

EL RIEGO Y SUS TECNOLOGÍAS

Luis Santos Pereira
José Arturo de Juan Valero
María Raquel Picornell Buendía
José M^a Tarjuelo Martín-Benito

El Riego y sus Tecnologías

Luis Santos Pereira
Prof. Dr. Ingeniero Agrónomo,

CEER - Centro de Engenharia dos Biosistemas,
Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa
Tapada da Ajuda 1349-017 Lisboa. Portugal

José Arturo de Juan Valero
Prof. Dr. Ingeniero Agrónomo,

María Raquel Picornell Buendía
Ingeniero Agrónomo

José M^a Tarjuelo Martín-Benito
Prof. Dr. Ingeniero Agrónomo,

Centro Regional de Estudios del Agua (CREA)
Universidad de Castilla-La Mancha (UCLM)
Campus universitario s/n. 02071 Albacete. España

CREA-UCLM

**Centro Regional de Estudios del Agua
Universidad de Castilla-La Mancha
Campus universitario s/n 02071 Albacete. España**

Web : crea.uclm.es

Marzo 2010

ISBN: 13:978-84-692-9979-1

1ª Edición en castellano.

Traducción de la edición portuguesa “**Necessidades de Água e Métodos de Rega**” publicada por Editora Europa-América en Lisboa en 2004

Copyright © 2010 por CREA-UCLM

**Todos los derechos reservados. No se permite la reproducción total o parcial de este libro en ninguna forma ni por ningún medio sin el permiso por escrito del
CREA-UCLM**

PRÓLOGO

La producción agraria a nivel mundial tiene dos misiones básicas: abastecer de alimentos a la población humana y promover su desarrollo económico-social. El que la actividad agraria sea competitiva en un mercado mundial cada vez más globalizado condiciona el futuro de muchas explotaciones, unidades técnico-económicas de gestión, en su viabilidad económica, dentro del marco de una Agricultura Sustentada, Sostenida o Perdurable, donde la tecnología aplicada reduzca los posibles impactos ambientales, conserve los recursos naturales (genéticos, suelo, agua, etc.) y contribuya a la equidad social.

El riego es un componente esencial del desarrollo agrario sustentado. La escasez de agua constituye una importante limitación para el desarrollo agrícola en las regiones áridas y semiáridas. En muchas áreas mundiales, la competencia creciente por el agua, consecuencia del aumento de la demanda para distintos usos, conlleva un incremento de su coste y una creciente limitación de su disponibilidad para su uso en la Agricultura. Para poder alcanzar estos objetivos, se hace necesario la incorporación y el aprovechamiento de los avances científicos de ingeniería y tecnológicos a los regadíos, principal usuario del agua, en el diseño y proyecto de los regadíos, pero, también, en el funcionamiento, conservación y manejo de los sistemas de riego en la explotación agrícola individual.

La utilización eficiente del agua por parte del regante requiere, además de una concienciación previa (y, en su caso, de unos mínimos incentivos económicos), el intercambio de conocimientos con los extensionistas, ingenieros y científicos. El agricultor formado mínimamente e informado con continuidad será capaz de mejorar enfoques y técnicas. El disponer de la suficiente información técnica, apoyada en experimentación de campo, que ayude a la elección del sistema de riego más adecuado en cada caso y la exigencia de la utilización de materiales y equipos homologados son, entre otros, aspectos básicos para aumentar la producción en las tierras de regadío, mediante el aprovechamiento eficiente del agua, a través de prácticas productivas y eficaces.

El regante, al igual que el extensionista y el técnico, requiere conocer la evapotranspiración de sus actividades agrícolas en el sistema de cultivo elegido para su explotación, aplicar las técnicas de programación de riegos que definen el momento y la cuantía de cada riego, conocer y controlar los principales factores que intervienen en el proceso de aplicación del agua a la parcela según el sistema de riego y velar para que las instalaciones estén bien diseñadas, manejadas y conservadas. Esta publicación pretende incidir modestamente en esta línea de mejora del diseño y proyecto y manejo del regadío. La obra tiene como objetivo suministrar guías para los gerentes de proyectos, consultores, ingenieros técnicos agrícolas, ingenieros agrónomos, estudiantes y regantes, habiendo pretendido cubrir los aspectos más destacables, que abarcan desde la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos hasta la descripción de los conceptos y equipos fundamentales para el diseño, proyecto y manejo de los principales sistemas de aplicación del agua a la parcela: gravedad, aspersion y localizados, la microaspersion y el goteo principalmente.

La obra pretende ser eminentemente práctica e ilustrada de las claves a tener en cuenta a la hora de realizar un adecuado manejo de los diferentes sistemas de riego, para lo que se han incluido numerosas tablas, figuras y fotografías que ayudarán a una mejor comprensión de los contenidos, además de dos Anejos básicos. Es la intención de los autores, que el presente trabajo, de cara al futuro, sea una fuente confiable de consulta en el análisis del diseño y proyecto de los nuevos regadíos, y en la modernización de los ya existentes, así como de su manejo, y que represente, a corto y medio plazo, una herramienta de apoyo en la toma de decisiones.

En los dos primeros capítulos de esta publicación, se presenta una actualización del procedimiento para calcular la evapotranspiración de referencia y la evapotranspiración del

cultivo a partir de datos meteorológicos y coeficientes de cultivo. El procedimiento se denomina como el enfoque de “Kc ETo”, donde los efectos del clima sobre los requerimientos de agua de los cultivos vienen reflejados en la evapotranspiración de referencia, ETo, y el efecto del cultivo se incorpora en el coeficiente de cultivo, Kc, una integración de todas las diferencias físicas y fisiológicas entre los cultivos. Los últimos contenidos presentan varios procedimientos que pueden ser utilizados para realizar ajustes del coeficiente del cultivo y que toman en cuenta las desviaciones de las condiciones de desarrollo del cultivo con respecto a las condiciones estándar, tales como la presencia de estrés hídrico y salino, baja densidad poblacional, factores ambientales y las prácticas de manejo del cultivo.

El tercer capítulo se centra en el balance hídrico del suelo y las necesidades hídricas de los cultivos. Para un buen manejo del riego, es necesario responder a tres cuestiones básicas: cuándo, cuánto y cómo regar. La respuesta dependerá del grado de conocimientos de los procesos ligados a las transferencias hídricas, en la zona de enraizamiento del cultivo regado, entre las plantas, el suelo y la atmósfera. Una vez expuestos los elementos que integran el balance de agua en la zona radicular efectiva, se muestran las aplicaciones de esta técnica para estimar los consumos de agua y las necesidades hídricas de los cultivos. Por último, se incluyen, en este capítulo la aplicación de este método en el manejo del riego, así como otros procedimientos basados en las medidas del potencial del agua y el contenido de humedad en el suelo.

La mayor parte del contenido de la obra presente se dedica a los sistemas de riego. En el cuarto capítulo, además de exponer una breve descripción de los distintos sistemas de riego, se trata la uniformidad y la eficiencia, y sus relaciones, de la aplicación del agua de riego a la parcela de cultivo. También, se incluyen diferentes indicadores del uso del agua en los regadíos.

El riego de superficie, o por gravedad, continúa teniendo una importancia relevante en el desarrollo de los regadíos, no sólo porque corresponde al 80 % de las áreas regadas en el Mundo, sino porque continúa siendo el método más apropiado técnicamente para suelos llanos y pesados, y, económicamente, para muchos cultivos y sistemas de producción. Este sistema de riego es objeto del quinto capítulo, donde, además de proceder a la descripción del proceso de riego en sus diferentes fases, se caracterizan todas las variantes tecnológicas aplicadas, con sus ventajas e inconvenientes. Por último, se desarrollan las posibles mejoras, equipos y métodos, para su modernización.

Cerca del 10 % de las áreas regadas en todo el Mundo son por aspersión, siendo este porcentaje más elevado en los países desarrollados y con bajos costes de la energía. En el sexto capítulo, después de clasificar y describir las distintas variantes tecnológicas del riego por aspersión, con sus ventajas e inconvenientes, se pasa a describir los elementos básicos y comunes de todos ellos: emisores, redes y laterales móviles. También, se incluye el procedimiento de evaluación de estas variantes tecnológicas para determinar la uniformidad de distribución del agua aplicada y de la eficiencia de la aplicación, para terminar hablando de la gestión de los sistemas de riego por aspersión y su utilización en la fertirrigación y aplicación de productos fitosanitarios.

Por último, en el séptimo capítulo, se aborda el riego localizado y sus variantes tecnológicas. Después de su clasificación en cuatro categorías, a las que corresponden trazados y procesos hidráulicos diferentes, se exponen sus ventajas e inconvenientes, la distribución del agua en el perfil del suelo, los tipos de emisores y sus características hidráulicas, los componentes básicos (redes, ramales, cabezal de riego, automatismos, etc.), los elementos fundamentales del diseño agronómico y la evaluación de la uniformidad de la distribución del agua en la parcela.

ÍNDICE

1. NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA	
1.1 Introducción	12
1.2. Evapotranspiración de referencia. Ecuación de Penman-Monteith	13
1.2.1. Formulación de la ecuación de Penman-Monteith	13
1.2.2. Parámetros de la cubierta vegetal en la ecuación de Penman-Monteith	16
1.2.3. El método de Penman-Monteith aplicado a una cubierta cespitosa	18
1.2.4. Definición de la evapotranspiración de referencia	19
1.2.5. La ecuación de FAO-Penman-Monteith (FAO-PM) para el cálculo de la ETo	20
1.3. El cálculo diario de la ETo por medio del método FAO-PM	22
1.3.1. Los parámetros físicos utilizados en la ecuación de FAO-PM	22
1.3.2. Cálculo de la radiación neta y de la densidad del flujo de calor en el suelo	25
1.3.3. El cálculo de la ETo con variables meteorológicas que no están disponibles	33
Apéndice I – Esquema de cálculo de la ETo, Hoja 3	35
2. NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS	
2.1. Conceptos básicos	39
2.1.1. Evapotranspiración real y del cultivo	39
2.1.2. Los coeficientes de cultivo	43
2.2. Coeficientes de cultivo medio y basal	44
2.3. Coeficientes de cultivo medios	47
2.3.1. Curva de los coeficientes de cultivo	47
2.3.2. Ajuste climático de los coeficientes de cultivo	55
2.3.3. Coeficientes de cultivo para la etapa inicial ($K_{c\ in}$)	58
2.3.4. Coeficientes de cultivo para la etapa inicial: cálculo numérico	62
2.4. Coeficientes basales de los cultivos	67
2.4.1. Coeficientes basales, K_{cb}	68
2.4.2. Coeficientes para la evaporación del suelo, K_c	69
2.4.3. Aplicación a cubiertas vegetales cuyos coeficientes de cultivo se desconocen	76
2.4.4. Aplicabilidad de los coeficientes de cultivo medios y basales	77
2.5. Evapotranspiración de los cultivos que no alcanzan su rendimiento máximo	78
2.5.1. Coeficiente de estrés hídrico, K_s	78
2.5.2. Coeficiente de estrés K_s por salinidad	81
2.5.3. Corrección de la evapotranspiración del cultivo considerando el manejo del mismo	83
3. BALANCE HÍDRICO DEL SUELO Y NECESIDADES DE RIEGO	
3.1. Introducción	87
3.2. Balance hídrico en la zona explorada por las raíces	88
3.2.1. Formulación	88
3.2.2. Determinación de los términos de balance hídrico	89
3.3. Aplicación del balance hídrico para estimar los consumos de agua de los cultivos	94
3.4. Aplicación del balance hídrico para la determinación de las necesidades de riego	98
3.4.1. Agua disponible	98
3.4.2. Balance hídrico	101
3.4.3. Necesidades de agua para el riego	103
3.5. Balance hídrico para el manejo del riego	105
3.6. Programación del riego recurriendo a mediciones de agua en el suelo	108

ÍNDICE (Cont.)

4. MÉTODOS Y SISTEMAS DE RIEGO. INDICADORES DE FUNCIONAMIENTO	
4.1. Introducción	112
4.2. Elección de los métodos de riego	113
4.3. Indicadores de funcionamiento. Riego en parcela	113
4.3.1. Importancia del análisis del funcionamiento de los sistemas de riego	113
4.3.2. Uniformidad	114
4.3.3. Eficiencia	116
4.3.4. Relaciones entre uniformidad y eficiencia	117
4.4. Funcionamiento de sistemas hídricos; usos y consumos de agua	120
5. RIEGO POR SUPERFICIE	
5.1. Introducción	127
5.2. Sistemas de riego por gravedad	128
5.2.1. Procesos de riego	128
5.2.2. Riego por canteros	129
5.2.3. Riego por surcos	134
5.2.4. Riego por fajas	137
5.3. Fases del riego	139
5.4. Modelos de simulación y proyecto y evaluación del riego por superficie	141
5.4.1. Bases teóricas	141
5.4.2. Evaluación	143
5.4.3. Uso de modelos y proyecto	146
5.5. Modernización. Aspectos generales	147
5.5.1. Nivelación de precisión	147
5.5.2. Reutilización de los caudales drenados	150
5.5.3. Sistemas de distribución del agua en surcos y canteros	150
5.6. Modernización del riego por surcos	153
5.6.1. Generalidades	153
5.6.2. Riego intermitente, o por oleadas	154
5.6.3. Riego con caudales decrecientes. Riego por cable	156
5.7. Modernización de riego por canteros	159
6. RIEGO POR ASPERSIÓN	
6.1. Introducción	164
6.2. Adaptabilidad del riego por aspersión	168
6.3. Aspersores	171
6.3.1. Aspersores y modelos de distribución del agua	171
6.3.2. Características de los aspersores	175
6.3.3. Tasa de aplicación	177
6.3.4. Tamaño de las gotas de agua	179
6.3.5. Clasificación de los aspersores	179
6.3.6. Perfil de precipitación y espaciamiento	181
6.4. Sistemas estacionarios	183
6.4.1. Tiempo de riego por posición	183
6.4.2. Sistemas desplazables manualmente	184
6.4.3. Sistemas semi-fijos	185
6.4.4. Tuberías con ruedas	188
6.4.5. Sistemas de cobertura total	189

ÍNDICE (Cont.)

6.4.6. Sistemas de tubos perforados	193
6.5. Sistemas de cañones móviles	194
6.5.1. Cañones móviles	194
6.5.2. Sistema de cañón propulsado por enrollador	199
6.5.3. Sistema de cañón con tracción por cable (cañón viajero)	202
6.5.4. Pluviometría del sistema y espaciamiento	203
6.6. Laterales móviles	204
6.6.1. Sistema pivote de riego	204
6.6.1.1. Aspectos generales	204
6.6.1.2. Aspersores y pluviometría	206
6.6.1.3. Velocidad de desplazamiento y dosis a aplicar	213
6.6.1.4. Manejo de la parcela	214
6.6.2. Laterales de avance frontal	215
6.6.3. Tuberías con enrollador y tracción por cable. Ala sobre carro	217
6.7. Evaluación	218
6.8. Introducción al proyecto	221
6.9. Gestión del riego; fertirriego y quimirriego	224
7. RIEGO LOCALIZADO	
7.1. Introducción	229
7.2. Adaptabilidad y capacidad del riego localizado	231
7.3. Distribución del agua en el perfil del suelo	234
7.4. Emisores	236
7.4.1. Tipos de emisores	236
7.4.2. Características hidráulicas de los emisores	237
7.4.3. Variabilidad de los caudales. Exponente característico del caudal de un emisor	241
7.4.4. Sensibilidad a temperatura	242
7.4.5. Susceptibilidad a la obstrucción	242
7.4.6. Coeficiente de variación de fabricación	242
7.4.7. Clasificación de los emisores en riego localizado	243
7.4.8. Conexión a las tuberías	245
7.5. Sistemas de riego localizado y sus componentes	246
7.5.1. Componentes básicos	246
7.5.2. Unidades de regulación y control	251
7.6. Bases para el proyecto	258
7.6.1. Selección, localización y espaciamiento de los emisores	258
7.6.2. Uniformidad	261
7.6.3. Dosis y capacidad de los sistemas	263
7.6.4. Diseño hidráulico	264
ANEXO 1	268
ANEXO 2	270
8. BIBLIOGRAFÍA	
8.1. Referencias principales	276
8.2. Evapotranspiración	277
8.3. Balance hídrico y conducción del riego	280
8.4. Métodos de riego y funcionamiento de los sistemas de riego	282

ÍNDICE (Cont.)

8.5. Riego por superficie	285
8.6. Riego por aspersión	299
8.7. Riego localizado	

CAPÍTULO 1

NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA

1.1. Introducción

Desde hace mucho tiempo, el llegar a conocer los consumos de agua por parte de los cultivos, y muy especialmente los requerimientos hídricos netos y brutos de riego, es una preocupación de los ingenieros, proyectistas, gestores y agricultores. A lo largo de todo el siglo XX, aunque en ocasiones con manifiestas contradicciones, la literatura científica acerca de estos temas se ha desarrollado profunda y extensamente.

Los consumos de agua de un cultivo, o necesidades hídricas, se corresponden con su evapotranspiración (ET) en un determinado ambiente y bajo un manejo concreto del mismo; dicha ET es la suma de dos procesos, fundamentalmente, la transpiración de la cubierta vegetal y la evaporación de agua desde el suelo que la soporta. La ET puede medirse directamente, con lisímetros, e indirectamente, con métodos micrometeorológicos, pero puede estimarse mediante diferentes modelos, más o menos empíricos, a partir de registros periódicos de distintas variables climáticas. Mientras que las dos primeras posibilidades son más propias del campo de la investigación, la tercera alternativa es la más extendida en la práctica del riego.

La ET de los cultivos puede estimarse, en base a registros climáticos periódicos, mediante modelos específicos que existen, generalmente recurriendo al de Penman-Monteith (que se describirá más adelante), que utiliza parámetros propios de la cubierta vegetal, o tomando un camino de estimación que requiere concretar dos pasos; en primer lugar, calcular la demanda evaporativa impuesta por las condiciones climáticas (es decir, la evapotranspiración de referencia, ETo) y, en segundo lugar, considerar las especificidades de los cultivos mediante un coeficiente de cultivo. Es este último procedimiento el que se abordará en el presente Capítulo, siguiendo la metodología propuesta por Allen *et al.* (1998). Para ello, se recurre a una cubierta vegetal de referencia, mediante la cuál se obtiene la ETo , y al cultivo en cuestión, el cuál se supone que se maneja óptimamente para la consecución de sus rendimientos máximos. A través de estos dos pasos, se llega a la estimación de la ET máxima de un cultivo bien dotado de agua y sin restricciones en las demás prácticas culturales. Se puede emprender un tercer paso, aplicando a los dos anteriores un coeficiente de estrés, y poder, así, estimar la ET_{real} ó ET_{actual} .

Las necesidades netas de agua para el riego se estiman mediante el balance hídrico del terreno cultivado. Este método, como tal balance, recoge unas entradas y unas salidas de agua en la parcela cultivada, que inciden directamente en el proceso de la ET del cultivo. Entre las primeras, figuran la precipitación, las reservas de agua en el perfil del suelo y el agua aportada por ascensión capilar desde las capas más profundas a la zona del perfil donde el sistema radicular es efectivo en cuanto a la absorción de agua; entre las salidas del balance, se han de cuantificar la correspondiente ET, la percolación de agua más allá de la profundidad efectiva de desarrollo del sistema radicular y, eventualmente, la escorrentía superficial. Estos componentes del balance hídrico se expondrán con más detalle en el Capítulo 3.

Las necesidades brutas, o totales, de agua de riego se calculan teniendo en cuenta las necesidades netas, corregidas por la eficiencia de riego y con la fracción de lavado, si diera lugar.

En este Capítulo, solamente, se abordará todo lo relativo a la ET de referencia, el primer paso que hay que dar para la estimación de los consumos de agua de los cultivos, dejando todo lo referente a los coeficientes de los cultivos para el Capítulo 2.

1.2. Evapotranspiración de referencia. Ecuación de Penman-Monteith

1.2.1. Formulación de la ecuación de Penman-Monteith

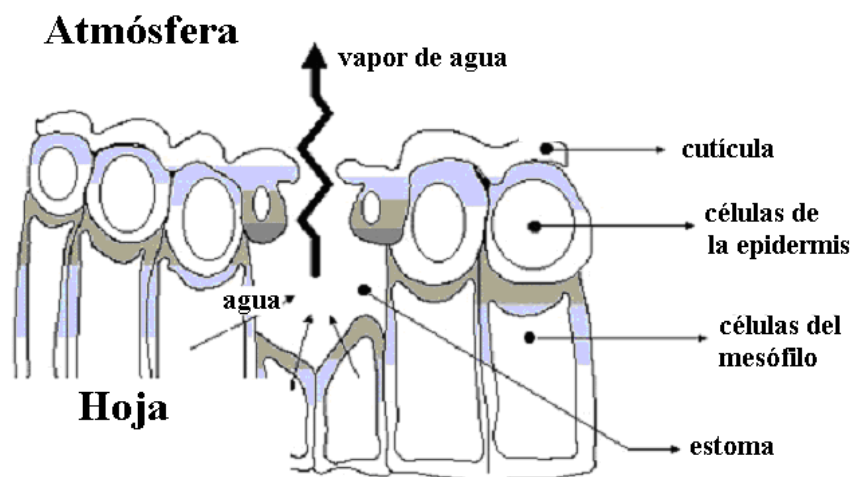
El proceso de evaporación, por el cuál el agua cambia de fase líquida a fase de vapor (vaporización), y pasa desde la superficie evaporante a la atmósfera, requiere grandes cantidades de energía, que es proporcionada fundamentalmente por la radiación solar y, en menor medida, por el aire que circunda la superficie evaporante. El proceso de ET está regulado por los niveles de energía disponibles en las cubiertas vegetales y está limitado por los mismos. En consecuencia, es posible estimar la tasa de ET mediante el balance de flujos de energía.

El balance de energía en la superficie del suelo, o en la cubierta vegetal, se obtiene aplicando el primer principio de la Termodinámica, según el cuál la energía no puede crearse ni destruirse, sino cambiar de una forma a otra; de aquí, se establece que la suma algebraica de todos los flujos de energía entrantes y salientes del sistema es igual a la variación de la energía interna del sistema. Bajo la hipótesis de que no existen aportes energéticos en sentido horizontal (advección), y de que la energía consumida en el proceso de la fotosíntesis y almacenada en el sistema constituyen una proporción despreciable (1-2%), el balance energético vertical se puede escribir como sigue:

$$\lambda ET = R_n - H - G \quad (1.1)$$

donde: λET , es el calor latente, es decir, el flujo de energía en forma de calor asociado al flujo de vapor de agua; λ , es el calor latente de vaporización, ésto es, la energía necesaria para evaporar la unidad de masa ($2,45 \text{ MJkg}^{-1}$, a $20 \text{ }^\circ\text{C}$); R_n , es la radiación neta o balance de energía intercambiada por radiación; H , es el calor sensible o flujo de energía en forma de calor intercambiado por convección entre la superficie y la atmósfera; y G , es el flujo de energía en forma de calor intercambiado por conducción entre la superficie evaporante y el suelo. Todos los términos del balance se expresan en unidades de energía por unidad de superficie horizontal y por unidad de tiempo.

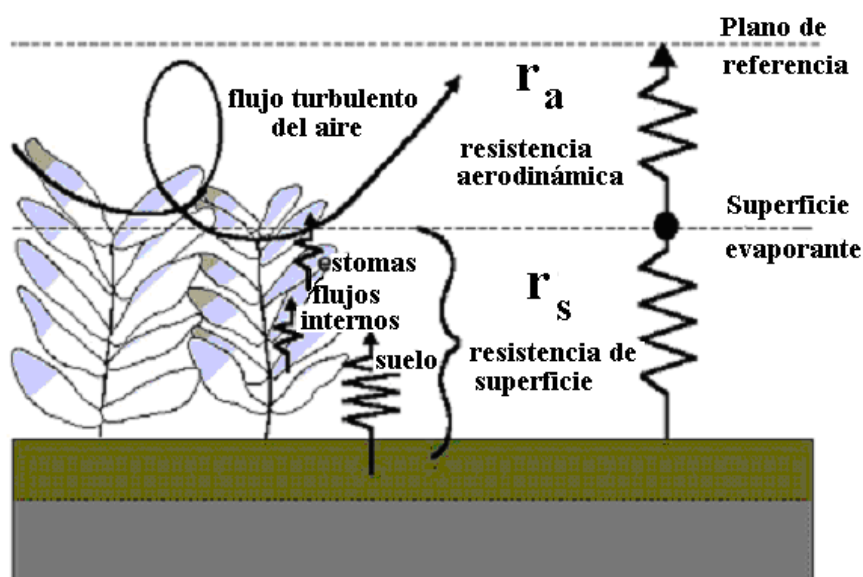
Los elementos del lado derecho de la Ec. (1.1) pueden calcularse a partir de factores climáticos y de factores relacionados con la propia cubierta vegetal, medidos o estimados. De entre los primeros, destaca la radiación neta, que se refiere al balance de energía en forma de radiación electromagnética, y representa, en el intervalo de tiempo que se considere, la energía que entra (o sale) del sistema por este mecanismo; es frecuente calcular R_n como resultado del balance de la radiación solar, o radiación de onda corta, y del balance de la radiación de onda larga, o terrestre. Los factores climáticos engloban, también, los efectos sobre H resultantes del movimiento horizontal del aire (velocidad del viento) y de las temperaturas del aire y de la superficie, y los flujos de calor en el suelo. Los factores propios de la cubierta engloban la resistencia a la difusión de vapor de agua entre el interior y el exterior de las hojas (Fig. 1.1) y tallos, y una resistencia a la difusión del vapor de agua desde las superficies de la cubierta vegetal, o desde la superficie del suelo, a la atmósfera.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.1. Estructura de una hoja y representación esquemática de la evaporación desde el estoma.

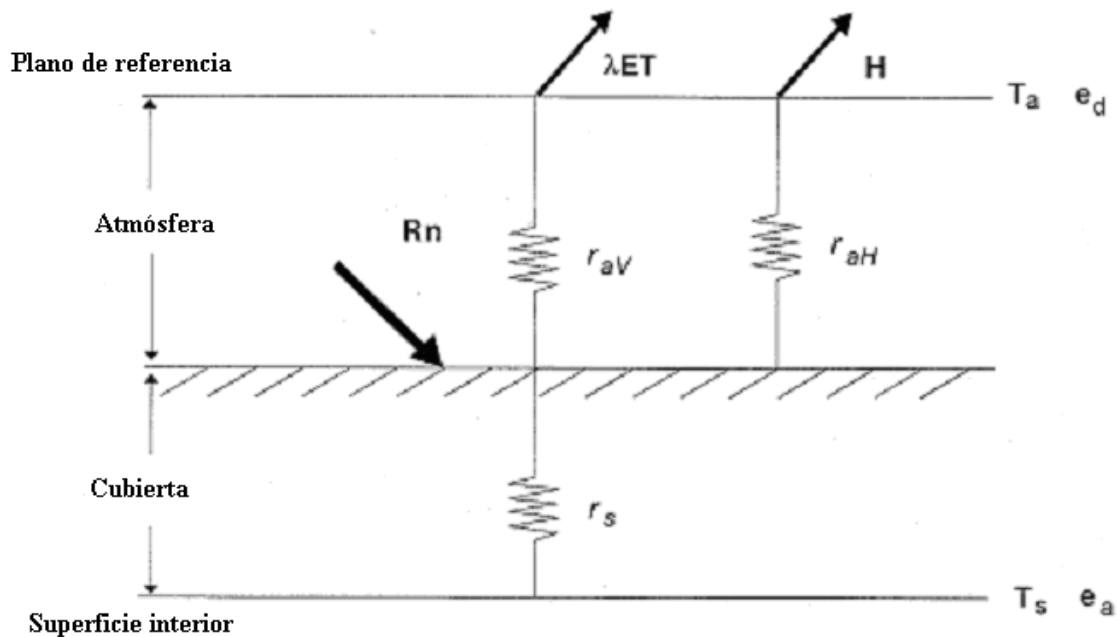
Con objetivos de estimación, los procesos de transferencia turbulenta en el interior y encima de la cubierta vegetal, así como los efectos de la participación de la radiación neta y de la energía en el interior de la misma, pueden ser representados por simples resistencias. El modelo considera que toda la cubierta es equivalente a una única “gran hoja” situada a una altura en la que se puede separar la componente aerodinámica de la de superficie; es el modelo “big leaf” de Monteith (1965, 1973) y Rijtema (1965), en el que se tienen en cuenta dos resistencias, la de superficie y la aerodinámica, que trabajan en serie entre el interior de las hojas y un plano de referencia por encima del cultivo (Figs. 1.2 y 1.3). La resistencia de superficie (r_s), o resistencia de la cubierta, representa la que se ofrece al flujo de vapor de agua en el proceso de transpiración y en el proceso de evaporación, desde donde se produce la vaporización a la atmósfera circundante; integra los flujos de vapor a través de los estomas (r_e), a través de la cutícula y por los poros del suelo, junto con el transporte en el interior de la cubierta vegetal hasta alcanzar la superficie exterior.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.2. Resistencias, de superficie (r_s) y aerodinámica (r_a), a los flujos de transferencia de vapor de agua en una cubierta vegetal.

La resistencia aerodinámica (r_a) al transporte de calor sensible y latente desde la cubierta vegetal representa la resistencia a la transferencia turbulenta de vapor de agua (r_{aV}) entre la misma y un plano de referencia, asociada a la correspondiente transferencia vertical de calor sensible de o para una cubierta vegetal (r_{aH}), como se muestra en la Figura 1.3.



Fuente: Adaptación de Alves *et al.* (1998).

Figura 1.3. Representación esquemática del modelo de Penman-Monteith, donde se recogen los términos esenciales del balance de energía (Rn , λET y H) y las resistencias aerodinámicas, para el calor y el vapor ($r_{aH} = r_{aV} = r_a$) y de superficie (r_s).

La ecuación de Penman-Monteith, para su deducción, parte de la ecuación de balance de energía (Ec.1.1) y de las ecuaciones que expresan los flujos en forma de calor sensible y calor latente a través del transporte de masa del proceso convectivo turbulento. Se asume que las resistencias aerodinámicas al flujo de calor sensible y al flujo de calor latente son iguales ($r_{aH} = r_{aV} = r_a$) y que el efecto global de la cubierta puede ser comparado a aquella de idéntico nivel medio de fuentes y sumideros de calor sensible y latente, lo que implica aceptar un único valor de la temperatura equivalente de superficie, y la ecuación de Penman-Monteith toma la forma siguiente (Monteith, 1965):

$$\lambda ET = \frac{\Delta (Rn - G) + \rho c_p (e_a - e_d) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a)} \quad (1.2.)$$

donde: λET , es el flujo de energía asociado al flujo de vapor de agua (calor latente); Δ , representa la pendiente de la curva que relaciona la presión de saturación de vapor de agua con la temperatura del aire; Rn , es la radiación neta; G , es el flujo de calor en el suelo; ρ , representa la densidad media del aire; c_p , es el calor específico del aire a presión constante; e_a , es la presión de saturación del vapor de agua estimada a la temperatura del aire; e_d , representa la presión de vapor de agua existente en el aire (real o actual); $e_a - e_d$, es el déficit de presión de vapor de agua ("Vapor Pressure Deficit", VPD) del aire a nivel del plano de referencia (altura de las mediciones meteorológicas, en que la temperatura del aire es T_a y la presión de vapor de agua es e_a); r_a , es la resistencia aerodinámica; r_s , es la resistencia de superficie; y γ , es la constante psicrométrica.

1.2.2. Parámetros de la cubierta vegetal en la ecuación de Penman-Monteith

Los flujos de calor sensible y calor latente entre la superficie evaporadora y la atmósfera dependen del gradiente de temperatura y vapor entre la superficie y la atmósfera. Estos procesos están regulados por las transferencias de cantidad de movimiento, que influyen en los coeficientes de transferencia turbulenta de calor y de vapor de agua.

En condiciones de neutralidad térmica, el perfil del viento ($u_z = u(z)$) por encima de una superficie plana (Fig. 1.4a) puede ser representado por una función logarítmica de la altura z_m por encima de la misma:

$$u(z) = a \ln(z_m) + b \quad (1.3)$$

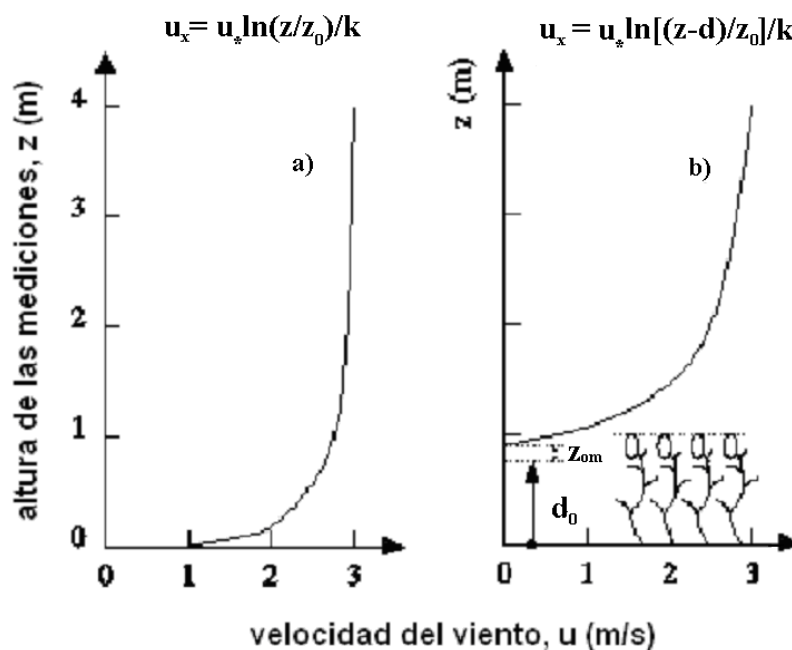
Tomando z_{om} tal que $u(z_{om}) = 0$ y $b = -a \ln z_{om}$, entonces

$$u(z) = a \ln(z_m/z_{om}) \quad (1.4)$$

donde: z_{om} , es la longitud de rugosidad; un parámetro con dimensiones de longitud que gobierna la transferencia de cantidad de movimiento, o lo que es lo mismo, el efecto de arrastre, dependiendo de la naturaleza de la superficie. El parámetro “a” puede ser obtenido a partir de la velocidad de fricción (u_*) debido a la transferencia turbulenta de la cantidad de movimiento; u_* corresponde a la tasa media de transporte vertical de cantidad de movimiento para la superficie. El cálculo de “a”, también, incluye la constante de von Karman (k).

Teniendo en cuenta lo expuesto, la Ec. (1.4) pasa a expresarse de la forma siguiente:

$$u(z) = (u_* / k) (\ln(z_m/z_{om})) \quad (1.5)$$



Fuente: Adaptado de Matias (1992).

Figura 1.4. Perfil de la velocidad del viento por encima de un suelo desnudo (a) y por encima del límite de un cultivo de cereal (b), cuando la velocidad del viento, a 4 m de altura, es la misma en ambas condiciones.

El perfil del viento se ve alterado cuando la superficie evaporativa es una cubierta vegetal con una altura y estructura que elevan el nivel del cero de referencia (en que $u = 0$) a un plano por encima del suelo (Fig. 1.4b). Considerando este nuevo nivel como la altura del plano de desplazamiento cero (d), definido como la altura aparente en la que se puede considerar que se ejerce todo el esfuerzo de corte debido al arrastre por el viento, la expresión general del perfil del viento es:

$$u(z) = (u_* / k) (\ln(z_m - d) / z_{om}) \quad (1.6)$$

Es evidente que ambos parámetros, d y z_{om} , dependen de la altura de la cubierta vegetal (h) y de su estructura. Existe alguna información que relaciona d y z_{om} con la altura de diversos cultivos; la mayoría de estas relaciones son propias de cada cultivo y únicamente se basan en la altura. Sin embargo, algunos autores prefieren considerar la estimación de z_{om} en base al Índice de Área Foliar (“Leaf Area Index”, LAI) ó a otros índices de cultivo que tienen en cuenta la densidad poblacional y la altura h .

Considerando todas las hipótesis expuestas anteriormente, muy particularmente lo que se refiere a las condiciones de neutralidad térmica, en cubiertas densas y de porte bajo, la transferencia de calor y vapor de agua desde la superficie evaporante al aire en el límite turbulento por encima de la cubierta viene determinado por la resistencia aerodinámica (r_a) entre la superficie y el nivel de referencia (a la altura z_m) por encima de la cubierta, que se puede estimar como sigue:

$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 u_z} \quad (1.7)$$

donde: r_a , es la resistencia aerodinámica (sm^{-1}); z_m , es la altura desde la que se registra la velocidad del viento (m); d , es la altura del plano de desplazamiento cero (m); z_{om} , es la longitud de rugosidad, con dimensiones de longitud, que gobierna la transferencia de cantidad de movimiento (m); z_h , es la altura a la que se miden la temperatura y la humedad del aire (m); z_{oh} , es la longitud de rugosidad, con dimensiones de longitud, que gobierna la transferencia de calor sensible y flujo de vapor de agua (m); k , es la constante de von Karman (adimensional; 0,41); y u_z , es la velocidad del viento a la altura z (ms^{-1}).

La Ec.(1.7) está restringida para condiciones de estabilidad neutra, es decir, que los campos de temperatura, presión y de distribución de velocidad del viento sean los correspondientes a un proceso adiabático; ésto es, que no exista intercambio de calor. La aplicación de esta ecuación para cortos períodos de tiempo (horas o fracciones horarias) requiere introducir correcciones de estabilidad que pueden tener gran importancia. Tales correcciones tienen menos importancia cuando se trata de una cubierta homogénea herbácea con un adecuado suministro de agua, que se utiliza para la estimación de la evapotranspiración de referencia (Epígrafe 1.5); en condiciones de buen suministro de agua, al ser pequeño el intercambio de calor sensible, normalmente, no es necesario la corrección de estabilidad.

La altura z_{oh} se estima como una fracción de z_{om} . Normalmente, se considera la relación:

$$z_{oh} = 0,1z_{om} \quad (1.8)$$

La resistencia de superficie para cubiertas densas puede ser expresada como sigue (Monteith, 1965):

$$r_s = \frac{r_e}{LAI_{eff}} \quad (1.9)$$

donde: r_s , es la resistencia de superficie (sm^{-1}); r_e , es la resistencia estomática de una hoja bien iluminada (sm^{-1}); y LAI_{eff} , es el Índice de Área Foliar efectivo (adimensional).

El LAI_{eff} es de la parte de la cubierta que contribuye activamente a la transferencia de calor y de flujo de vapor; generalmente, es el LAI correspondiente a la porción superior de la cubierta; en el caso de una cubierta densa (p. e., cultivos de referencia como gramíneas y alfalfa), que está expuesta directamente a la radiación solar, LAI_{eff} , puede estimarse a través de la expresión siguiente (Sceicz y Long, 1969; Allen *et al.*, 1989):

$$LAI_{eff} = 0,5 LAI \quad (1.10)$$

La Ec. (1.10) considera que, sobretodo, la parte superior de una cubierta vegetal densa contribuye activamente a la transferencia de calor y vapor de agua de la superficie.

1.2.3. El método de Penman-Monteith aplicado a una cubierta cespitosa

Las cubiertas de gramíneas, juntamente con las de alfalfa, son las más estudiadas en cuanto a sus características aerodinámicas y de superficie, por lo que pueden ser representadas por la ecuación de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1989; Jensen *et al.*, 1990). Para estos casos, que presentan superficies relativamente homogéneas, los conceptos de altura del plano de desplazamiento cero (d), y los parámetros de longitud de rugosidad para la transferencia de la cantidad de movimiento (z_{om}) y del calor y del flujo de vapor (z_{oh}), se pueden estimar desde la altura del cultivo (h) mediante las relaciones siguientes:

$$d = 0,67h \quad (1.11)$$

$$z_{om} = 0,123h \quad (1.12)$$

$$z_{oh} = 0,1 z_{om} = 0,0123h \quad (1.13)$$

La resistencia de superficie (Ec.1.9) se estima en base a las siguientes hipótesis:

- El valor mínimo medio de la resistencia estomática, durante el día, y para una única hoja, es, aproximadamente, $r_e = 100 sm^{-1}$.
- El Índice de Área Foliar efectivo (LAI_{eff}) para cultivos de referencia, como las gramíneas y la alfalfa, se calcula como sigue:

$$LAI_{eff} = 0,5 LAI \quad (1.14)$$

Esta relación es aplicable para valores de $LAI > 1$.

- Para el caso de gramíneas cortadas con una altura h inferior a 0,15 m, el Índice de Área Foliar toma el valor dado por la expresión siguiente:

$$LAI = 24h \quad (1.15)$$

Partiendo de estas últimas expresiones, y teniendo en cuenta la Ec. (1.9), la resistencia de superficie (r_s) puede calcularse como sigue, en función de h :

$$r_s = \frac{100}{0,5LAI} = \frac{200}{24h} \quad (1.16)$$

Si se toma, como hipótesis de trabajo, un valor constante de $h = 0,12$ m, mediante la Ec. (1.15), se obtiene un valor de $LAI = 2,88$, también constante, lo que conlleva, mediante la aplicación de la Ec. (1.16) a un valor de $r_s = 70 \text{ sm}^{-1}$, constante. Estas características, cuando se añade un factor que recoge la reflectividad del cultivo (albedo), definen completamente a una cubierta vegetal cespitosa de referencia, como se discute en Allen *et al.* (1994a).

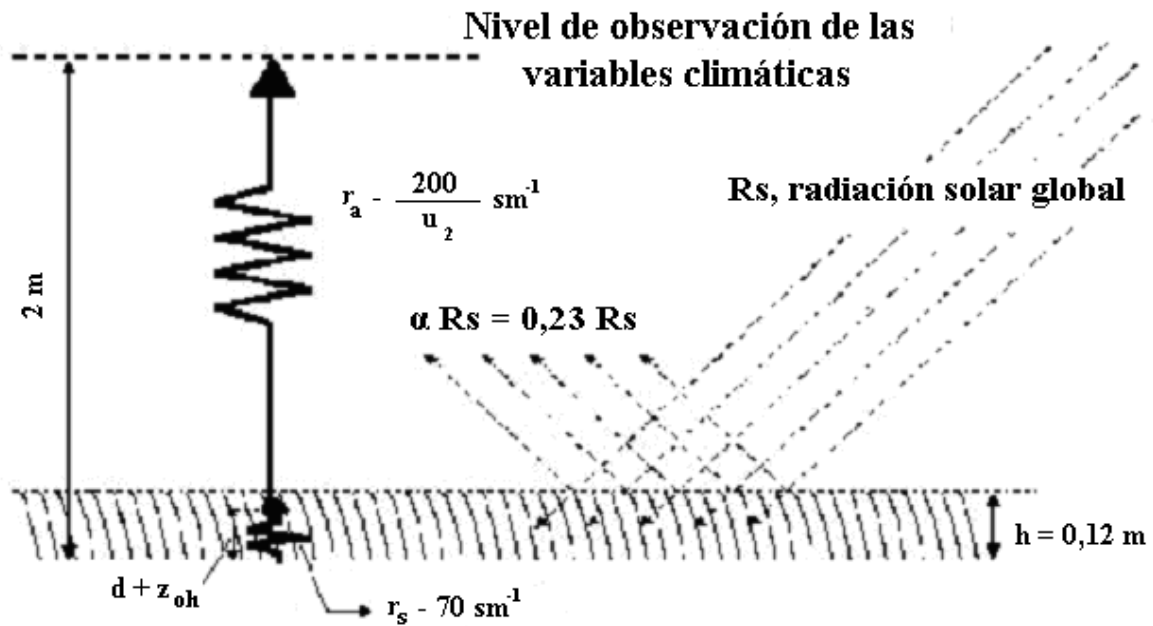
1.2.4. Definición de la evapotranspiración de referencia

El principal objetivo de definir la evapotranspiración de referencia (ET_0) es poder calcular una evapotranspiración (ET), que, multiplicada por un coeficiente de cultivo (K_c), pueda servir para estimar la evapotranspiración de los cultivos ($ET_c = ET_0 K_c$).

El método de Penman-Monteith fue seleccionado por la FAO para calcular la ET_0 por su capacidad para proporcionar resultados similares a los que se obtienen recurriendo a las mediciones directas e indirectas de la ET de cubiertas cespitosas, por tener una base física sólida y por incorporar tanto parámetros fisiológicos como aerodinámicos. Para evitar las calibraciones locales, que obligan a estudios laboriosos y onerosos, se elige, como cultivo de referencia, una cubierta cespitosa con una altura y resistencia de superficie constantes.

Obviamente, la elección de los parámetros de cultivo constantes, como son la altura y la resistencia de superficie, podría no representar totalmente la realidad en todos los regímenes climáticos. Con todo, este método proporciona valores de ET_0 consistentes para todas las regiones y climas. La ecuación de Penman-Monteith, siendo una representación simplificada y aproximada de los factores físicos y fisiológicos que regulan el proceso de evapotranspiración, permite tomar en consideración los efectos de las variables climáticas en la evapotranspiración del cultivo de referencia. Por otro lado, los coeficientes de cultivo recogen las respuestas específicas de los diferentes cultivos en sus distintas fases y etapas del ciclo agronómico. Las variaciones de r_s y r_a de cada cultivo se tienen en cuenta en el coeficiente de cultivo K_c .

La ET_0 se define como la tasa de evapotranspiración de una cubierta vegetal de referencia en óptimas condiciones de crecimiento y bajo un suministro adecuado de agua; para lo cual, se asume una altura de 0,12 m, una resistencia de superficie constante de 70 sm^{-1} y un albedo de 0,23. Esquemáticamente, se puede representar tal como se muestra en la Figura 1.5.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.5. Parámetros característicos del cultivo de referencia.

1.2.5. La ecuación FAO Penman-Monteith (FAO – PM) para el cálculo de la ETo

El cultivo de referencia hipotético, definido anteriormente, puede ser representado totalmente a través de la aproximación de Penman-Monteith. Si se considera una altura constante para el cultivo de referencia de $h = 0,12$ m, se obtienen (Ecs. 1.11 a 1.13) los siguientes parámetros estandarizados para un cultivo de referencia:

- La altura de desplazamiento del plano cero, $d = 0,08$ m.
- La altura de rugosidad para la transferencia de cantidad de movimiento, $z_{om} = 0,015$ m.
- La altura de rugosidad para las transferencias de calor y de vapor de agua, $z_{oh} = 0,0015$ m.

Considerando una altura de referencia de $2,0$ m ($z_m = z_h = 2,0$ m) para las mediciones de la velocidad del viento, temperatura y humedad relativa (“Relative Humidity”, HR), e introduciendo los parámetros fijados anteriormente en la Ec. (1.7), la resistencia aerodinámica se obtiene con la expresión siguiente:

$$r_a = 208 / u_2 \quad (1.17)$$

donde: r_a , es la resistencia aerodinámica (sm^{-1}); y u_2 , es la velocidad media del viento a $2,0$ m (ms^{-1}).

Sin embargo, la velocidad del viento es medida frecuentemente a una altura z_m superior a 2,0 m. Considerando el perfil logarítmico del viento (Ec.1.6), la velocidad del viento a 2,0 m (u_2) se puede obtener a partir de la velocidad del viento tomada a la altura z_m (u_z) mediante la expresión:

$$u_2 = u_z \frac{\ln\left(\frac{2-d}{z_{om}}\right)}{\ln\left(\frac{z_m-d}{z_{om}}\right)} \quad (1.18)$$

La Ec. (1.18), para valores estandarizados de $d = 0,08$ m y $z_{om} = 0,015$ m, se simplifica, quedando de la siguiente forma:

$$u_2 = u_z \frac{4,87}{\ln(67,8z_m - 5,42)} \quad (1.19)$$

donde: z_m , es la altura a la que se registra la velocidad del viento (m).

Si se introduce en la Ec.(1.2) los valores de r_a , dados por la Ec.(1.17), y de $r_1 = 70 \text{ sm}^{-1}$, se llega a la Ec.(1.20), que estima la ETo para períodos de 24 horas (Smith *et al.*, 1992; Allen *et al.*, 1994a,b):

$$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_a - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (1.20)$$

donde: ETo, es la evapotranspiración de referencia (mmdía^{-1}); Δ , es la pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); Rn, es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); G, es la densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); γ , es la constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); T, es la temperatura media del aire medida a una altura de 2 m ($^\circ\text{C}$); u_2 , es la velocidad del viento promedio diario medida a una altura de 2 m (ms^{-1}); e_a , es la presión de saturación promedio diario a 2 m de altura (kPa); e_d , es la presión real o actual de vapor de agua promedio diario existente en el aire a 2 m de altura (kPa); y $(e_a - e_d)$, es el déficit de presión de vapor promedio diario en el aire a 2 m de altura (kPa). Las constantes son: 0,408, valor de $1/\lambda$, con $\lambda = 2,45 \text{ MJkg}^{-1}$; 900, coeficiente para el cultivo de referencia (kJ^{-1}kgK), que proviene de la conversión de segundos en días y de los valores de ρ , e_p y r_a (Allen *et al.*, 1994b); y 0,34, es un coeficiente del viento para el cultivo de referencia (kJ^{-1}kgK) que proviene de la relación r_s/r_a (70/208).

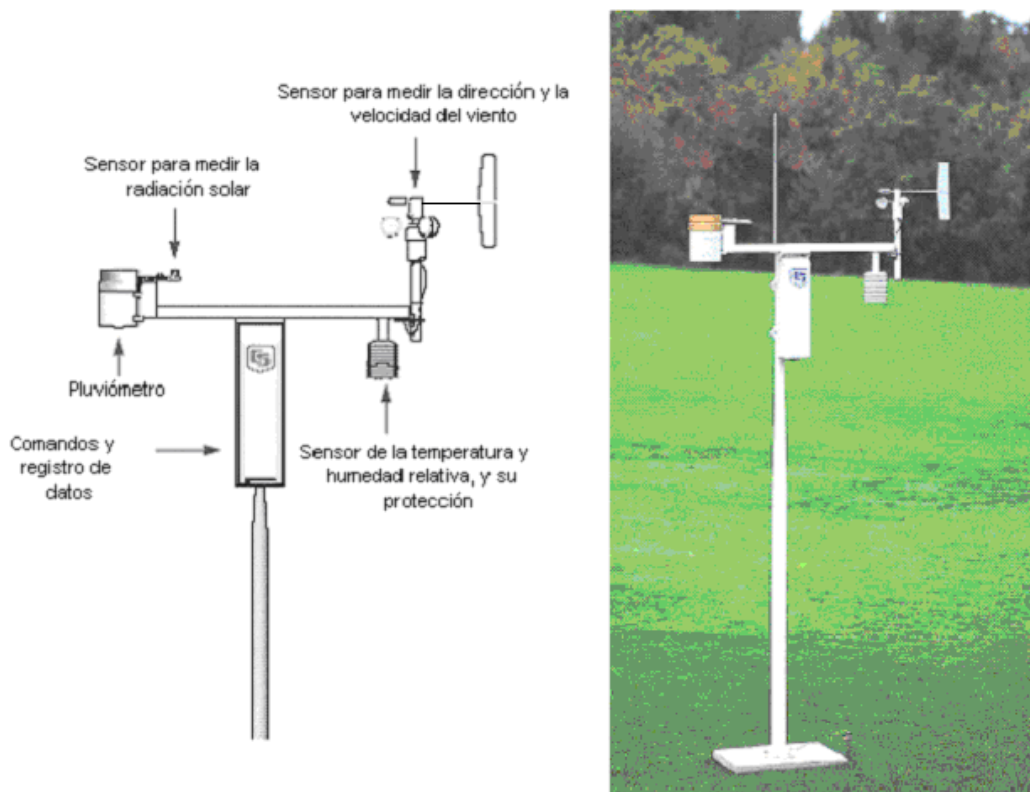
Los pormenores sobre la obtención de la Ec.(1.20) son dados por Allen *et al.* (1994a), y la ecuación y metodología para el cálculo horario de la ETo se encuentra en Allen *et al.* (1994b, 1998). En el Epígrafe siguiente, se muestra el procedimiento del cálculo diario de ETo y las adaptaciones necesarias para el cálculo de los valores medios diarios cuando los datos de entrada son también medios diarios de las variables climáticas observadas.

Para asegurar la bondad de los cálculos, los registros climáticos utilizados en la Ec.(1.20) deben tomarse sobre una superficie cespitosa extensa, que cubre totalmente el suelo y no se encuentra sometida a estrés hídrico, es decir, que no tenga restricciones de agua.

1.3. El cálculo diario de la ETo por medio del método FAO-PM

1.3.1. Los parámetros físicos utilizados en la ecuación de FAO-PM

En el cálculo de la ETo por el método FAO-PM, se necesitan varios parámetros que caracterizan la temperatura y la humedad relativa del aire y las transferencias de vapor de agua entre la superficie de la cubierta y el aire. Tales parámetros se obtienen a partir de los registros tomados en estaciones agroclimáticas estandarizadas; normalmente, recurriendo a estaciones automatizadas donde se recogen datos de la temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar o insolación real diaria, y velocidad del viento (Fig. 1.6). Los correspondientes métodos de cálculo se describen a continuación y las unidades están definidas en el Anexo 1.



Fuente: Campbell Scientific (2003).

Figura 1.6. Estación agroclimática automatizada para el cálculo de la ETo.

La pendiente de la curva de saturación del vapor de agua (Δ), que caracteriza la relación entre la temperatura del aire y la presión de vapor de saturación para una gama de temperaturas del aire registradas durante un determinado tiempo, se calcula mediante la Ec.(1.21):

$$\Delta = \frac{2504 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} \quad (1.21)$$

$$T = (T_{\max} + T_{\min})/2 \quad (1.22)$$

donde: Δ , es la pendiente de la curva de saturación del vapor ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); T_{\max} , es la temperatura máxima diaria ($^\circ\text{C}$); T_{\min} , es la temperatura mínima diaria ($^\circ\text{C}$); y T , es la temperatura media diaria del aire ($^\circ\text{C}$), dada por la Ec.(1.22).

La constante psicrométrica (γ), que relaciona la presión de vapor de saturación a la temperatura del termómetro de bulbo húmedo con la temperatura y presión de vapor actual del aire viene dada por la expresión:

$$\gamma = 0,00163 \frac{P}{\lambda} \quad (1.23)$$

donde: γ , es la constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); 0,00163, es un factor de conversión ($\text{MJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$); P , es la presión atmosférica (kPa) (Ec. 1.25); y λ , es el calor latente de vaporización (MJkg^{-1}) (Ec. 1.24).

El calor latente de vaporización (λ) es la energía necesaria para evaporar una unidad de masa de agua. Su valor sufre apenas variaciones ligeras para las temperaturas por encima de 20°C , por lo que es usual tomar el valor de:

$$\lambda = 2,45 \text{ MJkg}^{-1} \quad (1.24)$$

La presión atmosférica (P) puede calcularse por medio de una ecuación simplificada, obtenida a partir de la ley de un gas perfecto:

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065z}{293} \right)^{5,28} \quad (1.25)$$

donde: P , es la presión atmosférica a la altura z (kPa); 101,3, es la presión atmosférica al nivel del mar ($z = 0$) (kPa); z , es la altitud sobre el nivel del mar (m); 293, es la temperatura de referencia (K) a la altura $z = 0$ y la temperatura de 20°C ; y 0,0065, es la tasa de decrecimiento de la temperatura del aire húmedo con la altitud sobre el nivel del mar (Km^{-1}).

La presión de vapor de saturación (e_a), que es la presión de vapor del aire cuando, para una temperatura T , el aire se encuentra saturado por la humedad, se puede calcular mediante la relación siguiente:

$$e^o(T) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T}{T + 237,3}\right) \quad (1.26)$$

donde: $e^o(T)$, es la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura T (kPa); 0,611, es un factor de conversión (kPa); y T , es la temperatura del aire ($^\circ\text{C}$).

Para períodos de 24 horas, e_a se debe calcular recurriendo a la Ec.(1.27):

$$e_a = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad (1.27)$$

donde: e_a , es la presión de vapor de saturación (kPa); T_{\max} , es la temperatura máxima diaria ($^\circ\text{C}$); y T_{\min} , es la temperatura mínima diaria ($^\circ\text{C}$).

Para evitar subestimaciones de e_a , se debe recurrir a la temperatura media diaria, puesto que la relación temperatura-presión de vapor de saturación no es lineal, en vez de a la Ec.(1.27).

La presión de vapor actual (e_d) es la presión de vapor de saturación a la temperatura del punto de rocío (T_{dew}), temperatura a la que el aire necesita ser enfriado a presión constante para que se sature. Según los datos de partida disponibles, la presión de vapor actual, o presión de vapor a la temperatura del punto de rocío, se puede calcular mediante distintas formas, que, en orden decreciente en cuanto a precisión, se exponen a continuación:

- Temperatura del punto de rocío. Cuando está disponible T_{dew} , es el mejor procedimiento para calcular los valores diarios de e_d ; para ello, se recurre a la siguiente ecuación:

$$e_d = e^o(T_{dew}) = 0,611 \exp\left(\frac{17,27T_{dew}}{T_{dew} + 237,3}\right) \quad (1.28)$$

donde: e_d , es la presión de vapor actual (kPa); y T_{dew} , es la temperatura del punto de rocío (°C).

- Mediciones psicrométricas. La presión de vapor actual puede ser determinada midiendo las temperaturas del bulbo seco (T_{dry}) y del bulbo húmedo (T_{wet}), e integrándolas en la expresión (1.29):

$$e_d = e^o(T_{wet}) - \gamma_{asp}(T_{dry} - T_{wet})P \quad (1.29)$$

donde: e_d , es la presión de vapor actual (kPa); $e^o(T_{wet})$, es la presión de saturación de vapor a la temperatura del bulbo húmedo (kPa) (Ec.1.26); γ_{asp} , es la constante psicrométrica del instrumento ($kPa^{\circ}C^{-1}$); T_{dry} , es la temperatura del bulbo seco (°C); T_{wet} , es la temperatura del termómetro húmedo (°C); y P , es la presión atmosférica (kPa). Dependiendo del tipo de psicrómetro, γ_{asp} toma los valores siguientes:

$\gamma_{asp} = 0,00066$ ($^{\circ}C^{-1}$), para psicrómetros de Assmann con aspiración de 5 ms^{-1} .

$\gamma_{asp} = 0,0008$ ($^{\circ}C^{-1}$), para psicrómetros con ventilación natural de 1 ms^{-1} .

$\gamma_{asp} = 0,0012$ ($^{\circ}C^{-1}$), para psicrómetros que están instalados en garitas meteorológicas sin ventilación.

- Mediciones higrométricas, es decir, a datos registrados de humedad relativa:
 - Cuando se realizan dos mediciones diarias de HR, una con la T_{min} (amanecer) y otra con la T_{max} (mediodía solar), la presión de vapor actual se calcula mediante la ecuación:

$$e_d = \frac{1}{2} e^o(T_{min}) \frac{HR_{max}}{100} + \frac{1}{2} e^o(T_{max}) \frac{HR_{min}}{100} \quad (1.30)$$

donde: e_d , es la presión de vapor actual (kPa); $e^o(T_{min})$, es la presión de vapor de saturación calculada para la T_{min} (kPa) (Ec. 1.26); HR_{max} , es la humedad relativa máxima diaria (al amanecer) (%); $e^o(T_{max})$, es la presión de vapor de saturación calculada para la T_{max} (kPa) (Ec. 1.26); HR_{min} , es la humedad relativa mínima diaria (en el inicio de la tarde) (%); T_{max} , es la temperatura máxima diaria (°C); y T_{min} , es la temperatura mínima diaria (°C).

- Siempre que se utilizan instrumentos que pueden dar errores elevados en la valoración de HR_{\min} , la e_d puede calcularse sólo teniendo en cuenta HR_{\max} :

$$e_d = e^o(T_{\min}) \frac{HR_{\max}}{100} \quad (1.31)$$

- Cuando, únicamente, se dispone de datos de humedad relativa media diaria (HR_{mean}), la presión de vapor actual se puede calcular mediante la Ec.(1.32):

$$e_d = \frac{HR_{\text{mean}}}{\frac{50}{e^o(T_{\min})} + \frac{50}{e^o(T_{\max})}} \quad (1.32)$$

donde: HR_{mean} , es $(HR_{\max} + HR_{\min}) / 2$.

El cálculo de HR_{mean} a partir de las lecturas horarias, o el cálculo de e_d a partir de T_{mean} , no es recomendable, debido a la no linealidad de la relación $e^o(T)$ (Ec. 1.26); los resultados pueden estar fuera de rango.

- Cuando no existen los datos de humedad requeridos por los procedimientos anteriores, o cuando existiendo no son fiables, e_d puede estimarse asumiendo que la temperatura mínima del aire es idéntica a la temperatura del punto de rocío. Bajo este supuesto:

$$e_d = e^o(T_{\min}) \quad (1.33)$$

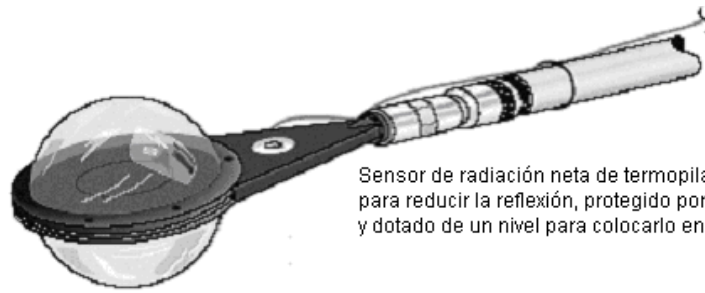
El VPD es la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión de vapor actual para un período de tiempo dado. Para períodos de 24 horas, su cálculo requiere de la fórmula siguiente:

$$VPD = e_a - e_d = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} - e_d \quad (1.34)$$

donde: VPD, es el déficit de presión de vapor (kPa); e_a , es la presión de vapor de saturación (kPa) (Ec. 1.27); y e_d , es la presión de vapor actual (kPa) (Ecs. 1.28 a 1.33).

1.3.2. Cálculo de la radiación neta y de la densidad del flujo de calor en el suelo

El cálculo de la radiación neta (R_n) disponible en las superficies evaporadoras es una fracción de la radiación extraterrestre (R_a); puede ser medida mediante los equipos adecuados (Fig. 1.7) o ser calculada mediante la determinación de cada uno de los términos del balance de radiación. Parte de la R_a se pierde, por absorción o reflexión, al atravesar la atmósfera. La totalidad de la radiación solar de onda corta en la superficie terrestre (R_s) es conocida como radiación solar global, o simplemente radiación global. En los días despejados, la atmósfera está limpia y es relativamente transparente a la radiación solar de onda corta, pudiendo alcanzar valores del 70 al 80% de R_a .

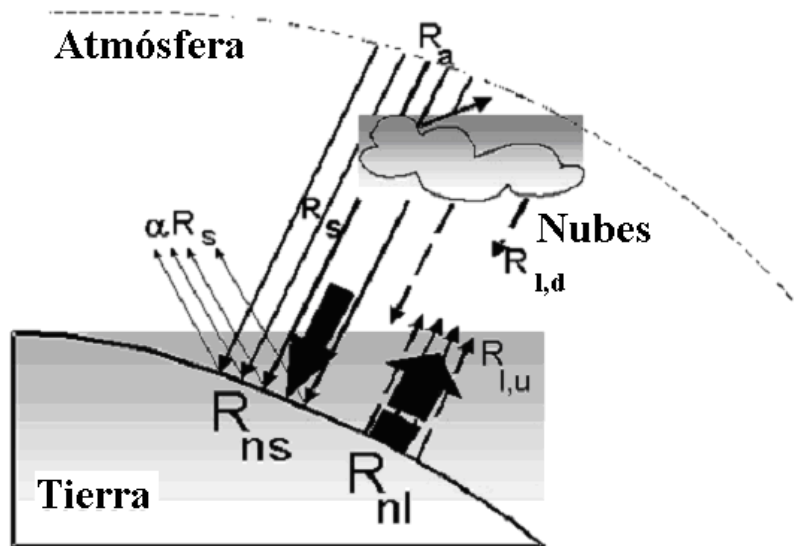


Sensor de radiación neta de termopilas con la superficie negra, para reducir la reflexión, protegido por cápsulas de polietileno y dotado de un nivel para colocarlo en horizontal

Fuente: Campbell Scientific (2003).

Figura 1.7. Radiómetro de balance de energía.

Una parte de la radiación global, en la onda corta, es reflejada a la atmósfera, fracción que depende de la reflectividad de la superficie, o albedo (α). Parte de la que es absorbida por la superficie vuelve a la atmósfera en forma de radiación de onda larga (R_{lu}). Una fracción de ésta es devuelta por la atmósfera, también en forma de onda larga (R_{ld}) (Fig. 1.8).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.8. Esquema del balance de radiación.

El balance de radiación puede escribirse como sigue:

$$R_n = R_s \downarrow - \alpha R_s \uparrow - R_{lu} \uparrow + R_{ld} \downarrow \quad (1.35)$$

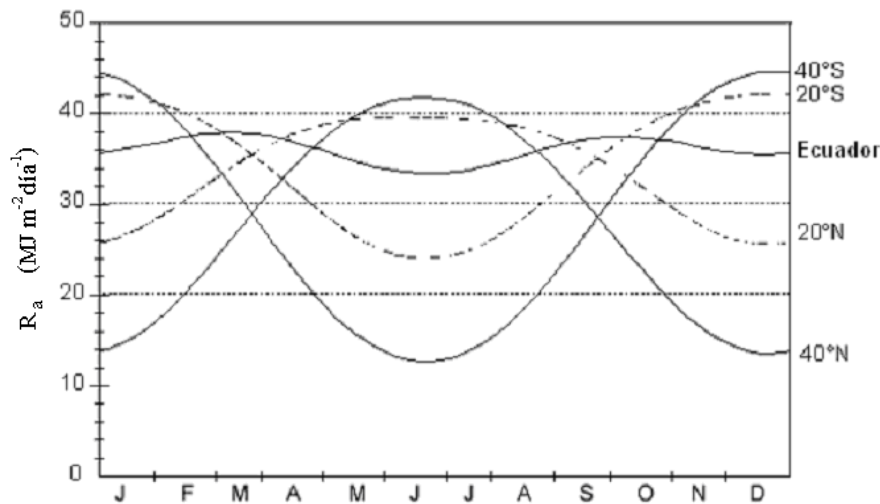
donde: las flechas indican entradas (\downarrow) o salidas (\uparrow).

Cuando R_n no puede medirse, el cálculo de los términos del balance de radiación para períodos diarios puede llevarse a cabo como se expone a continuación:

- La radiación extraterrestre (R_a), o radiación en el tope de la atmósfera, (Fig. 1.9) se calcula en función de la latitud de la localidad y del día del año:

$$R_a = 37,6 \, dr (\omega_s \, \text{sen} \varphi \, \text{sen} \delta + \text{cos} \varphi \, \text{sen} \omega_s) \quad (1.36)$$

donde: R_a , es la radiación extraterrestre total diaria ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); 37,6, factor de conversión derivado de los cambios de tiempo en el cálculo y la constante solar ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); d_r , es la inversa de la distancia relativa Sol-Tierra, elevada al cuadrado, siendo una magnitud adimensional (Ec. 1.40); ω_s , es el ángulo horario a la salida del sol para el día considerado (rad) (Ecs. 1.37 ó 1.38); φ , es la latitud del lugar (rad) (es negativa en el Hemisferio Sur); y δ , es la declinación solar (rad) (Ec. 1.41).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 1.9. Radiación extraterrestre; variación con la latitud y el día del año.

El ángulo horario a la salida del sol para el día considerado se calcula mediante la Ec. (1.37):

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad (1.37)$$

Como la función arccos no existe en todos los lenguajes de programación, se puede recurrir a la función arctan (o ATN) para el cálculo de ω_s :

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan\left(\frac{-\tan(\varphi)\tan(\delta)}{x^{0,5}}\right) \quad (1.38)$$

donde: $x = 1 - (\tan(\varphi))^2 (\tan(-\delta))^2$ (1.39). Para poder realizar los cálculos, si $x \leq 0$, se toma $x = 0,00001$.

Tanto d_r como δ pueden ser estimados en función del día en el año:

$$d_r = 1 + 0,033 \cos(0,0172J) \quad (1.40)$$

$$\delta = 0,409 \sin(0,0172J - 1,39) \quad (1.41)$$

donde: J, es el número del día del año, entre el 1 (1 de enero) y el 365 ó 366 (31 de diciembre).

Para cálculos diarios, J se determina mediante la expresión siguiente:

$$J = \text{“integer”} \left(275 \frac{M}{9} - 30 + D \right) - 2 \quad (1.42)$$

con las siguientes correcciones:

- Si $M < 3$, entonces $J = J + 2$.
- Si el año es bisiestivo y $M > 2$, entonces $J = J + 1$.

donde: M, es el número de mes (1-12), comenzando en enero; y D, es el número de día del mes.

Para cálculos mensuales, J se determina por el día de la mitad del mes mediante la Ec. (1.43):

$$J = \text{“integer”} (30,5M - 14,6) \quad (1.43)$$

y, para los cálculos semanales y decenales, se puede usar la Ec. (1.42), pero utilizando el día central del período considerado.

- Radiación solar en la superficie terrestre (R_s), o radiación de onda corta recibida. En las estaciones agroclimáticas más modernas, la R_s puede medirse con radiómetros y piranómetros (Fig. 1.10), instrumentos que exigen un meticuloso calibrado y mantenimiento. Son cada vez más numerosas las estaciones agroclimáticas electrónicas equipadas con piranómetros; no obstante, en la mayoría de las estaciones agroclimáticas, aún no es posible el registro de esta variable, lo que obliga a su determinación a partir de la insolación real (número real de horas de sol) tomada mediante heliógrafos o, menos frecuentemente, mediante polarímetros (Fig. 1.11). Sin embargo, cuando se recurre a estos instrumentos, hay que tomar los datos de insolación real con precaución, ya que esta información puede estar acompañada de errores debido a un inadecuado mantenimiento de los mismos y a una incorrecta interpretación de los registros.



Fuente: Pessl (2003).

Figura 1.10. Piranómetro para la medición de la radiación solar global.

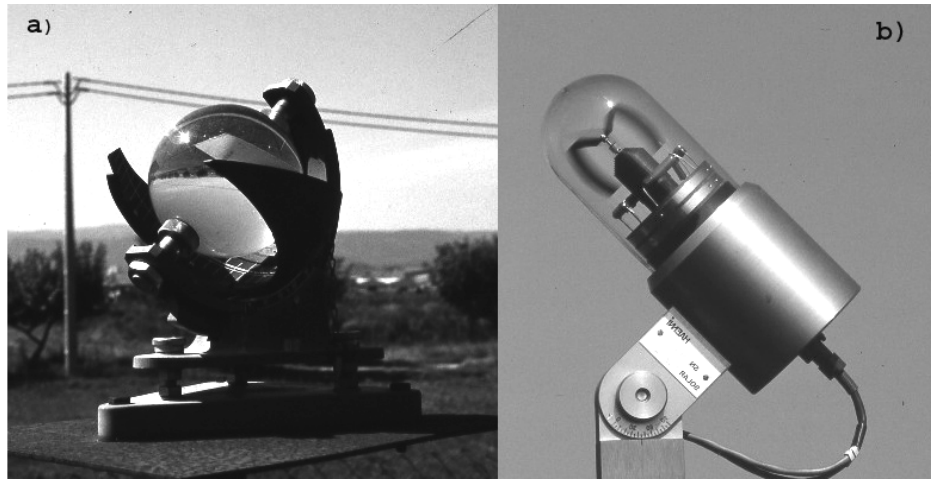


Figura 1.11. Heliógrafo (a) y polarímetro (b) para la medición de la duración de la insolación.

En el caso de que no se disponga de datos medidos, la radiación solar, o radiación de onda corta, puede ser estimada por la denominada fórmula de Ångstrom:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (1.44)$$

donde: R_s , es la radiación solar global que llega a un plano horizontal en la superficie terrestre ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); a_s , es el coeficiente de regresión que expresa la fracción que llega a la superficie terrestre un día completamente nublado ($n = 0$), pero que, en días despejados, para condiciones climáticas normales, si no se dispone de calibración de este parámetro, puede tomar el valor de 0,25; b_s , es el factor de proporcionalidad que, en condiciones climáticas normales, y si no se dispone de calibración de este parámetro, puede tomar el valor de 0,5; $a_s + b_s$, es la fracción de la radiación extraterrestre (R_a) que llega a la superficie terrestre los días despejados, cuando $n = N$; n , es la insolación diaria real, o número de horas de sol al día (horas); N , es la insolación máxima diaria, o número máximo de horas de sol al día (horas) (Ec. 1.45); n/N , es la fracción de insolación; y R_a , es la radiación extraterrestre ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Ec. 1.36). Los coeficientes a_s y b_s dependen de las condiciones atmosféricas de humedad y aerosoles (polvo) y de la declinación (latitud y mes).

La insolación máxima diaria (N) se calcula a partir del ángulo horario a la salida del sol para el día considerado:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s = 7,64 \omega_s \quad (1.45)$$

donde: N , es el número máximo de horas de sol para el día J (horas); y ω_s , es el ángulo horario a la salida de sol para el día considerado (rad) (Ec. 1.37).

- La Radiación neta de onda corta (R_{ns}) es la resultante del balance entre la radiación solar global recibida y reflejada. Su expresión es la siguiente:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s = 0,77 R_s \quad (1.46)$$

donde: R_{ns} , es la radiación neta de onda corta ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); α , es el albedo o coeficiente de reflexión de la cubierta vegetal (adimensional), que toma el valor de 0,23 para un cultivo

cespitoso de referencia; y R_s , es la radiación solar global incidente que llega a la superficie ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$), medida o dada por la Ec. (1.44).

- La radiación neta de onda larga (R_{nl}) es la resultante del balance entre el flujo de energía que sale de la superficie (cultivo y suelo), emitido por ésta en función de su temperatura, y el flujo que llega a la superficie emitido por la atmósfera. El vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono, los aerosoles son las principales sustancias emisoras y absorbentes de la radiación de onda larga. Una ecuación utilizada para el cálculo de la radiación neta de onda larga es:

$$R_{nl} = f\epsilon'\sigma\frac{T_{Kx}^4 + T_{Kn}^4}{2} \quad (1.47)$$

donde: R_{nl} , es la radiación neta de onda larga que sale de la superficie ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); f , es el factor de nubosidad (Ec. 1.48); ϵ' , es la emisividad neta de la superficie (Ec. 1.50); σ , es la constante de Stefan – Boltzmann ($4,90 \cdot 10^{-9} \text{ MJK}^{-4}\text{m}^{-2}\text{día}^{-1}$); T_{Kx} , es la temperatura máxima absoluta en el ciclo diario (K) ($T_{\text{max}} (\text{°C}) + 273$); y T_{Kn} , es la temperatura mínima absoluta del aire en el ciclo diario (K) ($T_{\text{min}} (\text{°C}) + 273$).

El factor de nubosidad (f) es la relación entre la radiación neta de onda larga real y la que tendría lugar en un día despejado (R_{nlo}); se calcula mediante la Ec. (1.48):

$$f = a_c \frac{R_s}{R_{so}} + b_c \quad (1.48)$$

donde: f , es el factor de nubosidad (adimensional); a_c , es 1,35 para condiciones climáticas normales; R_s , es la radiación solar global ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Ec. 1.44); R_{so} , es la radiación solar que alcanzaría la superficie en un día despejado ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Ec. 1.49); b_c , es -0,35 para condiciones climáticas normales; y $a_c + b_c = 1,0$. La Ec. (1.48) se hace más pequeña cuando la nubosidad aumenta, con lo cuál disminuye el flujo de energía en onda larga saliendo de la superficie.

R_{so} , para períodos diarios, se puede estimar mediante la Ec. (1.49):

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (1.49)$$

donde: 0,75, es $a_s + b_s$ (Ec. 1.44), si bien puede tomar valores diferentes cuando se dispone de valores calibrados; z , es la altitud sobre el nivel del mar (m); y R_a , es la radiación extraterrestre ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Ec. 1.36).

Esta ecuación (Ec. 1.49) es válida para estaciones cuya altitud es inferior a 6.000 m y donde la turbidez del aire sea despreciable.

Los parámetros a_c y b_c de la Ec. (1.48) pueden ser calibrados mediante estudios específicos que se apoyan en las mediciones de onda larga. Cuando no existen valores calibrados localmente, pueden usarse los valores de $a_c = 1,35$ y $b_c = 0,35$.

La emisividad neta de la superficie (ε') es la diferencia entre la emisividad del conjunto suelo-planta y la emisividad efectiva de la atmósfera, pudiéndose calcular a partir de la presión de vapor actual:

$$\varepsilon' = 0,34 - 0,14 \sqrt{e_d} \quad (1.50)$$

donde: ε' , es la emisividad neta de la superficie (adimensional); y e_d , es la presión de vapor de saturación a la temperatura del punto de rocío (kPa) (Ecs. 1.28 a 1.33). Los coeficientes $a_1 = 0,34$ y $b_1 = -0,14$ se recomiendan para las condiciones atmosféricas normales, siempre que no existan valores calibrados localmente.

La radiación neta de onda larga se calcula de acuerdo a la siguiente relación (el resultado es un valor negativo, ya que el término de las salidas es siempre superior al de las entradas):

$$R_{nl} = - \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_d}) \sigma \left(\frac{T_{Kx}^4 + T_{Kn}^4}{2} \right) \quad (1.51)$$

donde: R_{nl} , es la radiación neta de onda larga ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); R_s/R_{so} , es la relación entre la radiación de onda corta recibida y la que corresponde a un día despejado (adimensional); e_d , es la presión de vapor actual (presión de vapor de saturación a la temperatura del punto de rocío) (kPa); σ , es la constante de Stefan – Boltzmann ($4,90 \cdot 10^{-9} \text{ MJm}^{-2}\text{K}^{-4}\text{día}^{-1}$); T_{Kx} , es la temperatura (absoluta) máxima diaria (K); y T_{Kn} , es la temperatura (absoluta) mínima diaria (K).

- La radiación neta (R_n) disponible en la superficie evaporante se calcula como una suma algebraica de la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} + R_{nl} \quad (1.52)$$

donde: R_n , es la radiación neta ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); R_{ns} , es la radiación neta de onda corta ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (Ec. 1.46); y R_{nl} , es la radiación neta de onda larga ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$) (negativa) (Ec. 1.51).

Sintetizando las ecuaciones expuestas anteriormente, resulta:

$$R_n = 0,77R_s - 2,45 \cdot 10^{-9} \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) (0,34 - 0,14 \sqrt{e_d}) \left(\frac{T_{Kx}^4 + T_{Kn}^4}{2} \right) \quad (1.53)$$

- Densidad del flujo de calor en el suelo (G). Para cálculos diarios, y dado que la importancia del flujo diario de calor en el suelo cubierto de un cultivo cespitoso denso es pequeña, G puede ser despreciable. Para cálculos semanales y decenales, G puede ser estimado recurriendo a una aproximación simplificada del balance de calor en el perfil del suelo:

$$G = 0,1(T_i - T_{i-1}) \quad (1.54)$$

donde: G , es la densidad del flujo de calor en el suelo ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$); $0,1$, es un factor empírico de conversión ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}\text{°C}^{-1}$); T_i , es la temperatura media diaria del aire en el tiempo i (°C); y T_{i-1} , es la temperatura media del aire en el día $i-1$ (°C).

Para cálculos mensuales, donde G puede ser importante, su estimación se lleva a cabo mediante las Ecs. (1.55 y 1.56):

$$G = 0,07 (T_{\text{mes } i+1} - T_{\text{mes } i-1}) \quad (1.55)$$

$$G = 0,14 (T_{\text{mes } i} - T_{\text{mes } i-1}) \quad (1.56)$$

La Ec. (1.56) se utiliza cuando no se puede estimar la temperatura media mensual del mes siguiente ($T_{\text{mes } i+1}$).

Todas las variables referidas en los cálculos expuestos anteriormente tienen que ser registrados en estaciones agroclimáticas y meteorológicas estandarizadas para tales objetivos; normalmente, sobre cubiertas cespitosas extensas, sin carencia de agua, sin obstáculos (árboles, casas o muros) en la dirección del viento dominante y en ambientes sin advección (Fig. 1.12), es decir, en donde las estaciones no funcionen como un pequeño oasis, rodeado de secanos desde donde los flujos de calor sensible contribuyen a incrementar la energía disponible para el proceso de evapotranspiración de la cubierta vegetal que cubre el suelo donde se ubica la estación de registro. Cuando no se cumplen estas exigencias, la ET calculada, frecuentemente, sobreestima la ET característica del cultivo de referencia en las condiciones climáticas regionales y, en consecuencia, la ET_o estimada ha de ser corregida (Adaixo, 1999).



Figura 1.12. Estación agroclimática automatizada instalada en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, en Argentina, sobre una cubierta cespitosa en un entorno de regadío, con sensores de radiación neta y global, temperatura y humedad relativa del aire, velocidad y dirección del viento y precipitación.

Para facilitar los cálculos descritos anteriormente, se puede recurrir a una simple calculadora o construir un programa de cálculo con Excel; por ejemplo, como el programa que se presenta en el Apéndice que se acompaña a este Capítulo, hojas que, incluso, permiten calcular el déficit de presión de vapor de agua en función de las variables climáticas disponibles.

1.3.3. El cálculo de la ETo con variables meteorológicas que no están disponibles

El procedimiento de cálculo de la ETo diaria con la ecuación de FAO-PM, conforme lo expuesto en los epígrafes anteriores, puede ser llevado a cabo incluso cuando algunas de las variables meteorológicas faltan, siempre que se disponga de T_{\max} y T_{\min} . Algunas de las estaciones agroclimáticas, que están en manos de los agricultores, son demasiado simples y están dotadas de pocos instrumentos y, en consecuencia, proporcionan escasos datos. Los procedimientos para la estimación de las variables que faltan son descritos con detalle por Allen *et al.* (1998); las aplicaciones a Portugal y China se han descrito por Adaiko (1997) y Liu (1999), respectivamente.

Cuando faltan los datos para el cálculo de la presión de vapor actual, se recurre a la Ec. (1.33):

$$e_d = e^o (T_{\min}) \quad (1.33 \text{ bis})$$

Cuando faltan los datos de radiación e insolación, se recurre:

- A la relación $(R_s/R_a)_{\text{viz}}$ de una estación próxima, en la misma región, con similares condiciones climáticas, sobre todo en lo que se refiere a las masas del aire que gobiernan la precipitación y la nubosidad, así como semejantes temperaturas máxima y mínima y su diferencia ($T_{\max} - T_{\min}$). Bajo estas condiciones:

$$R_s = (R_s/R_a)_{\text{viz}} R_a \quad (1.57)$$

donde: la abreviatura “viz” corresponde al término portugués “vizinha” (vecina, próxima).

- A la diferencia ($T_{\max} - T_{\min}$). Los días despejados proporcionan grandes diferencias entre las temperaturas extremas; lo contrario ocurre en días cubiertos. Por esta vía, la R_s se puede estimar como sigue:

$$R_s = K_R (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} R_a \quad (1.58)$$

El coeficiente K_R toma valores diferentes según esté ubicada la estación en relación a las grandes masas de agua, mares y océanos. Para localidades “continentales”, $K_R = 0,16$ y, para localidades “costeras” (situadas a 15-20 km del mar), $K_R = 0,19$. No obstante, estos valores pueden variar ligeramente de una región a otra y sería deseable que fueran calibrados.

Cuando faltan los datos de velocidad del viento, se recurre:

- A los datos disponibles en las estaciones próximas, situadas en condiciones climáticas semejantes, como ya se ha expuesto en el caso de la radiación solar.
- A valores medios mensuales para la región. Dado que la ecuación FAO-PM no es muy sensible a los errores (no abultados) en la estimación de la velocidad del viento, puede recurrirse a valores regionales. A título indicativo, la media del planeta es

2 ms^{-1} , aunque siempre es inferior en climas tropicales húmedos. También, a título indicativo, puede tenerse en cuenta la siguiente clasificación:

Viento suave	$u \leq 1 \text{ ms}^{-1}$
Viento suave a moderado	$u = 1 - 3 \text{ ms}^{-1}$
Viento moderado a fuerte	$u = 3 - 5 \text{ ms}^{-1}$
Viento fuerte	$u \geq 5 \text{ ms}^{-1}$

Como alternativa a la ecuación FAO-PM, cuando no se dispone de toda la información exigida para el cálculo de la E_{To} , se puede recurrir a otras ecuaciones; por ejemplo, a la evaporación medida en tanques evaporimétricos (o cubetas), pero corrigiendo la medida con un coeficiente de cubeta apropiado (Allen *et al.*, 1998).

Existen varios programas informáticos para calcular la E_{To} ; por ejemplo, el programa CROPWAT de FAO y otros que se encuentran incluidos en modelos de programación del riego, como ISAREG (Fig. 1.13), presentado en el Capítulo 3 y desarrollado por el Departamento de Ingeniería Rural del Instituto Superior de Agronomía, en Portugal. En este último programa informático, se incluyen todos los procedimientos expuestos anteriormente, incluso los correspondientes para cuando se carece de datos de algunas de las variables climáticas.

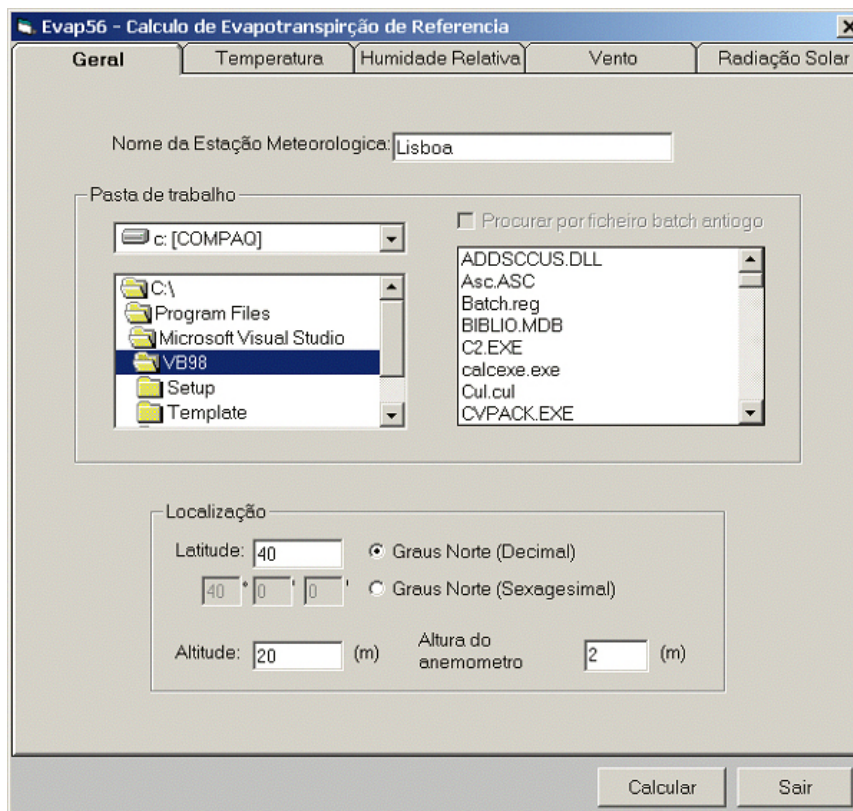
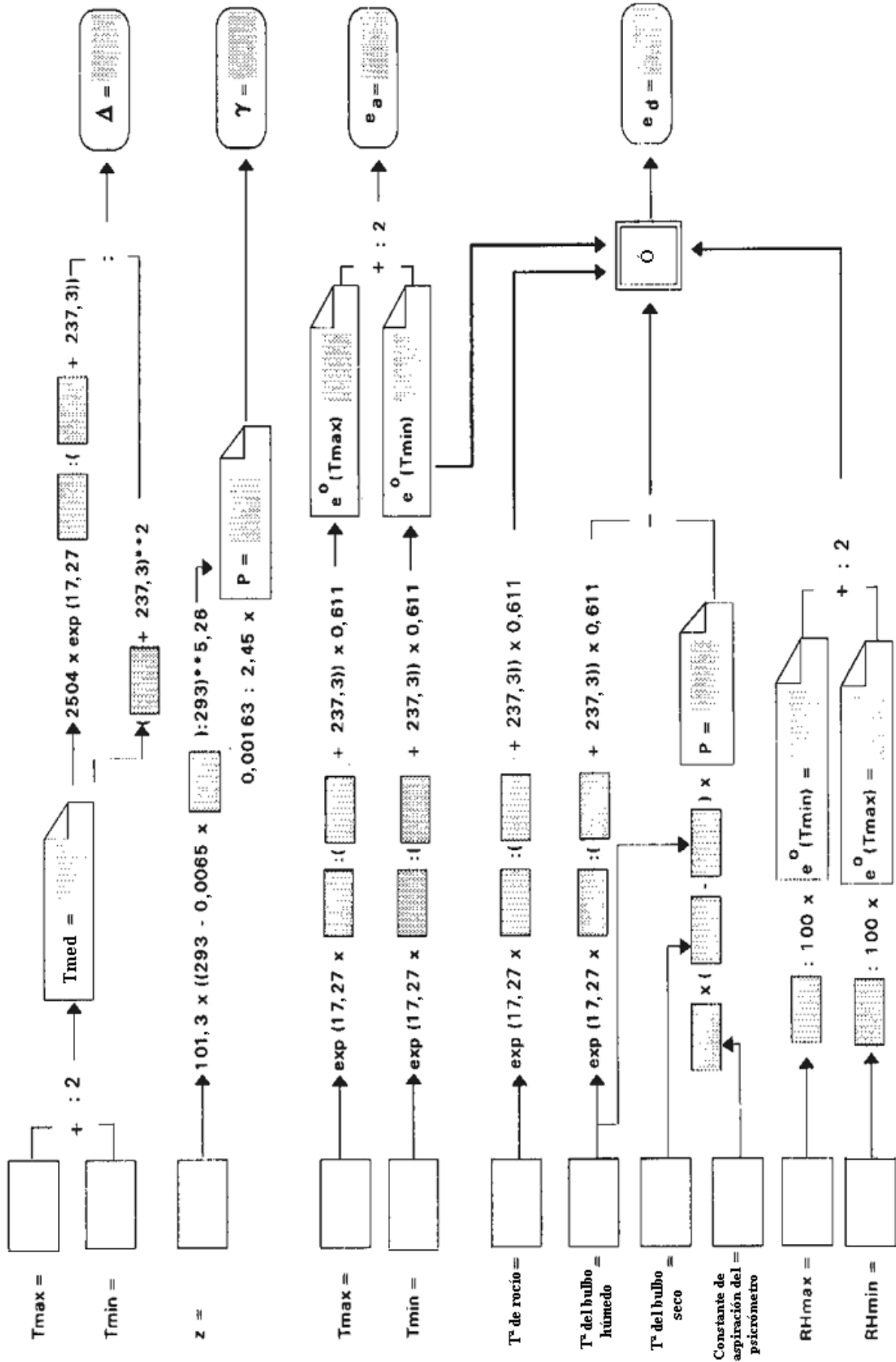
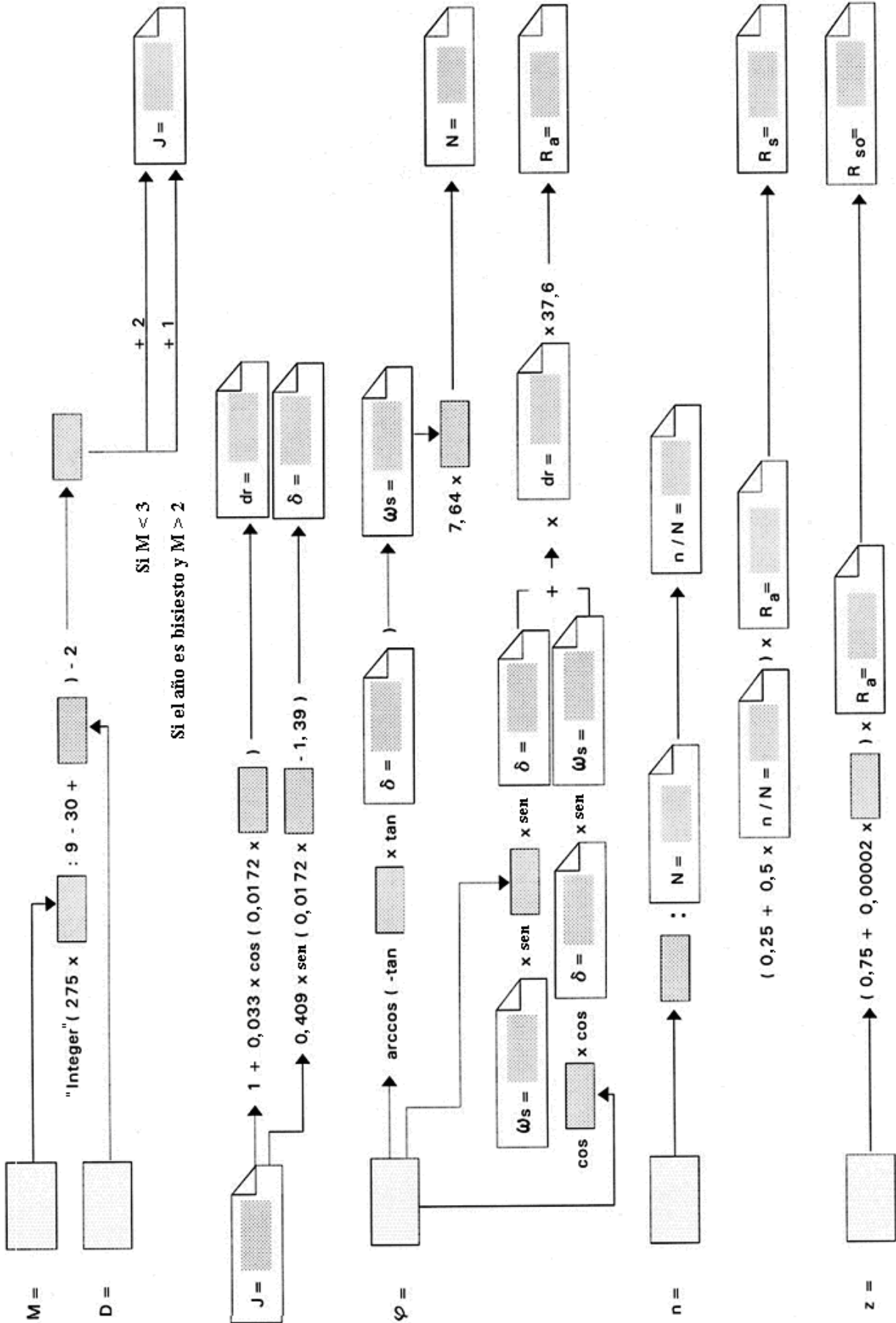


Figura 1.13. Menú del modelo ISAREG para el cálculo de la E_{To} .

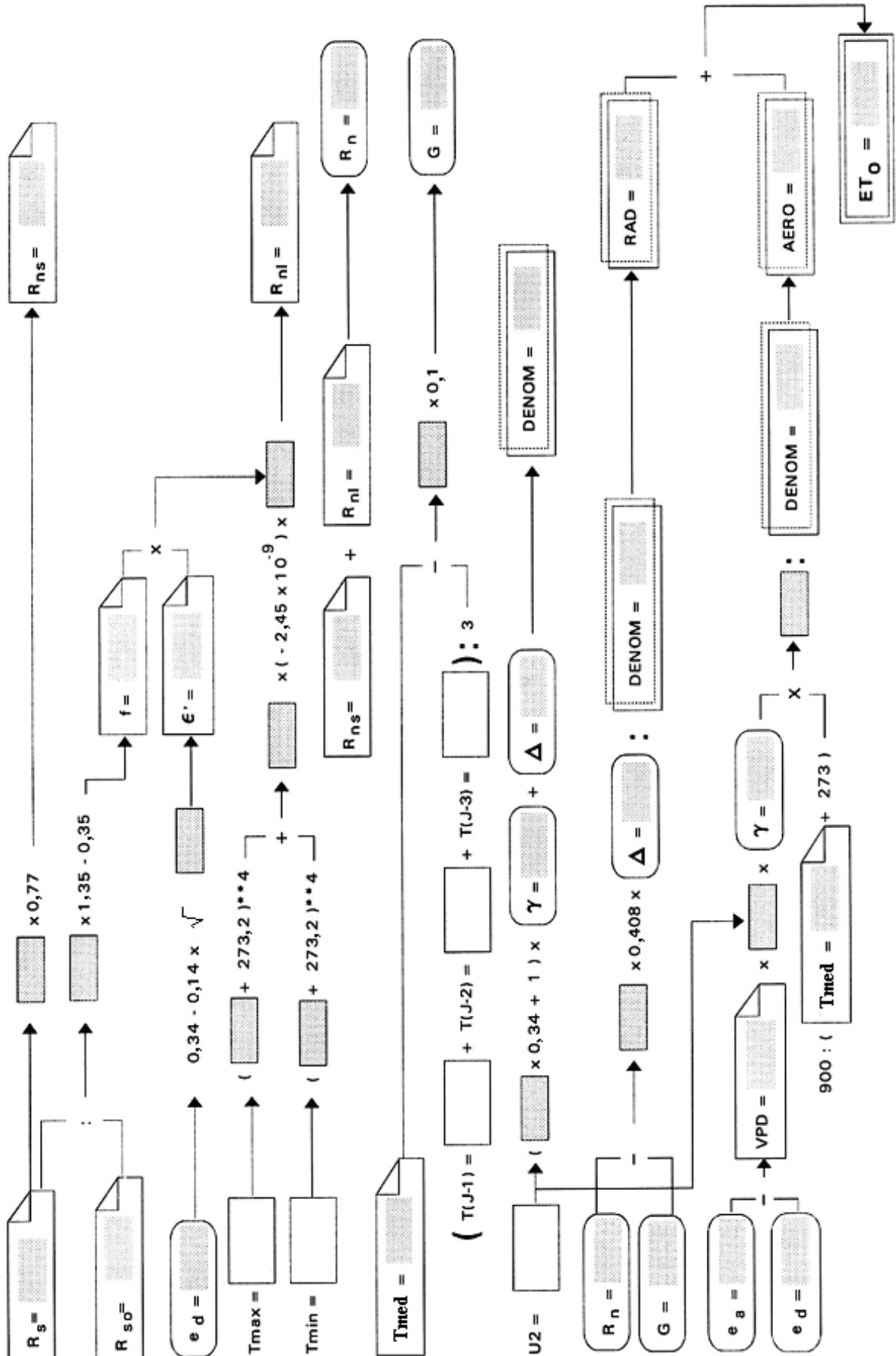
Apéndice I – Esquema de cálculo de la ETo, Hoja 1



Apéndice I – Esquema de cálculo de la ETo, Hoja 2



Apéndice I – Esquema de cálculo de la ETo, Hoja 3



CAPÍTULO 2

NECESIDADES DE AGUA DE LOS CULTIVOS: EVAPOTRANSPIRACIÓN DE LOS CULTIVOS

2.1. Conceptos básicos

2.1.1. Evapotranspiración real y del cultivo

Abordar los conceptos teóricos básicos es esencial para la aplicación de los conceptos prácticos que se presentan más adelante, siendo muy adecuado presentarlos en el inicio de este Capítulo, y siempre antes de entrar de lleno en la formulación de cálculo. De hecho, estos conceptos demuestran como el recurrir a los coeficientes de cultivo, empíricos en sí mismos, es un procedimiento con una base teórica adecuada. En el momento de escribir este Capítulo, no se dispone de métodos y modelos que permiten el cálculo directo de la evapotranspiración a lo largo de todo el ciclo del cultivo. Se ha avanzado mucho en el campo de la investigación, pero los pasos más decisivos, todavía, no se han dado.

El balance de energía (Ec. 1.1), que combina las ecuaciones que definen los intercambios de calor sensible y calor latente entre la superficie evaporante y el aire, es el punto de partida para llegar a la formulación de la evapotranspiración real de cualquier cultivo (Perrier, 1977); la expresión es la siguiente:

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left[(R_n - G) + \rho c_p H(u) \frac{D_a - D_s}{\Delta} \right] \quad (2.1)$$

donde: ET, es la evapotranspiración de la cubierta vegetal; Δ , es la pendiente de la curva de saturación del vapor de agua ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$) en relación con la temperatura del aire; γ , es la constante psicrométrica ($\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$); $R_n - G$, es la energía disponible en la cubierta (MJm^{-2}), como resultado de considerar la radiación neta (R_n) y el flujo de calor de o para el suelo (G); ρ , es la densidad promedio del aire atmosférico (kgm^{-3}); c_p , es el calor específico del aire a presión constante ($\text{kJkg}^{-1}\text{C}^{-1}$); $H(u)$, es el coeficiente de intercambio (ms^{-1}) entre la cubierta y un nivel de referencia por encima de la misma, pero situado en el interior de la subcapa límite; D_s , es el déficit de presión de vapor (kPa) en la superficie evaporadora; y D_a , es el déficit de presión de vapor (kPa) en el nivel de referencia.

La validez de la Ec. (2.1) se soporta sobre las siguientes hipótesis:

- La advección es despreciable, por lo que los flujos entre la superficie evaporadora y la superficie de referencia a la altura z_m son conservativos.
- Los coeficientes de intercambio turbulento ($H(u)$) son los mismos para el calor sensible y el calor latente.
- La superficie evaporada se considera situada al nivel definido por la altura del cultivo.
- Las ganancias de energía por la cubierta en forma de calor o utilizadas en la formación de la materia seca son cantidades despreciables.

Ocurre, sin embargo, que la Ec. (2.1) contiene un término que, actualmente, no se puede medir y su estimación es difícil; se trata del déficit de presión vapor en la superficie evaporadora (D_s), que representa la disponibilidad de agua en esa superficie. De hecho, cuando se efectúan mediciones micrometeorológicas, donde se toman datos de temperatura, presión de vapor de agua y velocidad del viento a diferentes niveles por encima de la cubierta (Fig. 2.1.), se pueden calcular los déficits de presión de vapor (VPD) a esos niveles, así como los flujos de calor y vapor en los mismos, y, con ello, determinar, con buena precisión, la

evapotranspiración del cultivo en estudio; sin embargo, con estas mediciones, no es posible llegar a los valores de VPD en la superficie evaporadora, es decir, de D_s .



Izquierda, sensores de medición de la velocidad del viento; centro, sensor de radiación neta; derecha, sensor de temperatura del aire y psicrómetro; debajo, sistema de adquisición de datos.

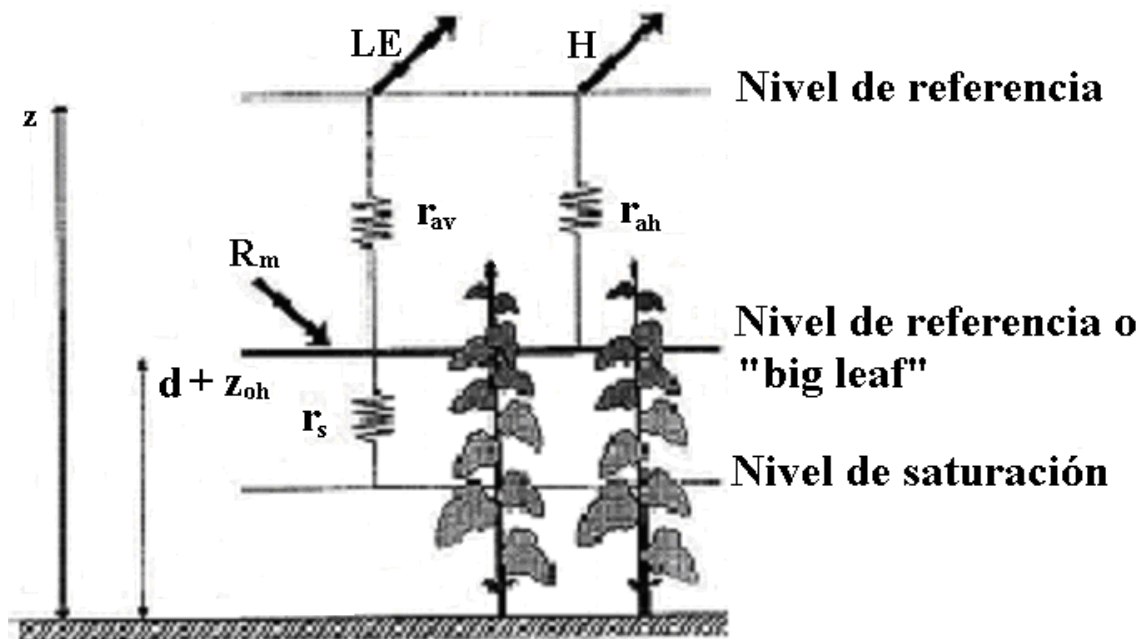
Figura 2.1. Observaciones micrometeorológicas en dos niveles de referencia sobre una cubierta de soja en Coruche (Portugal).

Si D_s se pudiera conocer, sería posible obtener la ET mediante la siguiente ecuación, muy simple, de flujo:

$$ET = (\rho \cdot C_p / \gamma)(D_s / r_s) \quad (2.2)$$

donde: r_s , es la resistencia de la superficie (sm^{-1}), que puede ser estimada a partir de valores de la resistencia estomática o de la resistencia de la hoja (Ec. 1.9). No obstante, su significado no es puramente fisiológico (Baldozchi *et al.*, 1991; Rochette *et al.*, 1991), sino más bien físico (Alves *et al.*, 1998).

El coeficiente de intercambio $H(u)$ se puede sustituir por la resistencia aerodinámica r_a (sm^{-1}), sabiendo que $r_a = 1 / H(u)$. Frecuentemente, r_a se calcula asumiendo que la superficie evaporadora está situada en el nivel donde la velocidad del viento se anula por los efectos de la cubierta (Fig. 2.2) (Monteith, 1973; Jensen *et al.*, 1990). Ahora bien, esta hipótesis, aceptando el concepto de “big leaf”, introducida por Monteith (1973), no corresponde totalmente con la realidad (Alves *et al.*, 1998), por lo que, exceptuando las cubiertas densas y de porte bajo (véase la Ec. 1.7, adaptada a un cultivo cespitoso de referencia), es más adecuado definir r_a a partir del tope de la cubierta.



Fuente: Alves *et al.* (1998).

Figura 2.2. Hipótesis de “big leaf”, básica para el modelo de Penman – Monteith.

Con todo lo anterior, r_a puede calcularse mediante la Ec. (2.3):

$$r_a = \ln[(z_m - d)/z_{om}] \ln[(z_h - d)/(h - d)] / k^2 u_z \quad (2.3)$$

donde: r_a , es la resistencia aerodinámica (sm^{-1}); z_m y z_h , son las alturas (m) a las que se realizan las observaciones de la velocidad del viento y de la temperatura y humedad del aire, respectivamente; d , es la altura de desplazamiento del plano cero (m); z_{om} , es la altura de rugosidad que gobierna la transferencia de cantidad de movimiento (m); k , es la constante de von Karman (adimensional; 0,41); y u_z , es la velocidad del viento (ms^{-1}).

Como ya se expuso en el Capítulo anterior (Ecs. 1.11 y 1.12), las alturas d y z_{om} (Fig. 2.2) son función de la altura del cultivo (h , en metros) y de la densidad del mismo (Shaw y Pereira, 1982; Perrier, 1982; Allen *et al.*, 1996a).

Dada la imposibilidad de llegar a conocer D_s en la superficie evaporativa, Penman (1948) asumió la plena disponibilidad de agua en este nivel ($D_s = 0$ y $r_s = 0$) para poder desarrollar su ecuación combinada y llegar a la evaporación potencial, popularizándose cuando fue adoptada por FAO (Doorenbos y Pruitt, 1975). Asumiendo la terminología más reciente, la ecuación de Penman se obtiene a partir de la Ec. (2.1), anulando D_s y substituyendo $H(u)$ por $1/r_a$; de este modo, la evapotranspiración potencial (EP) queda como sigue:

$$EP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left[(R_n - G) + \frac{\rho \cdot C_p \cdot D_a}{\Delta \cdot r_a} \right] \quad (2.4)$$

Combinando la Ec. (2.4) con las ecuaciones del balance de energía (Ec. 2.1) y de flujo (Ec. 2.2), se llega a la formulación de la evapotranspiración real como sigue (Pereira *et al.*, 1999):

$$ET = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \left[(R_n - G) + \frac{\rho \cdot Cp \cdot Da}{\Delta \cdot r_a} \right] / \left[1 + \frac{\gamma \cdot r_s}{\Delta + \gamma \cdot r_a} \right] \quad (2.5)$$

La Ec. (2.5) es la conocida como ecuación de Penman-Monteith (Ec. 1.2), proveniente de la adopción por Monteith (1965, 1973) de los conceptos de resistencia aerodinámica (r_a) y resistencia de superficie (r_s). Esta forma de la ecuación de Penman-Monteith demuestra que la EP es el valor límite de ET cuando $r_s = 0$, es decir, cuando, y sólo cuando, existe plena disponibilidad de agua en la superficie evaporadora.

El equilibrio entre la superficie evaporadora y la superficie de referencia en la capa límite atmosférica por encima de la cubierta tiene lugar cuando se cumple $D_s = D_a$. Entonces, la evapotranspiración real (Ec. 2.1) se denomina evaporación de equilibrio (E_e) (Slatyer y McIlroy, 1961), dependiendo únicamente de la energía disponible:

$$E_e = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) \quad (2.6)$$

La correspondiente ecuación de flujo (Ec. 2.2) pasaría a tener la expresión siguiente:

$$E_e = (\rho \cdot Cp / \gamma) (D_a / r_s) \quad (2.7)$$

Y la resistencia de superficie para estas condiciones de equilibrio (r_e), se obtendría de la combinación de las Ecs. (2.6) y (2.7):

$$r_e = \frac{\rho \cdot Cp \cdot \Delta + \gamma}{\gamma} \frac{D_a}{\Delta \cdot R_n - G} \quad (2.8)$$

La Ec. (2.8) pone de manifiesto que la resistencia de superficie en condiciones de equilibrio (r_e) depende exclusivamente de las condiciones climáticas de la atmósfera, por lo que se la conoce como resistencia climática.

Combinando las Ecs. (2.5), (2.6) y (2.8), se obtiene la formulación de la evapotranspiración real en función de la evaporación de equilibrio (Pereira *et al.*, 1999):

$$ET = \left(1 + \frac{\gamma \cdot r_e}{\Delta + \gamma \cdot r_a} \right) / \left(1 + \frac{\gamma \cdot r_s}{\Delta + \gamma \cdot r_a} \right) \quad (2.9)$$

La Ec. (2.9) es una nueva forma de expresión de la ecuación de Penman-Monteith que pone en evidencia, entre otras cosas, la relación entre los determinantes climáticos y de flujo en el proceso evaporativo.

Cualquiera de las formas de cálculo de la evapotranspiración real exige el conocimiento de varios parámetros climáticos y propios de la superficie de evaporación para poder estimar las resistencias aerodinámica y de superficie. Sin embargo, estos parámetros de

la cubierta varían de un cultivo a otro y, para un mismo cultivo, dependen del crecimiento del mismo y de su estadio o etapa del ciclo agronómico, aspectos que, a su vez, están condicionados por las prácticas culturales; en consecuencia, es extremadamente difícil poder utilizar algunas de las ecuaciones expuestas para el cálculo de la evapotranspiración real y poder llegar a los valores de la evapotranspiración del cultivo (ET_c). De todo esto, se desprende la necesidad de continuar recurriendo a la aproximación:

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2.10)$$

en la que interviene un coeficiente de cultivo (K_c) para “modificar” la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET₀) y poder estimar la evapotranspiración de cada especie cultivada. Como ya se expuso en el Capítulo 1, la evapotranspiración de referencia (Ec. 1.20) recoge la influencia del clima en el cultivo de referencia, y el coeficiente de cultivo representa la diferencia de comportamiento energético y aerodinámico entre el cultivo de referencia y el cultivo objeto de estudio.

2.1.2. Los coeficientes de cultivo

Como se concluyó del análisis expuesto anteriormente, la ET₀ corresponde a la evapotranspiración real del cultivo de referencia y la ET_c es la evapotranspiración real del cultivo; con la evaporación real (Ec. 2.9), ambas evapotranspiraciones reales se pueden relacionar de la forma siguiente:

$$ET_0 = (K_e)_0 E_e \quad (2.11)$$

$$ET_c = (K_e)_c E_e \quad (2.12)$$

Combinando las Ecs. (2.11) y (2.12) con la Ec. (2.10), se obtiene la expresión que relaciona ET_c y ET₀:

$$ET_c = \frac{(K_e)_0}{(K_e)_c} ET_0 = \alpha_0 \alpha_c ET_0 \quad (2.13)$$

en consecuencia, y relacionando las Ecs. (2.10) y (2.13), el coeficiente de cultivo puede definirse por la expresión siguiente:

$$K_c = \alpha_0 \alpha_c \quad (2.14)$$

en donde:

$$\alpha_0 = \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{r_e}{(r_a)_0} \right) / \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{r_e}{(r_a)_c} \right) \quad (2.15)$$

$$\alpha_c = \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{(r_s)_0}{(r_a)_0} \right) / \left(1 + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{(r_s)_c}{(r_a)_c} \right) \quad (2.16)$$

El término α_0 expresa, esencialmente, las relaciones entre las características aerodinámicas de las cubiertas del cultivo y del cultivo de referencia bajo la influencia de las condiciones climáticas (representadas por r_e y Δ). Por lo tanto, α_0 está influenciado, principalmente, por la altura del cultivo, su densidad y su grado de cobertura del suelo, si bien las condiciones climáticas pueden aumentar o reducir este grado de influencia. Por su lado, el término α_c recoge la especificidad del funcionamiento del cultivo en relación al cultivo de referencia, traducido en término de resistencias aerodinámica y de superficie, incluyendo, por lo tanto, la influencia de los propios mecanismos de control estomático.

Con todo lo expuesto, se constata claramente como los coeficientes de cultivo no son simples coeficientes de transferencia de naturaleza empírica, sino que tienen una significación física muy precisa. Igualmente, se verifica que existe compatibilidad teórica entre la utilización directa de la ecuación de Penman-Monteith (Ec. 2.5) para el cálculo de la ET_c y el empleo de ecuaciones más sencillas como la mostrada en la Ec. (2.10). Obviamente, existe una cierta carga de empirismo en este tipo de formulación que puede ser corregida si la elección del coeficiente de cultivo se hace racionalmente.

2.2. Coeficientes de cultivo medio y basal

Como se ha expuesto anteriormente, la evapotranspiración de un cultivo bajo condiciones estándar (ET_c , mmdía^{-1}) es la correspondiente a la cubierta vegetal de un cultivo libre de plagas, enfermedades y fisiopatías, bajo condiciones no restrictivas de agua disponible, con un adecuado suministro de nutrientes minerales, en extensas superficies, de tal forma que se puede obtener los máximos rendimientos bajo unas condiciones climáticas dadas. La ET_c , que también se la conoce como evapotranspiración máxima (ET_m , mmdía^{-1}) de un cultivo, se calcula multiplicando la evapotranspiración de la superficie de referencia (ET_0 , mmdía^{-1}) por el coeficiente de cultivo (K_c , adimensional), método extendido por Doorenbos y Pruitt (1975):

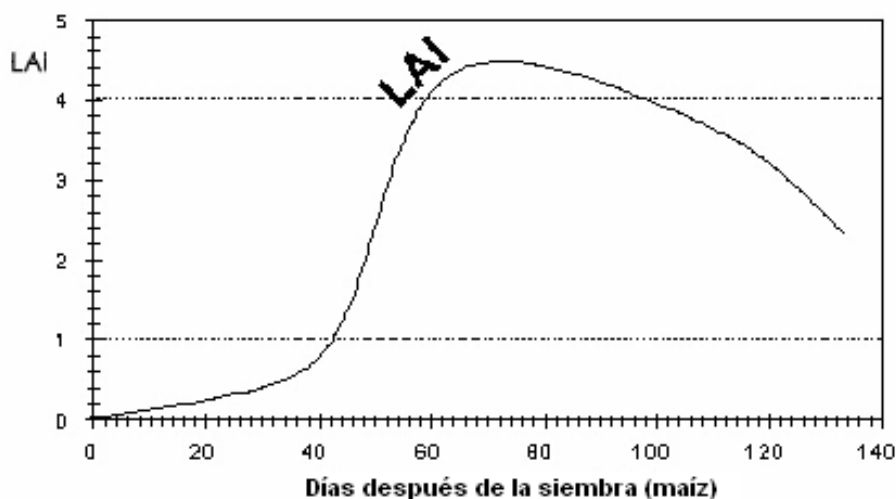
$$ET_c = K_c ET_0 \quad (2.10 \text{ bis})$$

El coeficiente de cultivo trata de integrar los efectos de cuatro características que diferencian el cultivo de la superficie de referencia:

- La altura de cultivo (h), la cuál tiene una influencia importante en la rugosidad y en la resistencia aerodinámica (Fig. 2.2).
- El albedo de la cubierta, que depende de la fracción de cobertura vegetal; el albedo es un parámetro que influye en la radiación solar absorbida y, por tanto, en la radiación neta absorbida por la cubierta.
- El área foliar, el número de estomas, su edad y condición, así como el grado de control estomático, ya que afectan a la resistencia al flujo de vapor de agua de la cubierta vegetal y, de esta forma, afectan a la resistencia de superficie.
- El área expuesta de suelo desnudo, que depende de la fracción de cobertura vegetal, y que determina la evaporación desde el suelo.

Durante el ciclo agronómico del cultivo, el valor de K_c varía a medida que la cubierta vegetal crece y se desarrolla, del mismo modo que varía con la fracción de cobertura de la superficie del suelo por la vegetación, y con la senescencia de la planta. Por todo ésto, se ha procurado calcular la evolución de los valores de K_c a lo largo del ciclo del cultivo a través de

la evolución del LAI efectivo, puesto que la transpiración de un cultivo varía a lo largo de su ciclo de crecimiento y desarrollo de forma muy similar a lo que lo hace su LAI (Fig. 2.3). No obstante, un aspecto de gran importancia en la evolución de K_c con el ciclo del cultivo es la contribución desde el suelo desnudo, especialmente cuando la proporción del suelo es alta, lo que ocurre en las primeras etapas de desarrollo de la mayoría de los cultivos, es decir, durante el establecimiento de los mismos o cuando salen de su reposo invernal.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.3. Evolución del LAI efectivo de un cultivo de maíz a lo largo de su ciclo agronómico.

Mientras que la ETo expresa la demanda evaporativa de la atmósfera en un lugar específico y en un determinado instante, y no considera los factores asociados al suelo y al cultivo, K_c varía fundamentalmente con las características del cultivo, si bien recoge, a menor escala, la variación de las condiciones climáticas, lo que hace posible la transferencia de sus valores estándar de una localidad a otra y de un clima a otro.

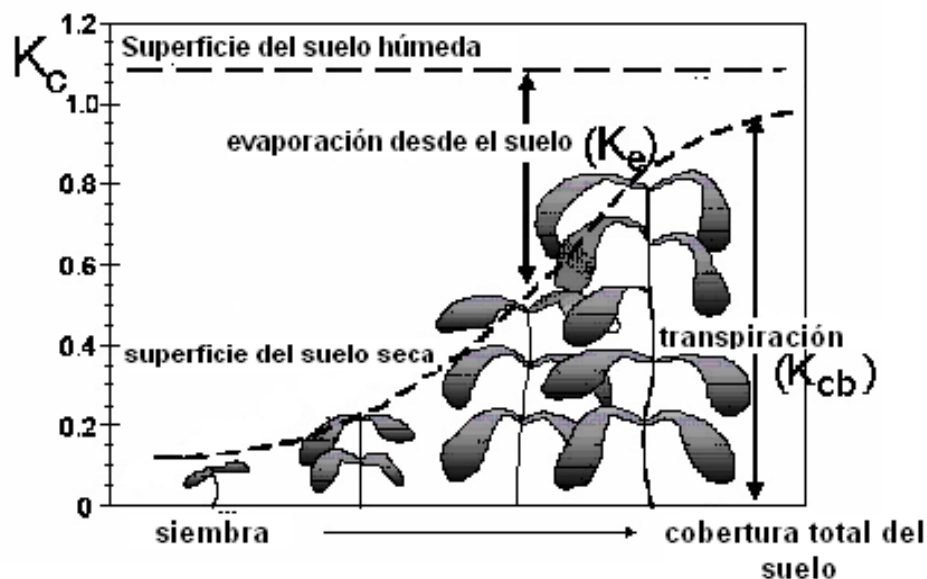
Los coeficientes de cultivo se expresan bajo dos formas, como K_c basal y como K_c medio. La expresión del K_c basal es la siguiente (Wright, 1982; Jensen *et al.*, 1990):

$$K_c = K_s K_{cb} + K_e \quad (2.17)$$

donde: K_c , es el coeficiente de cultivo; K_{cb} , es el coeficiente basal; K_s , es el coeficiente de estrés; y K_e , es el coeficiente de evaporación de agua del suelo. Todos los coeficientes son adimensionales.

El coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) se define como la relación entre ET_c y ET_0 cuando la superficie del suelo se encuentra seca (Fig. 2.4), pero cuando el contenido de agua en la zona radicular es el adecuado para que la transpiración se produzca sin ninguna limitación, de tal forma que el crecimiento y desarrollo del cultivo sea máximo; desde este punto de vista, K_{cb} representa el límite inferior (la línea base) de K_c en ausencia de los efectos de mojado de la superficie del suelo por los riegos o las lluvias. Cuando el cultivo se encuentra fuera de las condiciones óptimas, y su transpiración deja de ser máxima, K_{cb} se ve afectado por un coeficiente de estrés, o de déficit de humedad del suelo (K_s), que es menor que la unidad, y reduce su valor. Por último, el coeficiente de evaporación del suelo (K_e) representa la componente de evaporación de agua desde el suelo; K_e se ve afectado por el grado de

cobertura del suelo por parte del cultivo (Fig. 2.4) y por la humedad de la superficie del suelo, siendo elevado después de una lluvia o de un riego, disminuye conforme la capa superior del suelo se deseca y se anula cuando la superficie del mismo está seca.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.4. Representación esquemática de los componentes de un coeficiente de cultivo: K_{cb} , para la transpiración, y K_e , para la evaporación desde el suelo cultivado.

La aplicación de la Ec. (2.17) requiere un balance diario de agua que estime el contenido hídrico de la capa superficial, por lo que, a efectos prácticos, para intervalos de tiempo relativamente largos, se recurre a los coeficientes de cultivo promedios (Allen *et al.*, 1998):

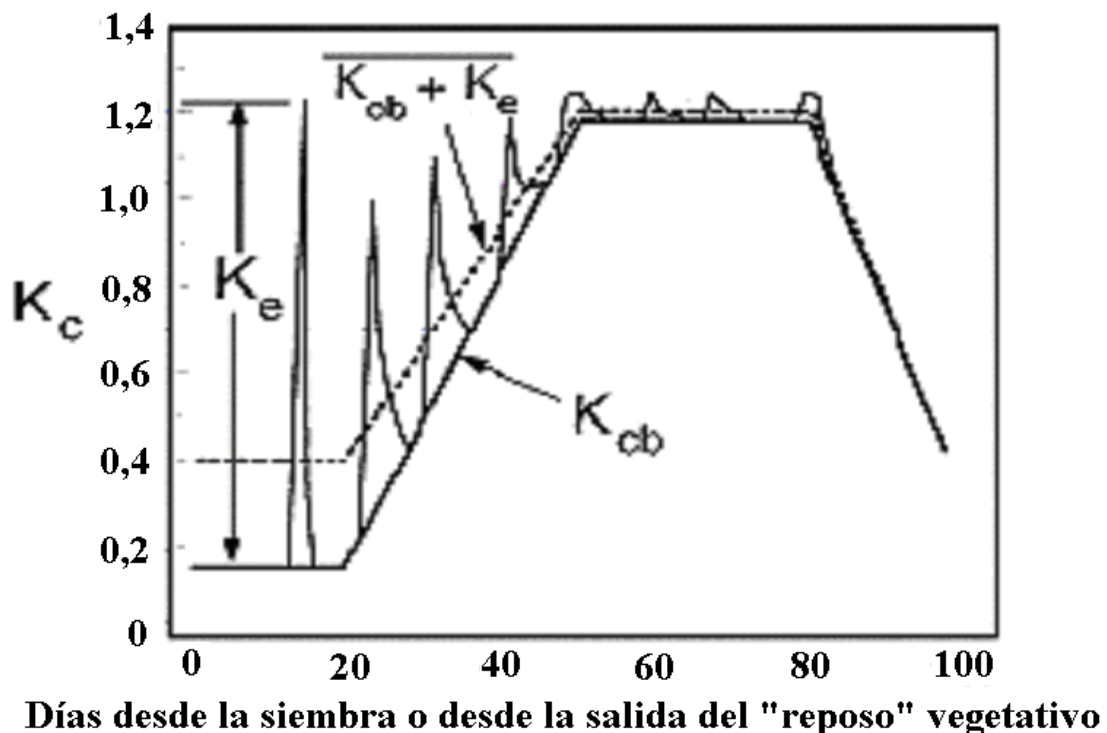
$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (2.18)$$

La Ec. (2.18) representa la media temporal de los efectos combinados de la transpiración del cultivo y de la evaporación desde el suelo, expresados, respectivamente, por K_{cb} y K_e , y asumiendo que K_s es igual a la unidad. Los coeficientes de cultivo medios corresponden a los divulgados en numerosas publicaciones, concretamente de FAO (Allen *et al.*, 1998). Los coeficientes de cultivo medios incluyen los efectos generales del humedecimiento del suelo por el riego o por la lluvia, por lo que se utilizan para el cálculo de la ETc en períodos de varios días, generalmente para el manejo del riego con los sistemas de gravedad y por aspersión. Cuando lo que se quiere conocer es la ETc diaria, es preferible recurrir al método de los coeficientes culturales de base (Ec. 2.17). En las condiciones corrientes de planificación y gestión del riego, y para los estudios generales de los balances hidrológicos, se adoptan los coeficientes de cultivo medios, procedimiento más conveniente que el recurrir al cálculo diario de K_{cb} y K_e .

Cuando se integra el papel del suelo en un único valor del coeficiente de cultivo (K_c), se dice que se utiliza el procedimiento “Coeficiente de Cultivo Único” (“Single Crop Coefficient”), por contraposición a cuando se considera separadamente el papel de la evaporación y transpiración, procedimiento este último que se denomina del “Coeficiente de Cultivo Dual” (“Dual Crop Coefficient”) y que requiere un mayor grado de procesamiento

numérico, por lo cuál está indicado especialmente para la programación del riego en tiempo real, para cálculos de balance de agua en suelo y para investigación.

Las curvas típicas de la evolución de los coeficientes K_{cb} , K_e y K_c medios se muestran en la Figura 2.5, donde la que representa la evolución de los valores del coeficiente basal (K_{cb}) corresponde a los valores mínimos de ET_c para las condiciones adecuadas de humedad en el suelo. Los "picos" de K_c corresponden a los períodos en que la precipitación o el riego mojan la superficie del terreno, aumentando temporalmente el valor total de ET_c para alcanzar valores máximos de hasta 1,2, dependiendo de las condiciones climáticas, de la profundidad de suelo humedecido y de la fracción de terreno mojado. La suma de los valores de K_{cb} y K_e representa el coeficiente de cultivo medio, que considera un valor promedio de dicho coeficiente de cultivo durante un intervalo temporal, por lo general cada etapa de su ciclo de crecimiento y desarrollo.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.5. Curva típica de los coeficientes de cultivo: basal (K_{cb}), de evaporación desde el suelo (K_e) y medio ($K_c = K_{cb} + K_e$).

2.3. Coeficientes de cultivo medios

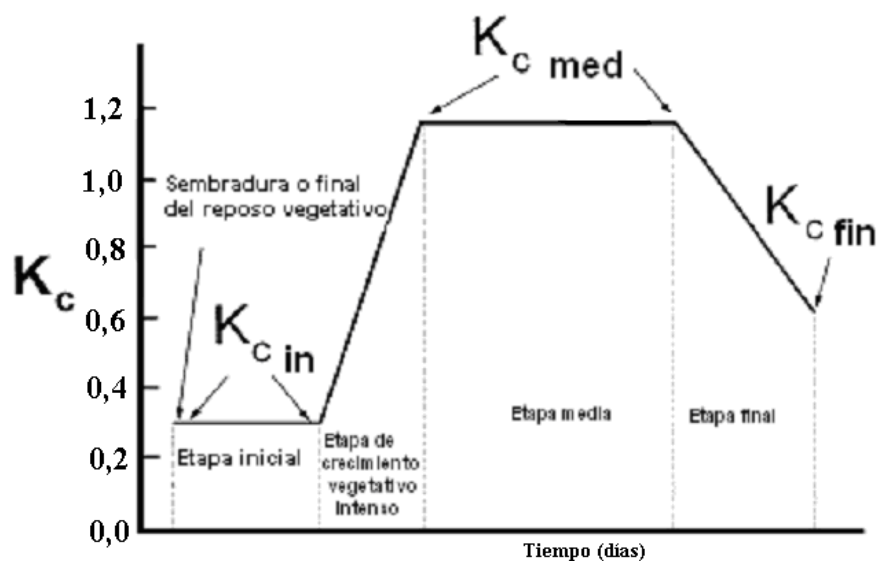
2.3.1. Curva de los coeficientes de cultivo

Los coeficientes de cultivo basados en la cubierta caracterizan típicamente el crecimiento y desarrollo de un cultivo anual desde la siembra o plantación hasta la recolección; intentan reflejar los cambios en su morfología, en el grado de interceptación y absorción de la radiación solar global incidente y en el grado de cubrición del suelo durante su ciclo agronómico anual, incluyendo las etapas de maduración y senescencia del cultivo en cuestión. Para cultivos plurianuales, o perennes, este criterio de valoración de la evolución de

los coeficientes de cultivo necesita de algunas adaptaciones. Frente a esta alternativa, que es la más extendida en la práctica, existen otros procedimientos para recoger la evolución de los valores de los coeficientes de cultivo, como son referir dicho cambio con las condiciones climáticas, a través del concepto de grados-día acumulados, o con la medida de la reflectividad de la cubierta.

La evolución del coeficiente K_c a lo largo de un ciclo agronómico anual de un cultivo, que crece y se desarrolla bajo condiciones ambientales y de manejo óptimas, se muestra en la Figura 2.6. Esta curva se construye dando los tres pasos siguientes:

- Atendiendo al grado de cobertura del suelo por parte del cultivo, su LAI y su altura, el ciclo se desglosa en cuatro etapas: (1) etapa inicial, o de establecimiento, (2) etapa de crecimiento vegetativo intenso, (3) etapa media, o intermedia, y (4) etapa final del ciclo agronómico anual.
- A continuación, se cifran los tres valores de K_c , que corresponden a $K_{c\text{ in}}$, $K_{c\text{ med}}$, $K_{c\text{ fin}}$:
 - $K_{c\text{ in}}$, valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante el período inicial o de establecimiento de cultivo:
 - * En los cultivos anuales, esta etapa transcurre desde la sembradura hasta que el cultivo cubre el 10 % de la superficie del terreno.
 - * En los cultivos plurianuales, o perennes, esta etapa comienza con la salida del reposo vegetativo y termina cuando se establece el crecimiento vegetativo.
 - $K_{c\text{ med}}$, valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ durante el período intermedio:
 - * En cultivos anuales, esta etapa ocupa el período que va desde que el cultivo alcanza la cobertura efectiva completa del terreno hasta el comienzo de la maduración o de la senescencia.
 - * En cultivos plurianuales, o perennes, esta etapa transcurre desde que se alcanza el pleno desarrollo vegetativo hasta el inicio de la senescencia o el cambio de color de las hojas.
 - $K_{c\text{ fin}}$, valor de $\overline{K_{cb} + K_e}$ en las fechas de recolección o de entrada en reposo vegetativo:

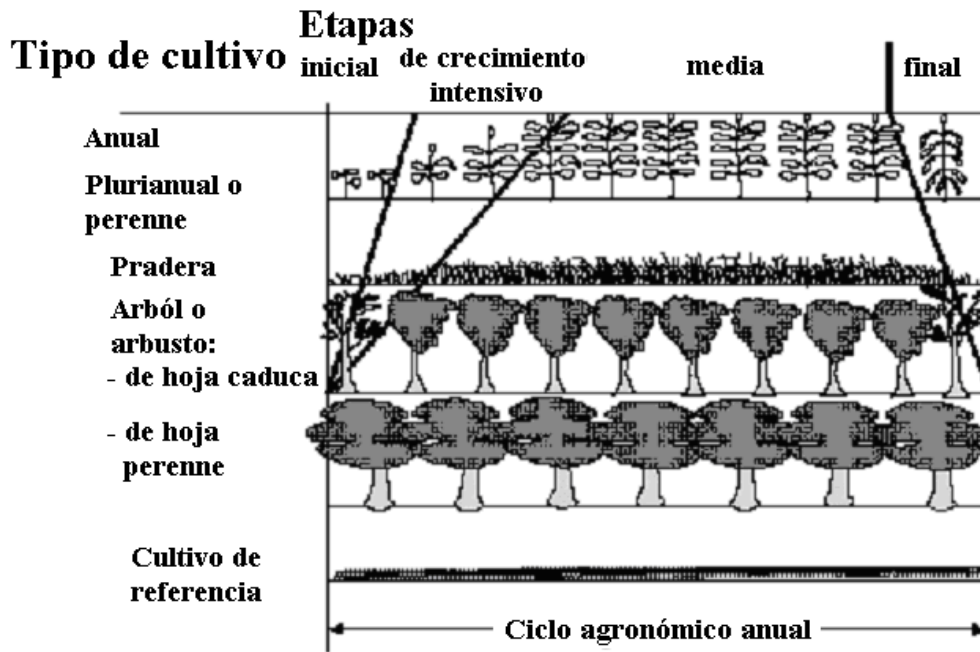


Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.6. Curva esquemática de la evolución del coeficiente de cultivo en las diferentes etapas en que se desglosa el ciclo de crecimiento y desarrollo.

- Por último, se trazan segmentos de recta para las cuatro etapas del ciclo tal y como se recoge en la Figura 2.6.

Las curvas de los coeficientes de cultivo son fáciles de definir para los cultivos anuales, para los que las cuatro etapas en que se puede desglosar su ciclo (Fig. 2.6) se identifican fácilmente. Sin embargo, para los cultivos plurianuales, o perennes, la definición de las etapas de su ciclo agronómico anual se hace por comparación con las etapas del ciclo de cultivos conocidos y teniendo en cuenta las indicaciones expuestas anteriormente, tal como se recoge esquemáticamente en la Figura 2.7.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.7. Desglose del ciclo agronómico en etapas para la estimación de los coeficientes de cultivo de especies anuales y perennes.

En la Tabla 2.1, se muestran los valores de $K_{c\ in}$, $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ para diversos cultivos. Estos valores corresponden a una frecuencia de riego (o de precipitación) estándar, propia del riego de superficie o por aspersión, que mantiene a los cultivos sin restricción hídrica, y a unas prácticas culturales adecuadas para la obtención del rendimiento máximo, es decir, utilizando técnicas de manejo del suelo, densidades poblacionales, técnicas de protección contra adversidades bióticas y fertilización apropiadas. En otras palabras, los coeficientes de cultivo recogidos en la Tabla 2.1 corresponden a los valores potenciales; en primer lugar, deben ser corregidas en función de las condiciones climáticas reinantes en la zona donde se van a aplicar (Epígrafe 2.3.2) y, en segundo lugar, deben ser ajustados a las condiciones reales de cultivo conforme se sugiere en el Epígrafe 2.5. Cuando se consulte la Tabla 2.1, se deben tener en consideración las explicaciones que se acompañan a la misma.

Los valores de K_c de la Tabla 2.1 provienen generalmente de estudios llevados a cabo con lisímetros de pesada, instalados en el centro de parcelas extensas, donde el cultivo está sujeto a prácticas culturales adecuadas y uniformes en toda la superficie, como se muestra en la Figura 2.8, o de estudios micrometeorológicos con observaciones a, por lo menos, dos niveles por encima de la cubierta, también, en parcelas extensas y cultivadas con esmero, tal como se muestra en la Fig. 2.8.



Figura 2.8. Lisímetro de Davis, Universidad de California, integrado en una parcela extensa cultivada de sorgo.

Tabla 2.1. Coeficientes de cultivo (K_c) medios para climas semihúmedos¹, altura máxima (h), profundidad máxima del sistema radicular (Zr) y fracción de agotamiento de la humedad del suelo permisible (p) para diversos cultivos.

Cultivo	K_c in ²	K_c med ³	K_c fin ³	h (m) ⁴	Zr (m) ⁵	P ⁶
a. Hortícolas de porte bajo	0,70	1,05	0,95	0,40		
Zanahoria		1,05	0,95	0,30	0,50 – 1,00	0,35
Apio (céleri)		1,05	1,00	0,60	0,30– 0,50	0,20
Crucíferas (coles) ⁷		1,05	0,95	0,40	0,40 – 0,60	0,40
Ajo		1,00	0,70	0,30	0,30– 0,50	0,30
Lechuga		1,00	0,95	0,30	0,30– 0,50	0,30
Cebolla:						
Seca		1,05	0,75	0,40	0,30– 0,60	0,30
Verde		1,00	1,00	0,30	0,30– 0,60	0,30
Para semilla		1,05	0,80	0,50	0,50– 0,60	0,30
Espinacas		1,00	0,95	0,30	0,30– 0,50	0,20
Rabanitos		0,90	0,85	0,30	0,30– 0,50	0,30
b. Hortícolas de raíz o tubérculo	0,50	1,10	0,95	0,50		
Remolacha de mesa		1,05	0,95	0,40	0,60– 1,00	0,50
Mandioca o yuca:						
Primer año	0,30	0,80	0,30	1,00	0,50– 0,80	0,60
Segundo año	0,30	1,10	0,50	1,50	0,70– 1,00	0,60
Chirivía (pastinaca)	0,50	1,05	0,95	0,40	0,50– 1,00	0,40
Patata ⁸ o papa		1,15	0,75 – 0,40	0,60	0,40– 0,60	0,35
Batata o camote		1,15	0,65	0,50	1,00– 1,50	0,65
Nabo (rutabaga)		1,10	0,95	0,60	0,50– 1,00	0,50
Remolacha azucarera ⁹	0,35	1,20	0,70	0,50	0,70– 1,20	0,55
c. Leguminosas	0,40	1,15	0,55	0,50		
Judías de verdeo	0,50	1,05	0,90	0,40	0,50 – 0,70	0,45
Judías secas	0,40	1,15	0,30	0,40	0,60– 0,90	0,45
Caupí (carilla)		1,05	0,60 – 0,35	0,40	0,60– 1,00	0,50
Garbanzo		1,00	0,35	0,40	0,60 – 1,00	0,50
Cacahuete		1,15	0,60	0,40	0,50– 1,00	0,50
Lenteja		1,10	0,30	0,50	0,60– 0,80	0,50
Garbanzo indio	0,40	1,15	0,35	0,80	0,60 – 1,00	0,50
Guisante de verdeo	0,50	1,15	1,10	0,50	0,60– 1,00	0,35
Guisante seco		1,15	0,30	0,50	0,60– 1,00	0,40
Haba de verdeo	0,50	1,15	1,10	0,80	0,50 - 0,70	0,45
Haba seca	0,50	1,15	0,30	0,80	0,50– 0,70	0,50
Soja		1,15	0,50	0,50– 1,00	0,60– 1,30	0,50

Tabla 2.1. (Cont.) Coeficientes de cultivo (K_c) medios para climas semihúmedos¹, altura máxima (h), profundidad máxima del sistema radicular (Zr) y fracción de agotamiento de la humedad del suelo permisible (p) para diversos cultivos.

Cultivo	K_c in ²	K_c med ³	K_c fin ³	h (m) ⁴	Zr (m) ⁵	P ⁶
d. Hortícolas de fruto	0,50–0,60	1,00–1,15	0,80	0,40–0,80		
Berenjena		1,05	0,90	0,80	0,70–1,20	0,45
Pimiento fresco		1,05	0,90	0,70	0,50–1,00	0,30
Tomate		1,15	0,70–0,90	0,60	0,70–1,50	0,40
Melón cantalupo	0,50	0,85	0,60	0,30	0,40–1,50	0,45
Pepino:						
Fresco	0,60	1,00	0,75	0,30	0,70–1,20	0,50
Pepinillo	0,50	1,00	0,90	0,30	0,70–1,20	0,50
Melón	0,50	1,00	0,75	0,40	0,80–1,50	0,40
Calabaza	0,50	1,00	0,80	0,40	1,00–1,50	0,35
Calabacín	0,50	0,95	0,75	0,30	0,60–1,00	0,50
Sandía	0,40	1,00	0,75	0,40	0,80–1,50	0,40
e. Hortícolas plurianuales						
Alcachofa	0,90	1,00	0,95	1,50	0,60–0,90	0,45
Esparraguera	0,50	0,95	0,30	0,20–0,80	1,20–1,80	0,45
Lúpulo	0,30	1,05	0,85	5,00	1,00–1,20	0,50
Hierbabuena	0,60	1,15	1,10	0,60	0,40–0,80	0,40
Fresa (frutilla)	0,40	0,85	0,75	0,20	0,20–0,30	0,20
f. Frutales y cultivos tropicales	0,50	1,10	1,00	3,00	0,50–0,90	0,35
Platanera:	1,00	1,20	1,10	4,00	0,50–0,90	0,35
Primer año						
Segundo año	0,50	0,30	0,30	0,60–1,20	0,30–0,60	0,50
Piña:	0,50	0,50	0,50	0,60–1,20	0,30–0,60	0,50
Suelo desnudo	1,00	1,05	1,05	3,00	0,70–1,00	0,30
Suelo cubierto						
Cacao	0,90	0,95	0,95	2,00–3,00	0,90–1,50	0,40
Café:	1,05	1,10	1,10	2,00–4,00	0,90–1,50	0,40
Suelo desnudo	0,90	0,95	0,95	8,00	1,50–2,50	0,50
Suelo cubierto	0,95	1,00	1,00	8,00	0,70–1,00	0,65
Datilera	0,95	1,00	1,00	10,00	1,00–2,00	0,60
Palmera	0,95	1,00	1,00	1,50	0,95–1,50	0,40
Caucho	1,10	1,15	1,15	2,00	0,95–1,50	0,45
Té no sombreado						
Té sombreado ¹⁰						
g. Especies oleaginosas	0,35	1,15	0,35	1,50		
Cártamo		1,00–1,15	0,25	0,80	1,00–2,00	0,60
Girasol		1,00–1,15	0,35	2,00	0,80–1,50	0,45
Sésamo (ajonjolí)		1,10	0,25	1,00	1,00–1,50	0,60
Ricino		1,15	0,55	1,30	1,00–2,00	0,50
Colza (canola)		1,10–1,15	0,35	0,60	1,00–1,50	0,60
h. Especies de fibras (textiles)	0,35					
Algodón		1,15–1,20	0,70–0,50	1,20–1,50	1,00–1,70	0,60
Lino		1,10	0,25	1,20	1,00–1,50	0,50
Sisal ¹¹		0,40–0,70	0,40–0,70	1,50	1,00–2,00	0,80
i. Cereales	0,30	1,15	0,40	1,50		
Cebada		1,15	0,25	1,00	1,00–1,50	0,55
Avena		1,15	0,25	1,00	1,00–1,50	0,55
Trigo		1,15	0,25–0,40	1,00	1,00–1,50	0,55
Trigo de invierno	0,40–0,70	1,15	0,25–0,40	1,00	1,00–1,80	0,55
Maíz grano ¹²		1,20	0,60–0,35	2,20	1,00–1,70	0,55
Maíz dulce ¹³		1,15	1,05	1,50	0,80–1,20	0,50
Mijo		1,00	0,30	1,50	1,00–2,00	0,55
Sorgo grano		1,00–1,10	0,55	1,00–2,00	1,00–2,00	0,55
Sorgo dulce		1,20	1,05	2,00–4,00	1,00–2,00	0,50
Arroz ¹⁴	0,05	1,20	0,90–0,60	1,00	0,50–1,00	(0,20)

Tabla 2.1. (Cont.) Coeficientes de cultivo (K_c) medios para climas semihúmedos¹, altura máxima (h), profundidad máxima del sistema radicular (Zr) y fracción de agotamiento de la humedad del suelo permisible (p) para diversos cultivos.

Cultivo	K_c in ²	K_c med ³	K_c fin ³	h (m) ⁴	Zr (m) ⁵	P ⁶
j. Especies forrajeras						
Alfalfa (heno) ¹⁵	0,40	1,20	1,15	0,70	1,00– 2,00	0,55
Trébol (heno) ¹⁵	0,40	1,15	1,10	0,60	0,60– 0,90	0,50
Praderas (pastoreo en rotación)	0,40	0,85– 1,05	0,85	0,15	0,50– 1,50	0,60
Praderas (pastoreo extensivo)	0,30	0,75	0,75	0,10	0,50– 1,50	0,65
Céspedes (clima templado) ¹⁶	0,90	0,95	0,95	0,10	0,50– 1,00	0,40
Céspedes (clima cálido) ¹⁶	0,80	0,85	0,85	0,10	0,50– 1,00	0,50
Pasto de Sudán (heno) ¹⁵	0,50	1,15	1,10	0,80– 1,20	1,00– 1,50	0,60
Raygrass (heno) ¹⁵	0,50	1,05	1,00	0,35	0,50– 1,00	0,60
Pasto de Bermuda (semilla)	0,35	0,90	0,65	0,40	1,00– 1,50	0,60
Pasto de Bermuda (heno) ¹⁵	0,55	1,00	0,85	0,35	1,00– 1,50	0,55
k. Caña de azúcar	0,40	1,25	0,75	3,00– 4,00	1,20– 2,00	0,65
l. Bayas						
Arbustos (p.e., grosellero) ¹⁷	0,30	1,05	0,50	1,50	0,60– 1,20	0,50
Vid “Concord” ¹⁷	0,30	0,85	0,45 ¹⁸	2,00	1,00– 2,00	0,35
Vid (mesa y vinificación)	0,30	0,70	0,45 ¹⁸	1,50– 2,00	1,00– 2,00	0,60
m. Frutales ¹⁸	0,40	0,90	0,65 ¹⁹	4,00	1,00– 2,00	0,60
Almendo, suelo desnudo ¹⁹	0,60	0,85	0,75	3,00	0,50– 1,00	0,70
Aguacate, suelo desnudo						
Cítricos, suelo desnudo						
70% de cubierta vegetativa	0,70	0,65	0,70	4,00	1,20– 1,50	0,50
50% de cubierta vegetativa	0,65	0,60	0,65	3,00	1,10– 1,50	0,50
20% de cubierta vegetativa	0,50	0,45	0,55	2,00	0,80– 1,10	0,50
Cítricos, con cubierta viva ²⁰						
En un 70%	0,75	0,70	0,75	4,00	1,20– 1,50	0,50
En un 50%	0,80	0,80	0,80	3,00	1,10– 1,50	0,50
En un 20%	0,85	0,85	0,85	2,00	0,80– 1,10	0,50
Coníferas	1,00	1,00	1,00	10,00	1,00– 1,50	0,70
Frutales caducifolios ¹⁹ :						
De pepita, suelo desnudo	0,45	0,95	0,70 ¹⁹	4,00	1,00 – 2,00	0,50
De hueso, suelo desnudo	0,45	0,90	0,65 ¹⁹	3,00	1,00– 2,00	0,50
De pepita, suelo cubierto	0,50	1,20	0,95 ¹⁹	4,00	1,00– 2,00	0,50
De hueso, suelo cubierto	0,50	1,15	0,90 ¹⁹	3,00	1,00– 2,00	0,50
Frutales caducifolios, sin heladas:						
De pepita, suelo desnudo	0,60	0,95	0,75 ¹⁹	4,00	1,00– 2,00	0,50
De hueso, suelo desnudo	0,55	0,90	0,65 ¹⁹	3,00	1,00– 2,00	0,50
De pepita, suelo cubierto	0,80	1,20	0,85 ¹⁹	4,00	1,00– 2,00	0,50
De hueso, suelo cubierto	0,80	1,15	0,85 ¹⁹	3,00	1,00– 2,00	0,50
Kiwi	0,40	1,05	1,05	3,00	0,70– 1,30	0,35
Olivos (40 – 60% de cubierta)	0,65	0,70	0,70	3,00– 5,00	1,20– 1,70	0,70
Pistacheros, suelo desnudo	0,40	1,10	0,45	3,00– 5,00	1,00– 1,50	0,60
Nogueras ¹⁹	0,50	1,10	0,65 ¹⁹	4,00– 5,00	1,70– 2,40	0,50
n. Humedales- climas templados						
Anea (<i>Typha</i>), junco (<i>Scirpus</i>), heladas	0,30	1,20	0,30	2,00		
Anea (<i>Typha</i>), junco (<i>Scirpus</i>), libre de heladas	0,60	1,20	0,60	2,00		
Vegetación de porte bajo	1,05	1,10	1,10	0,30		
Cañaveral, suelo inundado	1,00	1,20	1,00	1,00– 3,00		
Cañaveral, suelo húmedo	0,90	1,20	0,70	1,00– 3,00		

Tabla 2.1. (Cont.) Coeficientes de cultivo (K_c) medios para climas semihúmedos¹, altura máxima (h), profundidad máxima del sistema radicular (Z_r) y fracción de agotamiento de la humedad del suelo permisible (p) para diversos cultivos.

Cultivo	K_c med ³	K_c fin ³
p. Otras situaciones		
Agua libre < 2 m de profundidad o en climas subhúmedos o trópicos	1,05	1,05
Agua libre > 5 m de profundidad, Claras o turbias, clima templado	0,65	1,25

Fuente: Allen *et al.* (1998), Pereira y Allen (1999).

Para la aplicación en la práctica de los coeficientes de cultivo incluidos en la Tabla 2.1, se debe tener en consideración la explicación de las anotaciones que incluye:

⁽¹⁾ Los valores de $K_{c\ med}$ y $K_{c\ fin}$ corresponden a un clima semihúmedo, con humedades relativas mínimas de aire próximas a 45%, y con velocidades del viento moderadas, alrededor de $2\ ms^{-1}$, debiendo ser ajustados para las condiciones climáticas que prevalezcan localmente (Epígrafe 2.3.2).

⁽²⁾ Los valores de $K_{c\ in}$ son únicamente indicativos para los cultivos incluidos en los grupos a, b, c, d, e, g, h, i, j. Para una mayor precisión de éstos, se debe recurrir a los procedimientos expuestos en el Epígrafe 2.3.3.

⁽³⁾ Para cultivos cuyas densidades poblacionales, altura y área foliar sean inferiores a los valores óptimos, $K_{c\ med}$ y, para la mayoría de los cultivos, $K_{c\ fin}$ deben ser reducidos en una cifra que va desde 0,1 a 0,5, teniendo en cuenta la diferencia existente con las condiciones óptimas (Epígrafe 2.5).

⁽⁴⁾ La altura máxima h tabulada es frecuentemente superior a la correspondiente que se observa en el campo, ya que h depende del cultivar y de las condiciones reales de crecimiento del cultivo, por lo que se deben ajustar los valores de K_c a cada caso en estudio.

⁽⁵⁾ Los valores más pequeños de profundidad máxima del sistema radicular son propios de los cultivos regados, mientras que los mayores corresponden a condiciones de sequedad, y siempre que el perfil del suelo no sea restrictivo para el crecimiento radicular.

⁽⁶⁾ La fracción de agotamiento permisible de humedad del suelo, en condiciones hídricas no restrictivas, es el límite a partir del cuál la disponibilidad de agua en el suelo disminuye la transpiración de los cultivos, afectando al rendimiento. Los valores de p tabulados están referidos a una ET_c del orden de los $5\ mmdía^{-1}$ y para situaciones de no salinidad. En general, se podrá aumentar los valores de p cuando $ET_c < 5\ mmdía^{-1}$ y reducir, cuando $ET_c > 5\ mmdía^{-1}$ (Ec. 3.12).

⁽⁷⁾ Como crucíferas, son numerosas las especies hortícolas incluidas en esta familia botánica: coles-repollo, coliflor, col de Bruselas, brócoli, etc.

⁽⁸⁾ El valor de $K_{c \text{ fin}}$ para la patata puede ser inferior a 0,4 para cultivares de ciclo largo, y cuando la recolección se lleva a cabo en plantas totalmente senescentes.

⁽⁹⁾ El valor de $K_{c \text{ fin}}$ para la remolacha es 0,6 si se deja de regar el cultivo durante el último mes de su ciclo agronómico. Este coeficiente de cultivo es mayor, hasta 1,0, cuando se riega o hay lluvias significativas en el último mes.

⁽¹⁰⁾ Incluye las necesidades de agua de los árboles que producen el sombreado.

⁽¹¹⁾ El K_c del sisal depende de la densidad de plantación y del manejo del agua.

⁽¹²⁾ El primero de los valores de $K_{c \text{ fin}}$ es para el caso de cosechar el grano con mucha humedad. El segundo es en caso de cosechar una vez secado el grano en el campo (aproximadamente, hasta un 18% de humedad).

⁽¹³⁾ Este valor de $K_{c \text{ fin}}$ corresponde al cultivo que se lleva a cabo para el consumo del grano tierno. Se debe usar el $K_{c \text{ fin}}$ para el maíz grano si el maíz dulce se deja madurar y secar en el campo.

⁽¹⁴⁾ En general, el contenido mínimo de agua en el suelo corresponde al 80% del contenido de agua en saturación, es decir, por encima de la capacidad de campo.

⁽¹⁵⁾ Los tres coeficientes para los cultivos forrajeros y pratenses de siega (heno) corresponden, respectivamente, al período inmediatamente posterior al corte ($K_{c \text{ in}}$), cuando cubren totalmente al suelo ($K_{c \text{ med}}$) y a los días en que se efectúa el corte ($K_{c \text{ fin}}$). Para la alfalfa, los tréboles y otras pratenses cultivadas para la obtención de semilla, $K_{c \text{ fin}} = 0,5$.

⁽¹⁶⁾ Las gramíneas de clima templado incluyen especies como, por ejemplo, raygras inglés, festuca alta, dactilo apelotonado, etc. Como ejemplos de gramíneas de clima cálido, figuran los pastos de Bermuda y San Agustín. El valor de 0,95 para la estación fresca de crecimiento supone una altura de 0,06 – 0,08 cm bajo condiciones normales de cubierta cespitosa. Cuando se produce una programación de riegos cuidadosa y no tiene lugar un crecimiento rápido, los K_c para las cubiertas cespitosas pueden reducirse hasta 0,10 unidades.

⁽¹⁷⁾ Los valores de $K_{c \text{ fin}}$ corresponden a la etapa de crecimiento y desarrollo inmediatamente anterior a la caída de las hojas. Después de esta última etapa, de defoliación, se aconseja utilizar $K_{c \text{ fin}} = 0,20$ para viñedos con el suelo desnudo y generalmente seco o con “mulch” y $K_{c \text{ fin}} = 0,50 – 0,80$ para cuando las vides están acompañadas por una vegetación herbácea en crecimiento activo.

⁽¹⁸⁾ Los valores de $K_{c \text{ med}}$ y $K_{c \text{ fin}}$ para los frutales deben reducirse en 0,1 – 0,2 cuando el grado de cobertura del terreno no supera el 70%.

⁽¹⁹⁾ Los valores de $K_{c\text{ fin}}$ representan los coeficientes de cultivo anteriores a la caída de las hojas. Después de la defoliación, se aconseja usar valores de $K_{c\text{ fin}} = 0,20$ para cultivos con el suelo desnudo o con “mulch”, y $K_c = 0,50 - 0,80$ para suelos con cubierta herbácea en crecimiento activo, debiendo utilizarse valores intermedios para situaciones comprendidas entre los extremos.

⁽²⁰⁾ Para climas húmedos y subhúmedos, donde el control estomático es menos activo, los valores de K_c deben ser incrementados en $0,1 - 0,2$ unidades.

El trazado de las curvas de los coeficientes de cultivo, y los consiguientes resultados de su aplicación para el cálculo de la ET_c , son muy sensibles a la fijación en el tiempo de las etapas del ciclo definidas anteriormente, por lo que se deben seguir a tiempo real mediante la observación en el campo de los cultivos. A título indicativo, Allen *et al.* (1998) proporcionan una tabla orientativa que incluye la duración de las distintas etapas del ciclo agronómico de diferentes cultivos en diversas regiones climáticas; estos valores tabulados pueden diferir bastante de los reales, puesto que dependen de los cultivares, de las fechas de siembra, plantación o trasplante, de las prácticas de manejo de los cultivos y de las condiciones ambientales, factores que determinan las intensidades de crecimiento y maduración de las plantas.

Cuando el cultivo crece y se desarrolla en unas condiciones que no son las óptimas, capaces de proporcionar los rendimientos máximos en las condiciones ambientales donde se lleva a cabo, los valores de $K_{c\text{ med}}$ deberán reducirse en $0,3 - 0,5$ unidades, como ya se expuso en el Epígrafe 2.5, ya que su LAI es más pequeño, presenta un menor número de estomas activos y, como consecuencia, una menor transpiración. Las bajas densidades poblacionales o las malas nascencias, una preparación inadecuada del terreno de asiento, una insuficiente fertilización y los estreses abióticos y bióticos son factores que afectan al crecimiento y desarrollo normal del cultivo, disminuyendo su evapotranspiración, lo que exige una adecuada corrección de los valores de K_c .

2.3.2. Ajuste climático de los coeficientes de cultivo

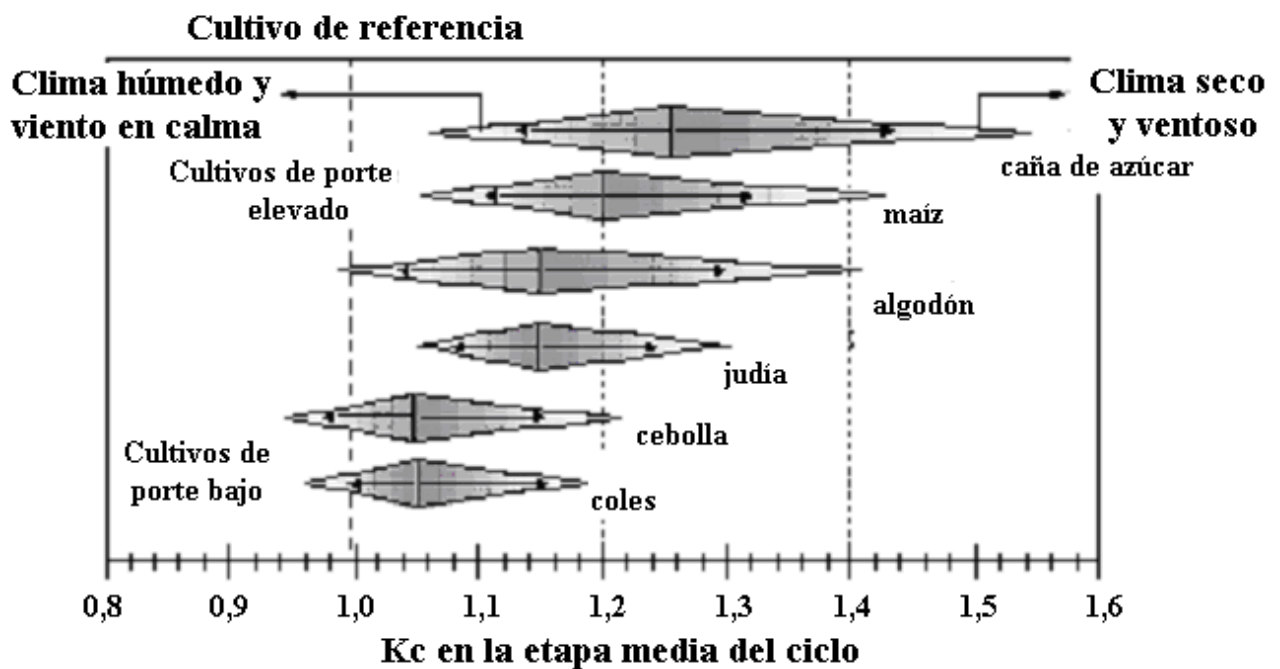
Los valores de $K_{c\text{ med}}$ y $K_{c\text{ fin}}$ (Tabla 2.1) son prototipos de las condiciones climáticas propias de un clima subhúmedo, es decir, de climas con una humedad relativa promedio diaria mínima (HR_{min}) de, aproximadamente, el 45% y un promedio de velocidad del viento, a 2 m de altura sobre el terreno (u_2), de 2 ms^{-1} .

Las cifras de la Tabla 2.1 difieren de los valores presentados por Doorenbos y Pruitt (1975), quienes ofrecieron unas tablas de múltiples entradas y la consiguiente corrección de los valores de K_c conforme a la humedad relativa del aire y la velocidad del viento. Los valores de K_c tabulados en la Tabla 2.1, para su aplicación en la práctica, requieren ser corregidos teniendo en cuenta ciertas variables que definen bien las condiciones climáticas. Tales correcciones tienen su fundamento teórico en las Ecs. (2.14 a 2.16).

En climas húmedos ($HR_{\text{min}} > 60\%$), y en condiciones de viento en calma ($u_2 < 1\text{ ms}^{-1}$), cabe esperar que los valores de K_c no excedan, generalmente, de la unidad (como máximo,

0,05 unidades), ya que, bajo tales condiciones ambientales, el déficit de presión de vapor ($VPD = e_a - e_d$) es pequeño. En este caso, la evapotranspiración es gobernada fundamentalmente por la energía disponible en la superficie de evaporación, lo que se traduce en la similitud del comportamiento entre una cubierta cespitosa y la de un cultivo cualquiera que cubra totalmente el terreno (Ec. 2.5). Por otra parte, las diferencias en la resistencia aerodinámica debida a la altura serán poco significativas siempre que la velocidad del viento sea baja, resultando que α_o (Ec. 2.15) se aproxima a la unidad y se reducen las diferencias de comportamientos incluidos en α_c (Ec. 2.16) siempre que los cultivos se encuentren con buena disponibilidad de agua (p. e., el funcionamiento estomático no induce fuertes resistencias de superficie, r_s).

Por el contrario, cuando la velocidad del viento aumenta, se incrementan las diferencias entre las resistencias aerodinámicas del cultivo de referencia ($(r_a)_o$) y de los cultivos comerciales ($(r_a)_c$), tanto más cuanto mayor es la altura de estos últimos, lo que conlleva un valor de $\alpha_o > 1$. Además, cuando la velocidad del viento es elevada, por lo general, la humedad relativa del aire es pequeña y, por lo tanto, el VPD es alto, lo que hace que la ET_c deje de ser esencialmente gobernado por R_n y aumenten las diferencias existentes entre ET_o y ET_c . Por ejemplo, para cultivos como el maíz, con 2-3 m de altura, los valores de K_c pueden ser superiores en un 40% en un clima árido y ventoso ($HR_{min} = 15\%$ y $u_2 = 6 \text{ ms}^{-1}$) que en un clima húmedo y con el viento en calma ($HR_{min} = 70\%$ y $u_2 = 1 \text{ ms}^{-1}$) (Fig. 2.9).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.9. K_c en algunos cultivos en función de las condiciones climáticas, humedad relativa y velocidad de viento.

Como consecuencia de lo expuesto anteriormente, es preciso realizar las correcciones específicas para el caso de climas donde el valor de HR_{min} difiera de 45% o donde el valor de u_2 sea mayor o menor de 2 ms^{-1} ; también, los valores de $K_{c_{med}}$ han de ser corregidos teniendo en cuenta la altura (h) del cultivo. Según Allen *et al.* (1998), para la etapa media del ciclo

agronómico anual de los cultivos, el valor de $K_{c \text{ med}}$ se puede obtener recurriendo a la expresión:

$$K_{c \text{ med}} = K_{c \text{ med tab}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (2.19)$$

donde: $K_{c \text{ med}}$, es el coeficiente corregido de cultivo para la etapa media del ciclo agronómico anual; $K_{c \text{ med tab}}$, es el valor de $K_{c \text{ med}}$ obtenido en la Tabla 2.1; u_2 , es el valor medio diario de la velocidad de viento a 2 m de altura sobre césped para la etapa de mediados de temporada (ms^{-1}), con $1 \text{ ms}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ ms}^{-1}$; HR_{min} , es el valor medio diario de la humedad relativa mínima durante la etapa de mediados de temporada (%), para $20\% \leq HR_{\text{min}} \leq 80\%$; y h , es la altura media de las plantas durante la referida etapa (m), para $0,1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$.

De igual manera, se puede plantear la estimación del coeficiente de cultivo para su etapa final ($K_{c \text{ fin}}$), en la recolección o a la entrada del reposo vegetativo. Los valores de $K_{c \text{ fin}}$ incluidos en la Tabla 2.1 representan valores típicos esperados bajo condiciones climáticas estándar. En climas de mayor aridez, y en condiciones de velocidad de viento mayor, se presentarán valores más elevados de $K_{c \text{ fin}}$. Por otra parte, para climas más húmedos, y con velocidad de viento menor, se considerarán valores inferiores de $K_{c \text{ fin}}$. Para hacer los ajustes pertinentes, para climas donde la HR_{min} sea diferente de 45% y donde u_2 sea mayor o menor a 2 ms^{-1} , se puede utilizar la Ec.(2.20):

$$K_{c \text{ fin}} = K_{c \text{ fin tab}} + [0,04(u_2 - 2) - 0,004(HR_{\text{min}} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (2.20)$$

donde: $K_{c \text{ fin}}$, es el coeficiente de cultivo corregido; $K_{c \text{ fin tab}}$, es el valor de $K_{c \text{ fin}}$ de la Tabla 2.1; u_2 , es el valor promedio de la velocidad diaria del viento a 2 m de altura sobre el césped durante la etapa final de crecimiento (ms^{-1}), para $1 \text{ ms}^{-1} \leq u_2 \leq 6 \text{ ms}^{-1}$; HR_{min} , es el valor promedio de humedad relativa mínima durante la etapa final (%), para $20\% \leq HR_{\text{min}} \leq 80\%$; y h , es la altura promedio de la planta durante la etapa final (m), para $0,1 \text{ m} < h < 10 \text{ m}$.

La Ec. (2.20) es aplicable, solamente, en los casos donde los valores tabulados de $K_{c \text{ fin}}$ sean mayores de 0,45. Según esta ecuación, los valores de $K_{c \text{ fin}}$ disminuyen cuando el valor de HR_{min} aumenta. Esta reducción del valor de $K_{c \text{ fin}}$ es característica de cultivos que son cosechados “verdes” o antes de la senescencia, es decir, $K_{c \text{ fin}} \geq 0,45$.

No se necesitan ajustes para los casos donde $K_{c \text{ fin tab}} < 0,45$; es decir, se toma $K_{c \text{ fin}} = K_{c \text{ fin tab}}$. En los casos donde los cultivos se dejan entrar en senescencia y secar en el campo (como se evidencia cuando $K_{c \text{ fin}} < 0,45$), los valores de u_2 y HR_{min} tendrán un efecto menor en $K_{c \text{ fin}}$, por lo que no se requerirá de ajustes. En realidad, $K_{c \text{ fin}}$ podría disminuir a medida que HR_{min} disminuye para cultivos que se encuentran más allá de la maduración fisiológica y secos en el momento de la recolección, debido a que la menor humedad relativa acelera el proceso de secado.

Cuando el usuario no disponga de una calculadora con función exponencial, la solución del término $(h/3)^{0,3}$ puede ser resuelto como $\left[\left(h/3\right)^{0,5}\right]^{0,5}$, utilizando la tecla de la raíz cuadrada.

El valor de HR_{\min} es utilizado en lugar de HR_{med} debido a que es más fácil obtener HR_{\min} a partir de $T_{\text{máx}}$ cuando no se tengan datos de humedad relativa. Además, considerando que, en condiciones normales, T_{\min} se aproxima a T_{rocio} (es decir, $HR_{\text{max}} = 100\%$), el valor del déficit de presión de vapor (VPD) se transforma en $((100 - HR_{\min}) / 200) e^0(T_{\text{max}})$; $e^0(T_{\text{max}})$ es la presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura máxima diaria. Ésto es indicativo de que HR_{\min} refleja más acertadamente el impacto del déficit de presión de vapor en el valor de K_c que HR_{med} .

Se puede calcular el valor de HR_{\min} para intervalos de tiempo diario o mensual como:

$$HR_{\min} = \frac{e^0(T_{\min})}{e^0(T_{\max})} \cdot 100 \quad (2.21)$$

donde: $e^0(T_{\min})$, es la presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura mínima diaria del aire (T_{\min}); y $e^0(T_{\max})$, es la presión de vapor de saturación correspondiente a la temperatura máxima diaria del aire (T_{\max}). Ambos valores de presión de vapor se pueden calcular mediante la Ec.(1.26).

2.3.3. Coeficientes de cultivo para la etapa inicial ($K_{c \text{ in}}$)

En cultivos anuales, la ET_c que se produce durante la etapa inicial se presenta, principalmente, en la forma de evaporación de agua desde el suelo, desde su superficie. Por lo tanto, para realizar estimaciones precisas del valor de $K_{c \text{ in}}$, se deberá considerar la frecuencia con que la superficie del suelo es humedecida durante la etapa inicial, tanto por la lluvia como por la aplicación de agua de riego a la parcela. Los valores de $K_{c \text{ in}}$ presentados en la Tabla 2.1 están referidos a condiciones de humedecimiento del suelo con la frecuencia más común para el tipo de cultivo indicado, 10 días para cultivos herbáceos como media. Tales valores de $K_{c \text{ in}}$, sólo, pueden ser usados para estimar ET_c en estudios preliminares o de planificación.

Las Figuras 2.10 y 2.11 proporcionan estimaciones, relativamente precisas, del valor de $K_{c \text{ in}}$ cuando el intervalo medio entre riegos y/o precipitación durante la etapa inicial es conocido o puede ser estimado. Estas figuras se obtuvieron recurriendo al proceso numérico recogido en el Epígrafe 2.3.4. La utilización de estas figuras exigen el conocimiento del valor medio del poder evaporante de la atmósfera, representado por ET_o , para la etapa inicial y una estimación del intervalo medio entre humedecimientos. En general, el intervalo promedio entre eventos de humedecimiento se estima contando todos los eventos de riego y lluvia mayores a unos pocos milímetros que se producen durante la etapa inicial. Cuando los eventos de humedecimiento ocurran en días sucesivos, éstos serán contados como un sólo evento. El intervalo promedio de humedecimiento se estimará dividiendo la duración de la etapa inicial entre el número de eventos.

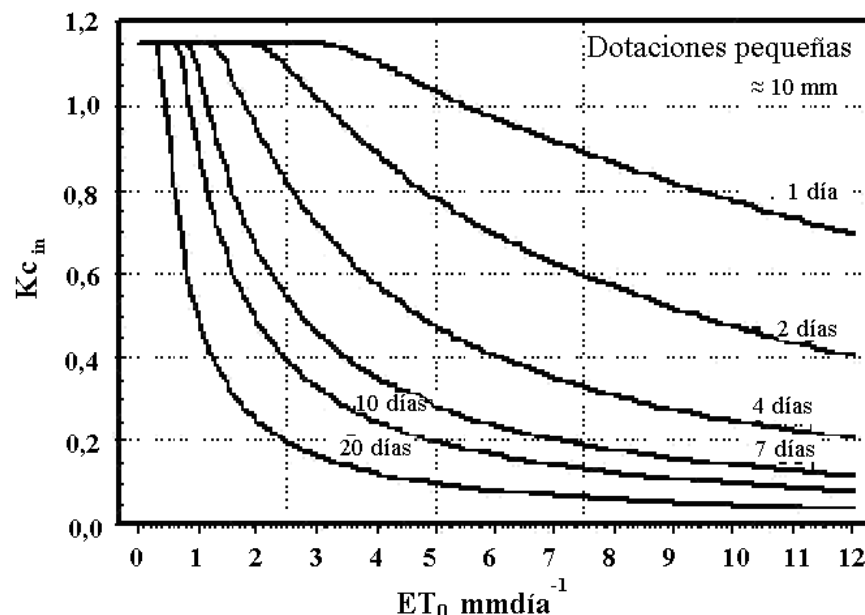
Cuando, solamente, se disponga de valores de precipitación a nivel mensual, sin información acerca del número de días con lluvia, se puede estimar el número de eventos dividiendo el valor de la precipitación mensual entre la lámina de lluvia que ocurriría en un evento típico de precipitación, lámina que, de existir, varía de clima a clima, de región a región y de temporada a temporada.

Cuando las lluvias sean insuficientes, se necesitará del riego para proporcionar al cultivo el agua requerida. Aún en los casos donde el riego no ha sido establecido, se deberá

estimar el intervalo de tiempo entre los riegos futuros para determinar la frecuencia necesaria para mantener al cultivo libre de estrés. Cuando no se pueden hacer estimaciones del intervalo de tiempo, se puede recurrir a los valores de $K_{c\ in}$ incluidos en la Tabla 2.1.

El valor de $K_{c\ in}$ puede determinarse recurriendo a las Figuras 2.10 y 2.11, las cuáles presentan estimaciones atendiendo al intervalo promedio entre los eventos de humedecimiento, el poder evaporante de la atmósfera y la magnitud del evento de humedecimiento.

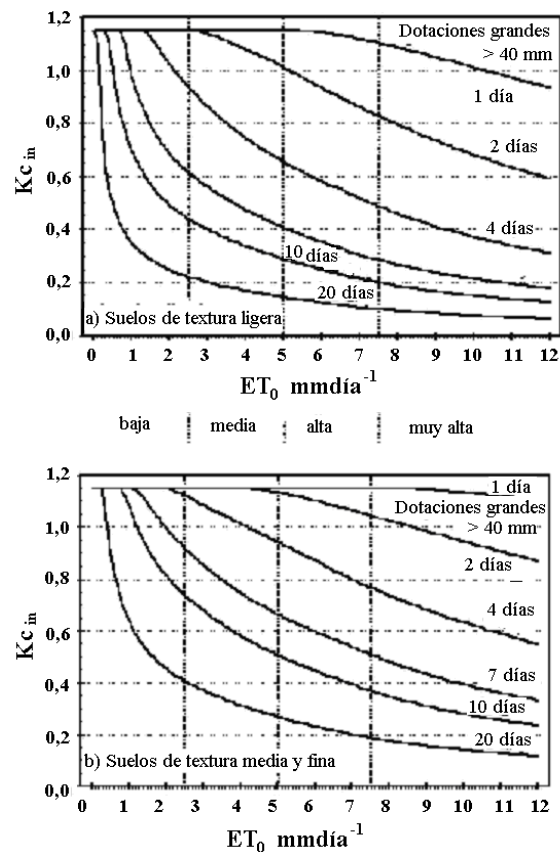
La primera de las figuras (Fig. 2.10) se puede utilizar para cualquier tipo de suelo, siempre que los eventos de humedecimiento sean ligeros (láminas infiltradas menores o iguales a 10 mm). También, se puede recurrir a ella cuando el humedecimiento durante la etapa inicial del ciclo de crecimiento y desarrollo sea producto únicamente de la lluvia. Además, se puede recurrir al gráfico cuando se riegue con sistemas de alta frecuencia (p. e., microirrigación, pivote central) y en los casos de aplicaciones ligeras de agua, de alrededor de 10 mm o menos por cada evento de humedecimiento. En esta figura, se puede ver como, con humedecimientos muy frecuentes, con intervalos de 1 ó 2 días, el valor de $K_{c\ in}$ puede alcanzar valores de hasta 1,15, incluso cuando la ET_0 es pequeña; en esta circunstancia, se mantiene una cantidad de humedad en la capa superficial del suelo lo suficientemente alta como para responder a la demanda climática o, en otras palabras, la energía disponible para la evaporación es suficiente para evaporar el agua del suelo disponible en su superficie. Así, si los eventos de humedecimiento se producen cada 2 días, se tiene un valor de $K_{c\ in} = 1,15$, para $ET_0 = 2,5\ \text{mmdía}^{-1}$, y un valor de $K_{c\ in} = 0,9$, para $ET_0 = 9,5\ \text{mmdía}^{-1}$. Por el contrario, cuando los intervalos de humedecimiento son grandes, porque la cantidad de agua que se renueva en la superficie del suelo es pequeña, la evaporación se reduce rápidamente, incluso para pequeños valores de ET_0 , dando como resultado valores bajos de $K_{c\ in}$; por ejemplo, para intervalos de humedecimientos de 10 días, $K_{c\ in} = 0,4$, para $ET_0 = 2,5\ \text{mmdía}^{-1}$, y $K_{c\ in} = 0,2$ para $ET_0 = 5\ \text{mmdía}^{-1}$.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.10. Diagrama para el cálculo de $K_{c\ in}$ en función del intervalo entre humedecimientos del suelo (días) y de la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mmdía^{-1}) para pequeñas láminas de agua infiltradas o dotaciones (10 mm).

Para eventos de humedecimiento con láminas de infiltración que superan los 40 mm, como ocurre cuando el humedecimiento es producido principalmente por riego periódico (riego por aspersión o superficie), los valores de $K_{c\ in}$ deben ser estimados mediante la Figura 2.11. La Figura 2.11a es usada para suelos de textura gruesa o ligera (arenosos y arenososfrancos), mientras que la Figura 2.11b se requiere para suelos de textura media (francos, franco – arenosos, franco – limosos y limosos) y suelos de textura fina (franco limo – arcillosos, limo – arcillosos y arcillosos). Este último grupo textural de suelos tienen mayor capacidad de retención de agua en la capa superficial y son capaces de conducir más agua por capilaridad, a partir de las capas inferiores del perfil del suelo, hacia las capas superficiales, en las cuáles se procesa la evaporación. Comparando los dos diagramas de la Figura 2.11, se puede ver que, para idénticos valores de ET_0 e intervalo de humedecimiento, $K_{c\ in}$ tiende a ser mayor en suelos de textura media y fina. Por otro lado, comparando las Figuras 2.10 y 2.11, en lo que se refiere a la altura de la lámina de agua infiltrada, puede observarse que $K_{c\ in}$ tiende a ser mayor cuanto mayor es la lámina infiltrada (Fig. 2.11), ya que, en tal situación, corresponde una mayor cantidad de agua almacenada en la capa superficial del suelo. Después de ocurrir el evento de humedecimiento, la cantidad de agua disponible para la evaporación en la parte superior del suelo es considerable, por lo que se incrementa significativamente el tiempo que el suelo tardaría en secarse. En consecuencia, el valor promedio de $K_{c\ in}$ será mayor que el correspondiente a eventos ligeros de humedecimiento. El tiempo que tardará el suelo en secarse no es sólo función del poder evaporante de la atmósfera (ET_0) y la frecuencia de humedecimiento, sino que está determinado también por la capacidad de almacenamiento de humedad en la capa superior del suelo.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.11. Diagrama para el cálculo de $K_{c\ in}$ en función del intervalo entre humedecimientos del suelo (días) y de la evapotranspiración de referencia (ET_0 , mm día^{-1}) para grandes dotaciones o grandes láminas de agua infiltradas (> 40 mm).

Cuando las láminas promedio de infiltración se encuentran entre los 10 y 40 mm, el valor de $K_{c\ in}$ puede ser estimado a partir de las Figuras 2.10 y 2.11 como sigue: $K_{c\ in} = K_{c\ in}(\text{Fig. 2.10}) + [(I-10) / (40-10)] [K_{c\ in}(\text{Fig. 2.10}) - K_{c\ in}(\text{Fig. 2.11})]$; donde: $K_{c\ in}(\text{Fig. 2.10})$, es el valor de $K_{c\ in}$ de la Figura 2.10, $K_{c\ in}(\text{Fig. 2.11})$, es el valor de $K_{c\ in}$ de la Figura 2.11; e I , es la lámina infiltrada promedio, expresada en milímetros, sobre la superficie total del campo, a las que se refieren las Figuras 2.10 y 2.11, que deberá ser dividida por la fracción de la superficie del suelo humedecida por el sistema de riego con el objeto de representar la lámina infiltrada verdadera en la porción de la superficie humedecida (Fig. 2.12):

$$I_w = I / f_w \quad (2.22)$$

donde: I_w , es la lámina media de agua infiltrada en la zona humedecida (mm); I , es la lámina promedio de riego en el campo (mm); y f_w , es la fracción de la superficie del suelo humedecida por el sistema de riego (0,1 – 1,0).

El valor de f_w puede ser estimado teniendo en cuenta la siguiente relación:

Precipitación	$f_w = 1,0$
Riego por aspersión	$f_w = 1,0$
Riego por canteros y fajas	$f_w = 1,0$
Riego por surcos	$f_w = 0,4 - 0,8$
Riego por microaspersión	$f_w = 0,5 - 1,0$
Riego gota a gota	$f_w = 0,3 - 0,7$

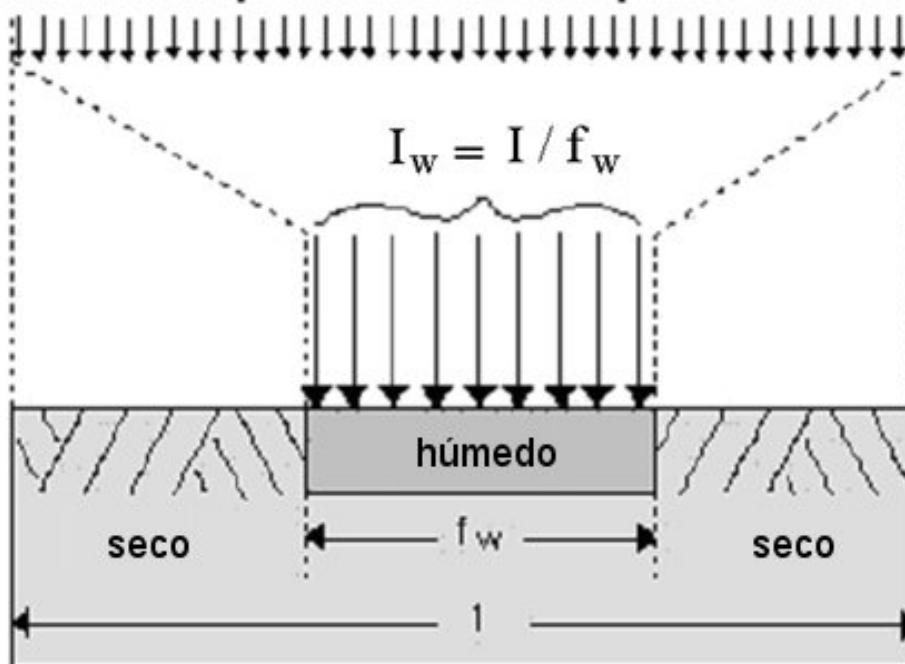
Cuando se produzca simultáneamente el riego de una porción de la superficie del suelo y la lluvia sobre la superficie total del campo durante la etapa inicial, el valor de f_w deberá representar el valor promedio de f_w correspondiente a cada tipo de humedecimiento, ponderado de acuerdo a la lámina total infiltrada producida por cada tipo de humedecimiento.

El $K_{c\ in}$, obtenido de la Tabla 2.1, o a partir de las Figuras 2.10 y 2.11, debería ser corregida multiplicando por la fracción de la superficie humedecida, para hacer un ajuste por el humedecimiento parcial del suelo:

$$K_{c\ in} = f_w K_{c\ in}(\text{Tab, Fig}) \quad (2.23)$$

donde : $K_{c\ in}$, es el valor final corregido ; f_w , es la fracción de área mojada (0,1 – 1,0); y $K_{c\ in}(\text{Tab, Fig})$, es el valor de $K_{c\ in}$ obtenido de la Tabla 2.1 o de las Figuras 2.10 y 2.11.

I = Lámina infiltrada promedio sobre la superficie total del campo



Fuente: Allen *et al.* (1998).

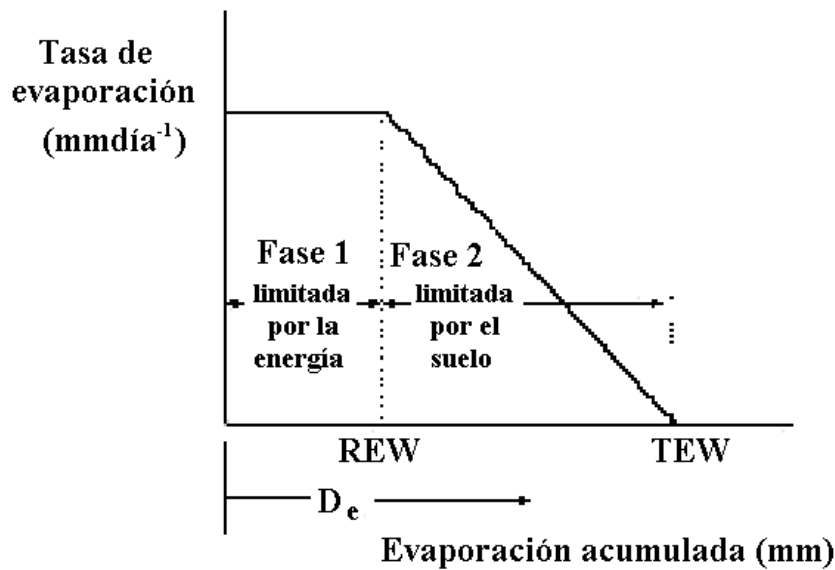
Figura 2.12. Riego con humedecimiento parcial del suelo.

2.3.4. Coeficientes de cultivo para la etapa inicial: cálculo numérico

El procedimiento de cálculo numérico se basa en que la evaporación de un suelo desnudo se puede caracterizar como un fenómeno que ocurre en dos etapas distintas (Ritchie, 1974; Kanemasu *et al.*, 1976; Hanks e Hill, 1990; Ritchie y Johnson, 1990). La primera etapa es la parte "limitada por la energía" (Fig. 2.13). Durante esta etapa, el agua del suelo se transporta a la superficie en una cantidad suficiente para cubrir el índice potencial de evaporación (E_{SO}), que, al mismo tiempo, es determinado por la energía disponible en la superficie del suelo. En este caso, E_{SO} se estima según la Ec. (2.24):

$$E_{SO} = 1,15 ET_0 \quad (2.24)$$

donde: E_{SO} , es la tasa máxima de evaporación del suelo (mmdía^{-1}); y ET_0 , es la evapotranspiración de referencia durante la etapa inicial (mmdía^{-1}). El valor de 1,15 representa a la evaporación potencial incrementada, debida al reducido albedo de la superficie del suelo mojado y a la posibilidad de contar con calor almacenado en la superficie del suelo gracias a periodos secos anteriores.



Fuente: Allen *et al.* (2003a).

Figura 2.13. Aproximación bifásica de la evaporación de agua del suelo.

La segunda etapa se conoce como la etapa “limitada por el suelo”, en la que el transporte hidráulico del agua sub-superficial a la superficie del suelo es incapaz de proveer de agua para satisfacer la evaporación potencial. Durante la segunda etapa, la superficie del suelo aparece parcialmente seca y una parte de la evaporación tiene lugar por debajo de la superficie del suelo. La energía necesaria para la evaporación sub-superficial resulta del transporte de calor desde la superficie del suelo hacia el perfil del suelo. La tasa de evaporación durante la segunda etapa disminuye a medida que el contenido de agua en el suelo disminuye (Fig. 2.13). La cantidad de evaporación se puede expresar, por lo tanto, como proporcional a la cantidad de agua restante en la capa de evaporación con relación a la máxima lámina de agua que se puede evaporar de la misma capa del suelo durante la segunda etapa.

La lámina total máxima de agua que se puede evaporar durante la primera etapa se llama “agua fácilmente evaporable” (“Readily evaporable water”, REW, mm), mientras que la lámina máxima total de agua que se puede evaporar de la superficie del suelo se conoce como “agua evaporable total” (“Total evaporable water”, TEW, mm). En la segunda etapa, la evaporación de agua del suelo decrece a medida que la humedad del suelo disminuye, pudiendo asumirse como proporcional a la razón entre la cantidad de agua que, todavía, está disponible en la capa del suelo que produce la evaporación ($TEW - D_e$; Fig. 2.13) y la total que puede ser evaporada en la segunda etapa ($TEW - REW$; Fig. 2.13).

La primera etapa de la evaporación de agua del suelo tendrá una duración t_1 (días) dada por la expresión:

$$t_1 = REW / E_{SO} \quad (2.25)$$

Si el intervalo promedio entre humedecimientos (t_w) fuera inferior a t_1 , entonces la evaporación del suelo tendría lugar con la máxima intensidad, permaneciendo en la primera etapa del proceso de evaporación. En el caso contrario, la evaporación tiene lugar en la segunda etapa, con una tasa decreciente y siempre menor que la potencial, E_{SO} . Es para estas condiciones, que son las más frecuentes en la práctica, para las que se ha desarrollado el

método de cálculo numérico, que se expone a continuación, y que incluye las estimaciones de TEW y REW cuando sus valores no son conocidos.

La máxima lámina de agua que puede ser evaporada de la superficie del suelo (TEW_{max} , mm), considerando que éste está bien abastecido de agua hasta una profundidad de 40 -50 cm, puede ser estimada por la profundidad del perfil del suelo que contribuye a la evaporación de agua del suelo y por las características retentivas del agua del suelo dentro del horizonte evaporante (Anexo 2), y teniendo en cuenta que los flujos de capilaridad a partir de las capas inferiores del perfil del suelo aumentan cuando, también, lo hace la demanda climática. Adicionalmente, TEW_{max} está influenciada por la conductividad hidráulica, por la presencia de algún horizonte que limita el flujo hidráulico por debajo de la capa evaporante y por la conducción de calor sensible en el suelo para proveer energía para la evaporación sub-superficial. Una aproximación al valor máximo de TEW para la etapa inicial, cuando $ET_0 \geq 5$ $mmdía^{-1}$, es:

$$TEW_{max} = Ze (\theta_{FC} - 0,5 \theta_{WP}) \quad (2.26a)$$

donde: TEW, se expresa en mm; Ze, es la profundidad de la capa superficial del suelo que está siendo secada por el proceso evaporativo (0,10 – 0,15 m; menor en suelos ligeros y mayor en suelos medios y pesados); θ_{FC} , es el contenido de agua en el suelo a capacidad de campo (m^3m^{-3}); θ_{WP} , es el contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente (m^3m^{-3}). Cuando no se conoce el valor de Ze, se puede asumir $Ze = 0,15$ m. Los valores típicos para θ_{FC} y θ_{WP} se muestran en la Tabla 2.2.

En invierno, se dispone de menos energía radiante que penetre en la superficie del suelo y evapore el agua. Por lo tanto, TEW_{max} podría tener un valor menor. Entonces, para $ET_0 < 5$ $mmdía^{-1}$, el valor de TEW_{max} se estima por:

$$TEW_{max} = Ze(\theta_{FC} - 0,5\theta_{WP}) \sqrt{\frac{ET_0}{5}} \quad (2.26b)$$

donde: ET_0 , es la evapotranspiración de referencia ($mmdía^{-1}$).

La Ec. (2.26b) se utiliza para corregir TEW, para su uso durante las etapas iniciales de los cultivos en la mayor parte de los suelos desnudos. No se recomienda el uso de esta ecuación en el procedimiento del K_c dual.

Tabla 2.2. Valores indicativos para el agua evaporativa en los principales grupos de suelos.

Tipo de textura	θ_{FC} (m^3m^{-3})	θ_{WP} (m^3m^{-3})	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	REW (mm)	TEW (mm)
Arenosa	0,12	0,04	92	4	4	5-6	10-15
Arenosa – franca	0,14	0,06	84	6	10	≈ 9	12-17
Areno – limosa	0,23	0,10	65	25	10	≈ 9	14-27
Franca	0,26	0,12	40	40	20	9 -10	20-30
Franco – limosa	0,30	0,15	20	65	15	9-12	23-34
Limosa	0,32	0,15	7	88	5	≈ 8	25-37
Franco – limo – arcillosa	0,34	0,19	10	55	35	9-11	25-37
Limo – arcillosa	0,36	0,21	8	47	45	≈ 12	25-38
Arcillosa	0,36	0,21	22	20	58	6-8	25-38

Fuente: Allen *et al.* (2003a).

Por otra parte, la lámina total máxima de agua que se puede evaporar durante la primera etapa, o agua fácilmente evaporable máxima (REW_{max} , mm), puede estimarse en función de la textura del suelo (Ritchie *et al.*, 1989), ya que esta característica del suelo es determinante de la cantidad de agua que es retenida con menor potencial y que puede ser más fácilmente extraída por evaporación. REW es mayor en suelos de textura media, con elevada capacidad retentiva de agua y moderada conductividad hidráulica, mientras que es menor en suelos de textura ligera, principalmente en suelos de textura arenosa. Las expresiones de estimación son las siguientes:

$$REW_{max} = 20 - 0,15 \text{ Arena, si la fracción de arena es } > 80\% \quad (2.27a)$$

$$REW_{max} = 11 - 0,06 \text{ Arcilla, si la fracción de arcilla es } > 50\% \quad (2.27b)$$

$$REW_{max} = 8 + 0,08 \text{ Arcilla, si la fracción de arena es } < 80\% \text{ y de arcilla } < \text{ al } 50\% \quad (2.27c)$$

donde: tanto la arena como la arcilla de la capa superficial del suelo, de profundidad Z_e , se expresa en porcentaje.

Las láminas efectivas de agua evaporable, TEW y REW, se determinan teniendo en cuenta sus valores máximos, TEW_{max} y REW_{max} , dados por las Ecs. (2.26 y 2.27), y la lámina media de agua disponible en la capa superficial del suelo en el inicio de cada ciclo de evaporación (Da , mm). De hecho, esta lámina de agua constituye el límite superior para TEW, puesto que ésta no puede superar el agua disponible cuando se inicia cada ciclo de evaporación. Por lo tanto, recurriendo a la función “min”, se presentan las dos expresiones siguientes:

$$TEW = \min (TEW_{max}, Da) \quad (2.28a)$$

$$REW = REW_{max} \left(\min \left(\frac{Da}{REW_{max}}, 1 \right) \right) \quad (2.28b)$$

donde: min, es una función que selecciona el valor mínimo de los elementos contenidos entre paréntesis y que están separados por una coma.

La lámina promedio de agua añadida al horizonte del suelo evaporante, en cada evento de lluvia o riego, se determina dividiendo la suma de la precipitación y riego que ocurren en todos los eventos de lluvia o riego entre el número total de los mismos; entonces:

$$P_{media} = \frac{(\sum P_n + \sum I_w)}{N_w} \quad (2.29a)$$

donde: P_{media} , es la lámina promedio de agua infiltrada por evento de lluvia o riego (mm); P_n , es la lámina de precipitación infiltrada que ocurre durante la etapa inicial (mm); I_w , es la lámina de riego infiltrada por la parte de la superficie mojada por el agua (mm) (Ec. 2.22); y N_w , es el número de veces que ha llovido o se ha regado durante la etapa inicial. Cada valor individual de la P_n e I_w debe limitarse en la Ec. (2.29a) a valores que cumplen con $I_w \geq TEW$ y $P_n \geq TEW$; TEW se calcula mediante las Ecs. (2.26a,b). Las cantidades de precipitación o de riego superiores son consideradas como que se infiltran a las capas inferiores del suelo que no intervienen en el proceso de evaporación desde la superficie. Por otra parte, el número de

humedecimientos (N_w) ha de ser corregido considerando un único evento para aquellos que tienen lugar dos días consecutivos.

La lámina Da (mm), de las Ecs. (2.28a,b), se calcula teniendo en consideración el agua retenida en el suelo en el inicio de la etapa de arranque del cultivo (A_{in} , mm), como sigue:

$$Da = P_{media} + \frac{A_{in}}{N_w} \quad (2.29b)$$

donde: P_{media} , es la lámina promedio de agua infiltrada por evento de lluvia o riego (mm); y A_{in} , es el agua almacenada en el suelo en el inicio de la etapa de arranque del cultivo (mm).

El tiempo promedio entre eventos de mojado del suelo durante la etapa inicial (t_w , días) se calcula mediante la expresión:

$$t_w = t_{in} / N_w \quad (2.30)$$

donde: t_{in} , es la duración de la etapa inicial (días); y N_w , es el número de acontecimientos de lluvia o de riego durante la mencionada etapa del ciclo. Si N_w se corrige, forzosamente la misma corrección se ha de introducir en t_{in} .

Con todo lo expuesto anteriormente, es el momento de expresar, como resultado, la ecuación básica para la estimación de $K_{c\ in}$, durante la segunda etapa de evaporación de agua de un suelo desnudo ($t_w > t_1$), como sigue:

$$K_{c\ ini} = \frac{TEW - (TEW - REW) \exp \left(\frac{-(t_w - t_1) E_{SO} \left(1 + \frac{REW}{TEW - REW} \right)}{TEW} \right)}{t_w \cdot ET_0} \quad (2.31)$$

donde: TEW , es el agua evaporable total (mm); REW , es el agua fácilmente evaporable (mm); t_w , es el intervalo promedio entre eventos de riego o lluvia (días); t_1 , es el tiempo en el que se completa la primera etapa ($REW / E_{SO} = t_1$) (días); E_{SO} , es la tasa potencial de evaporación de agua del suelo (mm día^{-1}); y ET_0 , es la demanda evaporativa de la atmósfera (mm día^{-1}).

El valor de $K_{c\ in}$ calculado con la Ec. (2.31) se limita al rango en que $K_{c\ in} \leq 1,15$.

Cuando $t_w < t_1$, es decir, cuando el proceso se queda dentro de la Etapa 1, se cumple:

$$K_{c\ in} = E_{SO} / ET_0 \quad (2.32)$$

La Ec. (2.32) expone el hecho de que la evaporación durante cada período I_w depende de la cantidad de agua que queda en el suelo inmediatamente después de la primera etapa de evaporación ($W_x - W_1$), siendo afectada tanto más la tasa de evaporación máxima cuanto mayores sean I_w y ET_0 .

Los procedimientos de cálculo referidos anteriormente pueden ser ejecutados más fácilmente recurriendo a programas como KCISA (Rodríguez *et al.*, 2000).

2.4. Coeficientes basales de los cultivos

En el enfoque del coeficiente único del cultivo, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo son combinados en un coeficiente K_c único. Este coeficiente integra las diferencias, en la evaporación en el suelo y en la tasa de transpiración del cultivo, entre el cultivo y la superficie del césped de referencia. Como la evaporación en el suelo puede fluctuar diariamente como resultado de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo es solamente una expresión de los efectos promedios en el tiempo (múltiples días) de la evapotranspiración del cultivo.

Debido a que el coeficiente único K_c representa un promedio de la evaporación en el suelo y la transpiración, este procedimiento se utiliza para estimar ET_c para períodos de tiempo semanales o mayores, a pesar de que los cálculos puedan realizarse a nivel diario. El coeficiente único K_c promediado en el tiempo se utiliza para estudios a nivel de planificación y para el diseño de sistemas de riego donde sea razonable y pertinente considerar los efectos promedios del humedecimiento del suelo. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersión donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único (K_c), promediado temporalmente.

De acuerdo al enfoque del coeficiente dual del cultivo, se determinan por separado los efectos de la transpiración del cultivo y de la evaporación en el suelo. Se utilizan dos coeficientes (Ec. 2.17): el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}), para describir la transpiración de la planta, y el coeficiente de evaporación del agua del suelo (K_e), para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único es reemplazado por: $K_c = K_{cb} + K_e$, donde K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo, y K_e , es el coeficiente de la evaporación del agua del suelo (Fig. 2.14).

K_{cb} es definido como el cociente entre ET_c y ET_0 cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración máxima de la planta. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El K_e describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo, después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los dos coeficientes (K_{cb} y K_e) podrá exceder un valor máximo, $K_{c_{max}}$, el cuál es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, y así determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El procedimiento del coeficiente dual del cultivo requiere de una mayor cantidad de cálculos numéricos que el procedimiento del coeficiente único, promediado temporalmente, K_c . El procedimiento del coeficiente dual es preferible para los casos de los calendarios de

riego en tiempo real, para los cálculos de balance del agua en el suelo, y para los estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de ETC, como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda. Éste será el caso de los riegos de alta frecuencia a través del riego localizado o sistemas de aspersión de movimiento lateral, como los pivotes centrales o las rampas de movimiento lateral.

2.4.1. Coeficientes basales, K_{cb}

Debido a que el valor del coeficiente único del cultivo (K_c) incluye los efectos de la evaporación de la superficie del suelo, el valor del coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) será menor al valor de K_c , tal como se ilustra en la Figura 2.14, por lo que se requiere de una tabla diferentes con los valores de K_{cb} . Allen *et al.* (1998) publicaron tablas para recoger los valores tanto de K_c como de K_{cb} . Aunque pueden ser calculados a partir de las tablas, es conveniente conocer como se puede llegar al conocimiento de K_{cb} a partir de K_c . El procedimiento de cálculo se puede aplicar a cualquier cultivo a partir de los valores incluidos en la Tabla 2.1; pero, también, para cualquier otro cultivo que no esté referenciado en el libro citado. Para estos cálculos, el ciclo anual de crecimiento y desarrollo se desglosa en las mismas etapas que se expusieron en el epígrafe 2.3.1 y que muestra, también, la Figura 2.14. La curva de los valores de K_{cb} se construyen de la misma forma que los de K_c .

a) K_{cb} para la etapa inicial, $K_{cb\ in}$

(1) Cultivos anuales, con el suelo desnudo en el momento de la siembra o de la plantación:

$$K_{cb\ in} = 0,15 \quad (2.33)$$

(2) Cultivos perennes, con el suelo desnudo en el inicio del periodo de crecimiento y desarrollo, antecediendo al inicio de la foliación:

$$K_{cb\ in} = 0,15 \text{ ó } 0,20 \quad (2.34)$$

(3) Otros cultivos perennes:

$$K_{cb\ in} = K_{c\ in} - (0,10 \text{ ó } 0,20) \quad (2.35)$$

recurriéndose a la corrección 0,20 cuando los cultivos se riegan frecuentemente.

b) K_{cb} para las etapas media y final del ciclo agronómico, $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$.

(1) K_{cb} para cultivos que cubren totalmente, o casi totalmente, el suelo (p. e., cereales); es decir, con un grado de cobertura $C \geq 0,8$ y, por lo tanto, la energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evaporación es muy pequeña:

$$K_{cb\ med} = K_{cb\ med} - 0,05 \quad (2.36)$$

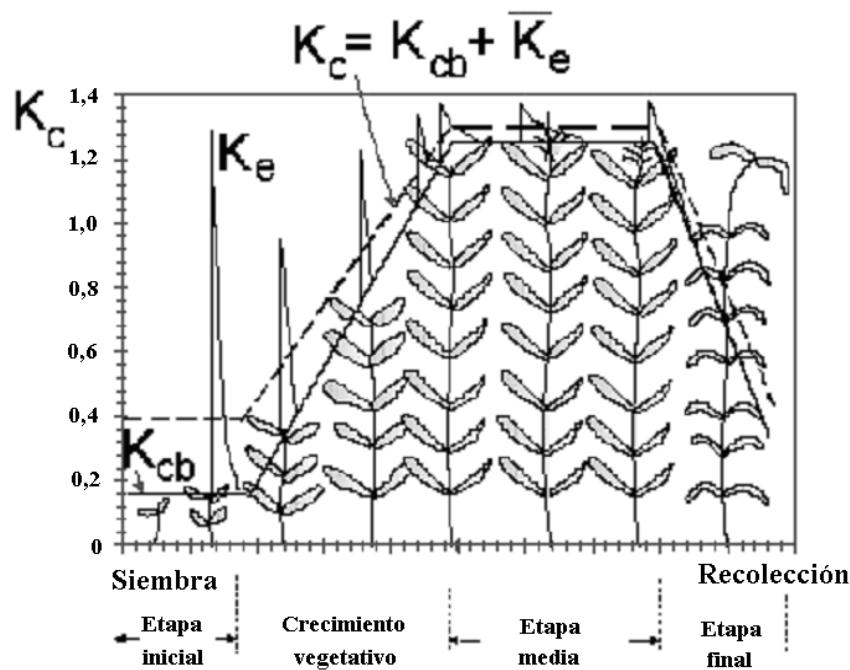
(2) K_{cb} para cultivos con un grado de cobertura $C < 0,8$, siendo C la fracción de suelo cubierta o sombreada por la vegetación (0,01 – 0,99):

$$K_{cb\ med} = K_{cb\ med} - 0,10 \quad (2.37)$$

(3) $K_{cb\ fin}$, en general:

$$K_{cb\ fin} = K_{cb\ fin} - 0,10 \quad (2.38)$$

Es de destacar que los valores de $K_{cb\ med}$ y $K_{cb\ fin}$ son los valores ya corregidos por los efectos del clima (Ecs. 2.19 y 2.20).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.14. Coeficientes basales de los cultivos: K_{cb} , para la transpiración del cultivo, y K_e , para la evaporación del suelo.

2.4.2. Coeficiente para la evaporación del suelo, K_e

El coeficiente de la evaporación de agua a partir del suelo, K_e , representa al componente de la evaporación en el valor de ET_c . Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, el valor de K_e será máximo. La evaporación a partir del suelo está gobernada por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo. Esta energía, por otra parte, depende de la fracción de energía total que es consumida por la planta en el proceso de transpiración. El coeficiente K_e decrece después de cada humedecimiento a medida que aumenta la cantidad acumulada de agua evaporada desde la capa superficial del suelo. Cuando la superficie del suelo se encuentra seca, K_e será pequeña, o incluso cero cuando no exista agua remanente en la superficie del suelo para ser evaporada. En consecuencia, K_e puede ser calculado como sigue:

$$K_e = K_r (K_{c\ max} - K_{cb}) \quad (2.39)$$

donde: K_r , es el coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente de la lámina acumulada de agua agotada (evaporada) de la capa superficial del suelo (0-1); $K_{c_{max}}$, es el valor máximo de K_c después del riego o lluvia; y K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo.

K_e depende de la fracción del suelo que se encuentra simultáneamente expuesto a la luz solar y humedecido, es decir, la fracción de la superficie del suelo a partir de la cuál ocurre la mayor parte de la evaporación, f_{ew} (0,01 – 1). Entonces:

$$K_e \leq f_{ew} K_{c_{max}} \quad (2.40a)$$

En los términos utilizados en programación, la Ec. (2.40a) se expresa como:

$$K_e = \min(K_r (K_{c_{max}} - K_{cb}), f_{ew} K_{c_{max}}) \quad (2.40b)$$

El valor del producto $K_{c_{max}} \cdot ETo$ representa el límite superior de la evaporación y transpiración (ET) que puede ocurrir en una superficie cultivada de altura h , valor que es impuesto para reflejar los límites naturales definidos por la cantidad de energía disponible representados en la diferencia del balance de energía. El valor de $K_{c_{max}}$ tiene un rango que oscila de 1,05 a 1,30, cuando se utiliza la evapotranspiración del césped de referencia (ETo). $K_{c_{max}}$ se puede calcular recurriendo a la función “max” (máximo entre):

$$K_{c_{max}} = \max \left(\left(1,2 + (0,04(U_2 - 2) - 0,004(HR_{min} - 45)) \cdot \left(\frac{h}{3} \right)^{0,3} \right), (K_{cb} + 0,05) \right) \quad (2.41)$$

donde: $\max ()$, es el valor máximo de los parámetros entre los paréntesis; U_2 , es la velocidad del viento registrado a 2 m de altura sobre el terreno (ms^{-1}); HR_{min} , es la humedad relativa mínima del aire (%); h , es la altura máxima promedio de las plantas durante la etapa de cálculo considerada (etapa inicial, etapa de crecimiento, etapa media ó etapa final) (m); y K_{cb} , es el coeficiente basal del cultivo.

La Ec. (2.41) asegura que el valor de $K_{c_{max}}$ sea siempre mayor o igual a la suma $K_{cb} + 0,05$. Ésto significa que la presencia de una superficie húmeda aumentará el valor de K_{cb} en 0,05 después de un humedecimiento completo de la superficie del suelo, aún en situaciones de completa cobertura vegetal.

Se utiliza un valor de 1,2, en lugar de 1, para el cálculo de $K_{c_{max}}$ (Ec. 2.41), debido al efecto del incremento de la rugosidad aerodinámica de los cultivos circundantes durante las etapas del ciclo, mediados y final, lo cuál incrementa la transferencia del vapor por turbulencia a partir de la fracción expuesta del suelo. El valor 1,2, también, recoge el impacto de la reducción del albedo en un suelo húmedo, así como la contribución del calor almacenado en el suelo seco antes del evento de humedecimiento, riego o lluvia. Todos estos factores pueden contribuir al incremento de la evaporación, con relación a la de referencia.

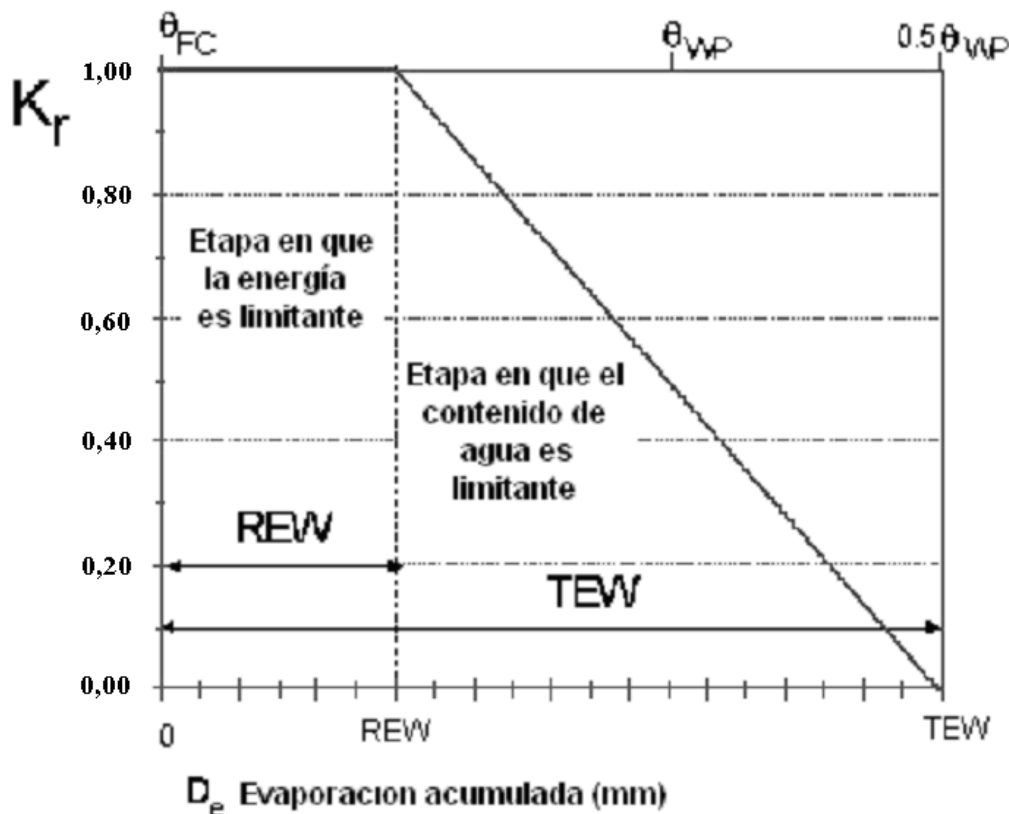
El valor 1,2 de la Ec. (2.41) representa el efecto de los intervalos de humedecimiento que son mayores de 3 ó 4 días. Si los eventos de riego o lluvia son más frecuentes (p.e., diarios o cada 2 días), el suelo tendrá menos oportunidad de absorber calor entre eventos

sucesivos, por lo que el valor 1,2 pasaría a ser 1,1. El intervalo de tiempo para el cálculo de $K_{c\ max}$ puede variar entre diario a mensual.

La Ec. (2.41) estima la evaporación que ocurre en una superficie cultivada, independientemente del grado de cobertura del suelo. Sin embargo, la evaporación a partir del suelo es mayor en la fracción de suelo que no está cubierta por el cultivo y que ha sido humedecida por el riego o la lluvia, f_{ew} (0 – 1). En estas circunstancias, el flujo evaporativo se concentra en la fracción de suelo humedecido expuesto a la radiación.

Cuando se calcula un único $K_{c\ max}$, U_2 , HR_{min} y h tomarían los valores promedios de la etapa media del ciclo. Cuando se plantean estudios más precisos, U_2 y HR_{min} corresponden a valores promedios de períodos cortos (p.e., 5 días) y h puede ser estimado para los mismos intervalos de tiempo, aunque, para la etapa inicial, h puede asumir el mismo valor que el cultivo de referencia, es decir, $h = 0,12$ m.

El método utilizado para estimar la evaporación de agua del suelo es similar al empleado para calcular $K_{c\ in}$ (Fig. 2.13), es decir, admitiendo un proceso de evaporación en dos etapas (bifásico). En la primera etapa, la tasa de evaporación es máxima siempre que la evaporación acumulada, D_e (mm), no alcance los valores de REW. Cuando D_e excede los valores de REW, el proceso evaporativo pasa a la segunda etapa y la tasa de evaporación disminuye proporcionalmente a la cantidad de agua todavía disponible para ser evaporada (Fig. 2.15).



Fuente: Allen *et al.* (2003b).

Figura 2.15. Teoría bifásica para estimar la evaporación a partir de un suelo con vegetación, recurriendo al coeficiente de reducción de la evaporación K_r .

Al comienzo de un ciclo de secado, después de un evento importante de lluvia o riego, el contenido de humedad en la capa superficial del suelo corresponderá a capacidad de campo y la cantidad de agua agotada por evaporación (D_e) sería igual a cero. Durante la etapa 1 del proceso de secado, la superficie del suelo permanecerá húmeda y se asume que la evaporación en la superficie expuesta del suelo variará a una tasa máxima, la cual será limitada solamente por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo. Esta etapa se mantiene hasta que la lámina acumulada de evaporación (D_e) aumente hasta un punto donde las propiedades hidráulicas de la parte superior del suelo comiencen a ser limitantes y la humedad no pueda ser transportada a la superficie del suelo a una tasa que pueda satisfacer la demanda potencial de la evaporación. Durante la etapa 1 de secado:

$$K_r = 1 \quad \text{para } D_e \leq REW \quad (2.42a)$$

La lámina acumulada de evaporación (D_e) al final de la etapa 1 de secado será igual a REW (agua fácilmente evaporable), la cuál representa la lámina máxima de agua que puede ser evaporada sin restricciones de la capa superficial del suelo durante la etapa 1. Esta lámina oscila normalmente entre los 5 a 12 mm, siendo, en general, mayor para suelos de textura media y fina.

La segunda etapa, donde la tasa de evaporación se va reduciendo paulatinamente, es denominada “etapa de reducción de la tasa de evaporación”, la cuál se inicia cuando el valor de D_e supera a la REW. En este punto, la superficie del suelo se encontrará visiblemente seca y la evaporación a partir de la porción expuesta del suelo se reducirá en proporción a la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo:

$$K_r = \frac{TEW - D_e}{TEW - REW} \quad \text{para } D_e > REW \quad (2.42b)$$

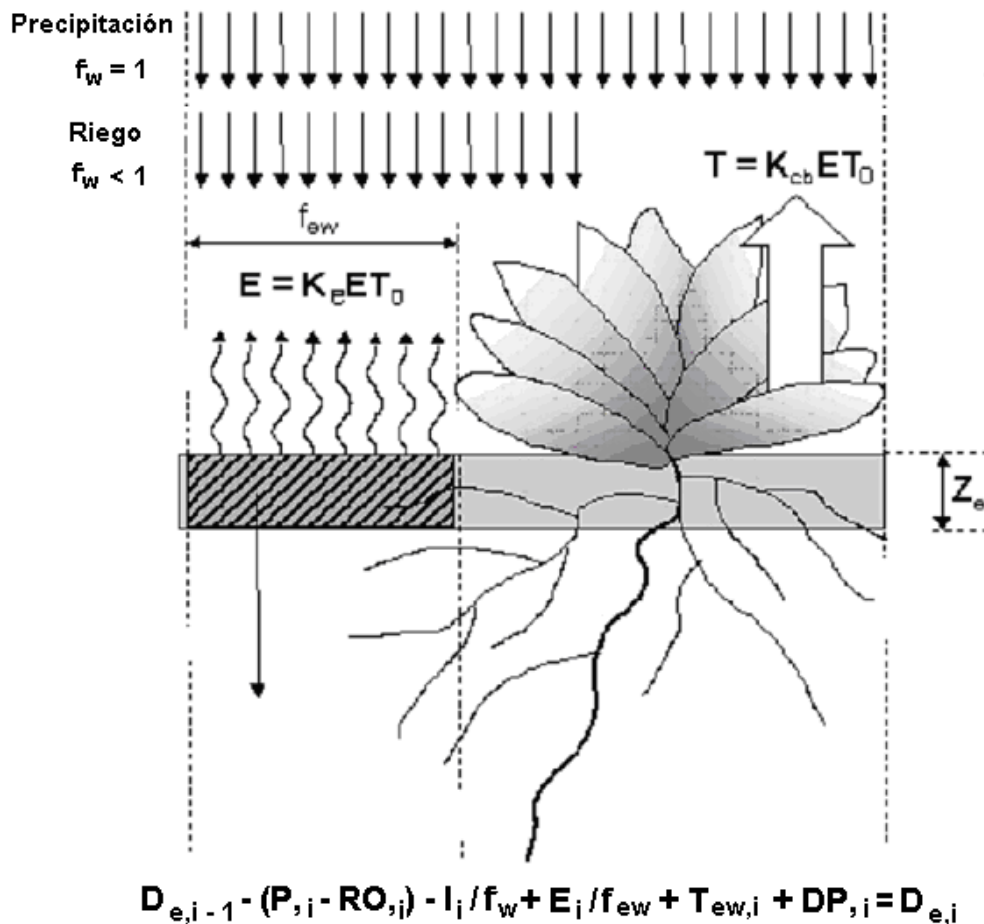
donde: K_r , es el coeficiente adimensional de reducción de la evaporación, dependiente del agotamiento de la humedad (lámina acumulada de evaporación), en la parte superior del suelo ($K_r = 1$, cuando $D_e \leq REW$); D_e , es la lámina acumulada de evaporación (agotamiento), al final del día anterior en la fracción f_{ew} de suelo humedecido y expuesto a la radiación solar directa (mm); TEW, es la lámina acumulada máxima de evaporación (agotamiento) en la capa superficial del suelo cuando $K_r = 0$ (TEW = agua evaporable total, mm); y REW, es la lámina acumulada de evaporación al final de la etapa 1 del secado (REW = agua fácilmente evaporable, mm).

Para la estimación del valor de D_e , se requiere del cálculo de un balance diario del agua presente en la capa superficial del suelo de 100 a 200 mm (menor para suelos ligeros, mayor para francos y pesados) (Fig. 2.16), con el objeto de determinar la lámina acumulada de evaporación o agotamiento. La ecuación para el balance de agua en el suelo, correspondiente a la fracción expuesta y humedecida del mismo, f_{ew} , es la siguiente (fig. 2.16):

$$D_{e,i} = D_{e,i-1} - (P_{,i} - PO_{,i}) - \frac{I_{,i}}{f_w} + \left(\frac{K_e \cdot ET_o}{f_{ew}} \right)_i + T_{s,i} \quad (2.43)$$

limitada a ($0 \geq D_{e,i} \geq TEW$), y siendo el índice i la identificación del día para el cual se estima el balance. En esta ecuación: $D_{e,i}$, es la lámina acumulada de evaporación (agotamiento),

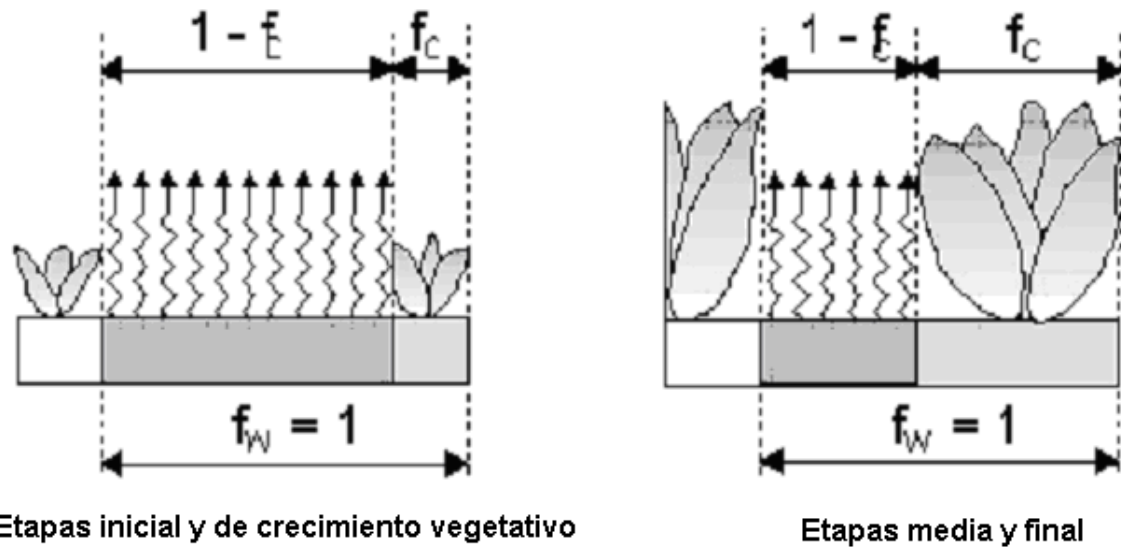
después de un humedecimiento completo, originada a partir de la fracción expuesta y humedecida de la porción superior del suelo, al final del día i (mm); $D_{e,i-1}$, es la lámina acumulada de evaporación (agotamiento), después de un humedecimiento completo, originada a partir de la fracción expuesta y humedecida de la porción superior del suelo, al final del día $i-1$ (mm); $P_{,i}$, es la precipitación en el día i (mm); $RO_{,i}$, es el escurrimiento del agua precipitada en la superficie del suelo en el día i (mm); $I_{,i}$, es la lámina de riego en el día i que se infiltra en el suelo (mm); $(K_e \cdot ET_0/f_{ew})$, es la evaporación a partir de la fracción f_{ew} de suelo humedecido y expuesto en el día i (mm); $T_{s,i}$, es la lámina de transpiración que ocurre en la fracción expuesta y humedecida de la capa superficial del suelo en el día i (mm); f_w , es la fracción de la superficie del suelo humedecida a través del riego (0,3 – 1); y f_{ew} , es la fracción del suelo humedecida expuesta a la radiación solar directa (0,01 – 1).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.16. Balance hídrico de la capa evaporativa de un suelo cultivado.

La fracción f_{ew} varía a lo largo del ciclo de crecimiento y desarrollo del cultivo en función del grado de cobertura, o sombreado, que el cultivo va ofreciendo, lo cual viene representado por la fracción f_c (Fig. 2.17). Cuando toda la superficie del suelo se humedece, por lluvia o riego por aspersión, la fracción de suelo humedecida y expuesta a la radiación solar directa f_{ew} iguala a $(1 - f_c)$, donde f_c es la fracción promedio del suelo cubierta por la vegetación (0 - 0,99).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.17. Las fracciones de cobertura (f_c) y de suelo humedecido (f_w) en los casos de humedecimiento por lluvia, riego por aspersión e inundación para las diferentes etapas del cultivo.

Si sólo una fracción f_w del suelo se humedece por el riego, f_{ew} depende también de f_w :

$$f_{ew} = \min(1 - f_c, f_w) \quad (2.44)$$

entendiéndose que f_{ew} es la fracción del suelo humedecida por el riego (0-1) que está expuesta a la radiación solar directa.

En cuanto al valor de f_c , puede ser estimado mediante la siguiente expresión empírica:

$$f_c = \left(\frac{K_{cb} - K_{c_{\min}}}{K_{c_{\max}} - K_{c_{\min}}} \right)^{I+0,5h} \quad (2.45)$$

donde: f_c , es la fracción efectiva de la superficie del suelo que se encuentra cubierta por la vegetación (0 – 0,99); K_{cb} , es el valor del coeficiente basal del cultivo para un día o periodo particular; $K_{c_{\min}}$, es el valor mínimo de K_c para un suelo sin cobertura y seco (0,15 – 0,20); $K_{c_{\max}}$, es el valor máximo de K_c inmediatamente después del humedecimiento (Ec. 2.41); y h , es la altura promedio de la planta (m).

Se debe utilizar con precaución la Ec. (2.45) y validarla a través de observaciones de campo. El valor de $K_{c_{\min}}$ representa el valor mínimo del coeficiente de cultivo para un suelo seco y desnudo, cuando la transpiración y evaporación en el suelo son cercanas a sus niveles basales (difusos). Se recomienda un valor de $K_{c_{\min}} = 0,15 - 0,20$. El valor de $K_{c_{\min}}$ constituye una parte integral de todos los coeficientes K_{cb} . Generalmente, $K_{c_{\min}}$ tiene el mismo valor que el de $K_{c_{in}}$ utilizado para cultivos anuales que se encuentran en condiciones de suelo casi descubierto (0,15 – 0,20).

En la Ec. (2.45), se asume que el valor de K_{cb} resulta afectado significativamente por la fracción del suelo cubierta por la vegetación. Esta consideración es acertada para la

mayoría de las condiciones y tipo de cubierta vegetal. El exponente $1 + 0,5h$, presente en la ecuación, viene a representar el efecto de la altura de la planta en el sombreado de la superficie del suelo, así como el incremento del valor de K_{cb} para un valor determinado de f_c . Se deberá limitar la diferencia $K_{cb} - K_{c_{min}}$ a $\geq 0,01$ para mantener la estabilidad numérica. El valor de f_c varía a medida que lo hace K_{cb} , aumentando hasta que K_{cb} alcanza su valor máximo, para luego decrecer con K_{cb} . Por lo tanto, la Ec. (2.45) se aplica diariamente.

La aplicación de la Ec. (2.45) predice la reducción del valor de f_c durante la etapa final en proporción al valor de K_{cb} , a pesar de que el suelo pueda permanecer cubierto por la vegetación senescente. Esta predicción ayuda a tomar en cuenta el transporte local de calor sensible desde las hojas senescentes hacia la superficie del suelo que se encuentra por debajo de las mismas.

El cálculo de D_e se realiza mediante un balance diario de agua en la capa superficial del suelo, de espesor $z_e = 100 - 200$ mm, conforme a la Ec. (2.43).

Al asumir que la capa superficial del suelo se encuentra a capacidad de campo, después de una lluvia importante o riego, el valor mínimo del agotamiento $D_{e,i}$ es igual a cero. A medida que se seca la superficie del suelo, aumenta el valor de $D_{e,i}$ y, en ausencia de algún evento de humedecimiento, $D_{e,i}$ alcanzará progresivamente su valor máximo TEW. En ese momento, no existirá agua en la capa superficial del suelo disponible para el proceso de evaporación, K_r será igual a cero, y el valor de $D_{e,i}$ se mantendrá igual a TEW hasta que la parte superior del suelo sea humedecido nuevamente. En consecuencia, los límites impuestos al valor de $D_{e,i}$ son: $0 \leq D_{e,i} \leq TEW$.

Para iniciar el balance de agua en la capa evaporante del suelo, se puede asumir que la capa superficial del suelo se encuentra cerca de la capacidad de campo después de una lluvia importante o riego, es decir, $D_{e,i-1} = 0$. En el caso que haya transcurrido un periodo largo de tiempo desde el último humedecimiento, se puede asumir que se ha agotado toda el agua evaporable de la capa superficial del suelo al comenzar los cálculos, es decir, $D_{e,i-1} = TEW = 1000 (\theta_{FC} - 0,5WP) z_e$.

El término P_i de la Ec. (2.43) representa la precipitación ocurrida en un día determinado. En el caso de que la precipitación del día ocurra en láminas menores de alrededor de $0,2ET_0$, se asume que la misma es normalmente evaporada en su totalidad, por lo que puede ser ignorada en el cálculo de K_e y en el balance de agua en el suelo.

La cantidad de agua precipitada que se pierde por escorrentía superficial depende de la intensidad de la lluvia, la pendiente del terreno, el tipo de suelo, sus condiciones hidráulicas y el contenido de humedad antecedente, el uso de la tierra y el tipo de cobertura. Para situaciones generales, puede asumirse un valor de RO_i igual a cero o ser estimado considerando solamente cierto porcentaje de P_i . En especial, esta consideración es válida cuando se considera el balance de agua en la capa superior del suelo, debido a que la mayoría de los eventos de precipitación que tengan intensidades o láminas lo suficientemente grandes como para causar escorrentía superficial, también, llevarán el contenido de humedad en la capa superior del suelo hasta su capacidad de campo. Por lo tanto, se podrá ignorar el impacto del componente del balance escorrentía superficial. Por otra parte, en general, los eventos ligeros de precipitación no producirán cantidades apreciables de escurrimiento superficial.

Exceptuando el caso de los cultivos con raíces superficiales (es decir, donde la profundidad máxima de la zona radicular es $< 0,5 - 0,6$ m), la cantidad de transpiración que ocurre en la capa evaporante del suelo es pequeña y puede ser despreciada, es decir $T_{s,i} = 0$. Por otra parte, en el caso de cultivos sembrados en hileras, la mayor parte del agua extraída por las raíces de las plantas es extraída por debajo de la cobertura vegetativa; por lo tanto, se puede asumir que la lámina $T_{s,i}$ que ocurre en la fracción f_{ew} de la superficie del suelo, es igual a cero en estos casos. Para los cultivos con raíces superficiales (es decir, con profundidad radicular $z_r \leq 0,5$ m), $T_{s,i}$ se puede calcular como sigue:

$$T_{s,i} = f_{ew} \left(\frac{z_e}{z_r} \right)^{0,6} \cdot (K_{cb,i} K_s) ET_{o,i} \quad (2.46)$$

en que todas las variables se refieren al día i .

El cálculo del balance diario de humedad en la capa superficial del suelo, incluso para el caso de cultivos de raíces profundas, es, en general, insensible al valor de $T_{s,i}$, debido a que $T_{s,i}$ representa una parte pequeña del flujo que ocurre en la capa z_e durante los 3-5 días primeros después de un evento de humedecimiento. Por lo tanto, en general, se puede ignorar el valor de $T_{s,i}$. Una forma alternativa de considerar los efectos de la reducción del contenido de humedad en la capa evaporante del suelo debido a $T_{s,i}$, cuando se ha asumido que $T_{s,i}$ está próxima a cero, es mediante la reducción del valor de z_e ; por ejemplo, de 0,15 a 0,12 m o de 0,10 a 0,08 m.

Mientras el contenido de humedad en la capa evaporante del suelo se encuentre por debajo de la capacidad de campo (es decir, $D_{e,i} < 0$), no habrá drenaje (percolación profunda) de agua en la capa superficial del suelo, y $DP_{e,i} = 0$.

Después de la ocurrencia de una lluvia interna o riego, el contenido de humedad en la capa superficial del suelo (capa z_e) podría Excel el valor de capacidad de campo. Sin embargo, se asume que el contenido de humedad del suelo será el correspondiente a capacidad de campo inmediatamente después de la ocurrencia del evento completo de humedecimiento, por lo que el valor del agotamiento $D_{e,i}$ en la Ec. (2.43) será igual a cero. El drenaje (percolación del agua que se produce a partir de la capa superficial del suelo se calcula según la fórmula: $DP_{e,i} = (P_{,i} - RO_{,i}) + I_{,i} / f_w - D_{e,i-1}$.

2.4.3. Aplicación a cubiertas vegetales cuyos coeficientes de cultivo se desconocen.

Para los cultivos de los que se desconoce los coeficientes de cultivo, pero de los que se conoce la fracción de cobertura del suelo por la vegetación, se puede estimar $K_{cb \text{ med}}$ mediante la Ec. (2.47), de Allen *et al.* (1998):

$$K_{cbmed} = K_{c \min} + (K_{cbh} - K_{c \min}) \left(\min \left(2f_c, f_{cef} \frac{1}{(1+h)} \right) \right) \quad (2.47)$$

donde: $K_{c \min}$, es el valor de K_c para el suelo seco y desnudo (0,15 – 0,20); K_{cbh} , es el valor máximo de K_{cb} para cultivos que cubren completamente el suelo teniendo la misma altura h ; \min , es la función que la selecciona el valor mínimo de los elementos incluidos en el

paréntesis; f_c , es la fracción de suelo cubierto por la vegetación; $f_{c\text{ ef}}$, es la fracción efectiva del suelo cubierta por la vegetación, obtenida a partir de f_c considerando el efecto de sombreado de la vegetación sobre el suelo desnudo; y h , es la altura promedio de los cultivos (m). Las estimaciones de f_c y $f_{c\text{ ef}}$, así como de h , se fijan al caracterizar la cubierta vegetal cuya ET se pretende calcular. Por otra parte, $K_{cb\ h}$ se puede estimar mediante la expresión siguiente:

$$K_{cb\ h} = \min[(1,0 + 0,1h), 1,2] + 0,04(U_2 - 2) - 0,004(HR_{\min} - 45) \left(\frac{h}{3}\right)^{0,3} \quad (2.48)$$

Cuando los cultivos se desarrollan en parcelas aisladas, $K_{cb\ h}$ deberá mayorizarse para tener en cuenta los efectos de advección local. Si la cubierta vegetal manifestara un alto grado de control estomático, $K_{cb\ h}$ deberá ser corregido por defecto.

2.4.4. Aplicabilidad de los coeficientes de cultivos medios y basales

En la Tabla 2.3, se recoge, según Allen *et al.* (1998), los criterios a considerar para seleccionar los métodos de cálculo de los coeficientes de cultivo. Como se puede verificar, la mayoría de los problemas prácticos que se plantean pueden ser resueltos recurriendo a los coeficientes de cultivos medios. La mayoría de los modelos de simulación usan esta aproximación; tal es el caso, por ejemplo, del programa KCISA (Rodríguez *et al.* 2000), incluido en el modelo ISAREG (Fig. 2.18). La elección del método de los coeficientes basales de cultivo pretende, esencialmente, conocer la cantidad de agua que es utilizada por los cultivos y la vegetación en el proceso de transpiración y la parte que es consumida como evaporación desde el suelo, siendo este análisis particularmente importante cuando se riega con frecuencia y se quiere saber qué medidas de gestión se pueden tomar para un uso más eficiente del agua. Lo mismo pasa con el riego de apoyo, al ser su objetivo maximizar el uso de la precipitación.

Tabla 2.3. Criterios para seleccionar los métodos de cálculo de los coeficientes de cultivo.

	Coefficientes de cultivo medio Kc	Coefficientes basales de cultivo K_{cb} + K_e
Finalidad de los cálculos:	<ul style="list-style-type: none"> * Planificación y proyecto de regadíos * Gestión de los regadíos * Programación del riego * Manejo del riego en tiempo real para riegos poco frecuentes (superficie y aspersión clásica) * Estudios de balance hídrico del suelo e hidrológico que no requieren análisis de los dos componentes de la ET 	<ul style="list-style-type: none"> * Investigación * Manejo del riego a tiempo real para riegos frecuentes (microirrigación y aspersión automatizada) * Riego de apoyo * Estudios de balances hídricos del suelo e hidrológicos en que se requiere el desglose de ET en transpiración y evaporación
Tiempo:	<ul style="list-style-type: none"> * Diario, 10 días y mensual (datos y cálculos) 	<ul style="list-style-type: none"> * Diario (datos y cálculos)
Medios para el cálculo:	<ul style="list-style-type: none"> * Gráfico * Calculadora * Ordenador 	<ul style="list-style-type: none"> * Ordenador

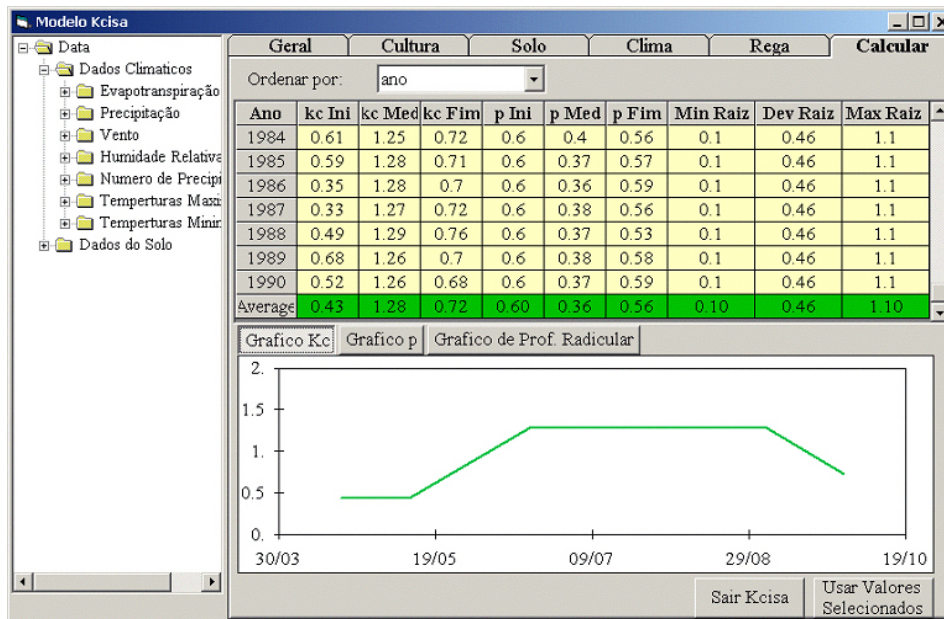


Figura 2.18. Menú del programa KCISA para calcular los coeficientes del cultivo.

2.5. Evapotranspiración de los cultivos que no alcanzan su rendimiento máximo

2.5.1. Coeficiente de estrés hídrico, K_s

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor de la ET del cultivo se manifiestan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente del estrés K_s .

El contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en dicha zona del perfil del suelo, D_r ; es decir, la cantidad de agua que falta con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento de humedad en la zona radicular es igual a cero ($D_r = 0$). Cuando se produce la extracción del agua a través del proceso de evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad, y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de D_r sea igual a RAW. Después de que el agotamiento en la zona radicular exceda a RAW (es decir, el contenido de agua es menor a un valor umbral θ_t), el agotamiento del agua será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radicular (Fig. 2.19).

La fracción de agua del suelo que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin experimentar estrés hídrico se denomina agua fácilmente aprovechable (extraíble) (Doorenbos y Pruitt, 1975; Allen *et al.*, 1998). La Tabla 2.1 recoge, para distintos cultivos, los valores de p , diferentes entre los cultivos. El factor p varía, normalmente, entre 0,30 para plantas de raíces poco profundas y tasas altas de ET_c ($> 8 \text{ mm día}^{-1}$). Un valor de 0,50 para p es utilizado comúnmente para una gran variedad de cultivos.

El valor de p está en función del poder evaporante de la atmósfera. Los valores de p presentados en la Tabla 2.1 serán mayores a tasas bajas de ET_c que a tasas altas de ET_c . Para condiciones atmosféricas cálidas y secas, donde el valor de ET_c es alto, p será 10 – 25 %

menor que los valores presentados en la Tabla 2.1, y el suelo se encontrará relativamente húmedo, aún cuando comiencen a ocurrir situaciones de estrés. Cuando la evapotranspiración del cultivo es baja, el valor de p será hasta 20 % mayor que los valores tabulados. Generalmente, se utiliza un valor constante de p para cada etapa específica del ciclo de crecimiento y desarrollo, en lugar de variar su valor para cada día. Una aproximación numérica para ajustar el valor de p de acuerdo a la tasa de ETc es: $p = p_{\text{tabla 2.1}} + 0,04 (5 - ETc)$, donde el valor ajustado es limitado a $0,1 \leq p \leq 0,8$ y el valor de ETc se expresa en mmdía^{-1} .

Es necesario reseñar que no es totalmente correcto expresar la tolerancia de los cultivos al estrés hídrico como una función de la fracción p . En realidad, la tasa de extracción del agua por parte de las raíces está influenciada más directamente por el nivel de energía potencial de agua del suelo (potencial matricial del suelo y la conductividad hidráulica asociada), que por el contenido del agua. Debido a que potenciales matriciales similares pueden corresponder a distintos tipos de suelos con diferentes contenidos de humedad, el valor de p , también, es función del tipo de suelo. En general, se puede establecer que, para suelos de textura fina (arcilla), los valores de p indicados en la Tabla 2.1 pueden ser reducidos en un 5-10 %, mientras que, para suelos de textura más ligera (arenosos), éstos pueden incrementarse en un 5-10 %.

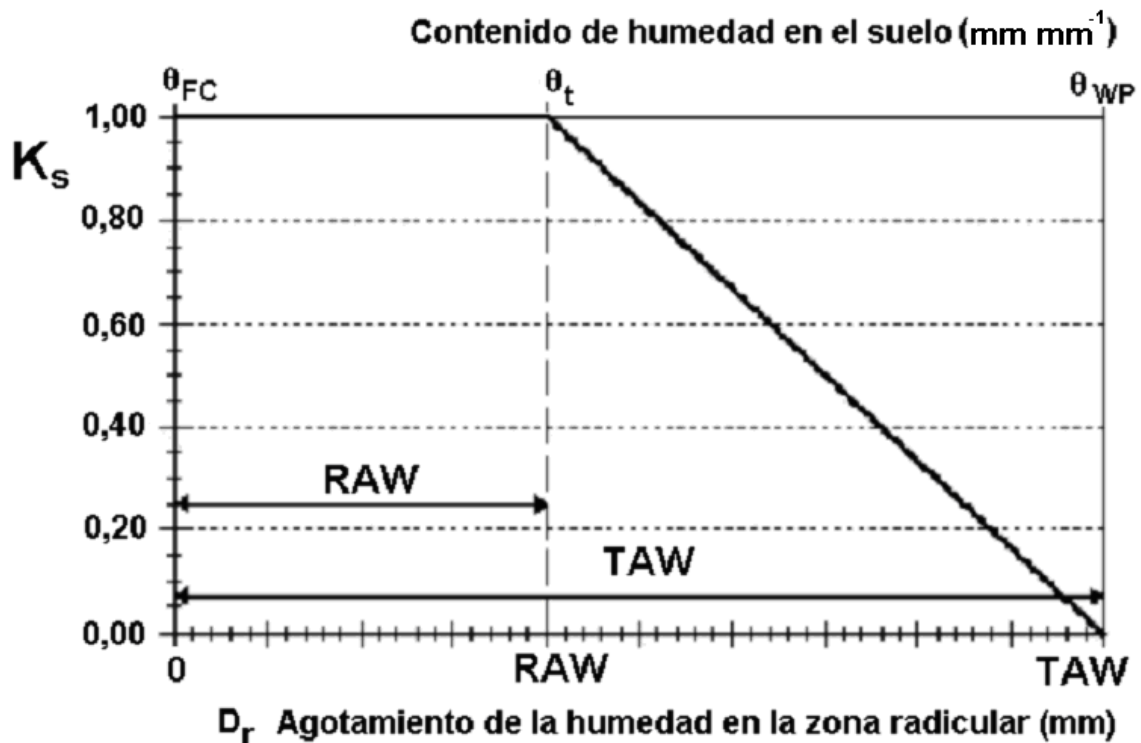
K_s resulta de la comparación entre la reserva real de agua en el suelo ($\theta_{FC} - \theta_{WP}$), tal como recogen las Ecs. (2.49a,b):

$$\frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \geq p \quad K_s = 1 \quad (2.49a)$$

$$\frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} < p \quad K_s = \frac{1}{p} \cdot \frac{\theta - \theta_{WP}}{\theta_{FC} - \theta_{WP}} \quad (2.49b)$$

donde: θ , es el contenido de agua del suelo en la zona radicular (m^3m^{-3}); θ_{FC} , es el contenido de agua a capacidad de campo (m^3m^{-3}); θ_{WP} , es el contenido de agua en el punto de marchitamiento (m^3m^{-3}); p , es la fracción de agotamiento de la humedad en el suelo; y K_s , es el coeficiente de estrés hídrico.

Cuando se prefiere recurrir al concepto de agotamiento máximo permisible (MAD) para el agua en el suelo, divulgado en la literatura de EE. UU., p es sustituido por MAD (expresado como fracción). Sin embargo, MAD es generalmente inferior a p , lo que supone admitir que el cultivo está sujeto a algún déficit hídrico. Los valores de MAD están influenciados por las prácticas de manejo y factores económicos, además de los factores físicos que influyen en el valor de p . En general, el valor de $MAD < p$ cuando se quiere evitar riesgos o imprevistos, y $MAD > p$ cuando se utiliza intencionadamente el estrés hídrico como práctica de manejo del agua del suelo. La utilización de p y MAD en la práctica se discute en el Capítulo 3.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.19. Coeficiente de estrés hídrico.

Cuando se pretende trabajar con láminas de agua disponibles en vez de contenidos de agua en el suelo, las Ecs. (2.49a,b) se sustituyen por la Ec. (2.50):

$$K_s = \frac{TAW - Dr}{TAW - RAW} = \frac{TAW - Dr}{(1 - p)TAW} \quad \text{para } Dr > RAW \quad (2.50)$$

donde: K_s , es el coeficiente de estrés hídrico (0-1); TAW, es el agua disponible total (mm), dado en función de θ_{FC} y θ_{WP} , así como de la profundidad radicular z_r ($TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) z_r$) (2.51); RAW, es el agua fácilmente utilizable (mm), función de TAW y de la fracción de agua que puede ser extraída sin causar estrés hídrico, p : $RAW = p TAW$ (2.52); y Dr , es la extracción de agua del suelo acumulada, la cuál se obtiene mediante el método del balance hídrico (diario) en el suelo cultivado (Capítulo 3).

Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que RAW, $K_s = 1,0$, como se puede comprobar en la Figura 2.19.

Una vez conocidos los valores de K_s , mediante las Ecs. (2.49) ó (2.50), la evapotranspiración del cultivo corregida para situaciones de déficit hídrico en el suelo se calcula como sigue:

$$ET_c = (K_s K_{cb} + K_e) ET_o \quad (2.53)$$

cuando se recurre al coeficiente basal del cultivo. Si se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$. Cuando no existan condiciones de estrés por falta de humedad del suelo, $K_s = 1$.

El coeficiente K_s describe el efecto del estrés hídrico en la transpiración del cultivo. Cuando se utiliza el coeficiente único del cultivo, el efecto del estrés hídrico se incorpora en el valor de K_c de la siguiente forma:

$$ET_c = K_s K_c ETo \quad (2.54)$$

Debido a que el coeficiente de estrés hídrico afecta solamente a la transpiración del cultivo, y no a la evaporación en el suelo, la aplicación del coeficiente K_s utilizando la E_c (2.53) es, en general, de mayor validez que su aplicación a través de la E_c (2.54). Sin embargo, en los casos donde la evaporación en el suelo no sea un componente importante de la ETo , se obtendrán resultados razonables a través de la E_c (2.54).

2.5.2. Coeficiente de estrés K_s por salinidad

La metodología propuesta por Ayers y Westcot (1985) asume que, bajo condiciones óptimas de manejo, la productividad del cultivo permanece a sus niveles potenciales hasta el momento en que aparece el valor umbral específico de conductividad eléctrica en la solución del agua del suelo. Cuando la salinidad se incrementa por encima de ese valor umbral, la productividad del cultivo disminuirá linealmente en proporción al incremento de la salinidad. La salinidad del suelo se expresa en la forma de conductividad eléctrica en el extracto de saturación, EC_e .

Los efectos de la salinidad en el rendimiento de los cultivos pueden estimarse mediante la expresión siguiente (Ayers y Westcot, 1985):

$$\frac{Y_a}{Y_m} = 1 - (EC_e - EC_{e_{umbral}}) \frac{b}{100} \quad \text{cuando } EC_e > EC_{e_{umbral}} \quad (2.55)$$

donde: Y_a , es el rendimiento real del cultivo; Y_m , es el rendimiento máximo esperado del cultivo cuando $EC_e < EC_{e_{umbral}}$; EC_e , es la conductividad eléctrica promedio del extracto de saturación en la zona radicular (dSm^{-1}); $EC_{e_{umbral}}$, es la conductividad eléctrica del extracto de saturación, correspondiente al umbral de EC_e , cuando el rendimiento del cultivo comienza a reducirse por primera vez por debajo de Y_m (dSm^{-1}); y b , es la reducción del rendimiento por incremento de EC_e [$\%/(dSm^{-1})$].

Los valores de $EC_{e_{umbral}}$ y b están tabulados en numerosas publicaciones para diferentes cultivos (Ayers y Westcot, 1985; Rhoades *et al.*, 1992; Allen *et al.*, 1998).

Cuando el estrés por salinidad ocurre sin la presencia de estrés hídrico, es posible expresar K_s como sigue (Allen *et al.*, 1998):

$$K_s = 1 - \frac{b}{K_y \cdot 100} (EC_e - EC_{e_{umbral}}) \quad (2.56a)$$

donde: K_s , es el cociente $ET_{c_{aj}} / ET_c$; $ET_{c_{aj}}$, es la evapotranspiración ajustada (real) del cultivo ($mmdía^{-1}$) (Ecs. 2.53 y 2.54); ET_c , es la evapotranspiración del cultivo en condiciones estándar ($mmdía^{-1}$); b , es la reducción del rendimiento por incremento de EC [$\%/(dSm^{-1})$]; K_y , es el factor de respuesta del rendimiento; EC_e , es la conductividad eléctrica promedio del

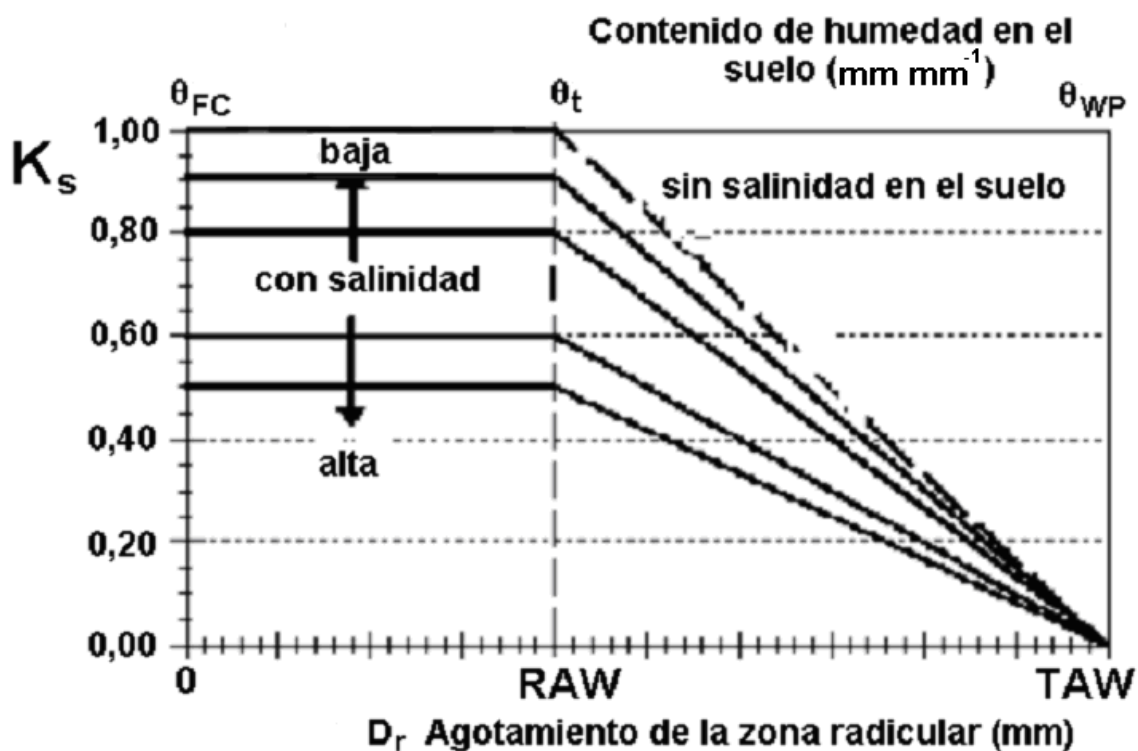
extracto de saturación en la zona radicular (dSm^{-1}); y $\text{ECe}_{\text{umbral}}$, es la conductividad eléctrica del extracto de saturación, correspondiente al umbral de ECe , cuando el rendimiento del cultivo comienza a reducirse por primera vez por debajo de Ym (dSm^{-1}).

La Ec. (2.56a) es válida para condiciones donde $\text{ECe} > \text{ECe}_{\text{umbral}}$ y el agotamiento de humedad del suelo es menor a la lámina de agua fácilmente extraíble del suelo ($\text{Dr} < \text{RAW}$).

Cuando el estrés hídrico ocurre simultáneamente con el estrés por salinidad, se puede combinar la Ec. (2.50) y la Ec. (2.56a) para obtener la siguiente expresión:

$$K_s = \left(1 - \frac{b}{K_y \cdot 100} (\text{ECe} - \text{ECe}_{\text{umbral}}) \right) \left(\frac{\text{TAW} - \text{Dr}}{\text{TAW} - \text{RAW}} \right) \quad (2.56b)$$

La Ec. (2.56b) es válida para las situaciones donde $\text{Ece} > \text{EC}_{\text{umbral}}$ y $\text{Dr} > \text{RAW}$. En la Figura 2.20, se ilustra el impacto de la reducción de K_s a medida que se incrementa la salinidad. Es de reseñar que la metodología asume que el valor de RAW (y p) no cambia a medida que se incrementa la salinidad. Para algunos cultivos, esta consideración podría ser cuestionable.



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 2.20. Coeficiente de estrés debido a la acción conjunta de déficit hídrico en el suelo y de la salinidad. El valor límite θ_z depende del cultivo, tanto en término de salinidad como de sensibilidad al estrés hídrico.

2.5.3. Corrección de la evapotranspiración del cultivo considerando el manejo del mismo

Cuando el cultivo tiene una cobertura o un desarrollo inferior al esperado para las condiciones ambientales dominantes, debido a unas no muy buenas prácticas culturales (época y dosis de siembra, manejo del suelo, control de malas hierbas, plagas y enfermedades, fertilización y riego), la ET deberá ser corregida para la etapa media y final del ciclo de crecimiento y desarrollo. En estas circunstancias, se puede recurrir a relaciones empíricas basadas en la cobertura vegetal, las cuales pueden ser aplicadas tanto a los coeficientes únicos de cultivo como a los coeficientes basales de cultivo.

a) Un procedimiento sencillo consiste en recurrir a un factor de corrección de los K_c :

$$K_c = K_{c\text{ tab}} - A_{cm} \quad (2.57)$$

donde: K_c , es el coeficiente $K_{c\text{ real}}$, conforme al grado de cobertura del suelo o de desarrollo del cultivo y observaciones en el campo ($K_{c\text{ med}}$ o $K_{cb\text{ med}}$); $K_{c\text{ tab}}$, es el valor $K_{c\text{ med}}$ de la Tabla 2.1, pero ajustado al clima [Ec. (2.19)]; y A_{cm} , es el factor de corrección [Ec. (2.58)].

Los factores de corrección, A_{cm} , pueden calcularse mediante la siguiente expresión:

$$A_{cm} = 1 - \left(\frac{LAI}{LAI_{denso}} \right)^{0,5} \quad (2.58)$$

donde: LAI, es el índice de área foliar del cultivo en estudio; y LAI_{denso} , es el índice de área foliar del mismo cultivo cuando se cultiva con las técnicas culturales propias para la obtención del rendimiento máximo. Como alternativa, por ser más fácil de observar, los valores de LAI pueden sustituirse por los de la fracción de suelo cubierta por el cultivo, f_c , resultando:

$$A_{cm} = 1 - \left(\frac{f_c}{f_{c\text{ denso}}} \right)^{0,5} \quad (2.59)$$

En principio, la corrección mediante la Ec. (2.57) no se aplica a los coeficientes de cultivo medios cuando el riego es frecuente, ya que la evaporación desde el suelo compensa la reducción de la transpiración. En estas condiciones, deberá aplicarse sólo a los K_{cb} .

b) El segundo procedimiento posible es recurrir a la función de Stewart (Doorenbos y Kassam, 1979). Esta función, lineal y sencilla, describe la relación entre el uso del agua por el cultivo y los rendimientos del mismo, siendo útil para predecir la reducción en el rendimiento cuando el estrés hídrico es inducido por la falta de agua del suelo:

$$\left(1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right) = K_y \left(1 - \frac{ET_a}{ET_m} \right) \quad (2.60)$$

donde: Y_a , es el rendimiento real del cultivo (kg ha^{-1}); Y_m , es el rendimiento esperado en ausencia de estrés (kg ha^{-1}); K_y , es el factor de respuesta del cultivo al déficit hídrico; ET_a , es la evapotranspiración real del cultivo, calculada para las condiciones reales de estrés hídrico,

salinidad o debida a un manejo inadecuado del cultivo con labores y operaciones lejanas del óptimo (mm); y ET_m, es la evapotranspiración del cultivo que cabe esperar en ausencia de estrés (mm).

De la Ec. (2.60), se puede obtener la siguiente relación:

$$K_s = 1 - \frac{1}{K_y} \left(1 - \frac{Y_a}{Y_m} \right) \quad (2.61)$$

Los valores de K_s pueden llevarse a las Ecs. (2.53 y 2.54) y obtener la ET_c corregida. Naturalmente, los resultados son aproximados, pero no dejan de ser coherentes con la realidad. No obstante, este procedimiento no es del todo válido cuando se pretende estimar la ET_c a escala diaria o semanal.

c) Un tercer procedimiento consiste en estimar el K_{cb med} para cultivos poco densos debido a las prácticas de gestión o a un manejo deficiente (o para vegetación natural). Este procedimiento, eventualmente más preciso que los anteriores, pero que exige un mayor conocimiento de los cultivos o de la vegetación en estudio, recurre a la ecuación siguiente (Allen *et al.*, 1998):

$$K_{cb\ med} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) (1 - \exp [-0,7\ LAI]) \quad (2.62)$$

donde: K_{cb med}, es el valor estimado para K_{cb} en la etapa media del ciclo para parcelas cultivadas con densidades poblacionales o LAI inferiores a los normales que se alcanzan cuando la cubierta vegetal logra su desarrollo completo; K_{c full}, es el valor de K_{cb} en la etapa media del ciclo (cuando las plantas alcanzan su pleno desarrollo o máxima altura) para cubiertas que cubren totalmente el suelo o alcanzan un LAI > 3; K_{c min}, es el mínimo valor de K_c en un suelo desnudo (0,15 – 0,20), pero en presencia de vegetación; y LAI, es el índice de área foliar (m²m⁻²).

Como alternativa, cuando sólo se disponga de estimaciones de la fracción de suelo efectivamente cubierta por la vegetación, se puede estimar K_{cb med} por la Ec. (2.63):

$$K_{cb\ med} = K_{c\ min} + (K_{cb\ full} - K_{c\ min}) \left(\min \left(1, 2f_c, (f_{c\ eff})^{\left(\frac{1}{1+h}\right)} \right) \right) \quad (2.63)$$

donde: K_{cb med}, es el valor estimado para K_{cb} en la etapa media para cubiertas con densidades poblacionales o LAI inferiores a los normales, cuando la vegetación alcanza un grado de desarrollo completo; K_{c min}, es el valor mínimo de K_c para un suelo desnudo (0,05 – 0,20), pero con presencia de vegetación; K_{cb full}, es el valor estimado para K_{cb} en la etapa media del ciclo de crecimiento y desarrollo (cuando las plantas alcanzan el pleno desarrollo o la máxima altura) para cubiertas que cubren totalmente el suelo o alcanzan valores de LAI > 3; f_c, es la fracción de suelo cubierta por la vegetación y observada desde la vertical (0,01 – 1); f_{c eff}, es la fracción efectiva del suelo sombreada por la vegetación (0,01 – 1); h, es la altura de las plantas (m); y “min”, es la función que selecciona el valor menor de los elementos incluidos entre los paréntesis.

Las nuevas aproximaciones a los coeficientes de cultivo para el cálculo de la evapotranspiración de los mismos pretenden, con un soporte teórico suficiente, propiciar procedimientos de cálculo adecuado para la ingeniería del riego, tanto para su planificación y proyectos como para el manejo del riego a tiempo real. Por otro lado, no siendo posible recurrir, de forma generalizada, a los cálculos directos de la evapotranspiración real con la aplicación de las resistencias aerodinámicas y de cultivo, el uso de los coeficientes supera el empirismo puesto que éstos traducen las relaciones entre tales resistencias para el cultivo de referencia y para el cultivo en estudio. Por otro lado, es posible estandarizar los coeficientes de cultivo desde que se viene utilizando los procedimientos de cálculo y la descripción de los cultivos se basa en las observaciones de campo. De igual forma, es posible aproximaciones razonablemente precisas a los coeficientes de cultivo de cubiertas vegetales que no corresponden a los patrones culturales normales.

CAPÍTULO 3

BALANCE HÍDRICO DEL SUELO Y NECESIDADES DE RIEGO

3.1. Introducción

El conocimiento del balance hídrico del suelo en la zona radicular es fundamental para una buena gestión del agua en regadío. Para un manejo adecuado del riego, es necesario responder a tres preguntas: cuándo, cuánto y cómo regar. La respuesta dependerá del grado de conocimiento de los procesos ligados a las transferencias hídricas en la zona de enraizamiento del cultivo regado entre las plantas, el suelo y la atmósfera.

El cultivo es el objetivo de interés, por lo que las manifestaciones fisiológicas de las plantas debidas al déficit hídrico deberán servir como indicadores para determinar cuando regar. Estos indicadores fisiológicos pueden tener carácter empírico, como los relativos al aspecto vegetativo del cultivo (color, turgidez, enrollamiento de las hojas, etc.), o constituir métodos científicos, como los relativos al potencial de agua en las hojas y la temperatura de la cubierta vegetal. Por otro lado, podrán servir de modelo para la calibración práctica de los métodos basados en la medición de los procesos que se producen en un medio donde el cultivo se desarrolla, la atmósfera y el suelo. Son ejemplos, la medición de flujo de la savia para estimar la tasa de transpiración del cultivo, la utilización de mediciones de variables meteorológicas para estimar la ET del cultivo (que se expusieron en los capítulos anteriores), la observación de la tasa de variación del contenido de agua en el suelo (por métodos como el gravimétrico, de la sonda de neutrones o de la reflectometría en el dominio del tiempo (“Time Domain Reflectometry”, TDR), o del potencial del agua en el suelo (por ejemplo, utilizando tensiómetros). En todos los casos, las variables observadas permiten optimizar la decisión relativa a la oportunidad del riego, siempre que los métodos estén calibrados o validados para el cultivo y el ambiente donde éste se desarrolla.

Sin embargo, éstos, u otros métodos, no pueden prescindir de los procesos de transferencia hídrica en el suelo, pues éste constituye el medio donde se efectúa el almacenamiento y el transporte de agua hasta las raíces de la planta. Sin embargo, el papel del suelo es menos importante en el caso del riego con pequeñas dosis y de alta frecuencia, ya que la dosis tiende a ser igual al consumo (debiendo, con todo esto, prevenir los riesgos de salinización de la zona de enraizamiento). Pero, la dosis de riego no tendrá que depender solamente del intervalo entre riegos o de la extracción del agua por las plantas y evaporación, sino, también, de la reserva de agua del suelo y de la posibilidad de que se produzcan aportaciones de agua a partir de las capas más profundas del suelo, o a partir de la capa freática, a través de la ascensión capilar. Por otro lado, se puede producir percolación profunda más allá de la zona radicular (drenaje) si las dosis son excesivas, arrastrando fertilizantes, como puede suceder si se aplican dosis mayoradas de una fracción de lavado destinada al control de la salinidad. La dosis a aplicar depende, también, del método del riego utilizado (como se analizará en capítulos posteriores). Por otra parte, valores bajos de tasa de infiltración y distribución de agua en el suelo condicionan la aplicación de agua a la parcela.

El manejo del riego deberá entenderse como la combinación óptima entre las necesidades hídricas del cultivo, las características del suelo, tanto como medio de transporte como de almacenamiento de agua, y la aplicación del agua a la parcela, con sus condicionantes técnico-económicos y sociales. Por eso, el conocimiento de lo que sucede al agua en el suelo es importante en la gestión del riego. La determinación del balance hídrico del suelo en la zona de enraizamiento, con la respectiva cuantificación de los términos que lo constituyen, y la caracterización de los modelos de los procesos de transferencia hídrica (modelos de extracción radicular y de escorrentía del agua en el suelo), es una necesidad determinante para la gestión del riego, para su mejora y optimización.

En el Anexo 2, se explican los conceptos fundamentales sobre las características físicas del suelo y sobre el contenido de agua del suelo relevantes para el tratamiento del balance hídrico del suelo.

3.2. Balance hídrico en la zona explorada por las raíces

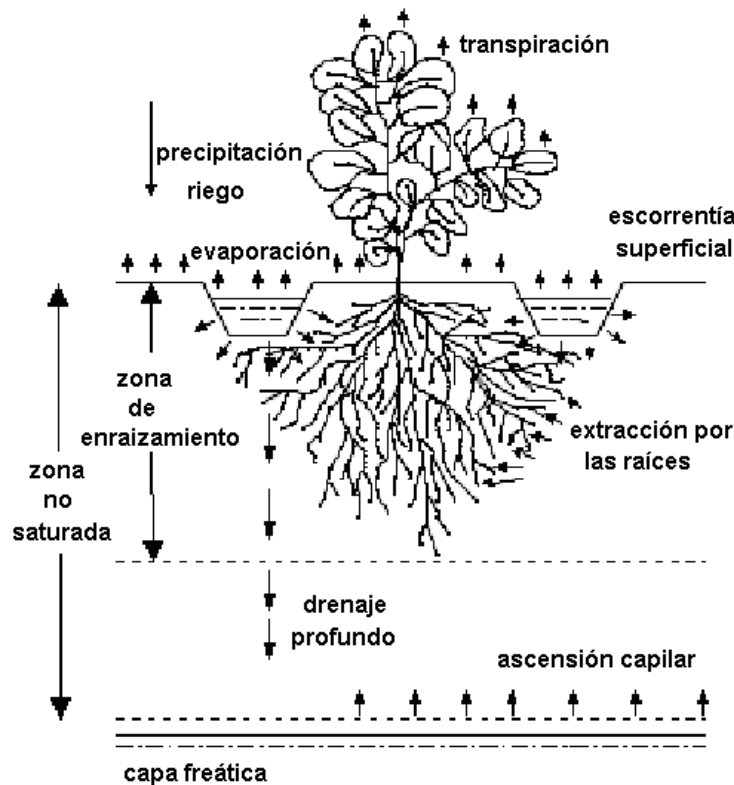
3.2.1. Formulación

La ecuación general del balance hídrico en la zona de enraizamiento (Fig. 3.1), para un intervalo de tiempo Δt (días), y para una capa de suelo de espesor Δz (m), correspondiente a la zona de enraizamiento, es dada por:

$$(\Delta S + \Delta V) = (P + I + GW) - (Q_r + DP + E + T) \quad (3.1)$$

donde: ΔS , es la variación de la reserva de agua en el suelo; ΔV , es el incremento de agua incorporada en las plantas (el agua de constitución); P , es la precipitación; I , es la dosis de riego; GW , es el flujo acumulado de ascensión capilar en el período Δt ; Q_r , es la escorrentía superficial en ese mismo período; DP , es el flujo acumulado de drenaje por percolación profunda; E , es la evaporación a partir del suelo; y T , es la transpiración de las plantas.

La Ec. (3.1) se aplica entre la superficie del suelo y una profundidad z_r (Fig. 3.1), para cualquier intervalo de tiempo Δt . Todas las cantidades referidas en la Ec. (3.1) se expresan en volumen por unidad de área (L^3/L^2), siendo más común en mm (acumulados para el intervalo Δt).



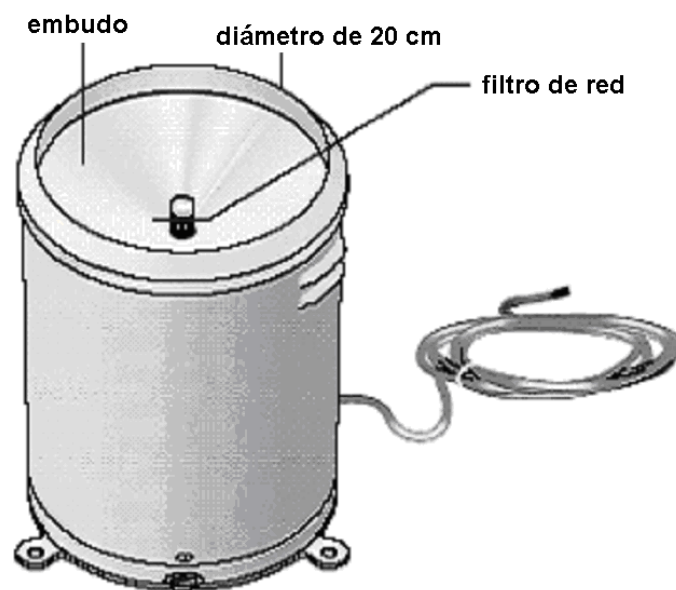
Fuente: Fernando (1998).

Figura. 3.1. Esquema de los términos del balance hídrico de la zona de enraizamiento.

El incremento de agua incorporada en las plantas (ΔV) tiene un valor insignificante en el conjunto del balance hídrico; la variación de la masa vegetativa fresca multiplicada por el factor 0,80 se aproxima a su valor. Por ejemplo, para una producción de 50.000 kg/ha de masa vegetativa fresca, cerca del 80% es agua de constitución; por tanto, $50.000 \times 0,80 = 40.000$ kg/ha de agua dará un volumen de $40 \text{ m}^3/\text{ha}$. Los consumos totales de agua (ETc) para producir esa masa vegetativa son del orden de 4.000 a $6.000 \text{ m}^3/\text{ha}$; ΔV representa menos del 1% de la evapotranspiración del cultivo.

3.2.2. Determinación de los términos de balance hídrico

La precipitación se determina fácilmente; es la medida realizada con pluviómetros (Fig. 3.2), aunque, también, pueden ser utilizados registros de estaciones meteorológicas próximas al lugar de estudio, que representen dicho área convenientemente.



Fuente: Campbell Scientific (2003).

Figura 3.2. Pluviómetro con registro en el sistema de adquisición de datos.

La medición de la dosis de riego puede presentar algunas dificultades, especialmente en riego por superficie y por aspersión, debido a la gran variación de la geometría del itinerario del agua que tiene que recorrer (variación de la sección, rugosidad de la superficie), a las variaciones de la tasa de infiltración del suelo, a las “pérdidas” por infiltración en las regaderas o en las tuberías y a las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento (aspersión). En riego por superficie, se usan varios tipos de medidores de caudales, (Fig. 3.3): de garganta estrecha (usada cuando hay gran cantidad de sedimentos transportados) o descargadores (Clemmens *et al.*, 2001). En riego con presión, se usan medidores insertos en la tubería o utilizando el principio de Venturi, como se recoge, por ejemplo, en el Capítulo 6. Las cantidades infiltradas y retenidas en la zona radicular pueden ser estimadas recurriendo al concepto de eficiencia de riego cuando ésta se registra a través de las evaluaciones de campo, como se expone en los Capítulos 4 a 6.



Figura 3.3. Medidor de caudales admitidos en un cantero de arroz.

La escorrentía superficial es un término importante en ciertas situaciones, pero, a veces, de difícil determinación. En general, se puede despreciar, pero habrá que considerarla en terrenos con pendientes pronunciadas y cuando llueva intensamente. En riego por superficie, la escorrentía al final de la parcela deberá ser cuantificada, recurriendo a mediciones de los caudales en las zanjas donde las aguas sobrantes son conducidas.

Los términos de variación de la reserva de agua en el suelo, evaporación, transpiración, ascensión capilar y percolación profunda son los de más difícil determinación. Normalmente, la evaporación y la transpiración determinan la evapotranspiración; su estimación se detalló en los capítulos anteriores.

La variación de la reserva de agua en el suelo en el intervalo Δt es función del contenido de humedad del mismo (θ), el cuál varía en profundidad (z) y en el tiempo (t). Para su determinación, es necesario realizar mediciones de contenido de humedad a diferentes profundidades y en distintos momentos. El contenido de humedad puede ser medido recurriendo al método gravimétrico, que es un método directo que obliga a la recogida de muestras de suelo (Fig. 3.4) y a su pesada antes y después del secado en la estufa. Es más común, y generalmente más fácil y más preciso, recurrir a métodos indirectos como: la termalización neutrónica, cuyo instrumento de medida es la sonda de neutrones (Fig. 3.5), la medición del tiempo que tarda un pulso electromagnético en viajar a través de unos electrodos de metal colocados en el suelo (son dos TDR; Fig. 3.6), tiempo de viaje que es función de la constante dieléctrica del suelo que, a su vez, varía con su contenido de humedad, y/o con la técnica de la reflectometría en el dominio de la frecuencia (“Frequency Domain Reflectometry”, FDR), basada en la capacitancia, que determina la permisividad dieléctrica del suelo al medir el tiempo de carga de un condensador que utiliza el suelo como un dieléctrico, estando aquella directamente relacionada con el contenido de agua (Fig. 3.7).



Fuente : Soil Moisture Instruments (2003).

Figura 3.4. Sonda de caña para la toma de muestras de suelo en la determinación de humedad del suelo por el método gravimétrico, o para estimar esa humedad mediante el tacto.



Figura 3.5. Sonda de neutrones.



Fuente: Campbell Scientific (2003).

Figura 3.6. Sondas TDR: diversos modelos y formas de instalación.



Fuentes: Aquagri (2003), Sentek (2003).

Figura 3.7. Tubo de acceso (centro) y dos tipos de sensores capacitativos para medir la humedad del suelo.

El término drenaje se utiliza para describir el flujo de agua del suelo por debajo de la zona radicular, mientras que el movimiento del agua en profundidad, a través del suelo, se denomina percolación profunda. La ascensión capilar y el drenaje, en pequeñas parcelas de pequeña pendiente, constituyen escorrentías de agua en el suelo con sentido opuesto; son, por esta razón, también, consideradas globalmente con frecuencia. En casos de terrenos con fuertes pendientes, puede existir una componente horizontal del drenaje cuando el contenido de humedad del suelo está próximo a la saturación, lo que creará a dificultades en los cálculos. Sin embargo, siendo raro, tanto más cuando, en esas condiciones, se tiende a recurrir a pequeñas dosis de alta frecuencia, no se trata aquí.

El agua en el suelo se puede mover en flujo saturado, en flujo no saturado y en forma de vapor. El movimiento del agua en condiciones no saturadas, también, se denomina movimiento capilar e incluye el movimiento de ascensión capilar desde una capa freática.

El flujo de agua líquida (en suelo saturado o no saturado) responde siempre a un gradiente de potencial. En condiciones de saturación, el agua que, por exceso, no puede ser retenida por la matriz del suelo recibe el nombre de agua gravitacional o agua de drenaje.

La conductividad hidráulica es la propiedad hidráulica más importante que afecta al flujo de agua y al transporte de solutos en el suelo. Es importante para determinar las tasas máximas de infiltración (en condiciones de saturación), la capacidad de campo, el flujo de agua en el suelo no saturado, la resistencia al flujo de agua hacia las raíces y el drenaje de un suelo saturado.

La conductividad hidráulica hace referencia al factor de proporcionalidad de la ley de Darcy aplicada al flujo viscoso de agua en el suelo. La ley de Darcy aplicada a un medio poroso no saturado, como es el suelo, expresada en forma diferencial, y en un sistema unidimensional, describe la densidad de los flujos de drenaje y de ascensión capilar, que

tienen la misma dirección y sentido opuesto; se puede expresar mediante las dos fórmulas siguientes:

$$J_w = -K(\theta) \frac{d\psi}{dz} \quad (3.2a)$$

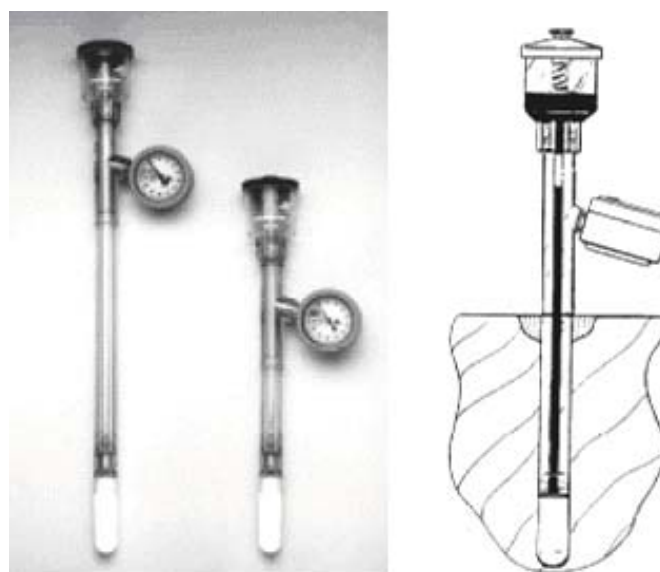
ó

$$\varphi_z = -K(\theta) \frac{dH}{dz} \quad (3.2b)$$

donde: J_w , es la densidad de flujo de agua ($\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-1}$); $K(\theta)$, es la conductividad hidráulica, que es función del contenido de agua (θ) en el suelo ($\text{kg}\text{s}^{-1}\text{m}^{-3}$); $d\psi/dz$, es el gradiente de potencial de agua en el suelo (ms^{-2}); φ_z , son los flujos de drenaje y de ascensión capilar (mmdía^{-1}); $K(\theta)$ de la Ec. (3.2b), conductividad hidráulica (mmdía^{-1}); H , es la carga hidráulica (energía potencial por unidad de peso, expresada frecuentemente en altura equivalente de agua, m); y dH/dz , es el gradiente hidráulico, cuyo signo define el sentido del movimiento del agua en el suelo.

Considerando el eje Oz orientado positivamente hacia abajo (profundidades crecientes a partir de la superficie del suelo), $dH/dz > 0$ significa un flujo ascendente o de ascensión capilar; por tanto, $\varphi_z < 0$. $dH/dz < 0$ corresponde a un flujo de drenaje descendente; por tanto, $\varphi_z > 0$. La carga hidráulica es función del contenido de humedad del suelo [$H = H(\theta)$], siendo, también, función del espacio y del tiempo [$H(z,t)$]. Para un determinado momento, los perfiles de carga hidráulica del suelo indican las zonas del suelo donde se producen flujos ascendentes o descendentes.

La carga hidráulica se mide generalmente con tensiómetros (Fig. 3.8); sin embargo, siendo ésta la mejor forma de medición, sucede que los tensiómetros solamente funcionan para valores relativamente elevados de contenido de humedad, no siendo capaces de medir en suelos muy secos. Sin embargo, los límites inferiores raramente se alcanzan en suelos regados.



Fuente: Soil Moisture Instruments (2003).

Figura 3.8. Tensiómetros y su instalación en el suelo.

La carga hidráulica puede, además, ser calculada a partir de mediciones de contenido de humedad utilizando la relación de la curva característica de agua del suelo, entre la presión efectiva del agua del suelo y el contenido de humedad [$H = H(\theta)$]. También, pueden ser utilizados otros métodos y equipos para medir la presión efectiva del agua del suelo; por ejemplo, los psicrómetros de termopares, especialmente para contenidos de humedad relativamente bajos, que miden la humedad relativa del aire en equilibrio con una muestra de suelo; es un método bastante preciso para medir el potencial mátrico y osmótico del agua en el suelo.

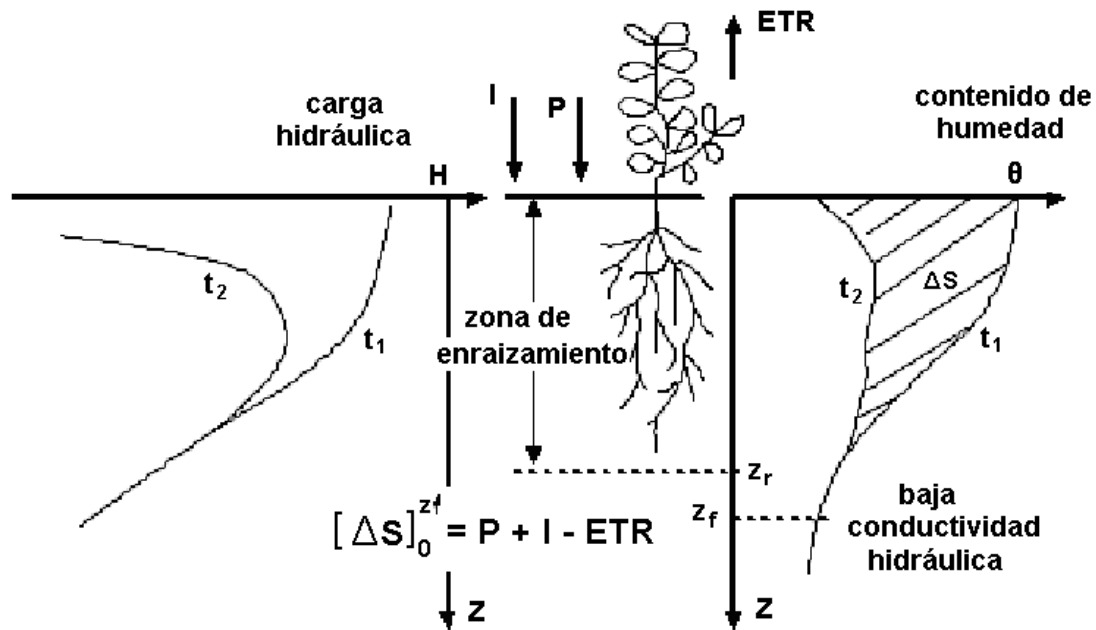
3.3. Aplicación del balance hídrico para estimar los consumos de agua de los cultivos

La Ec. (3.1) puede utilizarse para determinar la evapotranspiración de un cultivo y evaluar la forma de programar el riego. En este caso, es necesario conocer los flujos de agua en el suelo, pudiendo realizarse varias aproximaciones. La primera aproximación se aplica esencialmente a regímenes de sequía, aunque puede ser aplicada a regadío en períodos entre riegos de bajas dosis; considera que las escorrentías, tanto superficiales como internas del suelo, son insignificantes ($\Delta V = 0$, $GW = 0$, $Q_r = 0$ y $DP = 0$). La Ec. (3.1) adopta la forma más simple posible:

$$(\Delta S) = P + I - ETR \quad (3.3)$$

donde: $ETR = T + E$, es la evapotranspiración real del cultivo, la cuál depende de la disponibilidad del agua en el suelo; ésto es, $ETR = ET_c(\theta)$. El símbolo ETR se utiliza de manera que signifique indistintamente ET_a y ET_m , conforme se definen en 2.5.3. La Figura 3.2 presenta un esquema de una situación donde se aplican las restricciones siguientes, que hacen posible la aplicación de esta aproximación (Ec. 3.3):

- Variación insignificante del contenido de humedad en las capas más profundas del suelo; es decir, a la profundidad z_f no hay variación del contenido de humedad entre los instantes t_1 y t_2 entre los que se realiza el balance.
- Bajo valor del contenido de humedad en las capas más profundas (corresponde a tener un valor bajo de la conductividad hidráulica y , por tanto, un drenaje insignificante).
- Terrenos con poca pendiente y precipitaciones de intensidad reducida.



Fuente: Fernando (1998).

Figura 3.9. Esquema del balance hídrico en el intervalo entre los instantes t₁ y t₂ cuando se pueden despreciar los flujos de ascensión capilar y de percolación (Ec. 3.3).

La Ec.(3.3) se puede aplicar a situaciones donde toda el agua de riego, o de la precipitación, se infiltra, pero no hay humedecimiento de las capas más profundas (Fig. 3.9). En éstas, la humedad permanece constante, a valores bajos, correspondiendo a situaciones de baja conductividad hidráulica del suelo. Los perfiles de carga hidráulica indican la presencia de flujos de drenaje a la profundidad z_f; éstos tienen baja intensidad y pueden ser despreciados.

Si no existe variación de humedad en las capas profundas, pero los valores de contenido de humedad fuesen altos, se puede producir escorrentía en profundidad, en régimen cuasi permanente, siempre y cuando exista un gradiente de potencial; en este caso, la Ec. (3.3) no se aplica.

En regadío, rara vez, se utiliza esta aproximación simplificada (Ec. 3.3), exceptuando cuando se riega con pequeñas dosis y alta frecuencia. No se aplica en riego por superficie, donde las dosis son elevadas y se produce variación de humedad en las capas más profundas del suelo, siendo frecuentemente la aparición de percolación y pudiendo establecerse un régimen de drenaje permanente. Para cultivos regados y dotaciones altas, es necesario cuantificar los flujos de agua en el suelo, y la Ec.(3.1) adopta la forma (con ΔV = 0 y R = 0):

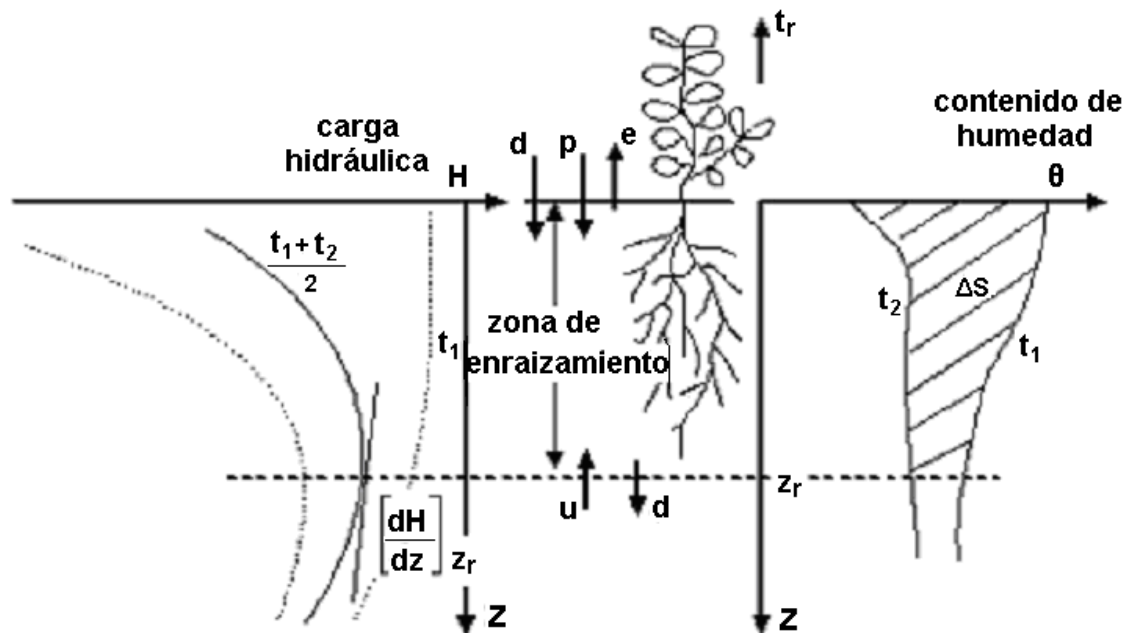
$$(\Delta S) = P + I - E - T - DP + GW \quad (3.4)$$

Después del riego, es normal que se produzca drenaje en las capas profundas del suelo ó, exactamente, percolación más allá de la zona explorada por las raíces. A medida que la planta va utilizando el agua del suelo, el sentido de la escorrentía se puede invertir y las capas de suelo debajo de la zona radicular pasan a suministrar agua a las capas superiores. Este comportamiento es más evidente cuando existe una capa freática próxima a la zona explotada por las raíces.

Derivando la Ec. (3.4) con respecto al tiempo, se obtiene la tasa de variación de la reserva de agua:

$$\frac{dS}{dt} = p + i - e - tr - dp + gw \quad (3.5)$$

donde: los símbolos en minúscula representan las tasas de variación temporal de los correspondientes valores integrados expresados en la Ec. (3.4), con unidades de alturas de agua por unidad de tiempo (LT^{-1}), generalmente $mmdía^{-1}$. El primer elemento de la Ec. (3.5) representa la tasa de variación de la reserva del agua en el suelo. El segundo elemento de la Ec. (3.5) representa la suma algebraica de los flujos de agua en el sistema; los términos p , i y e son los flujos de precipitación, de riego y de evaporación que se producen en el límite superior de la zona de enraizamiento a través de la superficie del suelo, mientras que dp y gw son flujos de percolación y de ascensión capilar, por lo tanto, son los flujos verticales que se producen a través del límite inferior de la zona radicular. El término tr simboliza el flujo que se produce a través de las raíces de las plantas y, a través de éstas, a la atmósfera como transpiración. La Figura 3.10 representa esquemáticamente esta situación.



Fuente: Fernando (1998).

Figura 3.10. Esquema del balance hídrico cuando se consideran los flujos de agua a través del límite inferior de la zona radicular, en el intervalo t^2-t^1 (Ec. 3.5).

Si se pretende conocer los términos e y tr , se hace necesario cuantificar los flujos dp y gw . Éstos se pueden calcular en conjunto con la Ec. (3.2), siendo los respectivos signos definidos por el gradiente hidráulico.

La Ec. (3.5) se aplica a la zona de enraizamiento para un intervalo de tiempo Δt , considerando una capa de suelo de espesor z_r , limitada superiormente por la superficie del suelo y estando el límite inferior a la profundidad z_r , donde ya no existan raíces. De esta forma, basta cuantificar la transferencia de agua de la superficie del suelo y la profundidad z_r para resolver la ecuación. Esta aproximación, pudiendo cuantificar los términos de balance,

no permitirá, sin embargo, conocer lo que se transfiere en el interior de la zona de enraizamiento. La Ec. (3.4) puede entonces escribirse de la forma siguiente:

$$[\Delta S]_0^{z_r} = P + I - ETR - \phi_{z_r} \Delta t \quad (3.7)$$

donde: $\phi_{z_r} \Delta t$, representa el drenaje o la ascensión capilar que tiene lugar a través del límite inferior de la zona de enraizamiento durante el intervalo Δt .

La dificultad práctica de la aplicación de esta ecuación reside en la dificultad de calcular los flujos verticales $\phi_{z_r} \Delta t$, ya que, es necesario conocer la conductividad hidráulica no saturada del suelo (Ec. 3.2), información actualmente poco disponible y de difícil determinación. En otras palabras, es preciso recurrir a las observaciones, en monolitos de suelo, del contenido de humedad, con la sonda de neutrones, y del potencial de presión, con tensiómetros; ambos, a la misma profundidad (Fig. 3.11).



Figura 3.11. Monolito de suelo equipado con tensiómetros de mercurio y tubo de acceso para la sonda de neutrones al inicio del período de drenaje para la determinación de las curvas de retención y de conductividad hidráulica de un suelo regado.

Se trata de observar la variación conjunta de la carga hidráulica y del contenido de humedad; primero durante un proceso de drenaje del suelo, después de saturación y manteniendo la superficie del suelo cubierta con paja para evitar la evaporación, y más adelante, por la alteración gradual de la posición del plano de flujo nulo debido a la evaporación a través de la superficie del suelo cuando el drenaje ha terminado (Fernando, 1993; Gonçalves, 1994). De este modo, resulta posible calcular las relaciones $h(\theta)$ y $K(\theta)$ y, posteriormente, describirlas a través de un modelo. Para extender tal información a otros suelos, los parámetros de tales modelos se tratan estadísticamente, generándose funciones de pedotransferencia que permiten estimar los parámetros referidos a las características hidráulicas de los suelos a partir de otras características físicas más fáciles de medir, como se ha hecho para algunos suelos portugueses (Gonçalves, 1994; Gonçalves *et al.*, 1997).

Cuando se disponga de información sobre las características hidráulicas del suelo, se podría utilizar la Ec. (3.2), donde el gradiente hidráulico se obtiene a partir de mediciones de carga hidráulica con tensiómetros. Diversos modelos mecanicistas o deterministas recurren a la Ec. (3.7), como se puede leer en Pereira *et al.* (1992, 1995) y en la aplicación de Fernando (1993).

Para conocer las capas del suelo donde las raíces de éste son más activas, la Ec. (3.4) se puede aplicar por estos espesores del suelo. La formulación de este caso exige un desarrollo (Fernando, 1993) que no corresponde al contexto de este libro.

3.4. Aplicación del balance hídrico para la determinación de las necesidades de riego

3.4.1. Agua disponible

La cantidad de agua retenida en el suelo a capacidad de campo en la profundidad radicular, expresada como altura de lámina de agua almacenada, se puede expresar como:

$$W_{r,FC} = 1000 \theta_{FC} Z_r \quad (3.8)$$

donde: $W_{r,FC}$, es el agua del suelo almacenada en la zona radicular a la capacidad de campo (mm); θ_{FC} , es el contenido de agua del suelo a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$); y z_r , es la profundidad radicular, es decir, de la zona explorada por las raíces (m).

La cantidad de agua retenida en el suelo correspondiente al punto de marchitamiento permanente en la profundidad radicular, expresada como altura de lámina de agua almacenada, se puede expresar como:

$$W_{r,WP} = 1000 \theta_{WP} Z_r \quad (3.9)$$

donde: $W_{r,WP}$, es el agua del suelo retenida en la zona radicular, en el punto de marchitamiento permanente (mm); θ_{WP} , es contenido de agua del suelo en el punto de marchitamiento permanente ($m^3 m^{-3}$); y z_r , es la profundidad radicular (m).

La cantidad de agua disponible total en el suelo (TAW) es la cantidad de agua que puede ser extraída por las plantas. Una vez que excede θ_{FC} es agua que no retiene el suelo y que drena libremente a través del perfil del suelo; cuando el agua es retenida a tensiones inferiores correspondientes a θ_{WP} , no es susceptible de ser extraída generalmente por las plantas cultivadas. TAW se obtiene como sigue:

$$TAW = 1000 (\theta_{FC} - \theta_{WP}) Z_r \quad (3.10)$$

donde: TAW, es el agua disponible total en la zona radicular (mm); θ_{FC} , es el contenido de agua del suelo a capacidad de campo ($m^3 m^{-3}$); θ_{WP} , es el contenido de agua del suelo en el punto de marchitamiento permanente ($m^3 m^{-3}$); y z_r , profundidad radicular (m).

La Tabla 3.1 recoge información orientativa sobre los valores esperados para θ_{FC} , θ_{WP} , y TAW para los principales tipos de suelos, de acuerdo con los correspondientes tipos de texturas.

Tabla 3.1. Valores orientativos de los contenidos de humedad en saturación (θ_{sat}), capacidad de campo (θ_{FC}), punto de marchitamiento permanente (θ_{WP}) y agua disponible total (TAW).

Clases de texturas	Contenidos de humedad			TAW
	θ_{sat} (m ³ /m ³)	θ_{FC} (m ³ /m ³)	θ_{WP} (m ³ /m ³)	1000(θ_{FC} - θ_{WP}) (mm/m)
Arenoso	0,32 – 0,42	0,10 – 0,15	0,03 – 0,06	60 – 70
Arenoso-franco	0,32 – 0,47	0,12 – 0,18	0,04 – 0,10	70 – 90
Franco-arenoso	0,34 – 0,51	0,17 – 0,26	0,06 – 0,13	110 – 130
Franco	0,42 – 0,51	0,22 – 0,31	0,09 – 0,16	130 – 150
Franco-limoso	0,42 – 0,55	0,23 – 0,34	0,08 – 0,15	150 – 190
Limoso	0,42 – 0,55	0,30 – 0,32	0,09 – 0,11	200 – 220
Franco-arcillo-limoso	0,40 – 0,49	0,20 – 0,30	0,13 – 0,19	80 – 120
Franco-arcilloso	0,47 – 0,51	0,28 – 0,38	0,16 – 0,22	120 – 160
Franco-limo-arcilloso	0,49 – 0,53	0,32 – 0,40	0,16 – 0,23	160 – 180
Arcillo-arenoso	0,47 – 0,53	0,28 – 0,40	0,20 – 0,30	90 – 100
Arcillo-limoso	0,49 – 0,55	0,38 – 0,50	0,22 – 0,36	150 – 160
Arcilloso	0,51 – 0,58	0,39 – 0,55	0,30 – 0,45	100 – 130

Los datos de TAW no son suficientes porque las planta extraen, con mayor o menor dificultad, el agua del suelo de acuerdo con sus modelos característicos de extracción radicular y con la demanda climática de la atmósfera, teniendo en cuenta, además, la influencia de las características físicas y químicas del suelo, principalmente la salinidad. Para que no ocurra estrés hídrico, será necesario que el agua del suelo se encuentre a tensiones de succión relativamente altas (menos negativa). Si el potencial del agua del suelo tiene valores de -10 a -33 kPa, los potenciales en las hojas activas en la transpiración oscilan de -500 a -3000 kPa. En estas circunstancias, se crea un gradiente de potencial favorable para mantener la tasa evaporativa determinada por las condiciones energéticas y aerodinámicas de la atmósfera. Sin embargo, a medida que el contenido de agua en el suelo va disminuyendo, el potencial de agua en el suelo se hace más negativo y, consecuentemente, la tasa de transpiración decrece.

Cuando se alcanzan valores muy bajos de potencial, llega a ser difícil mantener los gradientes necesarios para responder a la demanda evaporativa y, como consecuencia, el cultivo entra en fase de estrés hídrico. Ésto ocurre para un umbral de potencial del agua del suelo (ψ_{umbral}) específico del cultivo en cuestión, pero que es más alto (menos negativo) para estados vegetativos críticos, como el de emergencia o el de floración, y más bajo cuando la demanda climática es pequeña. Se tendrá un estrés tanto más acentuado cuando el potencial del agua del suelo se aleje más de ψ_{umbral} y se aproxime al límite inferior de extracción, correspondiente al punto de marchitamiento permanente (-1.5 MPa).

El estrés sufrido por el cultivo se traduce en la disminución de la tasa de evaporación y, consecuentemente, de las funciones fisiológicas que se relacionan con ella: la respiración, la fotosíntesis y la asimilación. La producción es, por tanto, afectada, tanto cuanto más mayor es el grado de estrés, o, con otras palabras, cuanto más se aleja el potencial de agua del suelo de ψ_{umbral} . Esta referencia tiene valores que varían en un rango amplio, entre -50 kPa, para

plantas jóvenes hortícolas de pequeño porte, y $\psi_{\text{umbral}} \approx -1,0$ MPa para alfalfa secada en el campo.

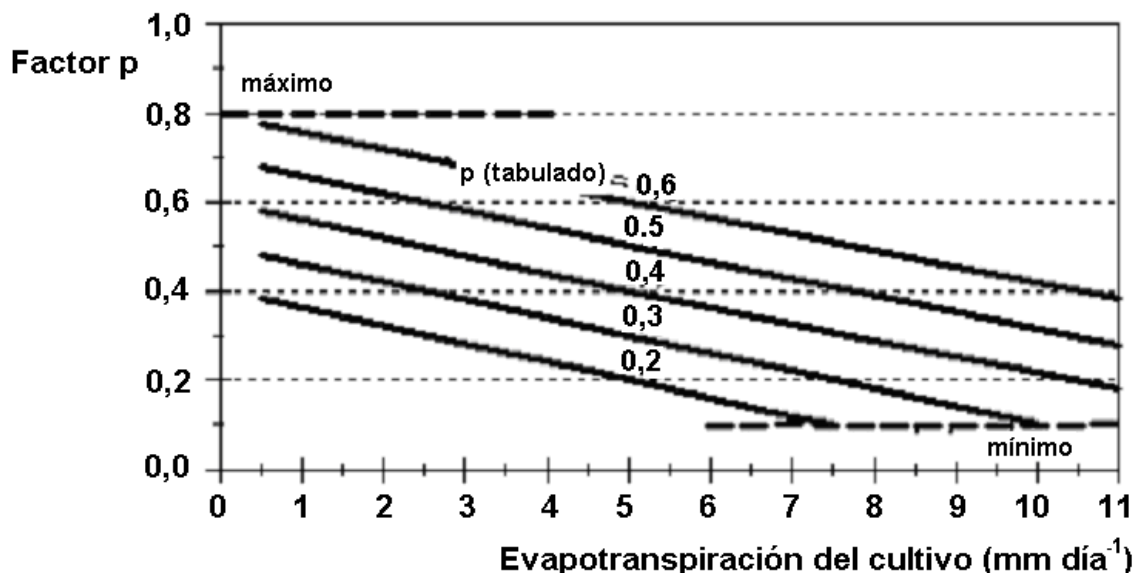
Para la realización del balance hídrico, por tanto, es más adecuado recurrir a límites referidos a los contenidos de humedad del suelo, en vez de los referidos a límites de potencial. Así, se desarrolla el concepto de fracción de agua del suelo extraíble sin afectar a la producción (p) que permite calcular el agua fácilmente disponible (RAW):

$$\text{RAW} = p \text{ TAW} = p 1000 (\theta_{\text{FC}} - \theta_{\text{WP}}) Z_r \quad (3.11)$$

donde: RAW, es el agua del suelo fácilmente disponible en la zona radicular (mm); p , es la fracción de agua del suelo extraíble sin afectar a la producción (la fracción de TAW que puede ser extraída de la zona radicular sin que ocurra estrés hídrico); TAW, es el agua disponible total en la zona radicular (mm); θ_{FC} , es el contenido de agua del suelo a capacidad de campo (m^3m^{-3}); θ_{WP} , es el contenido de agua del suelo en el punto de marchitamiento permanente (m^3m^{-3}); y Z_r , es la profundidad de la zona explorada por las raíces (m).

Los valores de p y Z_r , para un gran número de cultivos, están disponibles en la Tabla 2.1. Para cada uno de los cultivos recogidos en esta tabla, los valores más altos de Z_r corresponden a cultivos en secano mientras que los más bajos se refieren a cultivos en regadío; los valores son solamente, orientativos.

Los valores de p son valores medios para el perfil del suelo y bajo las condiciones de demanda climática correspondiente, aproximadamente, a una $ET_c = 5 \text{ mm día}^{-1}$. Ésto significa que p debe ser ajustado, reduciéndose para condiciones de demanda climática mayores y aumentándose cuando la demanda climática sea inferior a la ET_c , pero no sobrepasando los límites extremos de 0,1 y 0,8 (Fig. 3. 12).



Fuente: Allen *et al.* (1998).

Figura 3.12. Ajuste del factor de extracción del agua del suelo en función de la demanda climática, representada por la evapotranspiración del cultivo.

Tal ajuste se realiza recurriendo a la ecuación:

$$0,1 \leq p = p_{\text{Tab}} + 0,04 (5 - ET_c) \leq 0,8 \quad (3.12)$$

donde: p_{Tab} , es el valor estimado de p (Tabla 2.1); y ET_c , es la evapotranspiración del cultivo (mmdía^{-1}), según lo estudiado en el Capítulo 2.

La corrección de p en función de la ET_c , no solamente sirve para tomar en consideración los efectos del clima, sino también, para responder a la variación de sensibilidad de los cultivos en función de sus etapas vegetativas. Los valores más pequeños de p corresponden a las etapas de floración y formación del fruto, que son los más sensibles, y cuando es mayor la ET_c ; por el contrario, en la etapa de maduración, la ET_c es menor, el cultivo es menos sensible al estrés hídrico, y p tiene un valor menor. Se pueden realizar otros ajustes, normalmente escogiendo un valor intencionadamente bajo para la etapa de germinación y el desarrollo inicial del cultivo cuando la disponibilidad de agua sea crítica.

Los valores estimados de p se pueden, además, ajustar al tipo de suelo, reduciéndolos de 5 al 10% para los de textura fina, normalmente cuando están mal estructurados. El ajuste de p para condiciones de salinidad, reduciendo su valor bastante más cuanto más salino sea el suelo, fue estudiado por Campos *et al.* (2003); el agua del suelo se encuentra menos disponible para las plantas cuanto mayor es la salinidad del suelo en correspondencia con el aumento del potencial osmótico. Este efecto se suma al del potencial de presión al que el agua está retenida en el suelo con estas consideraciones. Entonces, se puede escribir:

$$p_{\text{sal}} = p - [b (EC_e - EC_{e \text{ umbral}})]p \quad (3.13)$$

donde, según lo expuesto en el epígrafe 2.5.2: p_{sal} , es el factor de extracción corregido para la salinidad; p , es el factor p corregido para la demanda climática (Ec. 3.12); EC_e , es la conductividad eléctrica del extracto saturado de la zona radicular (dSm^{-1}); $EC_{e \text{ umbral}}$, es el límite de la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo en la zona radicular a partir de la cuál la producción desciende por debajo de Y_m (dSm^{-1}); y b , es la tasa de reducción de la producción por unidad de aumento de EC_e [$\% / (\text{dSm}^{-1})$].

3.4.2 Balance hídrico

El balance hídrico del suelo, tratando de simular su contenido de humedad, se puede escribir como sigue:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{(P_i - Q_{ri}) + I_{ni} - ET_{ci} - DP_i + GW_i}{1000 z_{ri}} \quad (3.14)$$

donde: θ_i , es el contenido de agua del suelo en la zona radicular (m^3m^{-3} ó mmmm^{-1}) en el día i ; θ_{i-1} , es el contenido de agua del suelo en la zona radicular (m^3m^{-3} ó mmmm^{-1}) en el día $i-1$; P_i , es la precipitación en el día i (mm); Q_{ri} , es la escorrentía superficial en el día i (mm); I_{ni} ,

es la lámina de riego en el día i (mm), o la cantidad de agua de riego que realmente se infiltra para su almacenamiento en la zona radicular; ET_{ci} , es la evapotranspiración del cultivo en el día i (mm) (según se describió en el Capítulo 2, pudiendo ser $ET_{c\text{ cor}}$ cuando se produzca cualquier tipo de estrés); DP_i , es la percolación en el día i (mm); y GW_i , es el flujo acumulado de ascensión capilar en el día i (mm).

GW_i puede ser determinada a través de los métodos propuestos por Doorenbos y Pruitt (1975) ó por Martin y Gilley (1993). En la mayor parte de los casos, la ascensión capilar puede ser depreciada, ya que su valor es relativamente pequeño cuando se compara con la ET_c y con la precipitación y el riego, siendo frecuentemente inferior al error que se comete al final del balance hídrico. Por otra parte, cuando se produce exceso de riego (sobrerriego), la percolación excede frecuentemente GW . Se han exceptuado los casos en que existe una capa freática cerca de la superficie y los suelos son de textura fina y sin grietas. Para ellos, es posible estimar un valor medio para los flujos diarios GW en función de la profundidad de la capa freática y de los contenidos de humedad en la zona radicular (Doorenbos y Pruitt, 1975). El modelo ISAREG utiliza un conjunto de ecuaciones empíricas para parametrizar, de acuerdo con el tipo de suelo, la capa freática y la demanda climática (Fernando *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2001).

La percolación se estima, generalmente, mediante las Ecs. (3.15a,b):

$$DP_i = 0 \quad \text{cuando } \theta_i \leq \theta_{FC} \quad (3.15a)$$

$$DP_i = 1000 (\theta_i - \theta_{FC}) z_{rI} \quad \text{cuando } \theta_i > \theta_{FC} \quad (3.15b)$$

Ahora bien, θ_i puede exceder a θ_{FC} en un día antes de que $DP_i \geq 0$, ya que es preciso tener en cuenta que el exceso de agua en el suelo contribuye decisivamente a la ET antes de que se produzca el drenaje profundo más allá de la zona radicular. El proceso de percolación puede ser igualmente modelado y utilizar los resultados en el balance hídrico (Fernando *et al.*, 2001).

Como se ha escrito anteriormente, la escorrentía superficial se puede despreciar para la mayoría de los casos en que las superficies a regar sean llanas o, por lo menos, sin pendientes. Q_{ri} puede estimarse por el método de “número de escorrentías” de SCS (U.S. Soil Conservation Service), según lo propuesto por Martin y Gilley (1993). Como alternativa, el valor de P en la ecuación del balance puede ser sustituido por el de precipitación efectiva P_e y, entonces, tanto DP como Q_r no se consideran, dado que P_e puede ser calculada eliminando las cantidades que originan percolación o escorrentía (Dastane, 1977; Smith, 1992). Las láminas de riego representan cantidades de agua efectivamente infiltradas y que son almacenadas en la zona radicular, I_{ni} .

La profundidad efectiva de la zona radicular en el día i puede estimarse a través de la relación:

$$z_{ri} = z_{r\min} + (z_{r\max} - z_{r\min}) \frac{J_i - J_{in}}{L_{rd}} \quad \text{para } J_i \leq J_{in} + L_{rd} \quad (3.16a)$$

$$z_{ri} = z_{r\max} \quad \text{para } J_i > J_{in} + L_{rd} \quad (3.16b)$$

donde: z_{ri} , es la profundidad efectiva de la zona radicular en el día i (m); $z_{r\min}$, es la profundidad efectiva inicial (ó mínima) de la zona radicular (m) (cuando $J = J_{in}$); $z_{r\max}$, es la profundidad efectiva máxima de la zona radicular (m), a la que se refiere la Tabla 2.1; J_i , es el número del día i del año (1 a 365) (día juliano), siendo $J = 1$ el día 1 de enero (Ec. 1.42); J_{in} , es el día juliano correspondiente al día de siembra ó plantación, ó al día en que se inicia el crecimiento vegetativo, ó el día 1 de enero si se trata de un cultivo perenne sin parada de crecimiento; y L_{rd} , es la duración del período de crecimiento de las raíces (días).

Se puede simplificar los cálculos del balance, para cultivos anuales, tomando siempre como referencia la misma profundidad radicular. Tal es el caso cuando se realizan mediciones del agua del suelo siempre hasta una misma profundidad. En ese caso, como para los cultivos perennes, $z_{ri} = z_{r\max}$.

3.4.3. Necesidades de agua para el riego

Cuando el balance hídrico se realiza para calcular las necesidades de agua para el riego, la Ec. (3.14) se simplifica, asumiendo $Q_r = 0$ y $DP = 0$. Se tiene, entonces:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{Pe_i + I_{ni} - ET_{ci} + GW_i}{1000z_{ri}} \quad (3.17)$$

La Ec. (3.17) se resuelve hasta el día en que θ_i alcance el umbral:

$$\theta_t = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (3.18)$$

donde: p , es la fracción definida por las Ecs. (3.11 a 3.13). La cantidad de agua necesaria para restablecer entonces el contenido de agua del suelo a capacidad de campo es:

$$I_{ni} = 1000z_{ri}(\theta_{FC} - \theta_i) \quad (3.19)$$

cuyo sumatorio para todo el ciclo del cultivo, después de ser corregido por las necesidades de lavado de sales, corresponde a las necesidades netas de agua para el riego, IWR.

Es decir, se tiene:

$$IWR = \frac{ET_c - P_e - GW - \Delta S}{1 - LR} \quad (3.20)$$

donde: IWR, son las necesidades netas de agua para el riego de un determinado cultivo; P_e , es la precipitación efectiva, definida como precipitación que ocurre durante el ciclo vegetativo después de descontar las cantidades correspondientes a escorrentía y a percolación; GW, es el flujo de ascensión capilar acumulado durante el ciclo vegetativo; ΔS es la variación acumulada de la reserva de agua en la zona radicular durante el ciclo vegetativo que resulta de la suma algebraica de las sucesivas variaciones de las reservas de agua calculadas y representa la diferencia de agua en el suelo en el día de inicio del ciclo (por ejemplo, la siembra) y en el día final (por ejemplo, la recolección); y LR, es la fracción de lavado de sales.

LR es la fracción de agua de riego que debe ser añadida a las necesidades netas, debidas al consumo por la evapotranspiración (ET_c), de manera que haya percolación a través de la zona radicular; de esta manera, la sobredosis de riego arrastra las sales en exceso y, así, mantiene la salinidad del suelo a niveles compatibles con los objetivos de producción y ambientales (Ayers y Westcot, 1985; Rhoades *et al.*, 1992). LR puede estimarse, para suelos sin grietas, por la relación:

$$LR = \frac{EC_{iw}}{5EC_e - EC_{iw}} \quad (3.21)$$

donde: EC_{iw} , es la conductividad eléctrica del agua de riego; y EC_e , es la conductividad eléctrica del extracto saturado del suelo.

Las necesidades brutas, o globales, de agua de riego (GIWR) para el cultivo en cuestión dependen del proceso de la aplicación de agua a la parcela, es decir, del método y sistema de riego, y del sistema de transporte y distribución de agua a partir de su origen. Por estos motivos, se ha de considerar la eficiencia de aplicación, relativa al sistema de riego utilizado por los agricultores, y las eficiencias de distribución y de transporte, relativas a la red de riego; es decir:

$$GIWR = \frac{IWR}{e_f} \quad (3.22)$$

donde: e_f , es la eficiencia global de riego, aquí expresada como fracción (cuando se exprese en %, se deberá utilizar $e_f/100$).

Para un campo o parcela de cultivo, e_f corresponde solamente a la eficiencia de la aplicación (e_a), por lo que, GIWR representa las necesidades globales, o brutas, que el agricultor deberá satisfacer, y, para las cuáles, procurará evaluar los sistemas de riego que utiliza. Considerando toda la red de riego, e_f debe, también, incluir las eficiencias de distribución (e_d) y de transporte (e_t); es decir, $e_f = e_a e_d e_t$, lo que significa que GIWR representa las necesidades totales de agua que deben ser satisfechas en origen. Las Tablas

(4.2) y (4.5) proporcionan información sobre la gama de valores esperados para estas eficiencias, y los Capítulos 5 a 7 dan explicación de las causas de las bajas eficiencias y sobre los medios y procedimientos disponibles para mejorarlas.

3.5. Balance hídrico para el manejo del riego

En este epígrafe, se aplica la Ec.(3.14) a un cultivo que se sigue en el campo. Si la programación de riego se hace para evitar que ocurra déficit hídrico, la fecha límite para realizar el riego será cuando θ_i alcance el umbral:

$$\theta_i = (1-p)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (3.18 \text{ bis})$$

donde: p , es la fracción de TAW que puede ser extraída sin producir déficit hídrico [Ecs. (3.11 y 3.12)]. El riego puede, por tanto, ser programado para un umbral diferente que refleja la extracción deseada en términos de programación (MAD, utilizando la conocida abreviatura para "Management Allowed Depletion"; Martin *et al.*, 1990). La fracción correspondiente a MAD puede ser superior o inferior a p de acuerdo a los objetivos de programación. $MAD < p$ cuando, para cultivos muy rentables, se pretende disminuir el riesgo de aparición de estrés o las incertidumbres ligadas al manejo del riego. Por el contrario, se elige $MAD > p$ cuando se asume intencionadamente la programación del riego con estrés en determinados periodos, o cuando los recursos hídricos disponibles son insuficientes. La fecha del riego, entonces, vendrá determinada por:

$$\theta_i = \theta_{MAD} = (1-MAD)(\theta_{FC} - \theta_{WP}) + \theta_{WP} \quad (3.23)$$

En ambos casos, la dosis a aplicar para restablecer el agua del suelo a capacidad de campo viene dada por:

$$I_{ni} = 1000 z_{ri} (\theta_{FC} - \theta_i) \quad (3.19 \text{ bis})$$

La dosis neta así calculada es la mayor cantidad de agua a aplicar para que no exista percolación. En otras palabras, pueden utilizarse dosis más pequeñas, ya sea definiendo un valor máximo para θ inferior a la capacidad de campo, ya sea adoptando una dosis fija según el método de riego utilizado. La dosis bruta a aplicar a la parcela vendrá dada por: $G = I_{ni} / e_a$, donde, e_a es la eficiencia de aplicación, corregida por la fracción de lavado (FL), según lo referido anteriormente, si diera lugar a ello.

Existe un buen número de modelos de simulación de balance hídrico; son unas herramientas magníficas para la determinación de las necesidades de riego y para la programación del riego (Pereira *et al.*, 1992, 1995; Smith, 1992). De entre ellos, destaca el modelo ISAREG (Teixeira y Pereira, 1992; Liu *et al.*, 1998; Pereira *et al.*, 2003), desarrollado en el Departamento de Ingeniería Rural del Instituto Superior de Agronomía de Portugal, ahora disponible en Windows, capaz de trabajar con la ascensión capilar y percolación (Fernando *et al.*, 2001) así como con la salinidad (Campos *et al.*, 2003).

El modelo (Fig. 3.13) está compuesto por un programa para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (EVAP56), ya expuesta en el Capítulo 1 (Fig. 1.13), por un programa para parametrizar el cultivo (KCISA) que efectúa los cálculos conforme se describió en el Capítulo 2, y por un modelo de simulación del balance hídrico de un suelo regado utilizando la metodología descrita anteriormente, calculando tanto las necesidades de agua de los cultivos, como las necesidades de riego en diversos períodos de tiempo y con diversas opciones de entrada de datos climáticos, de suelos y de cultivos conforme al esquema de la Figura 3.13. Actualmente, se está preparando una guía de usuario, donde se recoge la versión actual y, por eso, el modelo no se describe en este libro. El menú principal se muestra en la Figura 3.14.

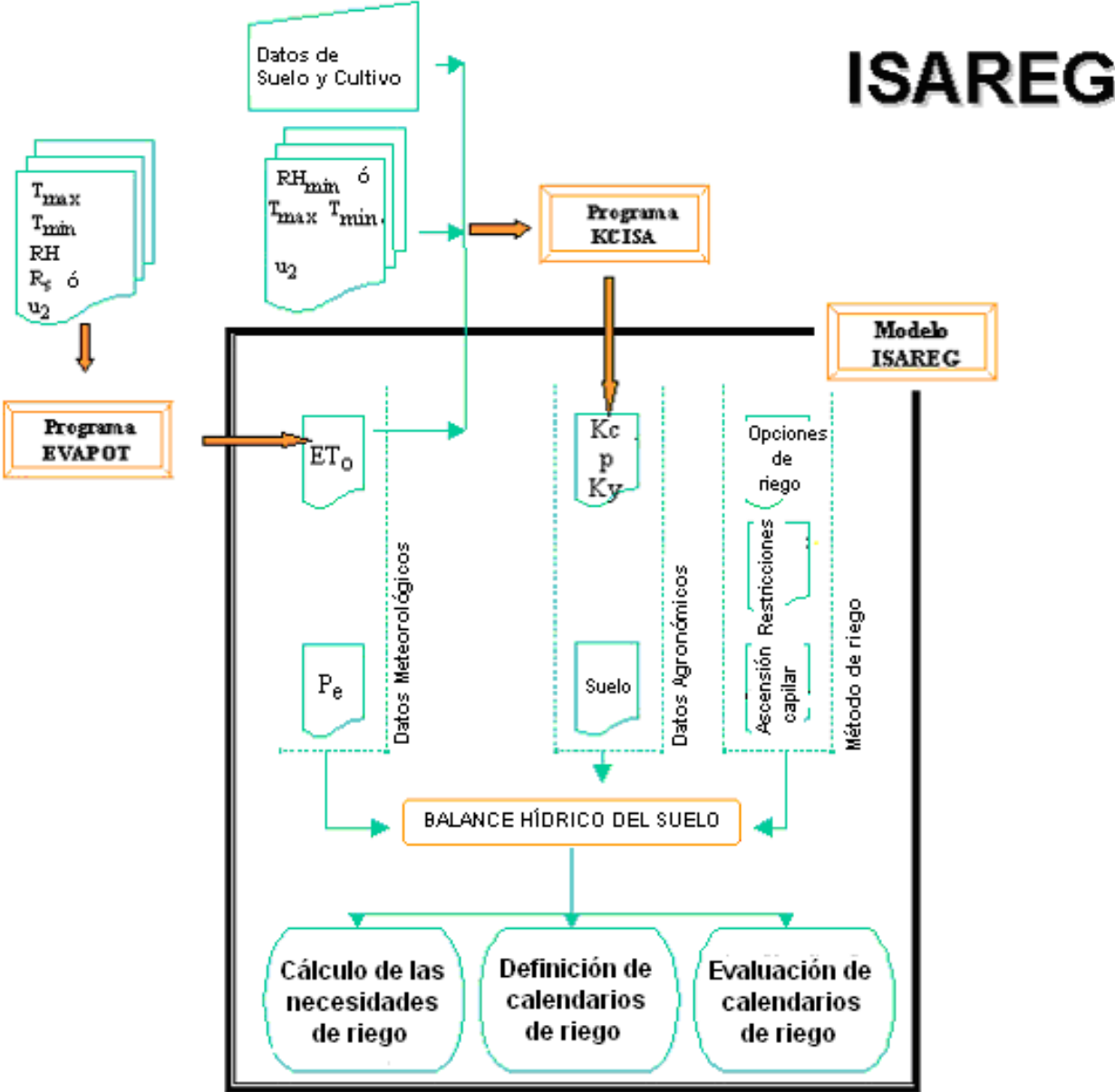


Figura 3.13. Esquema del modelo ISAREG con indicación de los programas asociados, de los datos utilizados, de los procedimientos de cálculo y del tipo de resultados.

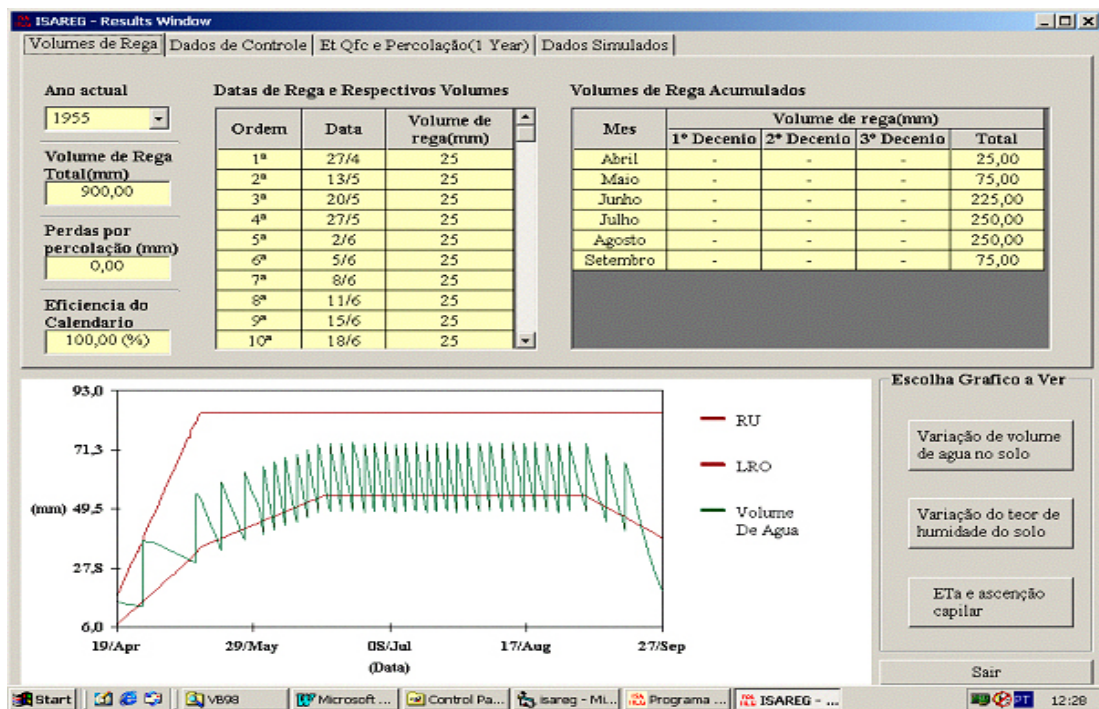
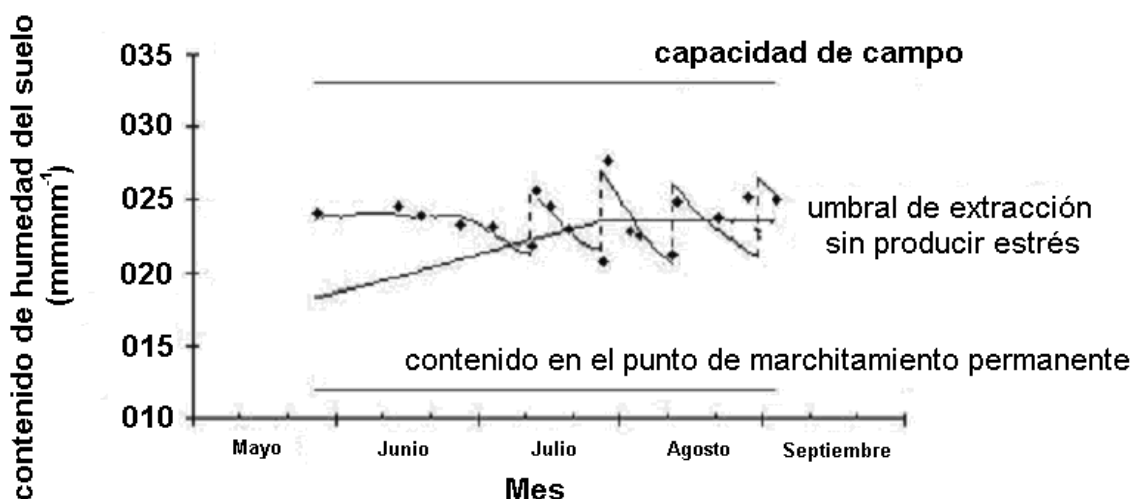


Figura 3.14 . Menú del modelo ISAREG, versión para Windows, mostrando resultados de simulación de riego de maíz con sistema pivót.

El modelo fue validado para las condiciones de diversos países. Para su validación, se utilizaron medidas de agua del suelo a lo largo del ciclo vegetativo de los cultivos, recurriendo a la sonda de neutrones en todo el perfil del suelo susceptible de ser explorado por las raíces. Un ejemplo de esa validación, para el cultivo del maíz en el Valle de Sorraia (Portugal), se presenta en la Figura 3.15, donde se comparan contenidos de humedad simulados con los observados.



Fuente: Teixeira y Pereira (1992).

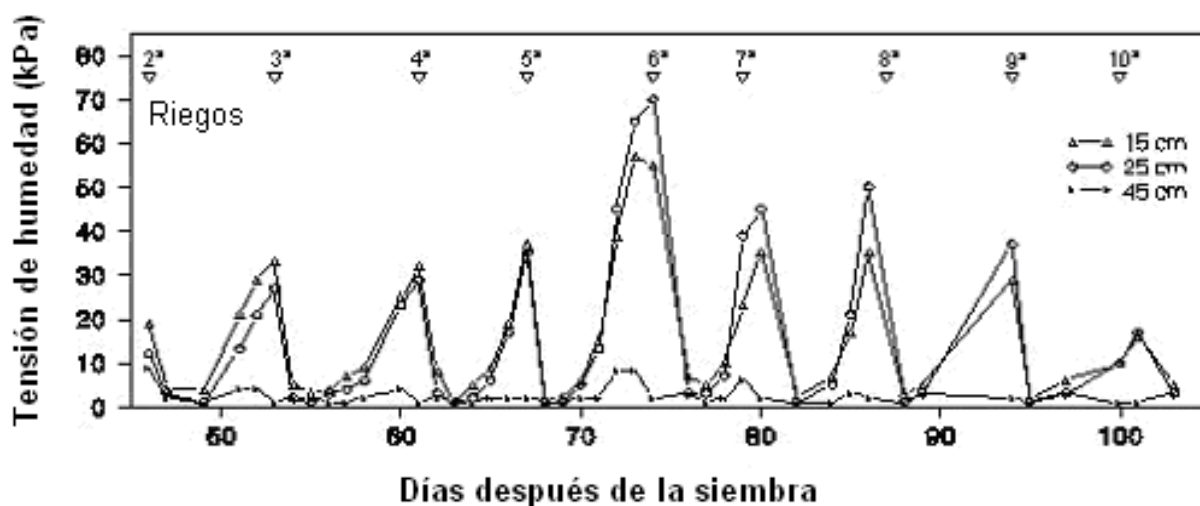
Figura 3.15. Validación del modelo ISAREG para un cultivo de maíz en suelo de aluvión, limoso, del Valle de Sorraia (Portugal) cultivado con maíz para ensilado.

Se puede observar que el cultivo fue regado cuatro veces (líneas verticales en el gráfico de la Figura 3.15) y fue sometido a un déficit hídrico, ya que el contenido de humedad en los tres últimos riegos era inferior a R_{min} , ésto es, al contenido de humedad que no supone restricción hídrica. El modelo considera que la reserva máxima de agua en el suelo (R_{max}) iguala al agua disponible total en la zona radicular (TAW), definida por la Ec. (3.10), y que la reserva mínima que no supone restricción hídrica corresponde al agua del suelo fácilmente disponible en la zona radicular (RAW); la reserva de agua en el suelo se anula cuando se alcanza el punto de marchitamiento permanente.

3.6. Programación del riego recurriendo a mediciones de agua en el suelo

Para el desarrollo de este epígrafe, se ha tomado, como ejemplo, dos casos estudiados (Pereira *et al.*, 1997): uno de riego del maíz en suelos ligeros, recurriendo a tensiómetros para identificar la oportunidad del riego, y el otro, también de riego de maíz, en suelo pesado de aluvión, recurriendo a mediciones con sonda de neutrones.

En la Figura 3.16, se muestran las curvas de tensión de humedad a tres profundidades, en la zona radicular del maíz. Por la variación de tensión de humedad entre riegos, se puede observar que las extracciones se producen, sobre todo, en las capas superficiales, registradas por los tensiómetros colocados a 15 y 25 cm, existiendo alguna extracción a la profundidad de 45 cm, para la cuál el trazado de tensión presenta una pequeña variación. Estos resultados ponen de manifiesto que el agua aplicada en exceso de la capacidad de retención de agua, hasta los 45 cm, percola más allá de la zona explorada por las raíces y no es consumida por el cultivo. Observaciones complementarias han permitido verificar que el cultivo sufrió déficit de agua cuando la tensión de humedad sobrepasaba los 20 kPa a 25 cm de profundidad en la etapa de espigazón y 30 kPa, durante la maduración, lo que significa que los riegos tendrían que haber sido en mayor número y con menores dotaciones.



Fuente: Pereira *et al.* (1997).

Figura 3. 16. Variación de la tensión de humedad del suelo medida con tensiómetros en un suelo arenoso cultivado con maíz en el Valle de Sorraia (Portugal).

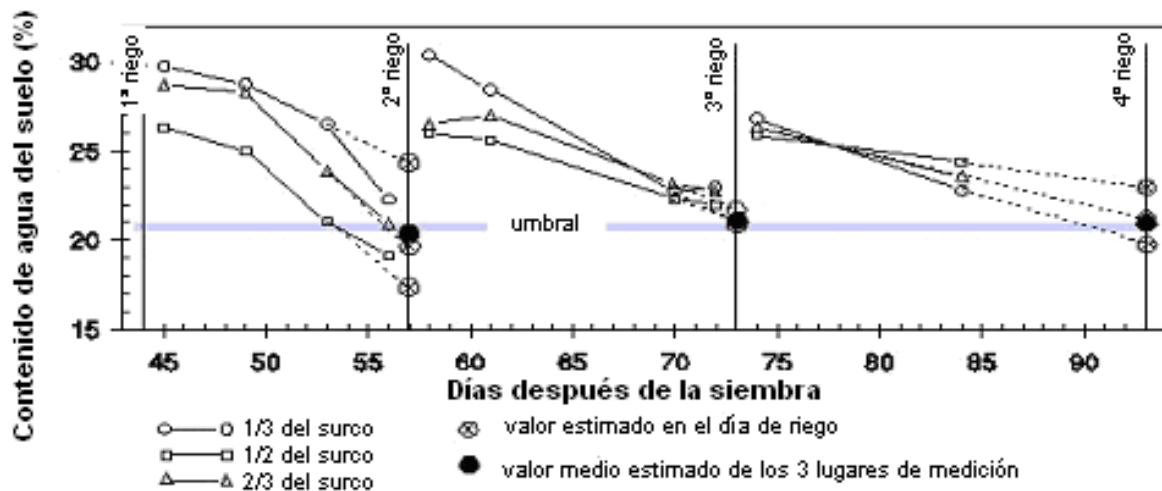
Estudios posteriores en el mismo suelo demostraron que la percolación, y la pérdida de nitratos, en profundidad, sólo podrían haberse evitado sustituyendo el sistema de riego de superficie por la aspersión en estos suelos, ligeros y de baja capacidad de retención. Los tensiómetros demostraron ser adecuados para la programación del riego en suelos ligeros y riego frecuente. Son, por eso, también, apropiados para conducir el riego de frutales por aspersión o por microrriego. Como alternativa, pueden utilizarse otros instrumentos, cuya respuesta es rápida y eficaz para riegos frecuentes, como es el caso de los bloques de yeso o de los modernos sensores dieléctricos del suelo (Fig. 3.17).



Fuente: Decagon (2003).

Figura 3.17. Sensor capacitativo dieléctrico de agua del suelo ECH_2O ; su instalación, sistema de adquisición de datos y lector manual.

En el caso de un suelo pesado, con elevada capacidad útil de almacenamiento de agua (TAW grande), los intervalos entre riegos pueden ser grandes, como tiene lugar cuando se utiliza el riego por superficie y se aplican grandes dosis. El caso de estudio aquí referido recurre a mediciones con sonda de neutrones, estando los tubos de la sonda colocados a $1/3$, $1/2$, y $2/3$ de la distancia entre la cabecera y el final de los surcos. Las lecturas fueron realizadas a profundidades de 20, 40 y 60 cm, y se tomó su media para estimar la tasa de extracción de agua del suelo y, así, predecir la oportunidad de riego. Se tomó, como umbral mínimo de contenido de humedad del suelo, el valor de 21%, lo que correspondía a una extracción de 65% de agua disponible total (TAW), siendo la dosis neta de riego igual a 65% de TAW. Para esta previsión, se utilizaron las medias de los contenidos de humedad observados en los tres lugares para tener en cuenta la variabilidad espacial del agua en el suelo (Fig. 3.18), que fue grande entre el primer y segundo riego, pero disminuyó después. El método resultó ser adecuado, como muestra la Figura 3.18; los resultados han permitido verificar que, en riego por surcos, las mediciones a mitad de su recorrido se aproximaban al valor medio para el campo.



Fuente: Pereira *et al.* (1997).

Figura 3.18. Programación del riego por surcos de maíz en suelo franco-limoso mediante mediciones de los contenidos en agua con sonda de neutrones, definiendo el día de riego por extrapolación de las mediciones de días anteriores (líneas punteadas) después de fijar un umbral para sin estrés.

Para riegos poco frecuentes, como es el caso del riego por superficie en suelos pesados, la utilización de mediciones de agua del suelo realizadas con algunos días de intervalo permite una programación eficaz del riego. No obstante, no existen, o son raras, las entidades que prestan este tipo de servicios a los agricultores. Para sustituir las mediciones regulares con sonda de neutrones, o tensiómetros, los fabricantes de instrumentos vienen proponiendo una amplia gama de sondas con registro continuo de datos, fáciles de utilizar y administrar por los agricultores, como se muestra, a modo de ejemplo, en las Figuras (3.6, 3.7 y 3.17).

CAPÍTULO 4

MÉTODOS Y SISTEMAS DE RIEGO. INDICADORES DE FUNCIONAMIENTO

4.1. Introducción

Es común referirse al riego en la parcela utilizando dos términos, métodos de riego y sistemas de riego; a veces, como sinónimos. Se hace aquí una distinción; se entiende por método de riego al conjunto de aspectos que caracterizan el modo de aplicar el agua a las parcelas regadas, y se entiende por sistema de riego al conjunto de equipamientos y técnicas que proporcionan esa aplicación siguiendo un método dado. En estas condiciones, los sistemas de riego tienen obligatoriamente que ser tratados cuando se habla de los métodos, como en este libro se decidió hacer. De forma diferente, cuando se abordan los sistemas no es necesario detallar los métodos, pero es importante incluir aspectos de dimensionamiento hidráulico, lo cual se optó por no incluir en este libro. El término sistemas de riego es también utilizado para referir el conjunto de equipamientos y técnicas de gestión que aseguran la captación del agua, su almacenamiento, transporte y distribución a los regantes, que son asuntos cuya amplitud aconsejó que no fueran tratados aquí. Se harán, sin embargo, algunas referencias a tales sistemas cuando sea oportuno.

Los métodos de riego pueden clasificarse del siguiente modo (Pereira y Trout, 1999):

- Riego de superficie, o por gravedad, comprendiendo el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros para arroz, el riego por infiltración en surcos o en fajas y el riego por escorrentía libre.
- Riego por aspersión, con sistemas estáticos y disposición en cuadrícula, fijos o móviles, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal.
- Riego localizado, o microrriego, comprendiendo el riego por goteo, por difusores o borboteadores (“bubblers”), por tubos perforados o porosos, la micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos.
- Riego subterráneo, realizado por control de la profundidad de la capa freática, casi sin representación en la Península Ibérica, pero que, en Portugal, se practicaba al Sur de la Ría de Aveiro y en las riberas de la Póvoa de Varzim.

Ha sido enorme el desarrollo de equipamientos para el riego. En el riego por gravedad, la tendencia es al abandono de los métodos tradicionales, en los que el agua es conducida “a punta de azada” por el regante. Merecen ser destacados los desarrollos conseguidos a través de la nivelación de precisión con control por láser, en particular el riego por canteros con nivelado de precisión y alimentación semi-automática, así como las innovaciones debidas a la adopción de diversos equipamientos para el suministro de agua a surcos y canteros, principalmente, con automatización.

Los avances en términos de equipamiento son principalmente importantes en los sistemas a presión, aspersión, y riego localizado, y se concretan tanto en aspersores y emisores, como en sistemas de tuberías y rampas, equipamientos para aplicación de fertilizantes y otros agroquímicos (fertirriego y quimirriego), o a equipamientos de control y automatización. Son tantas las innovaciones que la industria afirma, tanto en riego por aspersión como en riego localizado, que es difícil que alguien se mantenga actualizado.

4.2. Elección de los métodos de riego

La elección de los métodos de riego está impuesta por un gran número de factores, que serán presentados en los Capítulos siguientes; para proporcionar una visión de conjunto, se resumen en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Factores que favorecen la elección del método de riego.

Factores	Riego de superficie	Aspersión	Riego localizado
Precio del agua	Bajo	Medio	Alto
Suministro del agua	Irregular	Regular	Continuo
Disponibilidad del agua	Abundante	Media	Limitada
Pureza del agua	No limitante	Sin sólidos	Elevada
Capacidad de infiltración del suelo	Baja a media	Media a alta	Cualquiera
Capacidad de almacenamiento del suelo	Alta	Media a baja	No limitante
Topografía	Plana y uniforme	Relieve suave	Irregular
Sensibilidad al déficit hídrico	Baja	Moderada	Alta
Valor de la producción	Bajo	Medio	Alto
Coste de la mano de obra	Bajo	Medio	Alto
Coste de la energía	Alto	Bajo	Moderado
Disponibilidad de capital	Baja	Media a alta	Alta
Exigencia en tecnología	Limitada	Media a alta	Elevada

Fuente: Pereira y Trout (1999).

La adopción de sistemas de apoyo para la toma de decisión, de sistemas expertos y de otros sistemas inteligentes constituye una herramienta útil para la elección de los métodos y sistemas de riego, así como para el proyecto. Los modelos de simulación, sin embargo, están todavía insuficientemente divulgados y, sobretodo, no evitan la evaluación del riego en el campo, la cual constituye una fuente esencial de la información a ser introducida en los modelos, modo privilegiado de aprendizaje de los usuarios de sistemas de información y, sobretodo, medio esencial para apoyar a los agricultores en la búsqueda de mejorar el funcionamiento y los resultados económicos del riego.

4.3. Indicadores de funcionamiento. Riego en parcela

4.3.1. Importancia del análisis del funcionamiento de los sistemas de riego

El análisis del funcionamiento de los sistemas de riego, relativos ya sea a la parcela, ya sea a las redes de conducción y distribución de agua, han estado recibiendo atención continua.

Los indicadores de funcionamiento se usaron inicialmente como indicadores de calidad de un proyecto o de la gestión de un sistema. Posteriormente, en el caso de sistemas colectivos de riego, fueron considerados también como indicadores de la calidad de servicio o de funcionamiento. Más tarde, fueron tomados, además, como indicadores ambientales,

aunque de forma poco precisa. Actualmente, dada la capacidad ofrecida por los modelos computerizados para simular el funcionamiento de los sistemas de riego, los indicadores pueden ser utilizados en los proyectos, para establecer criterios a los que los sistemas deben ser capaces de responder.

Hoy en día, se busca un equilibrio entre el funcionamiento técnico de los sistemas de riego y los resultados económicos que estos producen; es decir, se busca encontrar medios activos para dar un significado económico suficientemente preciso a tales indicadores. Sin embargo, en este campo, hay todavía un largo camino por recorrer. Cuando hace 30 años se hacían proyectos, los criterios eran casi exclusivamente relacionados con el funcionamiento hidráulico de los sistemas y con la posibilidad de reducir los costes de inversión. Hoy, puede recurrirse al CAD (proyecto asistido por ordenador), a sistemas expertos y a sistemas de apoyo a la toma de decisión con ayuda del análisis multi-criterio (Gonçalves et al., 1998). Para sacar provecho de estas herramientas, hay que definir atributos cuantificables para cada solución alternativa que respondan a los objetivos del proyecto. En estas condiciones, es necesario que los indicadores de funcionamiento puedan ser interpretados en lo que respecta a los impactos sobre la producción, sobre los gastos excesivos de agua, sobre la contaminación por nitratos o sobre el rendimiento, por ejemplo.

A nivel de la parcela, han habido varios intentos de formulación de relaciones entre funcionamiento y rendimiento, como, por ejemplo, los trabajos de Seginer (1987), Warrick y Yates (1987), Sousa *et al.* (1993) y Santos (1998). Sin embargo, se han utilizado únicamente relaciones polinomiales, cuyos parámetros son específicos, haciendo imposible extender los resultados obtenidos. A la escala de las redes de riego, la opción ha sido la de ligar el funcionamiento a la calidad del servicio, es decir, a la capacidad del sistema para suministrar los caudales y presiones previstos de acuerdo con los calendarios o condiciones de suministro fijados. Los correspondientes impactos económicos son muy difíciles de evaluar por estar relacionados a las consecuencias del riego en parcela.

Considerando las limitaciones todavía existentes, se presentan sólo algunos indicadores de funcionamiento bien probados en la práctica, los cuales son útiles para la definición y comparación de los sistemas de riego y, para los cuales, se conocen interpretaciones mínimamente válidas en términos de impactos sobre el uso del agua, el rendimiento, la economía de la producción y la minimización de los impactos ambientales.

El funcionamiento del riego en la parcela puede ser evaluado a través de varios indicadores: la uniformidad de distribución y la eficiencia de aplicación. Los indicadores más importantes son presentados en las secciones que siguen. Más allá de estos, son utilizados otros indicadores, según la finalidad y el método de riego (Burt *et al.*, 1997; Pereira, 1999), de manera que los principales están recogidos en los capítulos siguientes.

4.3.2. Uniformidad

La uniformidad tiene como indicadores la uniformidad de distribución (DU), el coeficiente de uniformidad (CU) y la uniformidad estadística (U_s). La uniformidad de distribución se define como:

$$DU = 100 (Z_{1q}/Z_{avg}) \quad (4.1)$$

donde: DU, es la uniformidad de distribución (%); Z_{1q} , es la cantidad media (mm) infiltrada en el cuarto menor del área regada, correspondiendo a la cuarta parte del área regada que recibe menos agua; y Z_{avg} es la cantidad media (mm) infiltrada en la parcela.

En riego por aspersión, las alturas infiltradas son sustituidas por las pluviometrías medidas, mientras que, en riego localizado, se utilizan los caudales descargados por los emisores. El coeficiente de uniformidad se define como:

$$CU = 100 (1 - \sum X_i / n m) \quad \text{como } X_i = |Z_i - m| \quad (4.2)$$

donde: CU, es el coeficiente de uniformidad (%); Z_i , son las alturas de agua o caudales medidos (mm); n, es el número de puntos de medida; y m, es la media de las mediciones Z_i (mm).

CU sigue una distribución normal (Hart y Reynolds, 1965), pudiendo tomar la forma:

$$CU = 100 \left(1,0 - \frac{sd}{m} \left(\frac{2}{\pi} \right)^{0,5} \right) \quad (4.3)$$

donde: sd, es la desviación típica de las medidas (mm); y m, es la media de las medidas (mm).

En este desarrollo, puede escribirse:

$$sd = \frac{m}{(2/\pi)^{0,5}} \left(1,0 - \frac{CU}{100} \right) \quad (4.4)$$

DU y CU están relacionados entre si (Keller y Bliesner, 1990), pudiendo establecerse las siguientes expresiones aproximadas:

$$CU = 100 - 0,63 (100 - DU) \quad (4.5)$$

ó

$$DU = 100 - 1,59 (100 - CU) \quad (4.6)$$

Hart y Reynolds (1965) fueron los primeros en adoptar una distribución normal de las alturas de agua aplicadas a una parcela regada con media m y desviación típica sd (Ec. 4.4) para proyectar en aspersión, asumiendo una dosis media D (mm) y teniendo como objetivo un porcentaje pa de la parcela adecuadamente regado; es decir, que recibiese, por lo menos, la cantidad D. Recientemente, el asunto fue retomado por diversos autores, que analizaron otras funciones de distribución, como es el caso de Seginer (1987), o desarrollaron metodologías de proyecto, como Keller y Bliesner (1990).

El coeficiente de uniformidad estadística, U_s (%), se define como:

$$U_s = 100 \left(1 - V_q \right) = 100 \left(1 - \frac{S_q}{q_a} \right) \quad (4.7)$$

donde: V_q , es el coeficiente de variación de los caudales medidos; S_q , es la desviación típica de los caudales medidos (lh^{-1}); y q_a , es la media de los caudales observados (lh^{-1}).

Bralts *et al.* (1987) adoptaron U_s para el proyecto y definieron V_q a partir de la media geométrica de los coeficientes de variación relativos a la obstrucción de los emisores, a la variación de fabricación y a la variación de la presión (Epígrafe 7.6.2).

Las bajas uniformidades se traducen en condiciones de exceso y de déficit de infiltración en parte de la parcela (Burt *et al.*, 1997), provocando pérdidas de producción debidas al déficit, o al exceso, de agua en el suelo, y pérdidas de agua y de fertilizantes donde el agua infiltrada percola más allá de la zona radicular.

4.3.3. Eficiencia

La eficiencia de aplicación se define frecuentemente por la eficiencia del cuarto menor dada por la relación:

$$e_a = 100 (Z_{r,lq}/D) \quad (4.8)$$

donde: $Z_{r,lq}$, es la cantidad media añadida a la reserva de agua del suelo en la zona radicular (mm) en el cuarto menor de la parcela; y D , es la dosis bruta aplicada (mm).

Dada la dependencia entre eficiencia y manejo del riego, puede ser ventajoso determinar no la eficiencia de aplicación real si no su valor potencial en el supuesto de que el sistema pudiera ser mejor manejado. La eficiencia potencial del cuarto menor (PELQ, %), que puede ser usada para proyecto, corresponde al funcionamiento que el sistema puede alcanzar cuando la dosis requerida es aplicada en el momento adecuado (Merriam y Keller, 1978); está definida como:

$$PELQ = 100 \frac{Z_{lq, MAD}}{D_{MAD}} \quad (4.9)$$

donde: $Z_{lq, MAD}$, es la cantidad media de agua infiltrada en el cuarto menor de la parcela (mm) cuando es igual a MAD; D_{MAD} , es la dosis bruta aplicada (mm) cuando el déficit de agua en el suelo es igual a MAD; y MAD, es el déficit permisible de manejo de agua en el suelo (“Management Allowed Deficit”; mm).

El MAD se escoge de acuerdo con el cultivo, las condiciones ambientales y la disponibilidad de agua para riego (Martin *et al.*, 1990) como ya se ha expuesto en el Epígrafe 3.5.

Las bajas eficiencias ponen de manifiesto que parte del agua aplicada no es utilizada para la producción, y se pierde, adicionándose a las capas freáticas o a las aguas superficiales degradadas.

4.3.4. Relaciones entre uniformidad y eficiencia

Comparando las ecuaciones que definen DU (Ec. 4.1) y e_a (Ec. 4.8), se comprueba que los numeradores de ambas se refieren a alturas medias de agua infiltradas en la cuarta parte de la parcela que recibe menos agua: Z_{lq} , en el caso de DU, y $Z_{r,lq}$, en el caso de la eficiencia e_a . En cuanto a los denominadores, se tiene, respectivamente, Z_{avg} y D. Como $Z_{r,lq}$ es la parte de Z_{lq} que permanece en la zona radicular, mientras que Z_{lq} incluye la porción de agua que percola hacia capas más profundas de suelo, se tiene:

$$Z_{r,lq} \leq Z_{lq} \quad (4.10)$$

Por su parte, D es la dosis bruta aplicada a toda la parcela; por tanto, incluye no sólo la parte que se infiltra (Z_{avg}) sino, también, las fracciones de agua evaporada y de escorrentía superficial, resultando entonces:

$$Z_{avg} \leq D \quad (4.11)$$

Consecuentemente, si el numerador de e_a no puede exceder el de DU, y si su denominador no puede ser menor que el de DU, se tendrá:

$$e_a \leq DU \quad (4.12)$$

lo que indica que DU es el valor límite que puede ser alcanzado por la eficiencia de aplicación. Este hecho es completamente lógico, pues, como se analiza para cada uno de los métodos de riego en los capítulos siguientes, e_a depende del manejo del riego, es decir, de las cantidades y momentos de las aplicaciones. De este modo, la uniformidad de distribución funciona como el indicador que caracteriza el sistema mientras la eficiencia de aplicación caracteriza la gestión en la dependencia de las limitaciones impuestas por el sistema (Pereira, 1999; Pereira *et al.*, 2002a).

La idea de mejorar los regadíos, o su funcionamiento, se reduce frecuentemente a la de mejorar la eficiencia, considerándose que bajas eficiencias significaban grandes cantidades de agua perdida. Como se expuso anteriormente, se fue, sin embargo, constatando que ésto no era así, y que lo que caracterizaba un sistema y, por eso condicionaba la eficiencia, era su uniformidad (Keller y Bliesner, 1990; Pereira, 1999; Pereira *et al.*, 2002a). De aquí, resulta que la mejora de los regadíos pasa necesariamente por mejorar el sistema junto con su gestión o, con otras palabras, que es inconsistente buscar mejorar la gestión y la eficiencia sin identificar las características limitantes del sistema y sin encontrar sus respectivas soluciones.

Se presentan dos figuras que aclaran estos conceptos. La primera se refiere al riego tradicional en canteros con pendiente, como se practica en el Norte de China (Fig. 4.1). Muestra la falta de uniformidad de la superficie del cantero, con pendiente invertida cerca del extremo aguas abajo. Como el corte de los caudales es realizado cuando el agua alcanza el extremo aguas abajo, resulta evidente que, para que esto suceda, es necesario “llenar” toda la zona en depresión antes que el agua alcance el extremo aguas abajo. De ahí, resulta que se aplica un gran exceso de agua, lo que hace que Z_{lq} sea mucho mayor que $Z_{r,lq}$ y, por tanto [Ecs. (4.11 a 4.13)], la eficiencia sea muy baja aunque el manejo del riego no sea malo. Son las características del sistema en relación a la nivelación de las parcelas las que condicionan el funcionamiento.

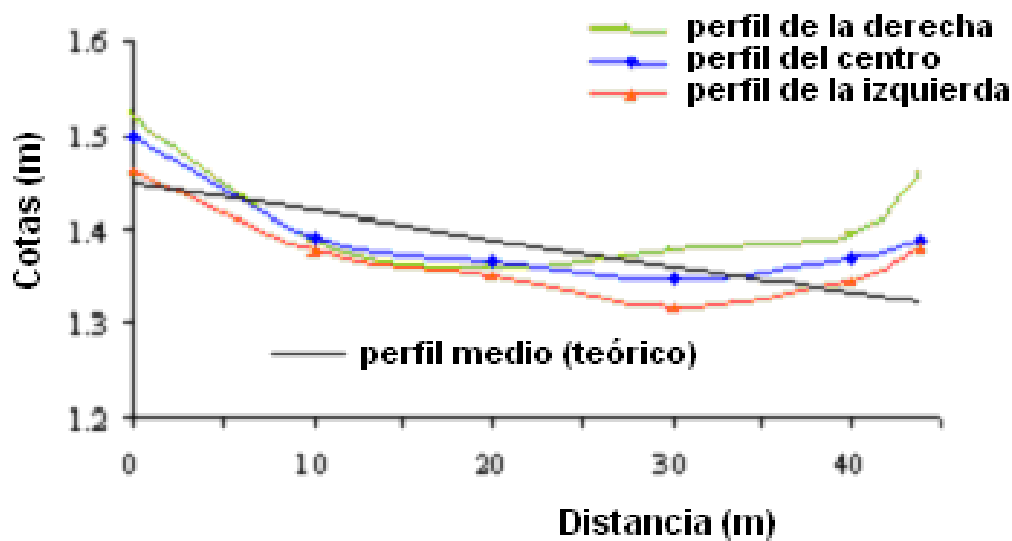


Figura 4.1. Perfiles longitudinales observados a lo largo de un cantero, comparados con el perfil medio (teórico), mostrando la no uniformidad del sistema, causa de la baja eficiencia.

El segundo ejemplo se refiere al riego por aspersión, con un equipo pivote en el Alentejo (Portugal). La baja eficiencia se pone en evidencia por la fuerte erosión producida por la escorrentía, bien visible en la fotografía de la Figura 4.2. La escorrentía corresponde al agua aplicada que no se infiltra y no es utilizada por el cultivo en la zona de aplicación. Las razones para que esto suceda están relacionadas con el proyecto deficiente del sistema, en el que se adoptó una intensidad pluviométrica muy superior a la tasa de infiltración del suelo, agravándose el problema con la pendiente del terreno. En este caso, la uniformidad no es baja, pero las características del sistema son inadecuadas a las condiciones ambientales. Una cuidadosa gestión del suelo para mejorar la infiltración y la realización mecanizada de zanjas según las curvas de nivel serían aquí las prácticas de gestión que permitirían mejorar la eficiencia, eventualmente asociadas al cambio de los aspersores que condujese a menores intensidades pluviométricas.



Figura 4.2. Riego ineficiente por causar escorrentía y erosión debido a la inadecuación del sistema a las condiciones de suelo y de terreno y a la no adopción de gestión del suelo que minimizase tales problemas.

En la Tabla 4.2, se proporcionan valores indicativos de la eficiencia de aplicación para los sistemas de riego que se abordan en los capítulos siguientes. Se trata de valores que presuponen sistemas bien proyectados y bien mantenidos, y que, por tanto, no imponen límites a la buena gestión y funcionamiento del riego.

Tabla 4.2. Valores indicativos de las eficiencias de aplicación para sistemas de riego bien proyectados y bien mantenidos.

Sistemas de riego	Eficiencias (%)
• Riego por gravedad con nivelado de precisión:	
– Surcos.	65 – 85
– Fajas.	70 – 85
– Canteros.	70 – 90
• Riego por gravedad tradicional:	
– Surcos.	40 – 70
– Fajas.	45 – 70
– Canteros.	45 – 70
• Riego de arroz, canteros en inundación permanente.	25 – 70*
• Riego por aspersión:	
– Sistemas estacionarios de cobertura total.	65 – 85
– Sistemas estacionarios desplazables manualmente.	65 – 80
– Laterales con ruedas.	65 – 80
– Cañón con enrollador o con cable.	55 – 70
– Laterales móviles, con pivote central.	65 – 85
• Microrriego (riego localizado):	
– Goteros, \approx 3 emisores por planta (frutales).	85 – 95
– Goteros, $<$ 3 emisores por planta.	80 – 90
– Micro-aspersores y “difusores” (frutales).	85 – 95
– Línea continua de emisores gota-a-gota.	70 – 90

* Los valores más bajos se refieren a canteros tradicionales, mal nivelados y sin un adecuado control de la lámina de agua del cantero, mientras que los más altos se refieren a canteros de grandes dimensiones, bien nivelados y con buen control de la lámina de agua.

4.4. Funcionamiento de sistemas hídricos; usos y consumos de agua

El concepto de eficiencia fue introducido por Israelsen (1932) para relacionar la cantidad de agua consumida en la producción de un cultivo dado con la cantidad de agua movilizada para el riego (Wolters, 1992). La idea de mejorar el riego se quedaba, así, reducida a mejorar la eficiencia por considerarse que bajas eficiencias significaban bastante cantidad de agua perdida. Sin embargo, poco a poco, se fue constatando que no era así. Como se discutió antes, al final, lo que caracteriza un sistema y, por eso, condiciona la eficiencia, es la uniformidad. Al constatarse que los indicadores de uniformidad tienen un significado estadístico, se hizo posible su uso en proyecto, principalmente relacionando dotaciones de riego y niveles de producción con objetivos de uniformidad. Por su parte, la eficiencia se volvió esencialmente un indicador de gestión y del potencial de ahorro de agua (Pereira *et al.*, 2002a,b).

Durante mucho tiempo, se utilizó el concepto de eficiencia como el principal indicador del uso del agua en sistemas de transporte y distribución. Se definieron así las eficiencias de transporte, de distribución y del proyecto, o del sistema, por la relación entre las cantidades de agua suministradas por las redes, en las salidas, y las cantidades suministradas a las redes, en la entrada (Wolters, 1992). Este concepto, sin embargo, fue utilizado de forma poco apropiada al considerarse como pérdidas las cantidades representadas por las fracciones no utilizadas. De hecho, en muchos casos, tales fracciones son utilizadas o utilizables aguas abajo de los sistemas considerados, como es el caso del sistema de Sorraia (Portugal) antes citado, y, por tanto, no son pérdidas. Este hecho llevó a Jensen (1996) a proponer la adopción del término fracción de uso consuntivo para designar la relación entre la cantidad de agua consumida por los cultivos y la cantidad movilizada por un sistema de riego. Allen *et al.* (1997) y Burt *et al.* (1997) fueron más lejos, y propusieron una nueva terminología, también adoptada por otros (Pereira, 2001; Pereira *et al.* 2002b), que se basa en la distinción clara entre “uso” y “consumo”.

Para muchos, los términos “uso del agua” y “consumo del agua” son sinónimos. Sin embargo, de hecho, no es así. Uso del agua corresponde a la movilización de una determinada cantidad de agua con un cierto fin (Fig. 4.3). Aún así, una parte de esa agua es devuelta al ambiente, en el mismo o, generalmente, en otro lugar, inmediatamente o pasado algún tiempo, pero, raramente, con la misma calidad, eventualmente degradada tras haber sido usada. La parte no devuelta corresponde al consumo. Del agua de buena calidad que recibimos en nuestras casas a partir de un sistema de abastecimiento (uso doméstico), la mayor parte es devuelta a la red de alcantarillado con calidad degradada tras haber sido usada en lavados, baños, retretes, y solo una pequeña parte es consumida en los alimentos o por evaporación. Si esa agua residual fuese recogida y tratada, podría ser usada otra vez, pero en condiciones menos exigentes en términos cualitativos que en el primer uso. Si no fuese recogida y tratada para otros usos, es desperdiciada y, eventualmente, irá a degradar otras masas de agua, ríos o acuíferos situados aguas abajo. Será una pérdida si es añadida a la masa de agua cuya calidad es tal que no permita su reutilización, incluso cuando fluya a los océanos (Fig. 4.3).



Figura 4.3. Uso y consumo de agua, usos benéficos, desperdicios y pérdidas.

De la misma forma, en la agricultura, el agua usada es la que es movilizada desde un río, de un depósito creado por una presa, o en un acuífero, mientras que el agua consumida es la que se evapora a partir del depósito, de los canales, y del suelo, y la que es transpirada por las plantas cultivadas y por otras plantas no útiles, así como la que se incorpora en el producto final como agua de constitución. Otras varias fracciones del agua usada no son consumidas, principalmente las que se infiltran y percolan hasta acuíferos subyacentes a partir de los depósitos, de canales y del propio campo cultivado, o fluyen hacia cursos de agua superficial por descargas de los canales o a partir de los campos regados. Estas aguas podrán ser usadas otra vez o ser añadidas a masas de agua cuya calidad no permita la reutilización.

Se puede, igualmente, distinguir pérdidas de agua de desperdicios de agua (Fig. 4.3). En el caso de la agricultura de regadío, pérdidas serán las aguas evaporadas que no corresponden a la evapotranspiración del cultivo regado y las aguas añadidas a masas de agua que no permiten su reutilización. Las restantes fracciones, o fueron consumidas para el objetivo escogido, o regresaron a la naturaleza de manera que pueden ser usadas otra vez, más tarde y por otros usuarios. Serán desperdicios las cantidades de agua que fueron usadas en exceso, como es el caso de descargas a partir de los canales o de exceso de agua aplicada en el riego. Los desperdicios conducen a pérdidas, o a fracciones reutilizables posteriormente pero sin que se obtenga beneficio de su utilización.

Se debe distinguir entre usos benéficos y usos no benéficos. Serán benéficos aquellos que llevan a la obtención del producto deseado (principalmente, la evapotranspiración del cultivo) y, en el caso del riego, al control de la salinidad del suelo, que exige la aplicación de una fracción de agua en exceso (la fracción de lavado) que percole a través de la zona radicular y arrastre las sales a profundidades que no afecten al cultivo.

Adoptando estos conceptos podemos decir que los funcionamientos de los sistemas hídricos, agrícolas y no agrícolas, grandes o pequeños, deben ser tales que favorezcan los usos benéficos y limiten al máximo las pérdidas y los desperdicios. Igualmente, serán buenos los funcionamientos que proporcionen el control de las fracciones no reutilizables. Tales conceptos e indicadores, definidos en la Tabla (4.3), para los usos agrícolas en regadío, y en la Tabla (4.4), para los usos domésticos, industriales, de ocio, paisajísticos y otros, pueden resumirse así:

- La fracción consumida (FC), que consiste en la fracción de agua usada o movilizada que es evapotranspirada por los cultivos y vegetación, se evapora, es incorporada en el producto o bien es consumida como bebida o alimento y, por tanto, deja de estar disponible tras su uso. Puede explicarse por la relación entre el agua evaporada y consumida total (Q_{ET+C}) y el agua movilizada para el uso en cuestión (Q_{MOB}):

$$FC = Q_{ET+C}/Q_{MOB} \quad (4.13)$$

- La fracción reutilizable (FR), que consiste en la fracción de agua usada que no siendo consumida, cuando es usada en una actividad dada (producción, proceso o servicio), es devuelta con calidad aceptable a las aguas dulces superficiales o subterráneas no degradadas, y puede ser usada otra vez. Está expresada por el cociente entre la cantidad de agua no consumida en el sistema, pero no degradada (Q_{RU}) y la cantidad movilizada (Q_{MOB}):

$$FR = Q_{RU}/Q_{MOB} \quad (4.14)$$

- La fracción no reutilizable (FNR), que consiste en la fracción de agua usada que no siendo consumida, cuando es usada en una actividad dada (producción, proceso o servicio), es devuelta al ambiente con calidad inaceptable o es añadida a aguas superficiales o subterráneas degradadas y no puede ser usada otra vez. Está expresada por el cociente entre la cantidad de agua perdida en el sistema y, por tanto, no reutilizable, Q_{NR} , y la cantidad movilizada (Q_{MOB}):

$$FNR = Q_{NR}/Q_{MOB} \quad (4.15)$$

Tabla 4.3. Indicadores de uso del agua en regadío

	Aguas consumidas	Aguas no consumidas, pero no reutilizables	Aguas no consumidas, pero reutilizables
Usos beneficiosos	<ul style="list-style-type: none"> • ET de los cultivos regados. • Evaporación. • Agua en el producto. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fracción de lavado añadida a aguas salinas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fracción de lavado añadida a aguas reutilizables.
Usos no beneficiosos	<ul style="list-style-type: none"> • ET de exceso de agua del suelo y de plantas adventicias. • Evaporación a partir de los aspersores. • Evaporación a partir de canales y depósitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Percolación a capas freáticas salinas. • Aguas de retorno y de descargas drenando a aguas degradadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Percolación a capas freáticas de buena calidad. • Aguas de retorno y de descargas reutilizables.
	Fracción consumida	Fracción no reutilizable	Fracción reutilizable

Adoptando estos conceptos e indicadores, se puede llegar a conocer más las perspectivas para usar mejor el agua en un marco de conservación del recurso y de ahorro en su uso, con la ventaja de recurrir a conceptos e indicadores que pueden ser comunes a sistemas agrícolas y no agrícolas. Por ejemplo, el concepto de eficiencia está siendo usado de forma muy dispar entre profesionales del riego y por otros profesionales y, frecuentemente, de forma muy desajustada de las realidades. Recurriendo a los indicadores y conceptos mencionados, el concepto de eficiencia se queda reservado para finalidades específicas para las cuales su definición es precisa.

La adopción, aún poco extendida, de los indicadores anteriores no elimina el uso de la eficiencia como indicador. A semejanza de la definición adoptada para eficiencia de aplicación, puede definirse la eficiencia de un sistema hídrico cualquiera (E_f) como el cociente entre las cantidades salientes y entrantes en ese sistema (expresado en %). En el caso del riego, es común recurrir a la eficiencia de transporte y de distribución, que relacionan las cantidades suministradas a la entrada de las redes con las cantidades que las mismas suministran a las salidas. A título indicativo, se incluye la Tabla (4.5) relativa a tales sistemas.

Tabla 4.4. Indicadores de uso del agua en usos municipales, domésticos, industriales, recreativos, paisajísticos y otros.

	Aguas consumidas	Aguas no consumidas, pero no reutilizables	Aguas no consumidas, pero reutilizables
Usos beneficiosos	<ul style="list-style-type: none"> • Agua para beber y en los alimentos y bebidas. • Agua incorporada en los productos. • Evaporación para control de la temperatura. • ET de la vegetación y evaporación de lagos en áreas de recreo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efluentes domésticos, urbanos, e industriales no tratados. • Efluentes de buena calidad emitidos a aguas salinas o degradadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efluentes domésticos, urbanos, e industriales tratados. • Caudales retornados no degradados de la generación de energía y de control de la temperatura.
Usos no beneficiosos	<ul style="list-style-type: none"> • ET de vegetación no beneficiosa. • Evaporación de aguas desperdiciadas. • Evaporación a partir de canales y depósitos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Percolación a partir de áreas urbanas y de ocio a capas salinas. • Fugas a partir de sistemas urbanos e industriales a capas salinas y aguas degradadas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aguas de calidad de percolación y de fugas a capas freáticas de buena calidad. • Fugas y descargas de sistemas urbanos reutilizables.
	Fracción consumida	Fracción no reutilizable	Fracción reutilizable

Tabla 4.5. Valores indicativos de las eficiencias de transporte y distribución para sistemas de riego bien proyectados y bien mantenidos.

Sistemas de riego	Eficiencias (%)
Sistemas de transporte (redes primarias de riego):	
• Tuberías (tubos).	95 – 100
• Canales revestidos.	60 – 90*
• Canales en tierra, no revestidos.	55 – 85*
Sistemas de distribución (redes secundarias y terciarias):	
• Tuberías a (alta) presión.	95 – 100
• Tuberías de baja presión.	90 – 100
• Canales con capacidad > 50 l/s (grandes distribuidores).	80 – 95
• Canales con capacidad ≤ 50 l/s (pequeños distribuidores).	60 – 90

* Los valores más bajos se refieren a canales con control aguas arriba y regulación insuficiente.

Sin embargo, más importante que conocer la eficiencia es percibir como el agua es usada, cuales son los beneficios que se obtienen de su uso. Para ello, está siendo adoptado el concepto de productividad del agua (WP), la cual es definida por el cociente entre la cantidad de producto o servicio producido y la cantidad de agua usada (no solo la consumida) para su obtención. En términos de riego, en el numerador se tendrá la producción final, o el rendimiento monetario que proporciona, mientras que, en el denominador, entra el agua usada en el riego, consumida o no, y el agua proporcionada naturalmente, es decir, la lluvia, la reserva de humedad del suelo y la ascensión capilar:

$$WP = \text{Producto (kg ó €)} / (I_t + P_e + \Delta S + GW) \quad (4.16)$$

donde: I_t , es el total de riego durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); P_e , es la precipitación efectiva durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); ΔS , es la variación de la

reserva de agua del suelo durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm); y GW, es la ascensión capilar acumulada durante el ciclo vegetativo del cultivo (mm).

En el caso de la industria, de los servicios o de los usos urbanos, el producto y su valor serán los específicos de los usos en cuestión (metros de tejido, litros de refresco, área lavada, personas servidas, etc.), mientras el denominador será la cantidad de agua movilizada o suministrada para ese fin.

Otros indicadores han sido utilizados frecuentemente en redes de riego para traducir las condiciones de servicio de la red, tales como la fiabilidad y la equidad (Lamaddalena, 1997; Lamaddalena y Pereira, 1998; Pereira *et al.*, 2003), que se presentan en Pereira (2001; 2002/2003), pero que no caben en el contexto de este libro.

CAPÍTULO 5

RIEGO POR SUPERFICIE

5.1. Introducción

El riego por superficie (o de gravedad) continúa teniendo una importancia relevante en el desarrollo del regadío, no sólo porque corresponde aproximadamente al 80% de las áreas regadas del Mundo, sino porque continúa siendo el método más apropiado, técnicamente, para suelos llanos y pesados, y, económicamente, para muchos cultivos y sistemas de producción. La euforia del desarrollo económico con bajos costes de energía llevó a una gran expansión del riego por aspersión y del riego localizado, muy particularmente a la mecanización del riego por aspersión, recurriendo a la alta presión; naturalmente, el interés por los métodos de los riegos por superficie disminuyó, sobre todo en Europa, donde tales sistemas (tradicionales) son altamente absorbedores de mano de obra, y se fueron convirtiendo en inviables económicamente.

Pese a ello, la evolución de los precios de la energía puso en entredicho el desarrollo del riego por aspersión, suscitando nuevas soluciones en el ámbito de la baja presión, principalmente de las redes de distribución para el riego de gravedad (Pereira *et al.*, 2003), y provocó un nuevo interés por el riego por superficie. El uso generalizado de las nivelaciones de precisión con control por láser creó condiciones para regar con uniformidad grandes superficies, recurriendo a equipamientos de automatización del riego, lo que resolvió los problemas asociados a los altos consumos de mano de obra, como es el caso del desarrollo y modernización del riego por superficie en los Estados Unidos, Canadá y Australia. Paralelamente, se ha asistido a un fuerte desarrollo de las técnicas de gestión del agua en riego de gravedad, tanto a nivel de explotación agrícola como en los sistemas de transporte y distribución, tratando de maximizar los beneficios del riego y responder a las necesidades de conservación y valorización de los recursos naturales.

El riego por superficie ha continuado siendo objeto de investigación para la mejora de los procesos y prácticas de riego. Se han desarrollado métodos de evaluación (Merriam y Keller, 1978; Walker y Skogerboe, 1987) para permitir la obtención de indicadores de funcionamiento de los sistemas (Capítulo 4) y, sobretodo, fundamentar los cambios a introducir para mejorar el uso y la productividad del agua en regadío (Li, 1999; Fabiao *et al.*, 2003). Igualmente, en gran medida, utilizando los datos de evaluación en el campo, se han desarrollado modelos de simulación de riego por superficie (Walker y Skogerboe, 1987) que constituyen hoy herramientas esenciales para el proyecto y para la evaluación. Una innovación actual es poder recurrir a las técnicas de optimización para la obtención de los parámetros que caracterizan la infiltración y la rugosidad hidráulica a utilizar en los modelos.

Estos desarrollos, a pesar de convertirse en garantía de la existencia de tecnologías adecuadas para fundamentar la investigación y el desarrollo experimental en riego por superficie, no dan respuesta directa e inmediata a los problemas y desventajas comúnmente indicados para dichos sistemas de riego, ya que sólo, de una forma muy limitada, han sido adoptados por los agricultores. Por un lado, éstos necesitan de apoyo técnico para aplicar la innovación, porque la utilización de equipamientos modernos exige la aceptación de nuevas tecnologías de gestión; por otro lado, la innovación, principalmente los equipamientos, al contrario del riego por aspersión y micro-riego, no es fácilmente accesible en el mercado, siendo muy pocas las empresas que producen y venden esas tecnologías. La oferta en el mercado de equipos para riego por superficie es muy limitada y los agricultores, casi únicamente, disponen de equipos disponibles en los EE.UU.

Este Capítulo trata el riego por superficie en la perspectiva de su modernización, dejando los aspectos teóricos para una lectura posterior, e incluyendo aquí la indicación de algunas obras de consulta actualizadas. Se da primero una perspectiva de los principales sistemas de riego por superficie y se presentan, seguidamente, algunos desarrollos tecnológicos que pueden ser importantes para la modernización y mejora técnica, económica y ambiental del riego de gravedad.

5.2. Sistemas de riego de gravedad

5.2.1. Procesos de riego

Los sistemas de riego de gravedad son muchos, en correspondencia con los procesos de aplicación del agua a las parcelas regadas. Estos se resumen esencialmente a los sistemas de surcos, canteros, fajas, surcos a nivel y riego de esparcimiento.

Los tres primeros son los principales y, sobre ellos, recae la atención en este Capítulo. Los sistemas de surcos y fajas son llamados de infiltración porque se aplican caudales suficientemente grandes, para que el agua fluya sobre el terreno, y, suficientemente pequeños, para que se vaya infiltrando mientras fluye, de forma que el agua deja de estar sobre el terreno en cuanto se corta el suministro. Se trata, pues, de riego de larga duración, al contrario del riego por canteros. En los canteros, el proceso de inundación es rápido y, enseguida, llenados con la dosis pretendida, la mayor parte de la infiltración se da después del corte de la alimentación, prolongándose por varias horas. Los procesos de los surcos a nivel y de esparcimiento son llamados de escurrimiento porque el agua fluye, más o menos libremente, sobre la superficie del suelo como si se tratase de un flujo superficial.

Los dos últimos sistemas, de surcos a nivel y por esparcimiento, tienen un gran número de variantes de acuerdo con las condiciones topográficas de las parcelas a regar y el tipo de cultivos (Palerm, 2002; Martínez *et al.*, 2007). El riego de surcos a nivel es usado frecuentemente para el riego de prados, principalmente en terrenos con pendiente, como el “riego de lima” usado tradicionalmente en las serranías del Norte de Portugal y España; es un riego por desbordamiento por rasas de contorno (o regueras de nivel), con una fina lámina de agua que escurre lentamente sobre toda la superficie de la pradera (Poças *et al.*, 2007). Derivan el agua de arroyos, riberas, pequeños ríos y manantiales. El agua es, entonces, conducida a través de acequias que abastecen pequeñas regueras, trazadas según las curvas de nivel o con una ligera pendiente, a partir de las cuales escurre sobre la superficie a regar hasta ser recogida en la reguera siguiente, desde donde escurre de nuevo hasta que el exceso de agua final drena de forma natural al curso de agua de donde fue derivado. Este proceso de regueras es tradicional en el riego de prados de montaña en el Norte de Portugal (Fig. 5.1) y de España, así como en zonas de montaña de Argentina y Chile. En Portugal y España, es usado como riego de invierno para el control de la temperatura y hacer que los prados se mantengan fisiológicamente activos durante el invierno. Estos sistemas están en el origen de los paisajes y los sistemas ecológicos de gran interés para la conservación de recursos naturales y para el turismo.

En los Andes, los surcos a nivel siguen frecuentemente un trazado en zig-zag para controlar la velocidad del agua, y se utilizan para el riego de cultivos en línea como maíz, patatas, judías y otros. Es grande la diversidad de sistemas de riego de superficie en las regiones andinas (Palerm, 2002; Martínez *et al.*, 2007), pero, en muchos casos, se está

tratando de substituirlos por sistemas en aspersión. Todavía, los sistemas de gravedad tienen potencial para su utilización en el futuro, pero se requieren estudios apropiados para su modernización.



Figura. 5.1. “Riego de lima” por regueras de nivel en prados de montaña.

El riego por esparcimiento de crecidas se practica en zonas áridas; las aguas de crecidas son derivadas por redes de canales y regueras, de donde acceden a los campos cultivados para esparcirse en ellos, de forma más o menos irregular, conforme los agricultores hayan preparado mejor o peor sus campos. Este proceso de esparcimiento de crecidas se practica en el Norte de África y en la Península Arábiga (Oweis *et al.*, 2004), principalmente, y se practicaba en la región de Murcia y en los campos de Cartagena (Morales, 2002). También, es de esparcimiento el riego que se practica tradicionalmente en canteros o tableros cultivados con maíz, judías o trigo, en los cuales el regante conduce el agua con la azada para humedecer la parcela más uniformemente. Tal proceso se practica, tradicionalmente, en toda la cuenca mediterránea, cuando los caudales son insuficientes para el riego por canteros, por ejemplo, y el terreno es irregular sin nivelar. Mientras que este último proceso tiende a desaparecer por caro e insuficiente, el riego por esparcimiento de crecidas sigue teniendo gran interés en las zonas áridas y subáridas donde no hay otras fuentes importantes de agua para el riego de cereales.

El capítulo incide, pues, en los métodos más difundidos y cuya modernización es más fácil y más necesaria.

5.2.2. Riego por canteros

Se trata del método más utilizado en todo el Mundo. Consiste en aplicar agua a parcelas generalmente rectangulares, con pendiente casi nula, circundadas por lomos, caballones o albardillas que impiden que el agua pase a otros campos. Los canteros pueden ser utilizados para el riego de arroz por inundación permanente o para el riego de otros cultivos, incluyendo frutales, por inundación temporal.

En el riego de arroz con canteros tradicionales, estos son pequeños, nivelados sin precisión (por tanto, con superficie irregular), llenándose antes de la siembra o trasplante y vaciándose sólo una o dos veces para control de la flora arvense y, finalmente, cuando se inicia la maduración del grano (Fig. 5.2). La lámina de agua sobre el suelo es relativamente grande, de 100 a 150 mm, pudiendo ser mayor cuando la irregularidad de la superficie lo

requiere o cuando se usan canteros siguiendo las curvas de nivel, que deben ser capaces de recoger el agua de lluvia sin ser destruidos, como es el caso típico de Bali, en Indonesia. Los riegos son frecuentes, de forma que mantengan siempre una lámina de agua sobre el suelo. El drenaje puede ser en cascada (Fig. 5.3), de parcela a parcela si las pendientes son bajas y no se producen grandes chaparrones durante el periodo de riego, o por una red de canales siguiendo las curvas de nivel, en el caso contrario. Un proceso de modernización de estos sistemas consiste en disminuir la lámina de agua después de completar el crecimiento vegetativo o, en climas cálidos, donde la lámina de agua no es requerida para el control de la temperatura, sustituir la inundación por mantener el suelo próximo a la saturación (Mao *et al.*, 2004).



Figura 5.2. Canteros tradicionales para el riego de arroz en el Baixo Mondego (Portugal).



Figura 5.3. Canteros para el riego de arroz con drenaje en cascada y adoptando riegos frecuentes para mantener el suelo próximo a saturación, en Guilin, China.

El riego por canteros de los arrozales modernizados utiliza superficies de grandes dimensiones (Fig. 5.4), pudiendo alcanzar más de una hectárea, nivelados con precisión con apoyo de láser, manteniendo la lámina de agua próxima a 100 mm, en la fase inicial del cultivo, y de 50 mm, después. El drenaje es independiente, de forma que cada cantero puede ser vaciado cuando lo aconseje el manejo realizado. En este caso, el trasplante es substituido por la siembra, incluso en seco, iniciándose la inundación después de esta operación.



Figura 5.4. Canteros modernizados de grandes dimensiones para riego de arroz, con redes independientes de riego y de drenaje, en el Valle del Sorraia (Portugal).

En el riego de otros cultivos, se distingue, también, el riego tradicional del modernizado. El riego tradicional (Mayer, 1945) se practica con canteros de pequeñas dimensiones y nivelados irregularmente. En general, su forma depende de la pendiente del terreno. En superficies llanas, se usan canteros anchos y cortos, casi cuadrados, en parcelas de 10 a 20 m de ancho y de 20 a 40 m de largo. Cuando la pendiente es suave, los canteros son rectangulares, estrechos y alargados, con 3 a 7 m de ancho y 40 a 80 m de largo, pudiendo alcanzar hasta 200 m cuando son más estrechos, confundiendo con las fajas que se describen a continuación, como sucede en China, India y Pakistán. Cuando la pendiente es mayor, su forma tiende a seguir la que indican las curvas de nivel, y sus dimensiones a reducirse. Si se usan para cultivos hortícolas, plantados o sembrados en caballones, se usan los llamados surcos cortos, en zig-zag dentro del cantero, entre los caballones (Fig. 5.5), con áreas que varían entre 50 y 200 m². A veces, cada cantero no corresponde a más de un surco corto, con 10 a 30 m de largo según la pendiente del terreno (Fig. 5.6). Cuando se usan para regar frutales, los canteros son generalmente individuales, en torno a cada árbol, tomando la designación de alcorques o pozas (Fig. 5.7.).



Figura 5.5. Pequeños canteros tradicionales para el riego de hortícolas en el que el agua se distribuye por surcos cortos entre caballones, en el Norte de África.



Figura 5.6. Canteros tradicionales para hortalizas, por surcos cortos, como eran en el Valle del Sorraia (Portugal). Obsérvese que la alimentación es cortada cuando el agua alcanza el final del surco.



Figura 5.7. Riego por alcorques o pozas, pequeños canteros junto a cada árbol, con una *hijuela* o reguera que sirve a dos líneas de árboles.

En la práctica tradicional, los canteros son alimentados por acequias en tierra (Fig. 5.8), trazadas perpendicularmente a la mayor dimensión del cantero; consecuentemente, y con frecuencia, en el sentido de la mayor pendiente. El riego de cada cantero se hace manualmente, con auxilio de una azada, para abrir y tapar las bocas de las regueras, utilizando caudales de 5 a 15 ls^{-1} , según la dimensión del cantero, el agua disponible, la pendiente de la reguera y la habilidad del regante (Fig. 5.9). Para los canteros de mayores dimensiones, o más largos, la regla es cortar la alimentación cuando el agua alcanza su final; es decir, cuando se completa el avance (Fig. 5.6). En los de más pequeñas dimensiones, lo normal es cortar la alimentación cuando el surco se llena, lo que es criterio subjetivo del regante. Resulta, pues, difícil que haya uniformidad en las cantidades aplicadas en una misma parcela, porque que tales cantidades dependen esencialmente del tiempo requerido para que se complete el avance, lo que, por otra parte, depende de la irregularidad de la nivelación (para las definiciones de uniformidad, ver Capítulo 4). De este modo, las dosis brutas aplicadas raramente bajan de 70 mm, siendo frecuentes dosis de 150 mm, o más.



Figura 5.8. Regueras perpendiculares a los surcos cortos y en el sentido del mayor pendiente.



Figura 5.9. Regando con azada canteros tradicionales de tomate.

En los canteros modernos, la práctica del riego es muy diferente. Por un lado, los canteros son de grandes dimensiones y nivelados con precisión. Por otro lado, el agua se aplica con estructuras hidráulicas variadas, tales como canales revestidos equipados con compuertas, como se muestra en la Figura 5.10, o tubos de baja presión con válvulas adecuadas. Estas estructuras aseguran el control de los caudales y, una vez que no se produce desbordamiento fuera de los canteros, la correspondiente dosis. La dosis a aportar es fácil de controlar puesto que se conoce el caudal, ya que se corresponderá con el simple producto del caudal por el tiempo de aplicación, dividido por el área regada.



Figura 5.10. Canteros modernos, con nivelado de precisión y alimentación por un canal con compuertas, Arizona.

Los caudales deben ser suficientemente grandes para que el avance sea rápido: generalmente, $> 2 \text{ ls}^{-1}$ por metro de ancho, preferiblemente $> 4 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$, fáciles de implementar en los sistemas modernos. Es posible reducir los tiempos de avance y aplicar cantidades de agua controladas, además de que ésta se distribuye más uniformemente a lo largo del cantero bien nivelado, asegurando, también, mejores eficiencias (Tabla 4.2). Los canteros pueden ser llanos, como están representados en la Figura 5.10, o dotados de caballones para el riego de cultivos en línea, hortícolas en particular (Fig. 5.11).



Figura 5.11. Cantero dotado con caballones para el riego de la lechuga, Arizona.

El riego por canteros es apropiado para suelos con tasa de infiltración (cantidad de agua infiltrada por unidad de área y unidad de tiempo; generalmente, expresado en mm de altura de agua por hora, mmh^{-1}) baja y media, y capacidad de reserva de agua elevada (Anexo 2), ya que, en tales condiciones, el agua cubre rápidamente el cantero y, después, se infiltra más uniformemente. En suelos con gran infiltración, el agua tiende a infiltrarse al principio del cantero, resultando esta zona sobrerregada, mientras que la del extremo opuesto se queda subhúmedecida.

Generalmente, en los riegos por canteros, exceptuando los de arroz, no hay sistemas de drenaje superficial asociados, ya que los caballones que bordean los canteros se ejecutan con altura suficiente para contener la precipitación que ocurra y, así, ese agua pueda ser infiltrada y sumada a la reserva de agua del suelo. Aún sí, en climas tropicales, cuando se producen lluvias intensas y frecuentes, puede haber encharcamiento y, consecuentemente, estrés hídrico por exceso de agua. En los climas de monzón, los canteros son generalmente largos y con pendiente en el sentido de la mayor distancia de forma que se asegure el drenaje libre durante la estación de las lluvias. En los sistemas modernos con nivelación de precisión, el drenaje superficial se hace mejor. Como para otros sistemas de riego por gravedad, cuando haya que controlar capas freáticas altas, frecuentemente en condiciones de salinidad, se necesitan redes de drenaje subterráneas por medio de tubos. Los respectivos colectores funcionan a la vez como medios de drenaje del exceso de agua superficial.

5.2.3. Riego por surcos

En estos sistemas, el agua corre lentamente y se infiltra a través de los surcos, pequeños canales abiertos regularmente, equidistantes, en el sentido de la mayor distancia (Fig. 5.12). Los surcos deben tener pendiente suave y uniforme y ser alimentados por pequeños caudales para que la mayor parte del agua que escurre por ellos se vaya infiltrando uniformemente a lo largo de la parcela. La búsqueda de la combinación ideal entre caudal, longitud y pendiente del surco para que, en las condiciones dominantes de la tasa de infiltración del suelo, se de tal infiltración máxima y uniforme, hace del proyecto y gestión del riego por surcos una tarea particularmente difícil. Tal vez por eso, los sistemas de riego tradicionales son por canteros, incluso cuando, en el riego tradicional, el terreno se prepara con largos surcos y se hace a partir de regueras transversales que los cortan y transforman en surcos cortos (Figs. 5.6 y 5.8) que, una vez llenos, permiten que la infiltración se produzca lentamente, durante mucho tiempo después del corte en el suministro.



Figura 5.12. Riego por surcos alimentados con tuberías de PVC (tomate en caballones largos, Valle del Sorraia, Portugal).

El riego por surcos se desarrolló, principalmente, en regiones donde el riego se practica a gran escala hace poco menos de un siglo, como América del Norte (EE.UU. y Canadá), Australia y los países de Asia Central. Se desarrolló después en otros países y regiones por transferencia tecnológica, ya que las regiones de origen tienen también la más abundante y elaborada investigación y desarrollo experimental, aunque esto ya no sea visible hoy en día en el caso de los países de la ex-URSS y Europa del Este.

Para que la dosis pretendida pueda infiltrarse lentamente a lo largo del surco, la duración del riego es muy dilatada, generalmente entre 6 y 12 h, pudiendo todavía ser superior en el caso de los surcos muy largos. La longitud de los surcos varía, en general, entre 200 y 400 m, pudiendo haber casos de 100 m y hasta de 800 m.

Los surcos están generalmente abiertos en el extremo aguas abajo, para que el exceso de agua aplicada, que no se infiltró, pueda drenar libremente. Las escorrentías aguas abajo representan del 10 al 40% de la dosis aplicada. En estas condiciones, los sistemas incluyen una red de drenaje de los caudales en exceso, que pueden llevarse a la red de drenaje natural, o ser almacenados y reutilizados en parcelas aguas abajo o bombeados para uso en la misma parcela. El agua drenada aguas abajo mantiene la calidad original, excepto en lo que se refiere a los

sedimentos que arrastran por haber provocado erosión en el fondo y paredes del surco, así como al transporte de fertilizantes, normalmente fósforo. Como alternativa, los surcos pueden cerrarse aguas abajo, pero el exceso de agua en ese extremo de los surcos crea frecuentemente problemas de encharcamiento y, por tanto, estrés al cultivo, además de arrastrar fertilizantes, nitratos en particular, y fitosanitarios, más allá de la zona radicular.

El riego por surcos se aplica principalmente para cultivos en línea, estando el cultivo sembrado o plantado en los caballones, entre los surcos. La distancia entre surcos depende de la capacidad de infiltración lateral del agua en el suelo, pero se fija sobre todo por el ancho de trabajo de la sembradora y cosechadora, siendo más común la distancia de 75 cm. En ciertos casos, como en el algodón, en suelos de textura fina y buena conductividad lateral, pueden abrirse los surcos entre cada par de líneas de cultivo cuando se pretende restringir el consumo de agua, con lo que aumenta la distancia entre surcos. Un sistema frecuente de ahorro del agua es el riego de surcos alternos, en el que se riegan sólo uno de cada dos surcos en un riego, humedeciendo, en el siguiente riego, sólo los surcos que se quedaron en el anterior. Sin embargo, este sistema no puede aplicarse a los suelos con baja conductividad lateral, en los que el agua infiltrada se desplaza principalmente en vertical, porque produciría un humedecimiento insuficiente de la zona radicular, induciendo un fuerte estrés al cultivo. En el caso de cereales, como el trigo y la cebada, se usan surcos muy poco profundos (Fig. 5.13), de forma que el agua puede desbordarse por los caballones.



Figura 5.13. Riego por surcos poco profundos alimentados por sifones de PVC para riego de cereales, California.

En los surcos, se usan pendientes pequeñas, generalmente entre $0,001$ a $0,05 \text{ mm}^{-1}$, pero pueden ser menores, incluso nulas en los llamados surcos de nivel, que constituyen un caso particular de los canchales. Las pendientes mayores corresponden a suelos con gran capacidad de infiltración, de forma que se compense la tendencia de que la mayor parte de la infiltración se produzca al principio de la parcela, mientras que las menores son adecuadas para suelos de muy baja infiltración, de forma que se haga más lento el escurrimiento y se favorezca la infiltración al principio de los surcos. El límite superior e inferior de la pendiente se fija por la necesidad de evitar la erosión y permitir que el agua escurra hasta el extremo aguas abajo, respectivamente. Cuando la pendiente natural del terreno sea relativamente grande, y no sea adecuado corregirla por nivelación, deben adoptarse surcos según las curvas de nivel, con ligera pendiente, de forma que se evite la erosión a lo largo de los surcos. Su trazado, al dejar de ser rectilíneo, exige cuidados especiales, tanto en la siembra del cultivo, como en la apertura de los surcos.

En los surcos, se recurre a caudales pequeños, respecto a los canteros, generalmente entre $0,3$ y $1,0 \text{ ls}^{-1}$ por surco. Los caudales más bajos se usan para suelos de muy baja infiltración, y los mayores, cuando esta es elevada. El agua se aplica individualmente a los surcos a partir de regueras, generalmente en tierra, o de tubos con compuertillas, es decir, con pequeñas aberturas regulables.

El proyecto, o la concepción de los sistemas de riego por surcos, consiste, esencialmente, en definir la combinación entre las características de la infiltración del suelo (f), longitud (L), pendiente (S_0) y caudal (q), que permiten maximizar la parte de la dosis (D , mm) que se infiltra y queda almacenada en la zona radicular (Z_{rad} , mm), o, en otras palabras, minimizar la parte de D que se pierde por escorrentía aguas abajo (R , mm) o que percola más allá del límite inferior de la zona explorada por las raíces (DP , mm). Ya que el funcionamiento económico del sistema requiere parcelas suficientemente largas y costes de nivelación aceptablemente bajos, y que el condicionamiento ambiental exige minimizar las pérdidas por erosión, el arrastre de nitratos y agroquímicos más allá de la zona radicular, y el propio ahorro de agua, es necesario encontrar la mejor combinación posible de f - L - S_0 - q , obligando a escoger otro método de riego, o a aceptar una solución que requiera costes adicionales, como es el caso de la reutilización de las aguas drenadas aguas abajo. De cualquier forma, para bajos valores de f , lo adecuado será aumentar L , disminuir S_0 y bajar q , mientras que, para grandes valores de f , será necesario aumentar S_0 y q , sin que este sea erosivo, y disminuir L . La capacidad de infiltración del suelo, que varía a lo largo del periodo de riego, tiene aquí un papel determinante. El problema se resuelve más fácilmente en canteros, ya que no hay escorrentía, y solo se trata de minimizar DP , haciendo más uniforme la distribución espacial de la dosis en el interior del cantero. En la práctica, el agricultor debe observar como tiene lugar el escurrimiento, demasiado lento o rápido, y ajustar los caudales y tiempos de riego, ya que no puede actuar sobre f - L - S_0 , sino, sólo, sobre el caudal. Más adelante, se muestran algunos procedimientos adecuados para tal fin.

5.2.4 Riego por fajas

En el riego por fajas, el campo se divide en fajas, o sea en parcelas rectangulares estrechas y largas, bordeadas lateralmente por caballones (“borders” en inglés, lo que da el nombre al método), con pendiente suave, donde el agua es aplicada y escurre a lo largo de su recorrido al mismo tiempo que se va infiltrando. Se trata pues de un método de infiltración semejante al de los surcos, aunque la forma de las fajas puede corresponder a la de los canteros largos.

El riego por fajas es poco usado, relativamente, pero se ha investigado sobre él más que sobre el riego en canteros. Se usa para cultivos densos, tales como cereales, forrajes y prados, así como para frutales y viñas; en este caso, con los árboles y las cepas plantadas sobre los caballones que separan las fajas. El método se adapta bien a terrenos de pendiente suave ($\leq 0,005 \text{ mmm}^{-1}$) y con una infiltración media a baja, de forma que permita fajas largas, de 100 a 200 m.

Los caudales aplicados son inferiores a los usados en el riego por canteros, pero superiores al de surcos, ya que se pretende que el agua avance lentamente para irse infiltrando y, por tanto, se va esparciendo uniformemente en toda la anchura de la faja; pero, escurriendo en forma de lámina sobre la superficie del suelo debe ser capaz de vencer el rozamiento provocado por el suelo y las plantas que en él crecen. Además de eso, los caudales no deben

ser erosivos, sobre todo cuando el riego se hace en suelo desnudo. Los caudales se sitúan frecuentemente en el intervalo $1,5$ a $2 \text{ ls}^{-1}\text{m}^{-1}$, según la infiltración de los suelos y la pendiente, con el que se relacionan de forma semejante a la referida para los surcos. Al ser los caudales relativamente elevados, y las fajas abiertas en el extremo aguas abajo, los caudales drenados en el extremo aguas abajo son relativamente importantes, generalmente superiores a los de surcos, lo que obliga a la existencia de una red de drenaje superficial, y aconseja la reutilización de los caudales de retorno. Como alternativa, las fajas pueden ser cerradas aguas abajo; pero, en este caso, requieren que el corte de alimentación se efectúe con precisión, de forma que se evite el encharcamiento excesivo aguas abajo.

La anchura de las fajas depende principalmente del cultivo. En viñas y frutales, las fajas tienen anchos correspondientes a la distancia entre las líneas de plantas. En el caso del riego de cereales, forrajes y prados, la anchura varía entre 5 y 60 m, dependiendo de los caudales disponibles y de la pendiente transversal (Fig. 5.14). La diferencia de nivel entre ambos lados debe ser $< 30\%$ de la altura de lámina de escurrimiento para que el agua se esparza bien a través de la faja. La pendiente transversal está limitada por los costes de nivelación; es tanto mayor cuanto mayor es la altura de lámina de escurrimiento, lo que sucede cuando la pendiente longitudinal es pequeña, así como cuando los caudales sean elevados y la rugosidad causada por las plantas sea alta, también. Consideradas estas restricciones, la anchura de las fajas debe ser un múltiplo de la anchura de trabajo de los aperos y maquinaria más importantes en el sistema de cultivo utilizado.



Figura 5.14. Riego por fajas largas, anchas y de pendiente suave en prados, California.

La longitud de las fajas, como la de los surcos, depende de la capacidad de infiltración del suelo, de la pendiente y del caudal disponible. Generalmente, se sitúan entre 100 y 200 m, pudiendo alcanzar 400 m cuando la infiltración es pequeña, los caudales son relativamente elevados y se suele regar para altos valores del MAD (Cap. 3.5).

Para conseguir un buen funcionamiento en el riego por fajas, (p.e., para que la infiltración sea uniforme a lo largo de su distancia y anchura), es necesario que el agua avance suficientemente deprisa. Puede ser necesario regar con caudales diferentes, mayores cuando la vegetación crece y aumenta la rugosidad y el rozamiento con la superficie. De lo contrario, al disminuir la velocidad, la infiltración al inicio aumenta perjudicando la uniformidad y la infiltración que ocurre aguas abajo, en el extremo opuesto.

El riego por fajas, cuando éstas son cerradas aguas abajo, y, sobretodo, tienen poca pendiente, se aproxima al riego por canteros. Además de eso, los equipamientos usados para la alimentación de las fajas son semejantes a los de los canteros. De hecho, solo se reconoce, si se trata de uno u otro método, observando el riego y midiendo la duración de sus fases, lo que se aborda a continuación.

Las dificultades de manejo, en cierta manera opuestas a la relativa facilidad con que se consigue el riego moderno por canteros, ha llevado a la progresiva sustitución de las fajas por éstos en el caso de cereales y forrajes. Por otro lado, el ahorro de agua que se consigue, el menor consumo de mano de obra y la mayor facilidad de manejo, inclusive su automatización, que están asociadas al riego por goteo, conducen a que haya fuerte tendencia para que éste sustituya al riego por fajas en el caso de frutales y viñas.

5.3. Fases del riego

Desde que el agua comienza a aplicarse a una parcela hasta que desaparece de su superficie, el riego pasa por diferentes fases, que tienen características y designaciones diferentes en el riego por inundación y en el de infiltración, como se muestra en la Figura 5.15.

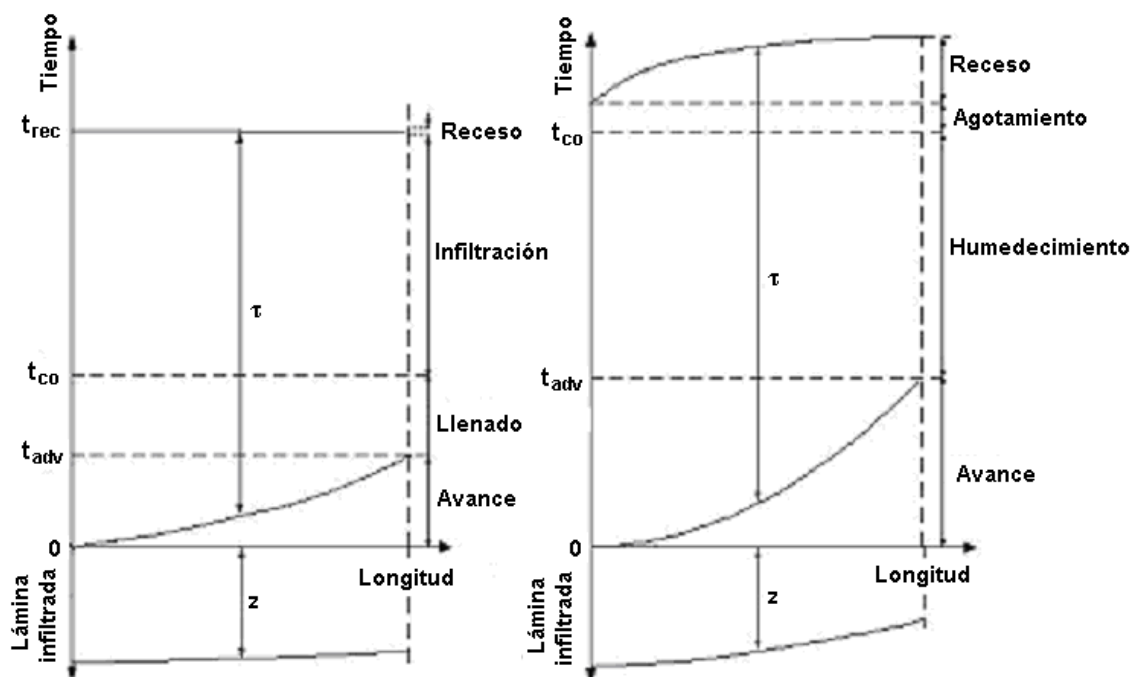


Figura 5.15. Fases de riego y respectivos tiempo de duración, tiempo de oportunidad para la infiltración, τ , y alturas de agua infiltradas, z , en (a) canteros y (b) surcos.

En los canteros, se pasa por las siguientes fases:

- Avance (“Advance”), desde que el agua comienza a aplicarse hasta alcanzar el último punto del cantero, con duración t_{adv} .
- Llenado o inundación (“Ponding”), desde que se completa el avance hasta que se corta la alimentación en el instante t_{co} .

- Vaciado (“Depletion”), desde el corte de la alimentación hasta que el agua comienza a desaparecer de la superficie del terreno.
- Receso o agotamiento (“Recession”), desde que el agua comienza a desaparecer de la superficie del terreno hasta que ésta se da en toda la parcela, en el instante t_{rec} .

En el caso de los surcos (y de las fajas), se consideran las fases de:

- Avance (“Advance”), desde que el agua comienza a aplicarse hasta alcanzar el extremo aguas abajo del surco (o de la faja), con duración t_{adv} .
- Humedecimiento (“Wetting”), durante el cual se produce la mayor parte de la infiltración, desde que se completa el avance hasta el corte de la alimentación, en el instante t_{co} .
- Vaciado (“Depletion”), desde que la alimentación es cortada hasta que el agua desaparece en el inicio del surco (o de la faja).
- Receso o agotamiento (“Recession”), desde que el agua desaparece en el inicio del surco hasta su desaparición completa, la que corresponde al tiempo t_{rec} .

Como se puede observar en la Figura 5.15, hay diferencias destacables entre el riego por canteros, por inundación, y el riego por surcos, por infiltración. En canteros razonablemente nivelados, y disponiendo de un caudal de alimentación suficientemente elevado, la fase de avance es más corta en los canteros que en los surcos. La de llenado es bastante más corta en canteros que en surcos, ocurriendo lo contrario en la fase siguiente. Porque la parte más importante de la infiltración en los canteros se produce después que se completa el llenado (Fig. 5.16), la fase de vaciado es mucho más larga en éstos, durando varias horas, al contrario que en surcos, que dura pocos minutos. Finalmente, la fase de receso, tanto en canteros como en surcos, depende de la nivelación; en canteros bien nivelados, y con un suelo uniforme, tenderá a ser nula, como se representa en la Figura 5.15; en los surcos, dependerá de la longitud, como se recoge en la misma figura.



Figura 5.16. Fin del llenado e inicio de la fase de vaciado en canteros.

Sucede, sin embargo, que la práctica de campo puede ser diferente. En canteros largos, o con suelos de elevada infiltración, o con la superficie irregular y/o con caudales pequeños, la fase de avance se alarga, tanto que, en los sistemas tradicionales, el corte de la alimentación coincide con el fin del avance. En estas condiciones de tiempo de avance alargado, como se puede observar en la Figura 5.15, el tiempo de oportunidad de infiltración, τ (tiempo

comprendido entre el avance y el receso, durante el que existe una lámina de agua sobre la superficie del suelo), será muy diferente a lo largo del cantero, siendo mucho mayor en la parte inicial que en la del extremo aguas abajo, resultando una curva de infiltración (z) no uniforme, con mucha mayor infiltración al inicio que en el extremo. En estas condiciones, desaparece la fase de llenado y se alarga la de vaciado, tanto más cuanto más irregular es la nivelación (Li, 1999; Fabião *et al.*, 2003). De ahí que, para corregir tal falta de uniformidad, los canteros tengan pendiente. En el caso de que fueran cortos, o con pendiente exagerada, también proporcionaría un riego poco uniforme, pero, ahora, con mayor cantidad de agua infiltrada en el extremo aguas abajo que al inicio. Por este motivo, los modernos sistemas de canteros utilizan nivelación de precisión, con pendiente nula y caudales elevados para producir un avance rápido y mejor equilibrio de tiempos de oportunidad de infiltración (τ) y de alturas infiltradas (z).

En el caso de riego por surcos, también, el tiempo de avance crece con la longitud, con la capacidad de infiltración del suelo, con la irregularidad de la nivelación e , inversamente, con el caudal. Ésto afecta al tiempo de oportunidad de la infiltración de forma muy parecida; como el escurrimiento se mantiene más tiempo, y continua siendo lento, da lugar a una falta de uniformidad acrecentada en las alturas infiltradas z , siendo muy superiores al inicio. Los caudales demasiado fuertes, la baja infiltración, o las longitudes demasiado cortas, dan lugar a avances muy rápidos, con escurrimiento demasiado rápido también en la fase de llenado, con el consiguiente exceso de infiltración aguas abajo y, sobre todo, fuerte escorrentía en el extremo aguas abajo. De ahí, la necesidad de realizar nivelaciones de precisión y de ajustar los caudales a la longitud y a la capacidad de infiltración. La falta de uniformidad tiende a ser mayor en el primer riego, en el que el fondo y las paredes del surco están ahuecadas y con rugosidad por el laboreo del suelo, debido a los pequeños terrones. Después del primer riego, estos desaparecen y el suelo se queda sellado por las partículas resultantes de la desagregación de la estructura del suelo por el agua, lo que disminuye fuertemente la infiltración y puede obligar a utilizar caudales diferentes entre el primer riego y los siguientes.

5.4. Modelos de simulación y proyecto y evaluación del riego por superficie

5.4.1. Bases teóricas

La complejidad de las relaciones entre las variables en juego y de las ecuaciones que definen los procesos combinados del movimiento del agua en los surcos, o sobre la superficie de canteros y fajas, con la infiltración obliga al uso de modelos de simulación. Entre otros, se pueden destacar el SRFR (Strelkoff, 1993) y el SIRMOD (ISED, 1989).

Las ecuaciones que gobiernan los procesos son la de la continuidad y la de la cantidad de movimiento (Walker y Skogerboe, 1987). La ecuación de la continuidad explica la conservación de masas:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} + I = 0 \quad (5.1)$$

donde: t , es el tiempo (s); Q , es el caudal (m^3s^{-1}); x , es la distancia según la dirección de escurrimiento (m); A , es el área de la sección de escurrimiento (m^2); I , es la tasa de infiltración por unidad de longitud ($\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^{-1}$).

La ecuación de la cantidad de movimiento expresa la conservación de la energía del escurrimiento:

$$\frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{v}{g A} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{v}{g A} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} = S_o - S_f - \frac{\partial y}{\partial x} \quad (5.2)$$

donde: g , es la aceleración de la gravedad (ms^{-2}); S_o , es la pendiente del surco, cantero o faja (mm^{-1}); S_f , es la pendiente de la línea de energía (mm^{-1}); v , es la velocidad de escurrimiento (ms^{-1}); e y , es el calado de escurrimiento (m).

Son ecuaciones diferenciales no lineales con derivadas parciales y que no poseen soluciones finitas exactas. Para la infiltración, se pueden utilizar varias ecuaciones (Pereira, 1996), pero la más utilizada es la ecuación de Kostiakov con dos parámetros, en el caso del riego por canteros, y con tres parámetros, en el riego por surcos (Pereira, 1996):

$$I = a k \tau^{a-1} \quad (5.3a)$$

y

$$I = a k \tau^{a-1} + f_o \quad (5.3b)$$

donde: I , es la tasa de infiltración (mmh^{-1}); a , es un parámetro empírico; k , es otro parámetro empírico; f_o , es la tasa de infiltración final o estabilizada (mmh^{-1}); y τ , es el tiempo de oportunidad para la infiltración (h).

La Ec. (5.3a) se usa cuando los tiempos de aplicación del agua son relativamente cortos, mientras que la Ec. (5.3b) se utiliza cuando la infiltración estabilizada se presenta durante el escurrimiento, como sucede en el riego por surcos. Cuando hay escurrimiento preferencial en suelos que se agrietan, se añade, a la infiltración acumulada (forma integral de las ecuaciones de infiltración referidas anteriormente), un parámetro empírico que representa la infiltración inicial en las grietas del suelo, que es casi instantánea. Como alternativa, para suelos que se agrietan, se pueden utilizar modelos semi-empíricos (Mailhol *et al.*, 1999).

A pesar de su utilización generalizada, debido a la facilidad con que pueden ser parametrizadas, las ecuaciones empíricas antes referidas no siempre son las mejores, principalmente en surcos, ya que no tienen en cuenta el hecho de que los flujos de infiltración son bidimensionales, puesto que la infiltración se procesa a lo largo de todo el perímetro mojado de la sección de escurrimiento. Idealmente, debería utilizarse la ecuación determinística de Richards (Tabuada *et al.*, 1995a,b), pero ésta induce a mayor complejidad en la solución de las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento (Ecs. 5.1 y 5.2) y, sobretodo, requiere el conocimiento detallado de las características hidráulicas $h(\theta)$ y $K(\theta)$ (Cap. 3) para las diversas capas del suelo, información que raramente existe y es tediosa y difícil de obtener en la práctica. Por eso, la mayoría de los modelos de simulación del riego por superficie usan sólo las ecuaciones de Kostiakov (Ecs. 5.3a,b).

Walker y Skogerboe (1987) describen varios procedimientos para estimar los parámetros de infiltración. La evaluación en el campo recurriendo a observaciones del avance y receso del agua en surcos y en canteros, son los más utilizados, haciéndose después la optimización de los parámetros por corridas sucesivas del modelo hasta conseguir un ajuste optimizado de las curvas de avance y de receso. Esta operación se hace frecuentemente optimizando conjuntamente los parámetros de infiltración (Ecs. 5.3a,b) y de rugosidad hidráulica de la ecuación de escurrimiento utilizada en las ecuaciones de conservación de masa y de energía (Ecs. 5.1 y 5.2). La rugosidad hidráulica n , para la ecuación de escurrimiento de Manning o Gauckler-Strickler, se define por la ecuación:

$$n = \frac{AR^{2/3}S_f^{1/2}}{Q} \quad (5.4)$$

donde: A , es el área mojada de la sección de escurrimiento (m^2); R , es el radio hidráulico de la sección (m); S_f , es la pendiente del surco o del terreno (mm^{-1}); y Q , es el caudal en la sección ($m^3 s^{-1}$).

Puede simularse el riego a través de métodos más simples, como el del balance del volumen que describe la conservación de masas en una zona de control entre dos secciones del surco, para la cual se estiman los volúmenes de agua en superficie e infiltrada en un intervalo de tiempo t desde el inicio del riego:

$$Q_0 t = V_y(t) + V_z(t) \quad (5.5)$$

donde: Q_0 , es el caudal entrante en el surco o cantero ($m^3 h^{-1}$); t , es el tiempo desde el inicio del riego (h); V_y , es el volumen de agua sobre la superficie del suelo (m^3); y V_z , es el volumen de agua infiltrada (m^3).

Este tipo de ecuaciones es adecuado para estimar la infiltración a partir del estudio de la evolución de los volúmenes infiltrados. Algunos modelos de simulación de surcos y fajas recurren a esta ecuación.

5.4.2. Evaluación

La evaluación del riego por superficie es esencial para plantear modificaciones de las prácticas de riego que mejoren el funcionamiento de los sistemas de aplicación del agua a la parcela, estimando indicadores (Cap. 4) que caracterizan el riego en cada zona, para, así, identificar posibles medidas a tomar para su mejora y para obtener los valores de los parámetros de los modelos de simulación a utilizar en la búsqueda de nuevas soluciones, o en el proyecto de los nuevos sistemas.

Los procedimientos de evaluación (Merriam y Keller, 1978) incluyen las siguientes medidas:

a) Caudales y volúmenes aplicados, y, en los casos de surcos y fajas, abiertos aguas abajo, los caudales y volúmenes de escorrentía, lo que permite efectuar el balance de volumen (Ec. 5.5). Además, en surcos y fajas, es conveniente medir el calado del flujo entrante en las secciones hidráulicas de inicio. Para tal objetivo, se utilizan medidores portátiles de caudal (Fig. 5.17) o aforadores portátiles (Walker y Skogerboe, 1987; Clemmens *et al.*, 2001) colocados en las secciones de entrada, de salida y en los tercios o cuartos de la longitud total.



Figura 5.17. Evaluación del riego en surcos: en primer plano, un aforador de solera larga modificado (con un nivel para su instalación en la horizontal); en segundo plano, estacas para observación del avance y receso. Es de destacar la rugosidad del avance en los 3 surcos recogidos.

b) Duración de las fases de riego (Epígrafe 5.3) para obtener las curvas de avance y receso (Fig. 5.18). Se realiza por observación directa de los instantes en que el agua alcanza (avance) secciones situadas a intervalos regulares, 10 a 20 m, a partir del inicio del cantero o surco (Fig. 5.17), y los instantes en que el agua desaparece (receso) después del riego en las mismas secciones. Se deben observar dos o tres perfiles longitudinales en caso de canteros anchos.

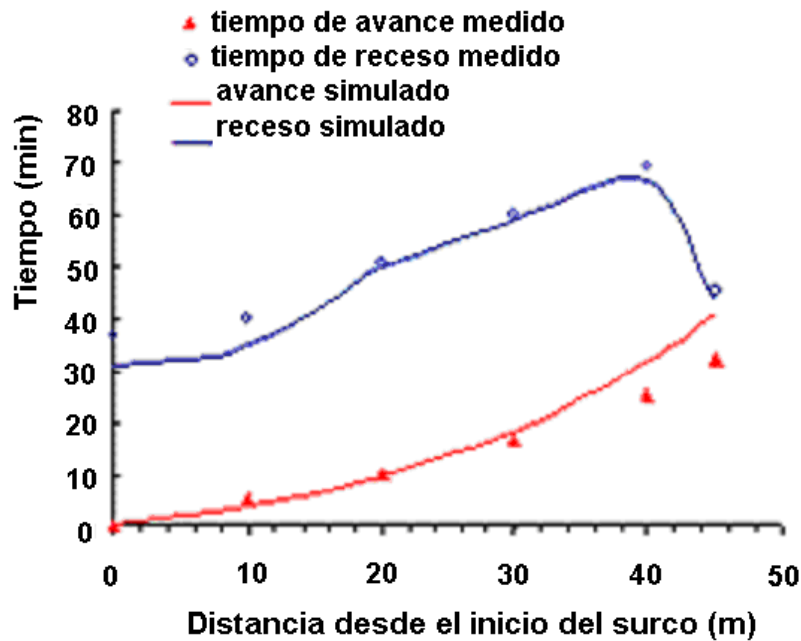


Figura 5.18. Comparación de valores simulados y observados para el avance y el receso en riego de canteros en Huimin, China.

c) Déficit de humedad del suelo antes y después del riego y su capacidad de almacenamiento. Generalmente, se estima por el método gravimétrico en cada muestra, o por simple comprobación al tacto del suelo extraído con la sonda toma-muestras, hasta la profundidad de almacenamiento de agua. Cuando se hace con precisión, permite estimar adecuadamente las láminas infiltradas a lo largo del surco o cantero y validar la modelación (Fig. 5.19).

d) Pendiente y condiciones microtopográficas que caracterizan el estado de nivelado del terreno (perfil longitudinal de la sección de escurrimiento), lo que se hace con equipamiento topográfico simple, pero efectuando observaciones de más de un perfil longitudinal en fajas y canteros.

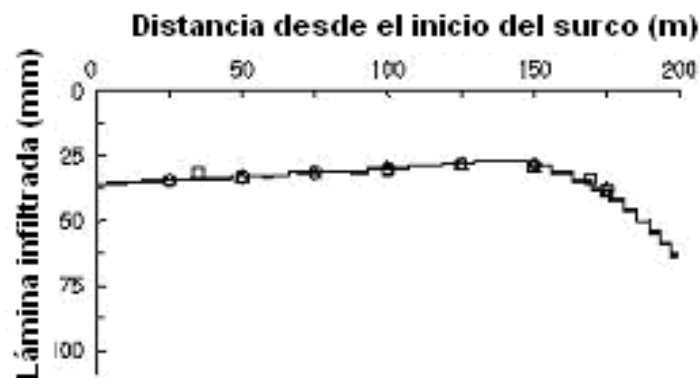
e) Geometría del surco, del cantero, o de la faja (perfil transversal de la sección de escurrimiento). En el caso de los surcos, se utilizan perfilómetros que permiten precisión en el trazado de la sección transversal; para canteros y fajas, se usa equipamiento topográfico.

f) Infiltración. El método más simple es el del infiltrómetro de doble anillo, pero traduce mal las condiciones que se verifican bajo la dinámica de riego. En los surcos, se usan infiltrómetros, con o sin recirculación, o se recurre al balance de volumen (Walker e Skogerboe, 1987). En canteros y fajas, se usa el cantero-infiltrómetro (Sousa, 1990).

g) Erosión y transporte de sedimentos, cuando las características del suelo lo aconsejen (Trout, 1996).

h) Gestión del riego por el agricultor, averiguando la forma de preparación de la parcela regada y los criterios que usa para decidir cuando regar y cuanta agua aplicar.

La infiltración es lo más difícil de caracterizar. El uso de datos de evaluaciones de campo es esencial para estimar los parámetros de la ecuación de Kostiakov. Para surcos con pendiente, un procedimiento simple y eficaz, basado en el balance de volumen, es el llamado método de los dos puntos (Elliott *et al.*, 1983), ya que se basa en medidas en solo dos secciones. Existe una norma para su aplicación (ASAE EP419.1, ASAE, 2003). La optimización de los parámetros basada en medidas de las curvas de avance y recesión han sido aplicadas con éxito tanto para surcos (Fig. 5.19) como para canchales (Calejo *et al.*, 1998; Li, 1999), recurriendo a la técnica llamada del problema inverso, en la que el modelo funciona de forma iterativa hasta encontrar los parámetros de infiltración y rugosidad que mejor describen las curvas de avance y receso observadas (Katopodes *et al.*, 1990; Walker y Busman, 1990). En este proceso, puede usarse, conjuntamente, un modelo de optimización (Calejo *et al.*, 1998).



Fuente: Calejo *et al.* (1998).

Figura 5.19. Simulación de la infiltración en surcos abiertos, evaluados en Coruche (los puntos representan valores medidos y la línea, valores simulados), cuando la optimización de los parámetros usados en el modelo incidió sobre el avance y el receso.

5.4.3. Uso de modelos y proyecto

Modelos como el SIRMOD (ISEA, 1989) y el SRFR (Strelkoff, 1993) resuelven las ecuaciones de conservación de la masa y de la energía (Ecs. 5.1 y 5.2) de diversas formas, pudiendo ser utilizados en la práctica del riego tanto en la evaluación como en el proyecto. Otros modelos se ha desarrollado con base en las mismas ecuaciones para casos específicos, como el riego por canchales (Playan *et al.*, 1994).

Tradicionalmente, el proyecto era esencialmente empírico, basado en medidas para suelos y terrenos semejantes. Más tarde, se pasó a la utilización de tablas y ábacos referentes a determinadas soluciones hidráulicas de los sistemas. Recientemente, se ha pasado al uso de los modelos de simulación. Sin embargo, su uso es limitado, dado que, en muchas zonas, no se dispone de los datos necesarios para parametrizar los modelos, como sucede cuando las medidas de campo para caracterizar la infiltración (Serralheiro, 1996) son muy limitadas. Además de eso, el hecho de que el riego por superficie depende enormemente de la calidad de la nivelación del terreno y de las prácticas de manejo del suelo, estando condicionado por la gran variabilidad espacial y temporal de las características del suelo que gobiernan la infiltración, se generan dificultades en la capacidad de predicción de los modelos.

Cuando se parametrizan adecuadamente, los modelos pueden ser utilizados en el proyecto, en la búsqueda de soluciones para mejorar el funcionamiento, con un menor consumo de agua y un mejor control de los impactos ambientales (Horst *et al.*, 2007; Pereira *et al.*, 2007). Para conseguirlo, los modelos deben usarse de forma iterativa en la búsqueda de la mejor geometría para los sistemas en combinación con la pendiente, la calidad de la nivelación, los caudales a usar, y las dosis a aplicar. El recurrir a técnicas multicriterio de apoyo a la decisión (Gonçalves y Pereira, 1999; Darouiche *et al.*, 2007) ha demostrado ser muy importante en la búsqueda de las mejores soluciones, y parece constituir una vía prometedora, como es el caso del modelo SADREGA (Gonçalves *et al.*, 2006a,b).

5.5. Modernización. Aspectos generales

Los métodos y procesos de riego existentes pueden ser mejorados en sus eficiencias y uniformidades de distribución cuando se puedan adoptar determinados equipamientos y técnicas operacionales recientes. No obstante, es condición previa que los sistemas de riego se adecúen a los criterios de proyecto de explotación propios del método de riego. En caso contrario, las mejoras esperadas no pueden alcanzarse debido a la inadecuación del proceso de riego a las condiciones de aplicación.

5.5.1. Nivelación de precisión

La precisión de la nivelación es fundamental en el funcionamiento de los sistemas de riego de superficie. El conjunto de parámetros definidores de las características del sistema (caudal aplicado y la correspondiente duración, longitud y forma del surco o longitud y anchura de canteros y fajas) depende de la pendiente longitudinal (y transversal, en el caso de las fajas), existiendo límites estrechos para su variación. Las pendientes excesivas originan altas velocidades de escurrimiento y las elevadas escorrentías en el extremo aguas abajo, mientras que las pendientes insuficientes o irregulares provocan un escurrimiento demasiado lento, con importante percolación, encharcamiento del suelo en zonas de depresión y baja uniformidad de distribución.

En el caso del riego por canteros, se pretende que el suelo presente las mínimas desviaciones en relación a la cota media, con el fin de que se consiga la máxima uniformidad de distribución, minimizando, al mismo tiempo, la percolación en profundidad. La influencia de la nivelación en el funcionamiento del riego por canteros es muy grande y esos sistemas son particularmente sensibles a la precisión del nivelado (Playan *et al.*, 1996a; Fangmeier *et al.*, 1999; Zapata y Playán, 2000b; Pereira *et al.*, 2007).

La precisión de las nivelaciones puede ser evaluada por la desviación típica S_d de las diferencias entre las cotas observadas en el terreno y las cotas objetivo de la nivelación:

$$S_d = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (h_i - h_{ti})^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (5.6)$$

donde: S_d , es la desviación típica de las diferencias entre cotas observadas y cotas objetivo (m); h_i , son las cotas medidas en el terreno en los puntos i (m); h_{ti} , son las cotas objetivo para los mismos puntos i (m); y n , es el número de observaciones.

Otros aspectos, que se desprenden del nivelado, son: (1), el ahorro de agua, ya que no hay que aplicar agua demás para el relleno de las depresiones existentes cuando el terreno es irregular; (2), el control de las pérdidas de fertilizantes, por reducirse la ocurrencia de depresiones donde las cantidades infiltradas percolan más allá de la zona radicular, transportando fertilizantes y productos fitosanitarios; y (3), los impactos económicos, porque el cultivo se desarrolla más uniformemente, sin ser influenciado negativamente en áreas donde, por una infiltración insuficiente o excesiva, ocurre estrés hídrico.

La utilización de equipamiento láser para el nivelado de precisión (Fig. 5.20) ha venido a resolver las dificultades propias del nivelado con apoyo topográfico. Resulta fácil dar a la parcela a regar las inclinaciones longitudinal y transversal requeridas, con gran precisión, haciendo que más del 80% del área nivelada se situó en el intervalo $\pm 1,5$ cm respecto a la cota media de la parcela. Algunos autores indican que es posible conseguir $S_d < 0,012$ m, mientras que, con el uso del equipamiento convencional, $S_d \geq 0,025$ m. La calidad del nivelado con apoyo láser se puede ver en la Figura 5.21, de un cantero de gran dimensión. De esta precisión, se desprende la posibilidad de modernizar el riego por canteros, cuya variante moderna, recurriendo a nivelado de precisión, se denomina por canteros de nivel (Fig. 5.10).

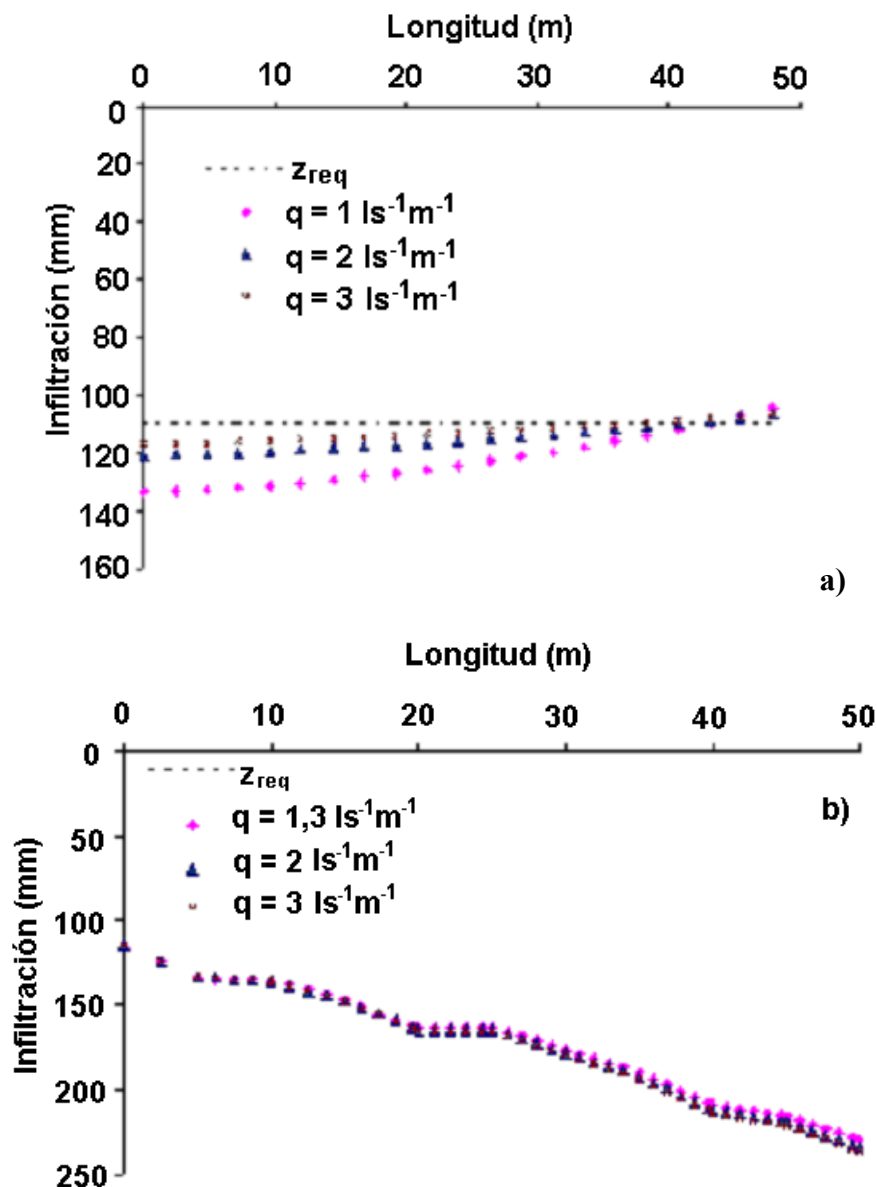


Figura 5.20. Nivelado de un cantero con láser.



Fig. 5.21. Buena nivelación de un cantero, inundado con una lámina de pocos milímetros de agua, Coruche.

La Figura 5.22 muestra como es diferente la relación entre cantidades de agua infiltradas (mm) y el caudal utilizado en canteros de nivel, sin pendiente y con nivelación de precisión, en comparación con los canteros con pendiente y sin nivelación. En el primer caso (Fig. 5.22a), es posible aplicar con alta uniformidad una cantidad de agua muy próxima de la requerida (z_{req}), tanto más uniforme cuanto mayor es el caudal. En el segundo caso (Fig. 5.22b), se puede ver que, para aplicar en todo el cantero la cantidad z_{req} , se provoca una infiltración excesiva aguas abajo y es casi nula la influencia del caudal aplicado. Este ejemplo pone en evidencia, claramente, las ventajas de los canteros de nivel en cuanto a la capacidad de ahorro de agua y de control de la fracción de lavado, así como la importancia de la buena calidad de la nivelación, como exponen varios autores (Playan y Martínez-Cob, 1999; Clemmens *et al.*, 1999; Pereira *et al.*, 2007).



Fuente: Pereira *et al.* (2003b).

Figura 5.22 Influencia de la calidad de la nivelación y del caudal en el funcionamiento del riego por canteros: con nivelación de precisión (a) las cantidades infiltradas son muy próximas de lo deseado (z_{req}) cuando el caudal es más grande, mientras con pendiente y sin precisión de nivelado (b) tiene lugar una infiltración excesiva aguas abajo y la influencia del caudal es casi nula.

5.5.2. Reutilización de los caudales drenados

Cuando se trata de los métodos de riego por infiltración, surcos y fajas abiertos en el extremo aguas abajo, el hecho de que la infiltración se produzca a lo largo del recorrido del agua no evita la escorrentía en el extremo aguas abajo, aunque la nivelación sea adecuada a las condiciones de infiltración y que los caudales, la duración de riego y las longitudes a recorrer sean calculados con precisión.

La reutilización de los caudales excedentes ha sido objeto de investigación, tanto en términos agronómicos como en lo que se refiere a la calidad de las aguas a utilizar, siendo hoy una alternativa importante de conservación del agua, particularmente interesante cuando se trate de agua de riego proveniente de acuíferos subterráneos. No obstante, es cara pues requiere el almacenamiento de las aguas drenadas, el bombeo y el transporte a partir de estas balsas de recuperación hasta la cabecera de la parcela a regar, así como un eventual control de la calidad del agua. En el riego por surcos, se pueden utilizar soluciones donde se reduzca la longitud de los surcos con pendiente, y el agua de escorrentía de los surcos ubicados aguas arriba es utilizada para alimentar los surcos aguas abajo, como se practica en Asia Central (Horst *et al.*, 2005). Todavía, el procedimiento es difícil de automatizar y requiere más mano de obra que los sistemas de recuperación con bombeo.

5.5.3. Sistemas de distribución del agua en surcos y canteros

La utilización de tubos perforados, o tubos con compuertillas (Fig. 5.12), en general con orificios o “compuertillas” de dimensión regulable a través de válvulas distribuidas para el control de los caudales derivados por los orificios, constituye un primer paso para la mecanización del riego por surcos, por fajas y por canteros (Fig. 5.23). Cuando están asociados al uso de válvulas de baja presión al inicio, la regulación de los caudales puede ser realizada por simple apertura o cierre, manualmente o por comando automatizado de la válvula.



Figura 5.23. Tubos con compuertillas; a la derecha, con válvula corredera y a la izquierda, con válvula de rosca, regulables.

Los tubos con compuertilla substituyen con ventaja a las regueras en tierra, que requieren costes de realización y mano de obra para su construcción, la colocación y el manejo de compuertas móviles para regulación de los niveles de agua, y la colocación y herraje de sifones, o la colocación y control de tubos en el lateral de la reguera. De hecho, si el uso de sifones (Fig. 5.13) fue en su tiempo una innovación importante, substituyendo la alimentación de los surcos por aberturas hechas con la azada en la pared de la reguera, la tendencia actual va en el sentido de su substitución por tubos con compuertillas que presentan

menor consumo de mano de obra, eliminan las pérdidas de agua por infiltración, y permiten un manejo del riego más flexible y su automatización.

Estos tubos con compuertillas están disponibles en varios materiales (inicialmente, se usaba el aluminio), como el PVC rígido con acoplamiento rápido entre tubos y, más recientemente, el plástico flexible (Fig. 5.24). Los tubos con compuertillas de plástico rígido, tratado contra los efectos de las radiaciones ultravioletas, están disponibles en el mercado para varios diámetros: 160, 200 y 250 mm, para caudales de 15 a 35 $l s^{-1}$, 20 a 50 $l s^{-1}$ y 25 a 135 $l s^{-1}$, respectivamente, conforme la pendiente adoptada, entre 0,0025 y 0,025 mm^{-1} . Las compuertillas con válvulas correderas pueden disponerse a uno o a ambos lados del tubo, a distancias, generalmente, de 0,75 m. Las mangas flexibles, con dimensiones semejantes a los tubos rígidos, tienen orificios equipados con simples tapas o con válvulas correderas, permitiendo su colocación, normalmente, por el propio usuario (Fig. 5.24). Las mangas flexibles facilitan la adaptación del tubo al contorno de la parcela cuando ésta no es rectilínea y las operaciones culturales, ya que el tubo puede ser pisado por las ruedas de las máquinas cuando va sin carga, además de que son más fáciles de almacenar y de colocar en el terreno.



Figura 5.24. Tubo flexible con compuertillas: colocación de la compuertilla.

La automatización de estos sistemas cuando su alimentación es regulada por válvulas de baja presión al inicio, como en el caso de las válvulas de mariposa, se ha buscado por muchos caminos, principalmente recurriendo a componentes neumáticos en las válvulas de baja presión, utilizando una fuente de aire comprimido, recurriendo a mecanismos de relojería o, más recientemente, a sistemas de control computerizado, regulando tiempos o volúmenes, con alimentación por baterías y paneles solares. Las válvulas de regulación pueden, igualmente, situarse en el propio tubo perforado, comandando secuencias de escalonamiento. El control a distancia se ha intentado recurriendo a sistemas de emisor-receptor de radio, pero sin éxito comercial.

Cuando los sistemas de distribución están constituidos por canales, como en el caso de los sistemas de distribución de agua para canteros y fajas (menos comúnmente por surcos), la solución dada ha sido la de la regulación automática de los niveles de agua en esos canales, utilizando compuertas verticales de varios tipos, que abren o cierran accionadas manualmente o por sistemas automáticos regulados por mecanismos de relojería, por aire comprimido o por sistemas de emisores y receptores de radio. El agua es, entonces, suministrada a la parcela a través de descargadores laterales anchos en la pared del canal, de baja carga (Fig. 5.25), o de orificios de grandes dimensiones controlados por compuertas verticales, como se muestra en

la Figura 5.36, o de orificios de menores dimensiones regulados por compuertas correderas o por compuertas neumáticas. Los mecanismos de control de las compuertas abasteciendo a las parcelas a regar pueden ser manuales o estar asociados a los automatismos de las compuertas que regulan los diferentes tramos del canal.



Fuente: Sousa y Pereira (1989)

Figura 5.25. Canal con compuertas automatizadas y descarga lateral para la distribución del agua a los canteros.

La adopción de procesos de automatización, incluyendo la simple colocación de tubos con compuertillas, implica, sin embargo, la solución de problemas particulares de calidad de agua con repercusión en el funcionamiento de las válvulas y compuertas, principalmente los que son provocados por el transporte de materiales y algas en suspensión. También, algunos avances se han conseguido en esta materia (Bondurant y Kemper, 1985), principalmente por el uso de filtros de red de baja carga para la retención de los materiales arrastrados (Fig. 5.26).



Figura 5.26. Filtro de red de baja carga para riego de gravedad, principalmente para algas.

La medición de los caudales en la red, en las tomas y en las regueras tiene importancia en la adopción de los sistemas de automatización, siendo igualmente importante el propio sistema de abastecimiento de agua a los regantes (Clemmens *et al.*, 2001).

5.6. Modernización del riego por surcos

5.6.1. Generalidades

A pesar de las facilidades referidas (nivelado de precisión, reutilización de los caudales excedentes y recurso a tubos perforados), el riego por surcos requiere otras intervenciones de modernización, buscando mejorar la uniformidad de distribución del agua en la parcela, disminuir los volúmenes de escorrentía en el extremo aguas abajo, controlar la percolación, reducir o eliminar el transporte de productos químicos (fertilizantes y productos fitosanitarios) fuera de la zona radicular y controlar las pérdidas de suelo.

Además de los aspectos tratados en los epígrafes que siguen, cabe destacar el riego con recorte del caudal. En su forma original, consiste en reducir a la mitad el caudal de alimentación del surco justo al completar el avance. De hecho, para que el tiempo de oportunidad de la infiltración sea más homogéneo (Fig. 5.15b), el avance debe ser relativamente rápido, lo que obliga a usar un caudal de alimentación elevado, llamado caudal de “ataque”. Al completarse el avance, un caudal elevado provocaría una elevada escorrentía en el extremo aguas abajo, por lo que resulta necesario reducirlo, normalmente a 2/3 o a su mitad. Ésto se conoce como recorte del caudal de alimentación (“cut-back”).

Como la infiltración a lo largo del surco tiende a disminuir con el tiempo, no sólo porque el contenido de agua del suelo va aumentando, sino, también, porque la acción del agua provoca la desagregación de las partículas del lecho y paredes del surco y, consecuentemente, el sellado de los poros por las partículas liberadas, puede conseguirse una mayor y progresiva disminución de la escorrentía aguas abajo disminuyendo progresivamente los caudales de alimentación, práctica que se denomina riego con caudales decrecientes. Actualmente, ésto se consigue a través de un sistema automatizado, conocido como riego con cable, que se analiza en el Epígrafe (5.6.3).

Otra alternativa de modernización es la aplicación de agua a los surcos a través de tubos flexibles, suspendidos, alimentados por una máquina de riego que se desplaza longitudinalmente a lo largo de los surcos. Este sistema conoció diversas variantes en países de la ex-URSS, pero fue abandonado, siendo finalmente sustituido por una variante del riego con rampas pivotantes o de desplazamiento frontal, el llamado sistema LEPA, en uso en EE.UU., que se considera como una variante de la aspersión (Cap. 6). Los surcos eran divididos en tramos cortos, donde el agua se infiltraba sin escorrentía hacia los tramos aguas abajo. Esta técnica, en que la que los surcos cortos son sustituidos por balsillas, se usa frecuentemente para evitar escorrentía en cultivos en líneas regadas por aspersión en terrenos con pendiente.

5.6.2. Riego intermitente, o por oleadas

El riego intermitente, o por oleadas (“surge-flow”), consiste en la interrupción cíclica del suministro de agua a los surcos, generando periodos de humedecimiento y secado, lo que lleva a que el avance se realice por oleadas sucesivas y, así, se vuelva más rápido de forma que se consiga controlar los caudales de escorrentía a través del extremo aguas abajo de los surcos.

El suministro cíclico de un caudal dado conduce a una clara mejora de la uniformidad y eficiencia del riego. Durante el avance, el proceso repetido de humedecimiento-secado en cada ciclo de aplicación del agua es responsable de la disminución de la tasa de infiltración por la modificación de las condiciones físicas e hidrodinámicas de la capa superficial del suelo en cada tramo humedecido porque el agua provoca la desagregación de los terrones y otros agregados del suelo, sellando los poros con las pequeñas partículas así liberadas, durante el ciclo de secado que sigue. En estas condiciones, en el primer ciclo de humedecimiento, el agua avanza hasta una fracción de la longitud total del surco, generalmente próxima a $\frac{1}{4}$ de la misma, al que sigue un tiempo de secado igual al de avance. En el ciclo siguiente, el agua recorre este tramo húmedo más rápidamente, porque los agregados del suelo están deshechos y los poros sellados, y avanza hasta un nuevo cuarto de la longitud del surco. Sigue una nueva fase de secado, y así hasta completarse el avance. De esta manera, la suma de los tiempos de humedecimiento necesarios para completar el avance es menor que el tiempo que sería necesario para tal fin si el caudal fuese suministrado de forma continua. Este procedimiento es interesante para reducir el tiempo de avance en suelos de infiltración grande a moderada, repercutiendo poco en los suelos de baja infiltración. Como consecuencia, es menor la escorrentía por el extremo aguas abajo de los surcos y menor el transporte de sedimentos, como se muestra en la Figura 5.27.

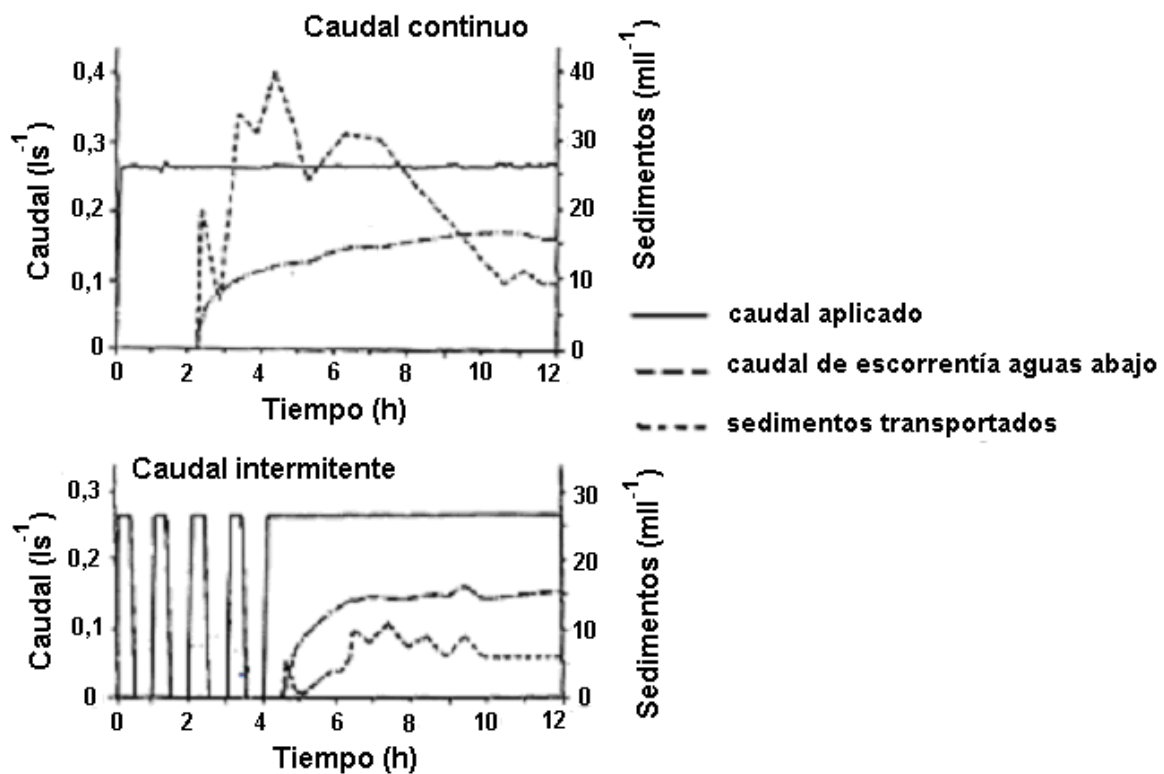


Figura 5.27. Comparación entre caudales de escorrentía aguas abajo de los surcos y sedimentos transportados en riego por surcos con caudal continuo y con caudal intermitente durante el avance.

Una vez completado el avance, el riego puede continuar con caudales intermitentes o continuos. Es frecuente continuar con el proceso de ciclos de humedecimiento y secado, porque, en este proceso de riego por oleadas, el agua se suministra a dos parcelas contiguas, una se humedece mientras que la otra está en el ciclo de secado (Fig. 5.28). De esta manera, completado el avance, es más fácil continuar suministrando agua alternadamente a ambas parcelas; los efectos sobre el suelo dejen de ser relevantes. La alternativa durante la fase de llenado es aplicar la mitad del caudal a cada surco en ambas parcelas, ahora regadas al mismo tiempo, lo que puede contribuir a controlar la escorrentía por el extremo aguas abajo (Horst *et al.*, 2007).



Figura 5.28. Riego por surcos con caudales intermitentes; inicio del humedecimiento en los surcos de la derecha mientras comienza el secado en los de la izquierda.

Resumiendo, para suelos de infiltración alta (pero no excesiva) a moderada, el riego intermitente tiene las siguientes ventajas:

- La fase de avance, referida a toda la parcela, es conseguida en menos tiempo y utilizando un volumen de agua significativamente menor, muy especialmente en el primer riego, cuando el surco se encuentra todavía aterronado, y en suelos permeables y sin compactar.
- La infiltración del agua a lo largo del surco es más uniforme, disminuyendo la percolación en el inicio.
- En surcos abiertos, la escorrentía por el extremo aguas abajo es menor y, en surcos cerrados, la percolación en el tramo final es igualmente menor.
- El transporte de sedimentos, de fertilizantes y de productos fitosanitarios con el agua de escorrentía es igualmente menor (Fig. 5.27).

La aplicación alternada de agua a las dos parcelas contiguas se consigue por la automatización de una válvula, generalmente de mariposa, situada en el centro de la t \hat{e} formada por la tubería de suministro y por los tubos perforados que abastecen a ambas parcelas, a la derecha e izquierda de la válvula (Fig. 5.29). El control de los ciclos se asegura mediante un temporizador comandado por un controlador computerizado, cuya energía proviene de baterías de 12 V alimentadas con un panel solar o una célula fotovoltaica. Este mecanismo simple de automatización convirtió estas válvulas en muy populares en EE.UU. para automatizar el riego, independientemente de los beneficios que proporciona el riego intermitente.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 5.29. Válvula para el riego intermitente (“surge-flow”), a aplicar en riego de surcos, equipada con controlador electrónico y su alimentación con panel solar.

5.6.3. Riego con caudales decrecientes. Riego por cable

La reducción progresiva de los caudales de alimentación de los surcos conlleva a una mejora de la uniformidad y eficiencia del riego, ya que tal variación de los caudales acompaña a la de la infiltración, que disminuye a lo largo del tiempo. De esta práctica, resulta que:

- Las escorrentías por el extremo aguas abajo son significativamente menores cuando los caudales admitidos en los surcos son progresivamente decrecientes, en comparación con la entrada de caudal constante (Fig. 5.30), resultando una disminución del transporte de sedimentos, fertilizantes y productos fitosanitarios. Cuando se usan surcos cerrados, el exceso de infiltración aguas abajo es menor con caudales decrecientes que con caudales constantes.

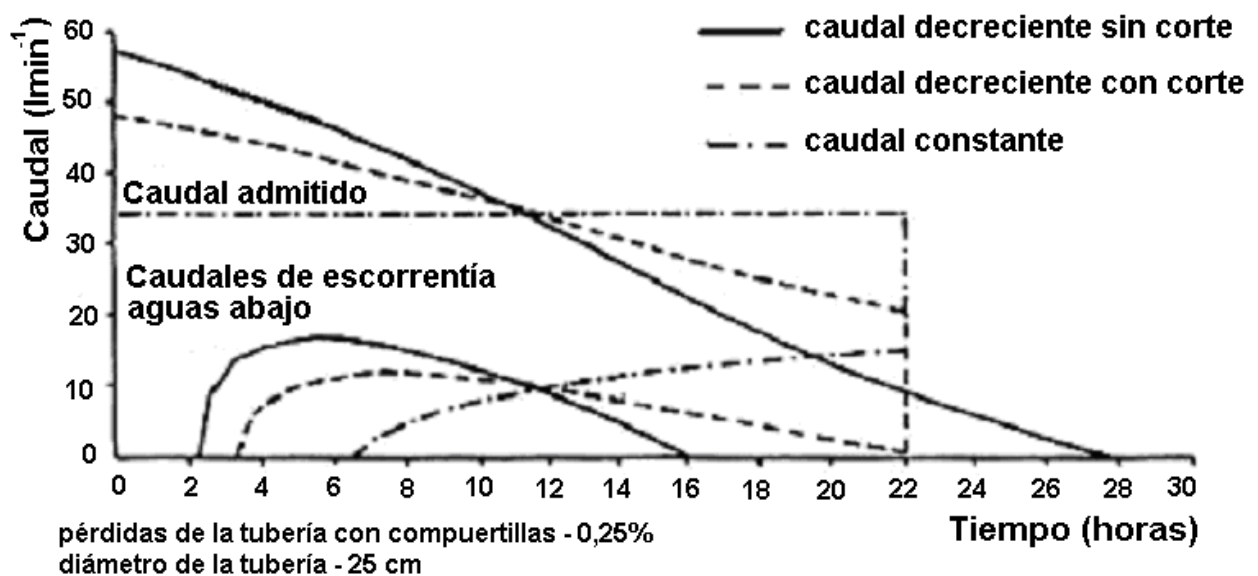
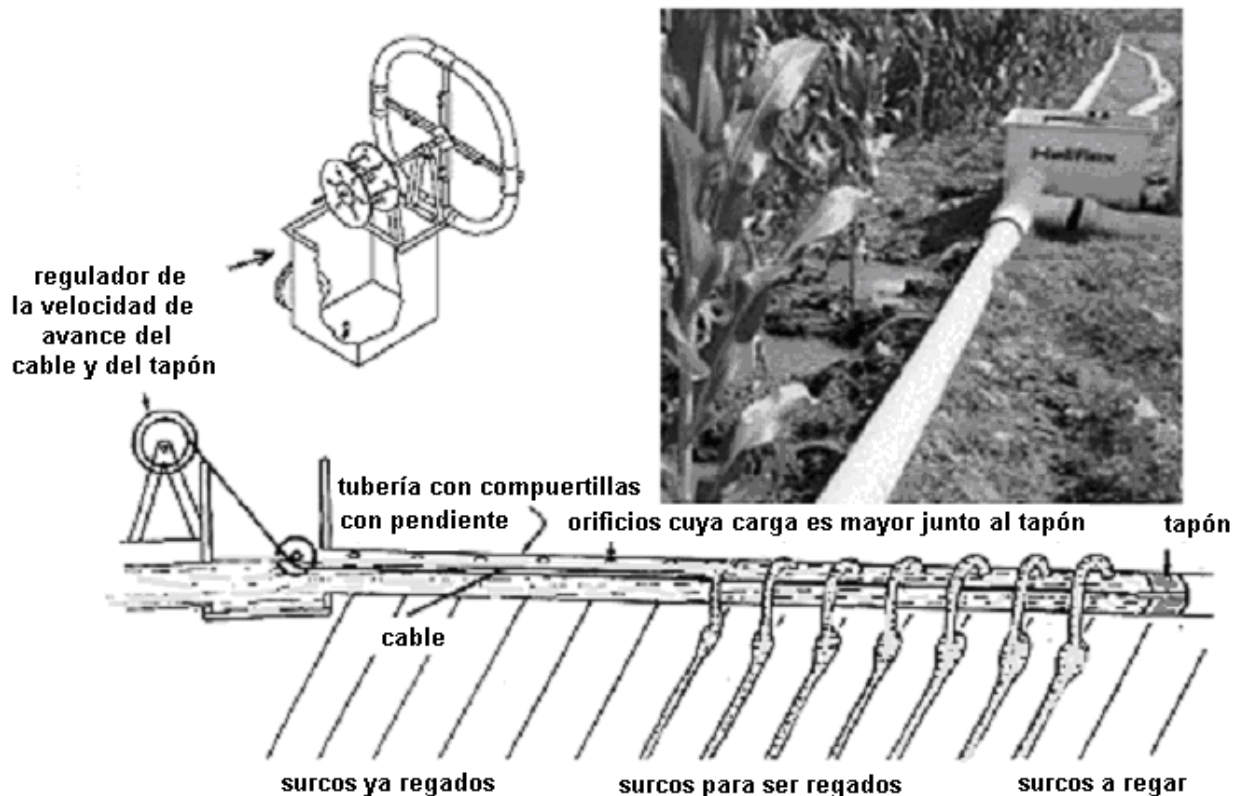


Figura 5.30. Comparación entre hidrogramas de caudales de alimentación en surcos (decreciente sin corte, decreciente con corte para la carga de 1,6 cm sobre el orificio y constante) y los respectivos caudales de escorrentía a través del extremo aguas abajo.

- El tiempo de avance es reducido, ya que el caudal inicial es elevado.
- En consecuencia, es posible obtener una infiltración más uniforme a lo largo del surco, principalmente si se utilizan dispositivos de recorte del caudal de alimentación cuando este alcanza un valor límite mínimo (“cut-off”). Este recorte final de alimentación es deseable porque, cuando los caudales son ya muy reducidos, el escurrimiento se produce con velocidad insuficiente, haciendo que el agua, sólo, se infiltre en los tramos iniciales del surco.

El proceso de riego con recorte progresivo de los caudales de alimentación es normalmente practicado a través de un sistema de automatización denominado riego con cable. Como se muestra en la Figura 5.31, el agua es conducida en una tubería perforada donde, a aguas abajo, se mueve un tapón (Kemper *et al.*, 1987). Un cable, cuyo desenrollamiento es controlado por un sistema mecánico o de relojería, mueve el tapón y comanda su velocidad de avance en el interior de la tubería con compuertillas. Si la tubería tiene una inclinación suficiente, porque es pequeña la carga necesaria para el movimiento del agua en la misma, los caudales debitados por los orificios son máximos junto al tapón, donde la carga es mayor, decreciendo hacia inicio; así, desplazando el tapón hacia aguas abajo, cada orificio estará sometido a una carga sucesivamente menor, con la correspondiente disminución de los caudales derivados, hasta que éstos se anulan. El tapón es introducido en el tubo en el inicio y retirado por el extremo aguas abajo después del riego. La salida por los orificios puede cortarse bruscamente (“cut-off”) si se dotan del dispositivo apropiado; en general, pequeños tubos curvos, también denominados de cuello de cisne.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 5.31. Riego por surcos con cable con caudales decrecientes: esquema y ejemplo de sistema en funcionamiento.

Los sistemas de riego con cable integran un pequeño depósito al inicio donde se regula el nivel del agua (por lo tanto, la carga para el funcionamiento de las tuberías), un enrollador del cable y un mecanismo para control de la velocidad con el que se desenrolla, el tapón y la tubería perforada. La regulación de la velocidad puede realizarse por un comando hidráulico o electrónico (Fig. 5.32). El depósito puede ser utilizado para la inyección de abonos líquidos (Fig. 5.32).



Figura 5.32. Sistemas de control de la velocidad de avance del cable y del tapón en los sistemas riego con cable para surcos: a la derecha, con regulación por rueda hidráulica, teniendo, por atrás, el depósito y el inyector de fertilizantes; a la izquierda, con motorización y comando electrónico.

La mayor dificultad en el manejo de estos sistemas es la elección conjunta de la inclinación que habrá que dar a la tubería (cuanto menos inclinado, más tiempo tarda el riego), de la velocidad de avance del tapón (cuanto menor, más tiempo tarda el riego), y del caudal inicial y de corte final. Normalmente, el ajuste se hace mediante medición, pero puede ser calculado ya que existen modelos específicos para la determinación de la pendiente – velocidad – caudal. En la Figura 5.33, se muestra la alteración del funcionamiento del riego en el caso de un surco cerrado en el que, de un riego a otro, se disminuye el caudal (ajuste de la abertura de las compuertas) y se aumenta el tiempo de riego (disminución de la velocidad del cable) para la misma lámina de riego pretendida, resultando, en este caso, una mejora del funcionamiento, que pasa de $DU = 73,7\%$ y $e_a = 73,4\%$ a $DU = 80\%$ y $e_a = 80\%$.

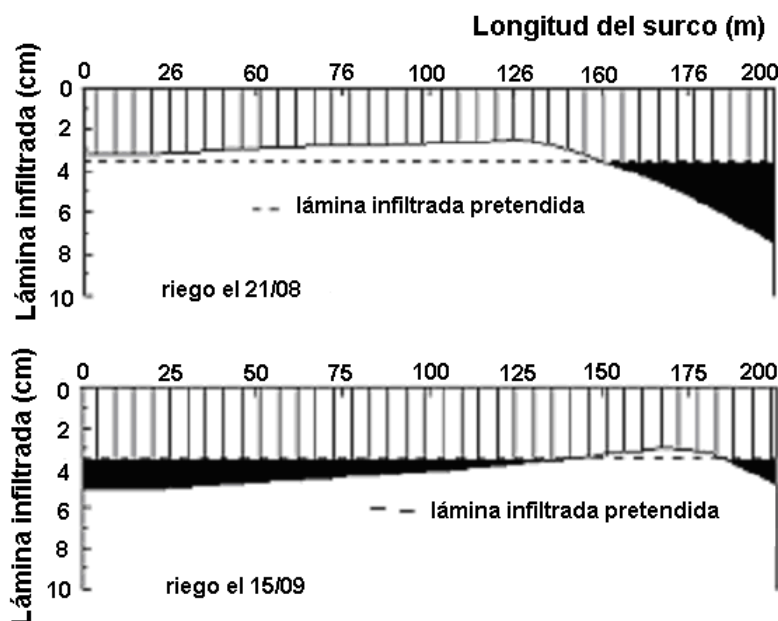


Figura 5.33. Mejora de la uniformidad y eficiencia en la aplicación del riego con cable a surcos por ajuste del caudal y de la velocidad del cable.

5.7. Modernización de riego por canteros

Como se expuso en el Epígrafe (5.5.1), la posibilidad de recurrir a la nivelación de precisión con láser permitió innovaciones importantes en el riego por inundación. La utilización de la nivelación de precisión logra la eliminación de las irregularidades del microrrelieve de los canteros y, consecuentemente, controla el movimiento del agua durante las fases del avance y de llenado, haciendo posible una infiltración más uniforme en la parcela (Fig. 5.20). La precisión del nivelado permite el movimiento natural de la lámina de agua sobre la superficie a ser regada, con elevados caudales de alimentación, sin absorción de mano de obra y sin erosión.

La posibilidad de utilización de grandes caudales de alimentación, a los que corresponden tiempos de avance relativamente cortos, reduce la duración de cada riego y, consecuentemente, la mano de obra utilizada, y propicia la obtención de una elevada uniformidad de distribución (>90%) y muy buena eficiencia de riego (>90%) . Si es adecuada la elección del caudal y el tiempo de riego, se reducen al mínimo las pérdidas por percolación profunda, tanto en la zona próxima a la alimentación como aguas abajo (Fig. 5.22). Siendo fácil el control de las pérdidas por percolación en canteros de nivel y con nivelación de precisión, la técnica permite un adecuado lavado de sales, minimiza las pérdidas de fertilizantes en profundidad y limita posibles subidas de la capa freática con aportación mínima al drenaje. Por eso, el método tiene ventajas para regiones áridas y semiáridas, en las que los problemas de salinidad son comunes. Si los canteros son largos y estrechos, puede ser ventajoso darles una pequeña pendiente en lugar de anularla.

Los canteros pueden presentar diversas sistematizaciones del terreno: en llano, para cultivos forrajeras; en caballones anchos, para cereales; y en caballones estrechos, para los cultivos en línea y cultivos hortícolas (Fig. 5.11).

El método de los canteros nivelados con precisión se utiliza tanto en grandes como en pequeños canteros. Pueden regarse canteros de 10 ha, o más, siempre que se disponga de caudales de alimentación muy grandes y la capacidad de infiltración del suelo sea reducida (Fig. 5.10); los canteros serán forzosamente pequeños siempre que no se disponga de caudales de alimentación elevados o cuando los suelos presenten altas tasas de infiltración estabilizadas. Es posible regar con pequeños volúmenes de agua, siempre que se respeten los caudales mínimos necesarios y las características de infiltración del suelo, lo que hace el método favorable para cultivos hortícolas, para cultivos exigentes en la germinación y para la aplicación de fertilizantes en el agua de riego.

A los canteros con nivelación de precisión les son inherentes diversas limitaciones importantes. Naturalmente, las ventajas destacadas, sólo, son posibles con un nivelado de precisión en que el microrrelieve no cause problemas graves al avance del agua; en consecuencia, se ha de mantener el nivelado de precisión de un año para otro y a ser cuidadosos en el laboreo del suelo y la preparación del terreno. Dados los elevados costes de nivelado de precisión, los canteros deben mantenerse varios años, lo que obliga a las estructuras de drenaje convenientes, principalmente para hacer frente al exceso de precipitación. Por eso, en regiones donde pueden acontecer fuertes lluvias, es mejor elegir canteros largos y estrechos con pequeña pendiente, que drenan mejor que los canteros anchos y más cortos de nivel. Éstos son más adecuados en regiones más secas, con menores requerimientos de drenaje superficial.

Para un buen funcionamiento del riego, se ha de disponer de grandes caudales de alimentación, y, de su valor, dependerán las dimensiones a dar a los canteros. Una solución para mejorar las condiciones de avance, cuando los caudales sean pequeños, es la de subdividir el cantero mediante lomos o albardillas que dan continuidad a los caballones (Fig. 5.34), lo que permite regular los caudales admitidos y realizar por fases el riego de todo el cantero beneficiándose siempre de caudales elevados. Otra alternativa es que el riego sea independiente para cada surco en el interior del cantero, proceso conocido como por surcos de nivel, el cual, además, permite adoptar el riego por surcos alternados (Fig. 5.34), que constituye un método adecuado de riego en condiciones de escasez.



Figura 5.34. Riego por surcos de nivel y por surcos alternados. El agua visible en los surcos no regados se debe al movimiento lateral de agua durante la fase de llenado.

La automatización del riego es fácil, dado que es posible calcular con precisión la duración de cada riego; la infraestructura del suministro de agua es reducida y no existe necesidad de manejar caudales excedentarios. Cuando la distribución es por canales, la automatización es la que se indicó anteriormente, con descargadores laterales anchos (Fig. 5.25), o, más común, recurriendo a compuertas que regula diferentes tramos del canal en combinación con compuertas en las paredes del canal abasteciendo directamente los canteros (Figs. 5.35 y 5.36).

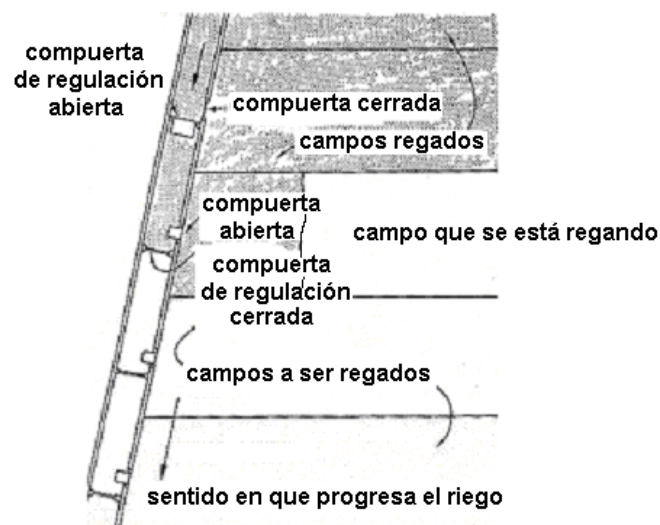


Figura 5.35. Sistema moderno de riego por canteros con alimentación por canal equipado con compuertas, tanto para controlar la disponibilidad de agua en cada tramo como para proveer el suministro a cada cantero.



Figura 5.36. Canal suministrando agua a los canteros a ambos lados, siguiendo el esquema de la Figura 5.35.

En la distribución por canales, puesto que el suministro se concentra en un único punto del cantero y son grandes los caudales de alimentación, hay que recurrir a estructuras de disipación de energía en esos puntos. Para mejorar la distribución del agua dentro del cantero, dar brevedad al tiempo de avance para todo el cantero y hacer que la lámina de agua a infiltrar en cualquier punto sea lo más uniforme posible, es preciso recurrir a regueras de distribución en el interior del cantero, al inicio, y de redistribución, en el extremo aguas abajo, ambas con la rasante a una cota inferior a la de la superficie del cantero (Fig. 5.37).

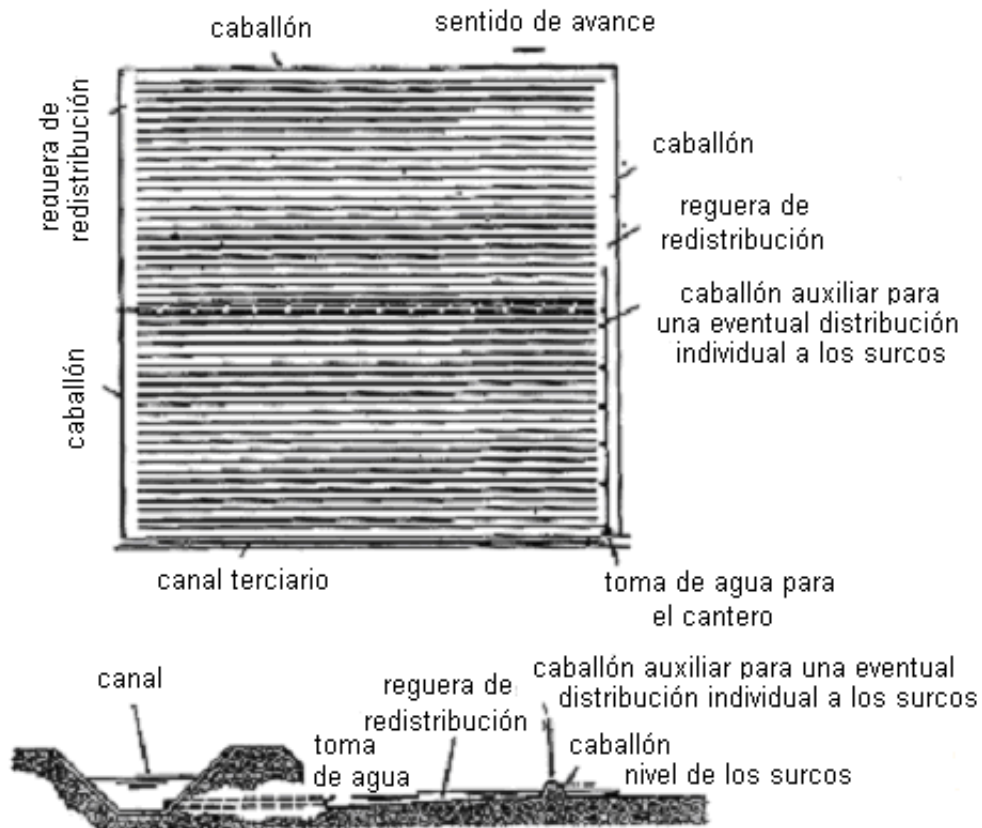


Figura 5.37. Esquema de cantero abastecido por un canal con una única toma de agua, mostrando las regueras de distribución y redistribución, en cabecera y aguas abajo. Abajo, corte transversal mostrando el sistema de alimentación del cantero.

La distribución de agua a los canteros puede realizarse por tuberías. Éstas pueden ser automatizadas como en el sistema riego con cable, pero, ahora, utilizando una estructura fija. Una tubería enterrada e instalada con una determinada pendiente puede alimentar una sucesión de canteros a partir de tomas. En la tubería, se mueve un tapón cuya velocidad es regulada por un cable (Figs. 5.38 y 5.39), a la semejanza del sistema riego con cable en el sistema de surcos. Esta velocidad es controlada por un sistema mecánico o de relojería que comanda el movimiento del enrollador del cable. La duración del riego es regulada por la velocidad de avance del tapón. La altura del borde de la toma es regulada según la línea piezométrica relativa al tubo. En las tomas, es necesario disponer de medios para la disipación de la energía ya que es grande el chorro de agua.

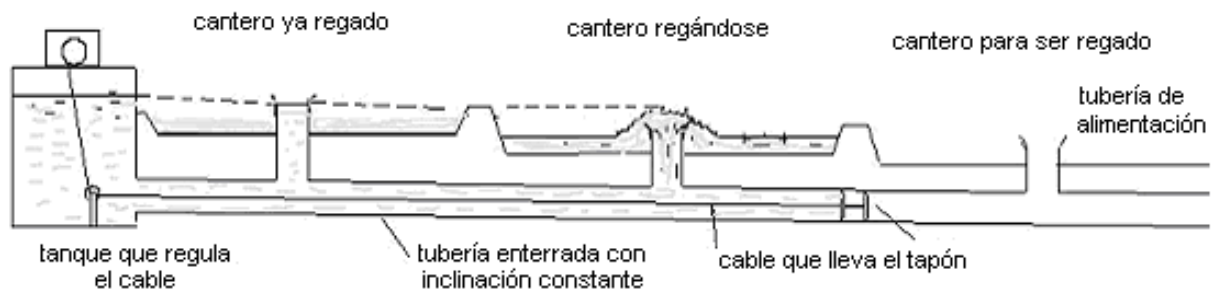


Figura 5.38 – Sistema riego con cable para canteros; caso en el que cada toma abastece un cantero y la cota de la boca de toma es regulable conforme la carga disponible.



Figura 5.39. Riego con cable para canteros, viéndose el chorro de agua en el cantero que va a ser regado y las tomas para otros canteros.

Un cantero puede, igualmente, alimentarse a partir de tuberías con compuertillas y de mangas flexibles, los cuales abastecen la reguera de distribución de cabecera. En este caso, la automatización se realiza a través de las válvulas situadas al inicio de las tuberías, generalmente válvulas controladas por temporizadores semejantes a las válvulas de riego intermitente.

CAPÍTULO 6

RIEGO POR ASPERSIÓN

6.1. Introducción

Los sistemas de riego por aspersión más antiguos datan de los principios de siglo XX, donde fueron utilizados en el riego de los céspedes ornamentales. Después, la aspersión en la agricultura fue desarrollándose lentamente para el riego de frutales, viveros y hortícolas en cultivo intensivo. En la década de los años 1930, con el desarrollo de los aspersores de impacto y de las tuberías en acero ligero con uniones rápidas, el riego por aspersión comenzó a extenderse y ser utilizado en una gama amplia de cultivos por todo el Mundo. En los años 1950, surgieron nuevos aspersores, tuberías de aluminio y sistemas de bombeo más eficientes, lo que favoreció la reducción de costes y aceleró la extensión de este método de riego. Más recientemente, en la década del 1960, surgen los equipos pivote, con costos relativamente bajos, riegos de alta frecuencia, automatización del riego y grandes reducciones de mano de obra. La innovación en los aspersores y en los otros equipos ha sido continua y ha proporcionado la posibilidad de prestar buenos servicios desde que los sistemas están concebidos adecuadamente.

Cerca del 10% de las áreas de riego en todo el Mundo son por aspersión, siendo este porcentaje más elevado en países desarrollados, con altos costes de mano de obra y bajos costos de energía. Las innovaciones que se introducen mejoran el funcionamiento del riego y favorecen la adaptación de la aspersión a todos los tipos de suelo, de topografía, de cultivos y de climas.

Una importante parte de los sistemas del riego por aspersión, actualmente utilizados, todavía, usan tuberías que se mueven manualmente. Sin embargo, la carencia de la mano de obra va haciendo la automatización cada vez más popular. En su forma más simple, la automatización consiste en el uso de las válvulas volumétricas que, como el nombre indica, controlan el volumen de agua deseado y cierran automáticamente después de su suministro. En un nivel más avanzado, estas válvulas se pueden programar para funcionar según una secuencia determinada. Más sofisticado, es el uso de unidades de control, que ordenan automáticamente la apertura y el cierre de las válvulas de acuerdo con el manejo del riego deseado. Finalmente, la automatización permite que varias parcelas puedan regarse sin la intervención de la mano de obra uniendo las unidades de control de campo a una unidad principal comandada por una computadora y ordenando el riego a partir de la computadora o por teléfono móvil.

Existen muchas variantes tecnológicas de sistemas de riego por aspersión, lo que permite su adaptación a una gran variedad de condiciones socio-económicas y de características de suelo y de cultivos. Sin embargo, todos los sistemas tienen común los siguientes componentes básicos:

- Bomba, accionada por un motor combustión o eléctrico, que tiene la función de elevar el agua a partir de su origen, una balsa, un pozo o un río, y alimenta el sistema de riego con la presión necesaria para el funcionamiento de los aspersores.
- Tuberías. La tubería principal conduce el agua desde la bomba a las tuberías secundarias, y de éstas a los ramales. En la mayoría de los casos, la tubería principal es fija, instalada sobre el suelo o, más generalmente, enterrada. En otros casos es desplazable, pudiendo ser trasladada de parcela a parcela. Las tuberías fijas pueden ser de acero galvanizado, de fibrocemento o de plástico de alta densidad. Las tuberías móviles son de aluminio ligero o de plástico, para que sean fácilmente transportables de un lugar a otro.

- Los ramales, o laterales, que son las tuberías donde se montan los aspersores, pueden ser fijos (en este caso, van generalmente enterrados), desplazables o móviles.
- Aspersores, que son los dispositivos que aplican el agua sobre el suelo y los cultivos en forma de gotas pequeñas, imitando la lluvia, y que constituyen los elementos principales en el diseño de los sistemas de riego y en la calidad de su funcionamiento.

Los sistemas de riego por aspersión se pueden, genéricamente, dividir en sistemas estacionarios y móviles o autopropulsionados. En los sistemas estacionarios (Fig. 6.1), los aspersores permanecen en una posición fija mientras dura la aplicación del agua. En las instalaciones móviles, con desplazamiento continuo, los aspersores funcionan mientras se mueven, de forma independiente o junto con las tuberías donde van montados, siguiendo una trayectoria lineal o circular. Dentro de los sistemas estacionarios, se incluyen los que se desplazan de una posición de riego a otra, ya sea a mano, tirados por tubería flexible o de forma mecanizada, como es el caso de las tuberías con ruedas, que se denominan sistemas de desplazamiento discontinuo. Los sistemas estacionarios incluyen también las instalaciones fijas, de cobertura total. Los principales sistemas móviles, con desplazamiento continuo, son los sistemas pivote (Fig. 6.2), los laterales de avance frontal y los cañones tirados por una tubería con enrollador o tirados por cable.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.1. Sistema estacionario de aspersión con tuberías desplazables.

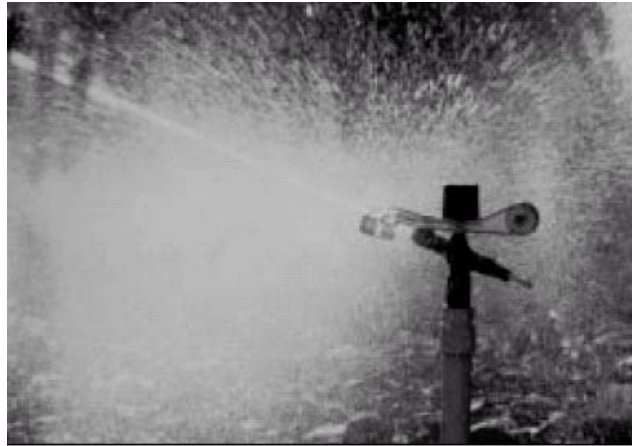


Fuente: Lagoalva (2003).

Figura 6.2. Sistema pivote.

Los aspersores pueden ser clasificados como:

- Aspersores rotativos de impacto (Fig. 6.3), los más utilizados, en los que el giro es producido por el impacto del chorro sobre una pala oscilante, disponiéndose de una amplia gama de presiones, caudales y alcances.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.3. Aspersor de impacto, apreciándose la nube de gotas de agua creadas por el impacto del chorro sobre el brazo oscilante.

- Aspersores rotativos de turbina (Fig. 6.4), disponibles en una amplia gama de características, donde la rotación se debe al accionamiento de una pequeña turbina instalada en el mismo aspersor. Su uso en la agricultura es escaso, al contrario de lo que pasa en el riego de jardines, campos de golf y otros espacios verdes.



Fuentes: Toro (2003), Irrimac (2003).

Figura 6.4 Aspersor de turbina en el riego de un parque.

- Aspersores de plato rotativo (Fig. 6.5), con boquilla de bajo arrastre de gotas por el viento (“LDN, Low Drift Nozzles”), que son, generalmente, de baja presión y pequeño alcance, y que constituyen la generación moderna de aspersores; han substituido los de turbina en usos agrícolas.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.5. Aspersores “rotator” de plato rotativo y con boquilla de baja deriva.

- Difusores, o aspersores estáticos (Fig. 6.6), muy populares en los laterales móviles porque requieren una presión muy baja; el agua se dispersa en círculo al chocar el chorro contra una placa, que puede ser plana o estriada, fija o balanceante. Existe una gama muy variada de características, tanto para el riego con ramales estacionarios como para laterales móviles.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.6. Difusores modernos para laterales móviles.

- Tubos de perforados (Fig. 6.7), consistentes en una tubería con pequeños orificios colocados longitudinalmente y por los cuáles el agua sale en pequeños chorros. Estas tuberías pueden ser estacionarias u oscilantes alternativamente para ambos lados de su eje central; se utilizan en horticultura y jardinería.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 6.7. Tubo perforado.

6.2. Adaptabilidad del riego por aspersión

El riego por aspersión es apropiado para la mayoría de los cultivos y se adapta a casi todos los suelos regables porque los aspersores tienen una gama amplia de características y de capacidades. Con los aspersores a los espaciamientos apropiados, en los sistemas estacionarios, el agua puede ser aplicada con cualquier pluviometría, desde un mínimo de 3 mmh^{-1} , lo que permite el uso de la aspersión en los suelos de textura fina y con una baja tasa de infiltración.

Los sistemas estacionarios se adecuan tanto a riegos frecuentes, diarios o casi diarios, en el caso de suelo con muy baja capacidad de retención y cultivos con raíces poco profundas, como a riegos con grandes dosis y baja frecuencia. Los sistemas de laterales móviles se adaptan particularmente a riegos de alta frecuencia, pero, cuando la infiltración y la permeabilidad del suelo es baja, provoca escorrentía superficial.

La flexibilidad de los equipos del riego por aspersión, incluso para el control de la aplicación del agua, hacen que su aplicabilidad sea casi universal para la mayor parte de las condiciones topográficas y climáticas. Sin embargo, las altas temperaturas y las grandes velocidades del viento, asociadas a las bajas humedades del aire, originan pérdidas de agua por evaporación y arrastre y problemas de toxicidad cuando el agua de riego tiene concentraciones de sales disueltas relativamente altas.

Cuando el diseño es el adecuado, el agua puede ser aplicada con buena uniformidad y con pluviometría compatible con la tasa de infiltración del suelo, siendo posible controlar la escorrentía y evitar daños al suelo y a los cultivos. Los sistemas de laterales móviles pueden alcanzar uniformidades de distribución del agua más altas que los restantes sistemas, incluyendo los sistemas estacionarios permanentes; además, puede ajustarse su velocidad para aplicar pequeñas dosis de riego de forma que se puede controlar la escorrentía en la superficie del suelo.

Las ventajas del riego por aspersión, respecto al riego de gravedad, pueden resumirse como sigue:

- Adaptabilidad:
 - A caudales pequeños, pero continuos, como es el caso de pequeños pozos y minas de agua.
 - A suelos de textura ligera, de elevada infiltración y baja capacidad de retención, difíciles tanto para el riego de la superficie como para riego por goteo.
 - A suelos con texturas o perfiles no uniformes y/o suelos poco profundos que no pueden ser nivelados.
 - A terrenos con topografía ondulada, o en ladera, pero que requieren un cuidadoso diseño y, frecuentemente, reguladores de presión para una adecuada uniformidad de los caudales aplicados.
 - A la aplicación de riegos pequeños y frecuentes, incluso para la germinación de cultivos que se podrían regar, posteriormente, por gravedad.

- Ahorro de mano de obra:
 - Los sistemas de aspersión fijos (de cobertura total) y los laterales móviles eliminan prácticamente las necesidades de la mano de obra, ya que pueden automatizarse totalmente.
 - Los sistemas de cañón móvil y algunos sistemas estacionarios pueden automatizarse también, y necesitan de poca mano de obra y son de fácil manejo.
 - Los sistemas de desplazamiento periódico requieren 1 ó 2 períodos diarios de trabajo, relativamente cortos, durante los cuales se procede al traslado de la tubería o de los aspersores, no teniendo exigencias de mano de obra especializada.

- Usos especiales, tales como para:
 - Humidificación del ambiente y refrigeración de las plantas en climas calientes y áridos, incluso en invernaderos.
 - Riego antihelada, evitando daños en las yemas y primeras hojas.
 - Riego de apoyo, o de complemento, cuando hay periodos secos durante la estación de lluvias, o para asegurar la germinación de los cultivos, en particular para siembras tempranas.
 - Lavado de sales en suelos salinos, que pueden ser más eficientes por aspersión que con riego de superficie cuando el terreno está asurcado o sistematizado en caballones.

- Economía del agua, que tiene lugar cuando los sistemas están bien elegidos para los cultivos, suelos y parcelas a que van destinados, y están bien dimensionados y funcionan correctamente. En tales condiciones, es posible aplicar las dosis deseadas y evitar pérdidas por evaporación y arrastre por el viento, escorrentía y percolación profunda del agua de riego. Sin embargo, el ahorro del agua respecto a los riegos de gravedad bien diseñados y manejados, sólo, es evidente en el caso de suelos con alta permeabilidad, donde la percolación puede ser muy fuerte.

El riego por aspersión, también, presenta desventajas y limitaciones, tales como:

- Costes elevados, tanto de la inversión, más elevada que en riego de superficie en suelo llanos, como de explotación, destacando los costes de energía para el bombeo, que dependen de la presión requerida por los sistemas.
- Limitaciones relativas a la distribución del agua a los regantes puesto que, cuando ésta es periódica, se necesitan depósitos en la finca o la adopción de sistemas fijos de cobertura total. En el caso de redes colectivas, son necesarias redes bajo presión, funcionando a la demanda, y donde serán mínimas las variaciones de caudal y presión.
- Limitaciones relativas a la calidad del agua:
 - Porque el uso de aguas salinas en aspersión, mojando hojas y frutos, puede traer consecuencias a la producción; el contacto de los sales con las hojas es frecuentemente tóxico, mientras que las altas concentraciones de bicarbonatos provocan manchas en los frutos.
 - Cuando se utilizan aguas residuales tratadas, a los problemas debido a las sales transportadas por el agua, se agregan los que se relacionan con la presencia posible de microorganismos patogénicos, que pueden ser transmitidos a los productos y a los trabajadores, siendo entonces causa de problemas de salud pública. Ésto limita mucho la adaptabilidad del riego por aspersión al uso de aguas residuales.
 - Por otra parte, el agua del riego puede contener sales corrosivas de los materiales utilizados en las tuberías y en los aspersores, reduciendo la vida útil de las instalaciones de riego.
- Limitaciones ambientales, en particular debidas a que:
 - La aspersión no se adapta a suelos con tasas de infiltración muy bajas, $\leq 3 \text{ mmh}^{-1}$, pudiendo producir fuerte escorrentía y consiguiente erosión del suelo.
 - En ambientes de la humedad relativa baja y viento fuerte, o sea en climas secos, calientes y ventosos, tienen pérdidas apreciables de agua por evaporación y arrastre por el viento.
- Limitaciones en cuanto al diseño, puesto que, en terrenos de forma irregular, los sistemas de aspersión son difíciles de dimensionar y de manejar, especialmente cuando se desea mecanizarlos, pudiendo conllevar a una baja uniformidad de distribución.
- Problemas de salinidad:
 - Algunos cultivos (viñas, cítricos y la mayoría de frutales y hortícolas) son sensibles a las concentraciones relativamente bajas de sodio y cloro en las hojas, normalmente en condiciones de baja humedad relativa del aire, lo que puede provocar la caída de las hojas cuando la concentración de sodio y de cloro en el agua de riego excede 70 ó 105 ppm, respectivamente. El problema puede ser controlado efectuando los riegos en los períodos de mayor humedad atmosférica (por la noche), siendo recomendable, en el caso de frutales, el uso de aspersores para el riego por debajo de las copas de los árboles.
 - La mayoría de cultivos herbáceos extensivos, forrajeros y pratenses, no siendo tan sensibles a los niveles de cloro y sodio como los cultivos anteriores, pueden ser sensibles a las sales que se depositan en las hojas cuando las gotas se evaporan, lo que ocurre con la aplicación del agua por aspersión y no con otros métodos.

- El arrastre por el viento puede depositar agua de peor calidad y causar daño en el cultivo ubicado en el lado contrario de la dirección del viento. Por lo tanto, en climas áridos, donde se utilizan aguas salinas, los ramales de riego deben ser ubicados al favor del viento para que las sales depositadas se laven cuando se riega.
- Deben tenerse en consideración las normas existentes acerca de los niveles de aceptación de salinidad en el agua y en el suelo, como de las necesidades de lavado.
- Por razones de seguridad sanitaria pública y, en segundo lugar, de toxicidad para los cultivos, la aspersión no es, generalmente, el sistema de riego más adecuado para la aplicación de aguas urbanas usadas y tratadas (Pereira *et al.*, 2002a,b). Sin embargo, se puede recurrir a las aguas residuales agrícolas para el riego por aspersión siempre que se controlen desde el punto de vista sanitario.

6.3. Aspersores

6.3.1. Aspersores y modelos de distribución del agua

Los aspersores son el componente más importante de un sistema de riego por aspersión; son los que determinan la eficacia y la eficiencia de todo el sistema.

Un aspersor funciona forzando el agua bajo presión a pasar a través de un orificio circular, el pico o la boquilla, para la atmósfera. El chorro resultante se quiebra gradualmente en las pequeñas gotas que caen al suelo como lluvia. El aspersor gira en la posición horizontal y produce un modelo de distribución circular (Fig. 6.8). Sin embargo, los aspersores pueden poseer los dispositivos que permiten regar solamente una fracción del círculo. La distancia del aspersor a la circunferencia exterior del círculo mojado se llama alcance. Los aspersores rotativos, cuando trabajan satisfactoriamente, deben distribuir las gotas de forma uniforme y proporcionar un tamaño de las mismas adecuado.

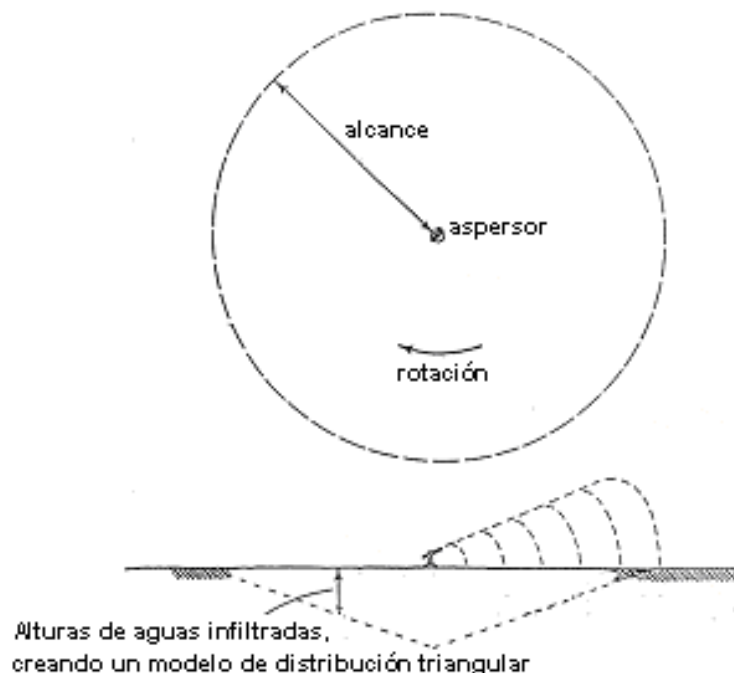


Figura 6.8. Modelo de distribución del agua para un aspersor de impacto.

En los aspersores de impacto, la rotación es causada por el impacto de los chorros del agua en un brazo oscilante controlado por un resorte (Fig. 6.9). Cuando el aspersor está en funcionamiento, el brazo oscilante interrumpe el chorro del agua y éste la tira para un lado. Una vez apartado del chorro, por la tensión del muelle, el brazo oscilante retorna e interrumpe, de nuevo, el chorro de agua. En el movimiento de retorno, el brazo oscilante golpea un lado del aspersor provocándole una rotación lenta. El aspersor puede regar, sólo, un sector circular cuando dispone de mecanismos que obliguen a que el sentido del movimiento se invierta, una vez ha recorrido el correspondiente ángulo, como se describe más adelante, para los cañones. Es importante que el aspersor gire en la horizontal y la velocidad sea constante para que no queden áreas regadas por defecto.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.9. Aspersor de impacto.

Los aspersores de impacto pueden ser diseñados para varios ángulos del chorro (Fig. 6.10): el menor, 7 a 12°, llamado chorro raso, sirve para el riego por debajo de las copas de los árboles y en condiciones ventosas; el mayor, generalmente 24°, es el más común cuando se pretenden alcances mayores, pero puede llegar hasta cerca de 40° en aspersores gigantes, llamados cañones, para aplicaciones especiales. Los aspersores de impacto pueden tener dos boquillas en direcciones opuestas (Fig. 6.10), en el que la mayor se destina a lograr los alcances y los caudales más elevados, así como a asegurar la rotación del aspersor. Un mismo modelo puede utilizar varias boquillas de diámetros diferentes, generalmente crecientes con la presión y el caudal pretendidos.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.10. Algunos tipos de aspersores rotativos, con una o dos boquillas y diferentes ángulos del chorro.

En los aspersores de turbina (Fig. 6.4), sólo, se mueve la boquilla. El agua entra en el aspersor a presión y actúa sobre una pequeña turbina, la cual acciona la rotación de la boquilla. Al contrario que los aspersores de impacto, no necesitan mecanismos especiales para controlar la velocidad de rotación.

Los aspersores de plato rotativo, también conocidos como aspersores LDN (“Low Drift Nozzle”; Clark *et al.*, 2003) se han diseñado para que el chorro impacte en un plato que rueda por acción del agua (Fig. 6.11), y conduce el chorro para que describa un círculo (Fig. 6.8). Al no interrumpirse el chorro, el modelo de distribución es elíptico y más uniforme a lo largo del radio mojado, permitiendo chorros más próximos a la horizontal, pero con razonable alcance para contrarrestar los efectos del viento (Fig. 6.12). En estos aspersores, es posible utilizar diversas combinaciones de boquillas y de platos rotativos, ambos reconocidos por un color que se relaciona con el caudal y la presión para los que fueron diseñados.



Figura 6.11. Aspersor “rotator” de plato rotativo. Nelson (2003).



Fuente: Nelson (2003).

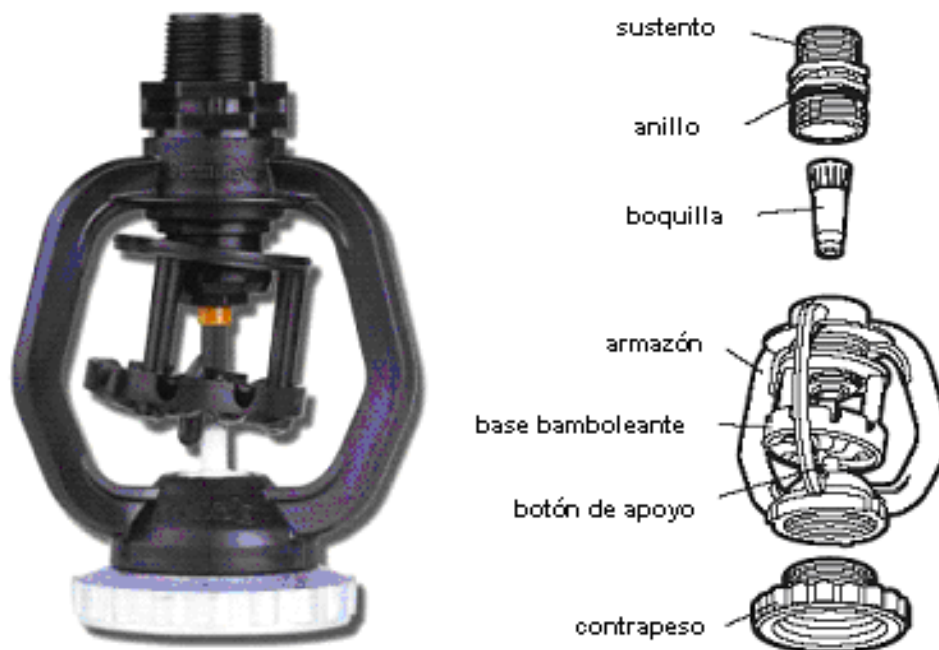
Figura 6.12. Aspersor “Windfighter” de plato rotativo y chorro raso para contrarrestar mejor los efectos del viento.

Los difusores, también llamados aspersores estáticos, son aspersores de baja presión que dispersan el agua en círculo porque el chorro impacta en una superficie opuesta al orificio. Esta superficie puede ser plana, estriada u ondulada; en este caso, generalmente, cóncava (Fig. 6.6). En estos difusores modernos, esta superficie es diseñada para conseguir una buena uniformidad de distribución del agua en un círculo mayor (Fig. 6.13). Tal círculo es más uniformemente mojado en el caso de que la superficie de impacto pueda balancear (Fig. 6.14), pero estos aspersores bamboleantes son necesariamente más caros. Los difusores se usan principalmente en laterales móviles y, en este caso, son diseñados especialmente para tal efecto. También, para los difusores, es posible escoger varias combinaciones de placas y de boquillas según la presión y el caudal deseados. Su identificación se hace normalmente por el color.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.13. Difusor de placa de impacto plana en un sistema estacionario de cobertura total.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.14. Aspersor bamboleante o “Wobbler” con placa cóncava.

Un aspersor o difusor no puede dar lugar a un riego uniforme sobre todo el círculo mojado. Normalmente, la lámina de agua aplicada durante un riego es mayor cerca del aspersor. El modelo de aplicación puede representarse por un triángulo (Fig. 6.8). Para hacer que la aplicación sea uniforme, es necesario colocar varios aspersores funcionando próximos unos de otros, para que sus modelos de aplicación del agua se superpongan, como se ejemplifica en la Figura 6.15, relativa a los modelos de distribución triangulares. Como primera aproximación, para aspersores de impacto, se considera que una buena uniformidad es alcanzada cuando hay un solape de cerca del 65% del diámetro del círculo mojado por cada uno de ellos. La uniformidad puede ser mejorada con una colocación más próxima de los aspersores, pero ello conlleva unas tasas de aplicación de agua elevadas, un número de aspersores mayor y, consecuentemente, un coste del sistema, también, más elevado. En el caso de los aspersores de plato rotativo, el solape requerido es menor, pudiendo distanciar más los aspersores y contar con un menor número de aspersores.

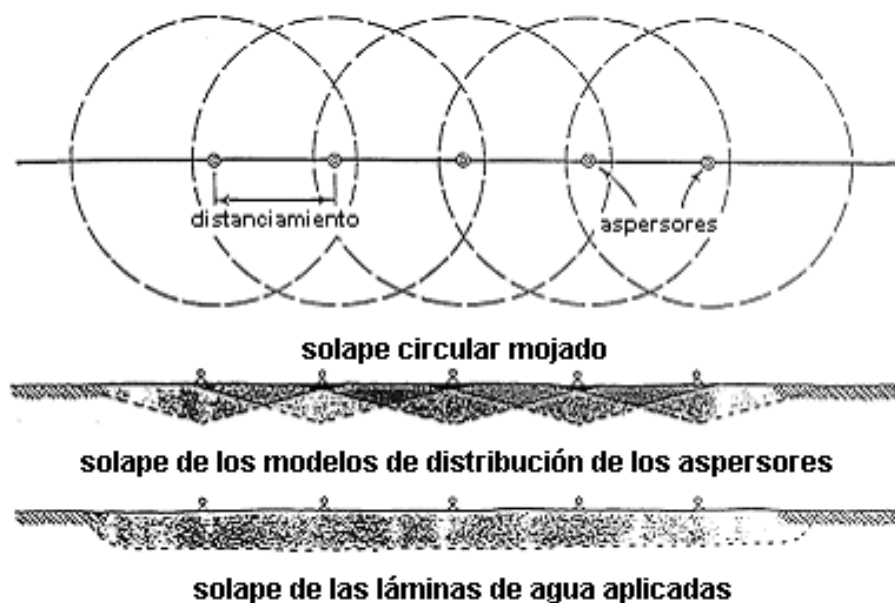


Figura 6.15. Solapamiento de las áreas mojadas por los aspersores regando en un sistema estacionario.

La uniformidad de distribución (Cap. 4) de un sistema de aspersión estacionario puede ser medida en el campo. Para ello, se usan pequeños pluviómetros dispuestos en malla cuadrada entre los aspersores y, para un determinado periodo de riego, se mide el agua que recogen, lo que permite evaluar la uniformidad del riego. En los sistemas de aspersión móvil, la uniformidad de distribución puede evaluarse colocando los pluviómetros en línea, perpendicularmente a la dirección del movimiento del lateral o del cañón.

6.3.2. Características de los aspersores

Cada aspersor se caracteriza, esencialmente, por:

- La presión de funcionamiento P (kPa) o por la altura de presión H (m) necesaria para proporcionar la mejor distribución de agua.
- El caudal q (ls^{-1} ó m^3h^{-1}) correspondiente a una presión dada P .
- El diámetro del círculo mojado D_w (m), o el radio de alcance R_w (m), con $R_w = D_w/2$, correspondiente a cada par (P, q) .

El mismo aspersor puede ser utilizado para diferentes combinaciones P-q, dependiendo del diámetro de la boquilla, d_n (mm). Los catálogos de los aspersores suministrados por los fabricantes deberán indicar cuales son las mejores combinaciones P-q- D_w para cada boquilla del diámetro d_n , como se muestra, a título de ejemplo, en la Figura 6.16, referido a un aspersor de impacto disponible en el mercado.



Aspersor Acetal Círculo Completo RC160.

Presión (bar)	Alcance (m)	Caudal (m^3h^{-1})	Tasa de flujo (ls^{-1})
1,7	13,8	1,10	0,30
2,1	14,2	1,20	0,33
2,4	14,5	1,30	0,36
2,8	14,8	1,39	0,38
3,1	15,0	1,47	0,41
3,5	15,0	1,55	0,43

Fuente: Heliflex (2003).

Figura 6.16. Características de un aspersor de impacto para la boquilla de 3/4": caudal y alcance para varias presiones de funcionamiento.

Las características P-q- R_w (ó D_w) se relacionan entre si como sigue:

$$q = K_d P^{0,5} \quad \text{ó} \quad q = K_d H^{0,5} \quad (6.1)$$

y

$$R_w = K_f q^{0,5} \quad \text{ó} \quad R_w = K_f K_d H^{0,25} \quad (6.2)$$

Los parámetros K_d y K_f de las Ecs. (6.1 y 6.2) dependen, en primer lugar, del diámetro de la boquilla, pero varían con la concepción y fabricación de los aspersores. La Tabla 6.1 proporciona valores para la Ec. (6.1) en relación con diferentes diámetros de boquilla. Una presión inadecuada modifica el modelo de distribución de los aspersores. Cuando es demasiado baja, el chorro es curvilíneo, las gotas son mayores, tienden a caer más próximas al aspersor y el alcance es menor. Cuando es demasiado alta, el chorro se rompe demasiado por fricción con el aire, aumentando, también, la cantidad de agua caída próxima a los aspersores y disminuye el alcance. Las cantidades aplicadas por unidad de tiempo son, sin embargo, diferentes, siendo más elevadas cuando la presión es mayor.

Tabla 6.1. Caudales y diámetros mojados para aspersores de impacto con diámetros de boquilla de 2,4 a 5,2 mm, con ángulos de la trayectoria entre 22° y 28°, y boquillas normales.

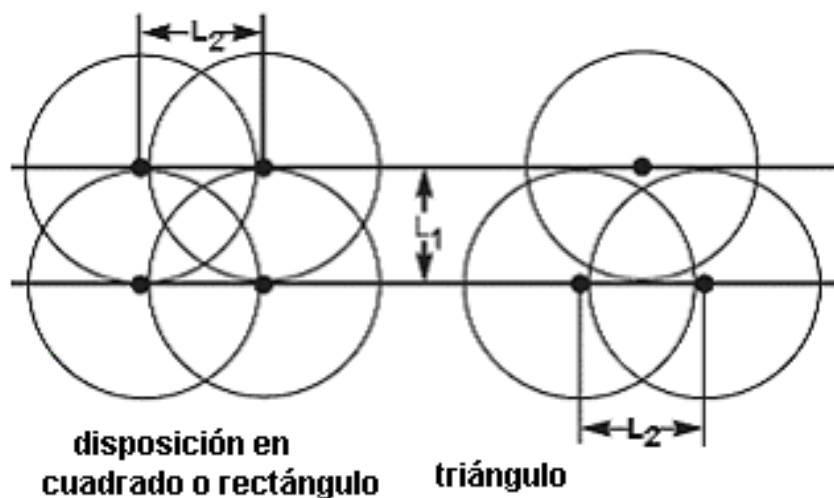
Presión en el aspersor (kPa)	Diámetro de boquilla, d_n (mm)							
	2,4		3,2		4,0		4,8	
	Caudal, q_s ($m^3 h^{-1}$), y diámetro mojado, D_w (m)							
	q_s	D_w	q_s	D_w	q_s	D_w	q_s	D_w
140	0,26	19,2	---	---	---	---	---	---
170	0,29	19,5	0,51	23,2	0,80	25,0	---	---
205	0,32	19,8	0,56	23,5	0,88	25,9	1,20	27,8
240	0,34	20,1	0,61	23,8	0,94	26,5	1,36	28,7
275	0,37	20,4	0,65	24,1	1,01	26,8	1,45	29,3
310	0,39	20,7	0,69	24,4	1,07	27,1	1,54	29,9
345	0,41	21,0	0,73	24,7	1,13	27,4	1,63	30,5
380	0,43	21,3	0,77	25,0	1,19	27,7	1,71	30,8
415	0,45	21,6	0,80	25,3	1,24	28,0	1,78	31,1
450	---	---	0,83	25,6	1,29	28,3	1,86	31,4
485	---	---	---	---	1,34	28,6	1,93	31,7
K_d	1,151		2,044		3,177		4,566	

Nota: La utilización de boquillas troncocónicas aumenta el diámetro mojado hasta cerca del 5%.

Fuente: Pereira y Trout (1999).

6.3.3. Tasa de aplicación

La pluviosidad a la que los aspersores suministran el agua cuando están en funcionamiento se denomina tasa de aplicación, o pluviometría horaria, I_a (mmh^{-1}). La tasa de aplicación depende de las características del aspersor (d_n , P , q , D_w ,) y del espaciamiento entre aspersores en el marco de la disposición de los aspersores en el terreno: en cuadrado, rectángulo o triángulo, en el caso de los sistemas estacionarios (Fig. 6.17).



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.17. Esquema de las disposiciones de los aspersores en sistemas estacionarios y de los respectivos espaciamientos.

Para la aspersión estacionaria (el caso de los sistemas móviles se trata más adelante, al describir esos sistemas), I_a viene dada por la expresión:

$$I_a = 1000 \frac{q}{a} \quad (6.3)$$

donde: q , es el caudal o gasto del aspersor (m^3h^{-1}); y a , es el área (m^2) que le toca regar a cada aspersor ($a = L_1 \times L_2$, con L_1 = espaciamiento entre aspersores en el lateral, L_2 = espaciamiento entre laterales; Fig. 6.17).

El aumento del tamaño de la boquilla, o de la presión, y la disminución de los espaciamientos entre aspersores aumentan la tasa de aplicación. En general, los fabricantes proporcionan la información necesaria para el cálculo de I_a de sus aspersores, sugiriendo, también, los espaciamientos más idóneos. Sin embargo, tal información no se refiere a condiciones de viento, en las que los espaciamientos deben ser reducidos, como se expone más adelante.

La tasa de aplicación deberá ser siempre menor que la tasa de infiltración del suelo para evitar la acumulación de agua en la superficie, las pérdidas por escorrentía y la erosión del suelo. Puesto que las condiciones de infiltración son peores en terrenos inclinados, donde la escorrentía se produce rápidamente, las tasas de aplicación deberán ser menores. La Tabla (6.2) presenta las tasas de aplicación máximas aconsejadas para las condiciones de infiltración del suelo y la pendiente.

Tabla 6.2. Tasas máximas de aplicación conforme a la capacidad de infiltración del suelo (expresada, a título indicativo, por la textura y profundidad) y la pendiente.

Perfil y textura del suelo	Tasa máxima de aplicación (mmh^{-1})			
	Pendiente (%)			
	0-5	5-8	8-12	12-16
Suelo arenoso, hasta 1,8 m de profundidad	50	38	25	13
Suelo superficial arenoso sobre horizontes más compactos	38	25	19	10
Suelo areno-limoso, hasta 1,8 m de profundidad	25	20	15	10
Suelo superficial areno-limoso sobre horizonte compacto	19	13	10	8
Suelo franco-limoso, hasta 1,8 m de profundidad	13	10	8	5
Suelo superficial franco-limoso sobre horizonte compacto	8	6	4	2,5
Suelos de textura pesada (limosos a arcillosos)	4	2,5	2	1,5

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

La tasa de aplicación I_a (mmh^{-1}) no debe exceder la tasa de infiltración del suelo, también expresada en mmh^{-1} . Para su estimación, se ha de considerar la dosis D (mm) a aplicar y el tiempo de riego t_r (h):

$$I_a = \frac{D}{1000 t_r} \quad (6.4)$$

6.3.4. Tamaño de las gotas de agua

Un aspersor produce normalmente una amplia gama de tamaños de gotas; generalmente, de 0,5 a 4 mm de diámetro. Las gotas de diámetro inferior caen cerca del aspersor. Las gotas de grandes dimensiones pueden dañar flores, frutos o hasta las hojas de cultivos delicados, y destruyen la estructura superficial de los suelos que tengan estructura frágil, provocando la formación de costra y reduciendo la tasa de infiltración. En tales casos, deben utilizarse, sólo, aspersores que produzcan gotas pequeñas que minimicen estos problemas.

El tamaño de las gotas puede ser controlado mediante la relación entre el diámetro de la boquilla y la presión de funcionamiento. La Tabla (6.3) puede servir de guía para la elección de la combinación del diámetro de la boquilla y la presión de funcionamiento de los aspersores de impacto, de forma que se obtenga la rotura del chorro en gotas de tamaño apropiado (véase también el índice CI, Ec. 6.16). Con las presiones bajas, las gotas son de mayor tamaño, mientras que, con presiones mayores, tienden a ser bastante más pequeñas, lo que puede dar origen a pérdidas importantes por acción del viento (arrastre) y por evaporación. En estas condiciones, cuando los aspersores operen en climas áridos y ventosos, habrá que evitar las combinaciones de pequeña dimensión de la boquilla y de presión elevada que den origen a gotas de pequeño tamaño. En el caso de los modernos aspersores de plato rotativo (LDN), existen modelos adecuados para trabajar en condiciones ventosas (Fig. 6.12).

Tabla 6.3. Relaciones diámetro de la boquilla – presión buscando buenas dimensiones de las gotas en aspersores de impacto.

Diámetro de la boquilla (mm)	Presión (kPa) a partir de la cuál la rotura del chorro es adecuada	Intervalo de presiones recomendado (kPa)
3,0 a 4,5	200	275 a 350
4,5 a 6,0	275	350 a 425
6,0 a 19,0	350	425 a 500

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

6.3.5. Clasificación de los aspersores

Los aspersores se pueden clasificar atendiendo a diversos criterios:

- El área mojada. Cubriendo un círculo mojado completo (Fig. 6.8) o sólo un sector circular; en este caso, llamado aspersor sectorial.
- El alcance. Variando de pequeño (< 10 m) a grande (> 50 m).
- La presión. De baja (< 100 kPa) a alta (> 350 kPa).
- El caudal. De pequeño (< 100 l h⁻¹) a grande (> 50 m³h⁻¹).
- La tasa de aplicación. De baja (< 5 mm h⁻¹) a alta (> 15 mmh⁻¹).
- El número de boquillas. 1 ó 2.
- El ángulo del chorro con la horizontal. Raso (< 10°), para el riego por debajo de las copas, normal (18°- 21°) o alto (> 25°).

En general, esta clasificación deberá combinar las características mencionadas y considerar la adaptabilidad del aspersor a las condiciones de campo, lo que se proporciona en la Tabla (6.4) como apoyo referencial para la elección de los aspersores.

Tabla 6.4. Referencias para la elección de los aspersores.

Tipo de aspersor e intervalo de presiones de funcionamiento				
Características de funcionamiento de los aspersores	De impacto o difusores de baja presión (35-140 kPa)	De impacto o de turbina de presión moderada (105-210 kPa)	De impacto o de turbina de media presión (210-410 kPa)	
Gama de diámetros mojados	6 a 15 m	18 a 24 m	23 a 37 m	
Tasa de aplicación mínima	10 mmh ⁻¹	3 mmh ⁻¹	2.5 mmh ⁻¹	
Características del chorro (con presión y diámetro de la boquilla adecuados)	Las gotas de agua son de gran tamaño debido a la baja presión, pero menores en los LDN	Las gotas de agua son de gran tamaño debido a la baja presión, pero menores en los LDN	Las gotas de agua se fragmentan bien en todo el diámetro mojado	
Distribución del agua cuando el espaciamiento, la presión y el diámetro de la boquilla son adecuados	Razonable, en general, pero buena a muy buena en los LDN	Razonable a buena (en los límites superiores del intervalo); buena a muy buena en los LDN	Muy buena	
Adaptabilidad y limitaciones para los sistemas estacionarios	Para cultivos herbáceos extensivos, hortícolas y frutales (riego por debajo de las copas); en suelos con tasas de infiltración > 13 mmh ⁻¹	Para cultivos herbáceos extensivos y frutales (riego, por debajo de las copas de los árboles)	Para todos los cultivos y la mayoría de los suelos regables. Bien adaptados a riego por encima de las copas de los árboles	
Adaptabilidad y limitaciones para los sistemas móviles	Difusores adaptables a laterales pivotantes y lineales en suelos con elevada tasa de infiltración	Laterales pivotantes y lineales en suelos con buena tasa de infiltración	Laterales pivotantes y lineales en la mayoría de los suelos	
Características de funcionamiento de los aspersores	De impacto o de turbina de alta presión (345-690 kPa)	Cañón de muy alta presión (550-830 kPa)	Pequeños aspersores para riego por debajo de las copas de los árboles (70-245 kPa)	Tubo perforado (30-40 kPa)
Gama de diámetros mojados	34 a 90 m	61 a 122 m	12 a 27 m	Rectangulares, de 3 a 15 m de anchura
Tasa de aplicación mínima	10 mmh ⁻¹	15 mmh ⁻¹	5 mmh ⁻¹	13 mmh ⁻¹
Características del chorro (con presión y diámetro de boquilla adecuados)	Gotas de agua bien fragmentadas en todo el diámetro mojado	Las gotas de agua están bien fragmentadas	Las gotas de agua están razonablemente bien fragmentadas	Las gotas de agua son grandes debido a la baja presión
Distribución del agua (cuando el espaciamiento, la presión y el diámetro de la boquilla son adecuados)	Buena, excepto cuando las velocidades del viento exceden 6,4 kmh ⁻¹	Aceptable con el aire en calma, pero muy deformada con viento	Razonablemente buena	Buena. El modelo de distribución es rectangular
Adaptabilidad y limitaciones para los sistemas estacionarios	Para cultivos herbáceos extensivos, en suelos con infiltración razonable y viento no excesivo	Para cultivos herbáceos extensivos, en suelos con tasas de infiltración altas y zonas poco ventosas	Para todos los frutales. Ideal en áreas ventosas	Para cultivos en pequeñas parcelas y suelos con tasas de infiltración altas
Adaptabilidad y limitaciones para los sistemas móviles	Cañones terminales en pivót (con sobrepresor) y cañones móviles	Cañones móviles	No aplicable	No aplicable

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

6.3.6. Perfil de precipitación y espaciamento

La elección de un aspersor tiene por objetivo encontrar la mejor combinación entre el espaciamento, el caudal, la presión de funcionamiento y el tamaño de la boquilla que proporciona la tasa de aplicación óptima y el mayor grado de uniformidad de aplicación posible en relación con el cultivo a regar.

En un sistema de aspersión estacionario, el modelo pluviométrico y el espaciamento entre aspersores condicionan ampliamente el grado de uniformidad alcanzable. Sin embargo, el modelo de distribución de agua se altera mucho por efecto del viento y de la presión inadecuada. Las condiciones que afectan tanto al diámetro mojado como al modelo de la distribución de la precipitación del aspersor son la dirección y la velocidad del viento, la altura y el ángulo de elevación del chorro, la turbulencia del flujo de agua que entra y sale de la boquilla, la presión en la boquilla y el diámetro de la boquilla. Hay, además, características del propio aspersor que afectan a su calidad de funcionamiento, principalmente las que determinan la velocidad y la uniformidad de rotación, lo que condujo al desarrollo de los nuevos aspersores de plato rotativo con boquillas de baja deriva.

El viento distorsiona los modelos de precipitación (Fig. 6.18) y, consecuentemente, afecta a la uniformidad de distribución (Tarjuelo *et al.*, 1999b). Es de destacar que una velocidad de viento de 5 kmh^{-1} , que es solo una brisa, altera profundamente tal modelo. Bajo condiciones de viento, los aspersores necesitan funcionar más cerca unos de otros, de forma que un mayor solape de los chorros permita que la aplicación de agua sea más uniforme. Además, se deberá posicionar las tuberías de los laterales perpendicularmente a la dirección del viento.



Figura 6.18. Distorsión del modelo de distribución pluviométrica de los aspersores por acción del viento, soplando de la derecha a la izquierda en la figura.

Un aspersor funciona mejor cuando la presión disponible está dentro de los límites especificados por el fabricante. En caso contrario, la distribución del agua puede ser sustancialmente diferente de la esperada. Si la presión es muy baja, el chorro no se rompe fácilmente, una parte del agua cae en la proximidad de los aspersores y otra parte cae a alguna distancia de éstos, pero inferior al alcance, además de que se producen gotas grandes. Si la presión es demasiado alta, el chorro se fragmenta demasiado y buena parte del agua cae relativamente cerca del aspersor (Epígrafe 6.3.2). En cualquiera de los dos casos, el alcance se reduce y los modelos de distribución son bastante diferentes de lo esperado, produciendo un riego heterogéneo. El funcionamiento a presiones demasiado bajas es un problema común en muchos sistemas de aspersión, afectando de forma evidente a la uniformidad del crecimiento de los cultivos.

Puede evaluarse visiblemente la adecuación de la presión; si la línea del chorro es rectilínea, el aspersor está trabajando a la presión correcta, pero, si es curva, la presión es demasiado baja. En las evaluaciones de campo se usan manómetros, que se colocan en frente de la boquilla de los aspersores de modo que midan la presión con que el chorro sale de la boquilla.

La altura de agua aplicada al área que rodea un aspersor varía con la distancia al mismo (Fig. 6.8). De ahí que, para obtener una uniformidad de aplicación razonable, sea necesario solapar los círculos mojados por aspersores adyacentes (Fig. 6.15). Los catálogos comerciales de los aspersores proporcionan los diámetros mojados para todas las combinaciones de diámetro de la boquilla y presión de funcionamiento. Estos diámetros, asociados al modelo (o perfil) de distribución deben tenerse en cuenta para la elección del espaciamiento adecuado entre aspersores, como se recoge en la Tabla (6.5).

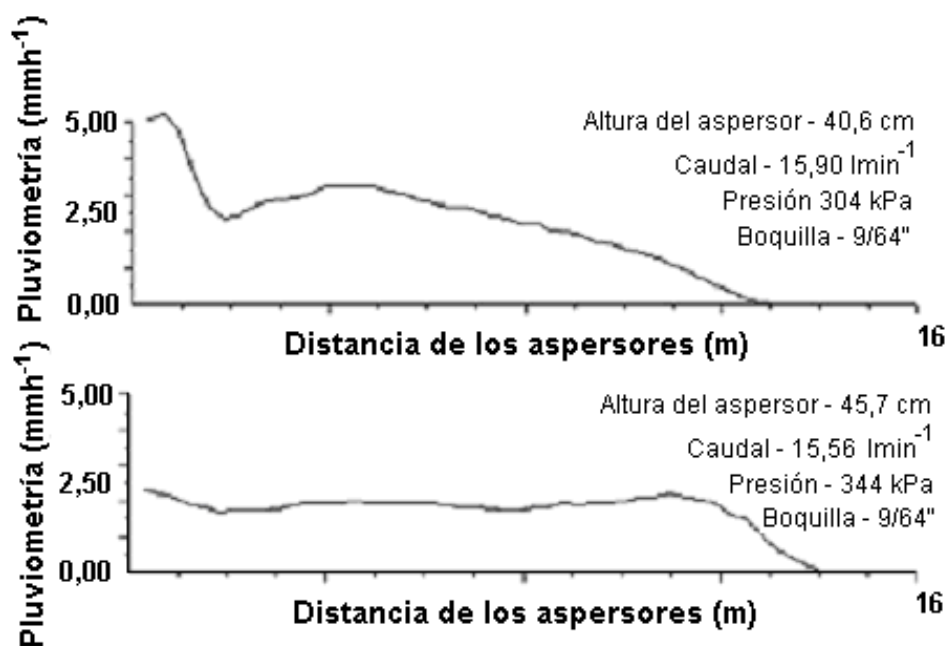
Tabla 6.5. Espaciamientos en porcentaje del diámetro mojado (% Dw) sugeridos para los sistemas estacionarios y diversos modelos de distribución pluviométrica bajo velocidades de viento < 5 kmh⁻¹.

Modelos de distribución pluviométrica	Espaciamiento* de los aspersores (% Dw)		
	Cuadrangular	Triángular	Rectángular
Triangular	55	66	40 x 60
Elíptico	60	66	40 x 60 ó 65
Elíptico achatado	40 a 80	80	40 x 80

* a ser reducidos un 2,5% por cada 1,6 kmh⁻¹ por encima de la velocidad del viento de 5 kmh⁻¹.

Fuente: Pereira y Trout (1999).

Los perfiles triangular y elíptico son propios de los aspersores de impacto con una o dos boquillas y de los difusores. El perfil elíptico achatado, que corresponde a una mayor uniformidad en la pluviometría alrededor de cada aspersor, es característico de los aspersores de turbina y de plato rotativo (LDN) y de algunos aspersores de una única boquilla funcionando con la presión recomendada. En la Figura 6.19, se muestran ejemplos de perfiles pluviométricos de aspersores de impacto y de plato rotativo (LDN). Los aspersores con boquillas alargadas tienden a producir un perfil más achatado, así como los que son diseñados para contrarrestar los efectos del viento. En condiciones ventosas, sin embargo, se produce distorsión.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.19. Perfiles pluviométricos observados sin viento: arriba, modelo triangular de un aspersor de impacto; abajo, modelo elíptico achatado de un aspersor de plato rotativo (LDN) diseñado para condiciones ventosas.

Los diámetros mojados de los aspersores que constan en los catálogos de los fabricantes se basan en tests efectuados en ausencia de viento y se miden hasta la distancia en que la tasa de aplicación no es inferior a $0,25 \text{ mmh}^{-1}$. En condiciones de campo, con viento de 0 a 5 kmh^{-1} , esos diámetros deberán ser acortados en un 10%. Pero, precisamente, se puede prever una reducción del 2,5% del espaciamiento por cada $1,6 \text{ kmh}^{-1}$ por encima de la velocidad del viento de 5 km h^{-1} para los valores recogidos en la Tabla (6.5).

En general, los buenos catálogos de los fabricantes proporcionan orientaciones sobre los espaciamientos capaces de proporcionar las uniformidades más elevadas para cada tipo de aspersor, u orientaciones sobre las uniformidades esperadas para determinados espaciamientos, pero, casi siempre, sin considerar los efectos del viento. Es de reseñar que los espaciamientos obtenidos de la Tabla (6.5) deben ser redondeados hasta la unidad en el caso de usarse tuberías de plásticos (PVC) o a múltiplos de 3 m en el caso de tuberías móviles de aluminio, cuya longitud estándar es de 3 m. Este redondeo se hace para los valores más bajos en condiciones ventosas y para cultivos sensibles, y para los más altos, en caso de viento menos probable y cultivos menos rentables.

6.4. Sistemas estacionarios

6.4.1. Tiempo de riego por posición

La palabra posición, o estación, es utilizada para designar al área regada por un conjunto de aspersores que se encuentran, estacionarios, regando simultáneamente. El conjunto de tales aspersores y tuberías respectivas define un sector. El tiempo de riego por posición es el tiempo necesario para que los aspersores completen el riego en esa posición. Ese tiempo por posición t_i (h) depende de la tasa de aplicación de agua de los aspersores I_a

(mmh^{-1}) y de la dosis de riego D (mm):

$$t_i = \frac{D}{I_a} \quad (6.5)$$

Una vez que el sistema está instalado, la cantidad de agua aplicada puede ser modificada variando el tiempo de riego en cada posición. En los sistemas fijos, no es posible cambiar la tasa de aplicación una vez que ésta es determinada por los aspersores, por los espaciados y por la presión disponible. Sin embargo, si fuera necesario, puede sustituirse la boquilla y, con ello, cambiar el caudal y el alcance correspondiente a la presión de funcionamiento. En general, no es conveniente alterar la tasa de aplicación modificando la presión, al menos que la presión no fuera la correcta. En los sistemas desplazables, puede alterarse I_a modificando la distancia entre tuberías de una posición a otra.

6.4.2. Sistemas desplazables manualmente

Los sistemas desplazables más simples, llamados también portátiles, son transportados manualmente (Fig. 6.20), y constituidos por una tubería principal y solo una tubería lateral con aspersores, espaciados de 9 a 24 m. Las tuberías son, generalmente, de aluminio o de plástico (PVC o, más raramente, polietileno), con un diámetro de 50 a 125 mm. Una vez que el riego se completa en una posición, la bomba se desconecta, las tuberías son separadas de la tubería principal, drenadas, desmontadas y trasladadas manualmente a la posición siguiente, siendo entonces conectadas otra vez a la tubería principal y la bomba accionada de nuevo. La tubería se mueve entre una a cuatro veces por día, en función del tiempo de riego en cada posición, hasta que todo el terreno esté regado. Otros sistemas utilizan dos o más tuberías en funcionamiento simultáneo, conectadas a la tubería principal a través de válvulas de acoplamiento rápido (Fig. 6.21), lo que permite que el riego continúe mientras una de las tuberías está siendo desplazada. En algunos casos, para evitar el traslado de tuberías en el suelo mojado, se trabaja con una tubería de espera que es trasladada de la posición de riego precedente a la siguiente al final del riego en cada posición.

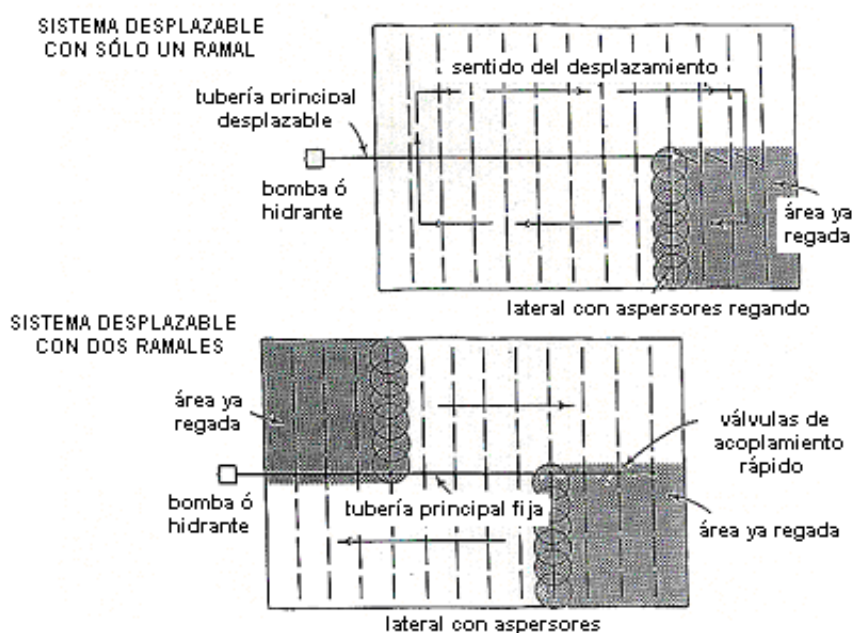


Figura 6.20. Sistemas desplazables manualmente, con una tubería lateral o con dos tuberías.

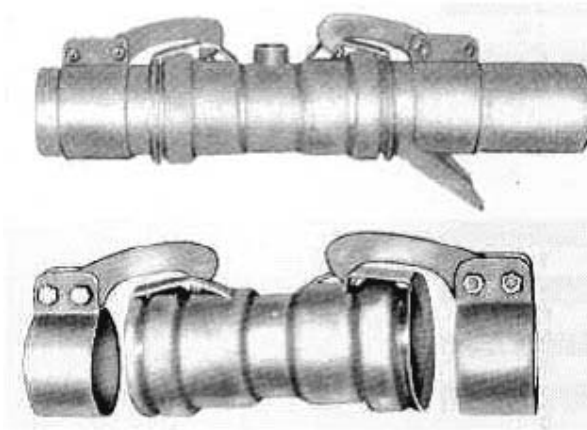


Figura 6.21. Válvulas de acoplamiento rápido en tuberías de aluminio.

En los sistemas referidos anteriormente, sólo son desplazadas las tuberías con los aspersores mientras la tubería principal permanece en el mismo lugar. Pero, en algunos casos, todo el sistema es desplazado de parcela a parcela, incluyendo la bomba y la tubería principal. Los sistemas portátiles son utilizados para regar una gama amplia de cultivos herbáceos y de frutales en parcelas de pequeños agricultores. Su coste es bajo y son de manejo muy simple; pero, requieren mano de obra, siendo el trabajo muchas veces realizado en condiciones poco confortables, por el barro y la humedad.

Para reducir las necesidades de mano de obra, las tuberías se pueden montar en ruedas o en patines y ser arrastradas linealmente por un tractor entre posiciones sucesivas. Los sistemas arrastrables fueron muy populares en los cultivos industriales, como el algodón, en grandes áreas regadas, o para el riego de apoyo de los cereales. En otros casos, los sistemas arrastrables eran adoptados para el riego de grandes áreas frutícolas por aspersión por debajo de las copas de los árboles. Otro tipo de sistema arrastrado es el de los aspersores gigantes (cañones), de alta presión con grandes espaciamientos. Estos sistemas arrastrables están siendo abandonados y sustituidos por los sistemas de desplazamiento continuo.

6.4.3. Sistemas semi-fijos

Se desarrollaron, también, otros sistemas de riego que conjugan las ventajas de los sistemas fijos y de los desplazables, intentando conjugar bajos costes de capital con menores necesidades de mano de obra. Son los denominados, frecuentemente, como sistemas semi-fijos, e incluyen, siempre, el desplazamiento de los aspersores.

Los sistemas con traslado de los aspersores y de las tuberías son muy semejantes a los sistemas portátiles, pero los aspersores se colocan a lo largo de los laterales solo en posiciones alternas (Fig. 6.22). Cuando termina la aplicación de la dosis de riego en la primera posición, los aspersores se desconectan y se trasladan a la posición siguiente en la tubería, donde riegan durante un periodo de tiempo igual al de la posición en la que se encontraban. Durante este proceso, no se necesita interrumpir el flujo de agua en la tubería lateral, ya que cada aspersor se encuentra conectado a ella mediante una válvula que interrumpe automáticamente la salida de agua cuando el aspersor se retira. La tubería lateral es, a continuación, desplazada a otra posición y el proceso de “cambio” repetido.

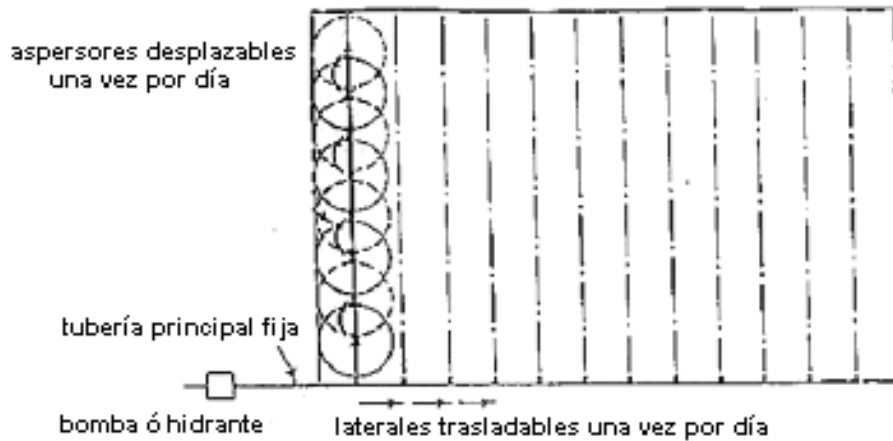


Figura 6.22. Sistema con desplazamiento de laterales y de aspersores.

Los sistemas con traslado de los aspersores y de los laterales trabajan con bajos caudales. Normalmente, sólo, es necesario un desplazamiento de las tuberías y un “cambio” de los aspersores por día, lo que permite ajustar la necesidad de mano de obra a los restantes trabajos de la explotación. Ya que el sistema puede funcionar durante mucho tiempo sin necesidad de vigilancia, es adecuado para condiciones en que el sistema precisa funcionar durante la noche. Como alternativa, los sistemas pueden tener un aspersor por cada tres posiciones, lo que corresponde a una posición inicial y dos desplazamientos (“cambios”).

Estos sistemas de riego son, en muchos aspectos, similares a los sistemas de cobertura total (Fig. 6.23), y se recomiendan como solución de menor inversión para cultivos de porte elevado, donde el traslado de las tuberías de una posición a otra es muy difícil. Todos los laterales se colocan sobre el terreno y ahí permanecen durante toda la estación de riego, lo que reduce las necesidades de mano de obra. Generalmente, se conectan dos aspersores a cada tubería, uno cerca del inicio de la tubería y otro a media distancia. Como alternativa, sólo, se usa un aspersor por tubería, cuya posición inicial es en el origen. Una vez aplicada la dosis de riego, cada aspersor se desconecta y se coloca en la posición siguiente en el lateral, proceso que se repite hasta completar el riego de toda la parcela. Las válvulas de conexión de los aspersores a las tuberías son de acoplamiento rápido, con una esfera que corta la salida del agua cuando el aspersor se desconecta. El traslado de los aspersores de una posición a otra gasta poco tiempo y encaja bien con las otras actividades de trabajo de la explotación, pudiendo llevarse a cabo, generalmente, dos desplazamientos de aspersores por día.

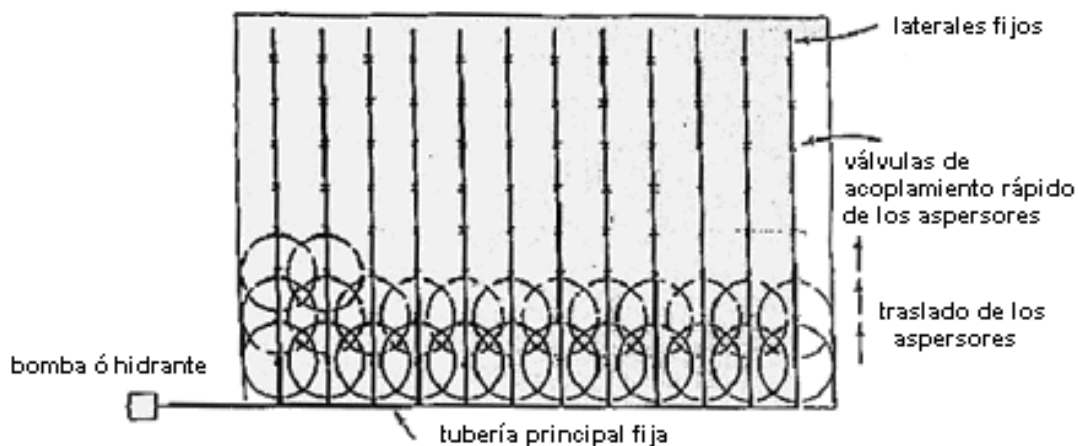


Figura 6.23. Sistema con laterales fijos y aspersores trasladables.

Los sistemas de aspersión con mangueras, también llamados sistemas con aspersores arrastrados, fueron, originalmente, desarrollados para regar frutales por debajo de las copas (Fig. 6.24), pero, también, se utilizan para otros cultivos en líneas. La tubería principal y las tuberías laterales se instalan permanentemente, enterradas, aunque, en algunos casos, son portátiles. Los aspersores se montan sobre trineos (Fig. 6.25) y se conectan a las tuberías porta-aspersores mediante mangueras flexibles, de pequeño diámetro, con una longitud generalmente de hasta 50 m, para evitar excesivas pérdidas de carga. En la Figura 6.24 se pueden ver las posiciones sucesivas de cada aspersor. Cuando se inicia el riego, los aspersores se colocan entre las líneas de árboles en las posiciones más alejadas, donde permanecen hasta que toda la dosis se aplique. A continuación, los aspersores se trasladan, tirando de la manguera flexible, a las posiciones siguientes y, así, se continúa hasta que el riego de toda la parcela se complete. Las posiciones de los aspersores pueden ser corregidas para que se compensen posibles distorsiones causadas por el viento.

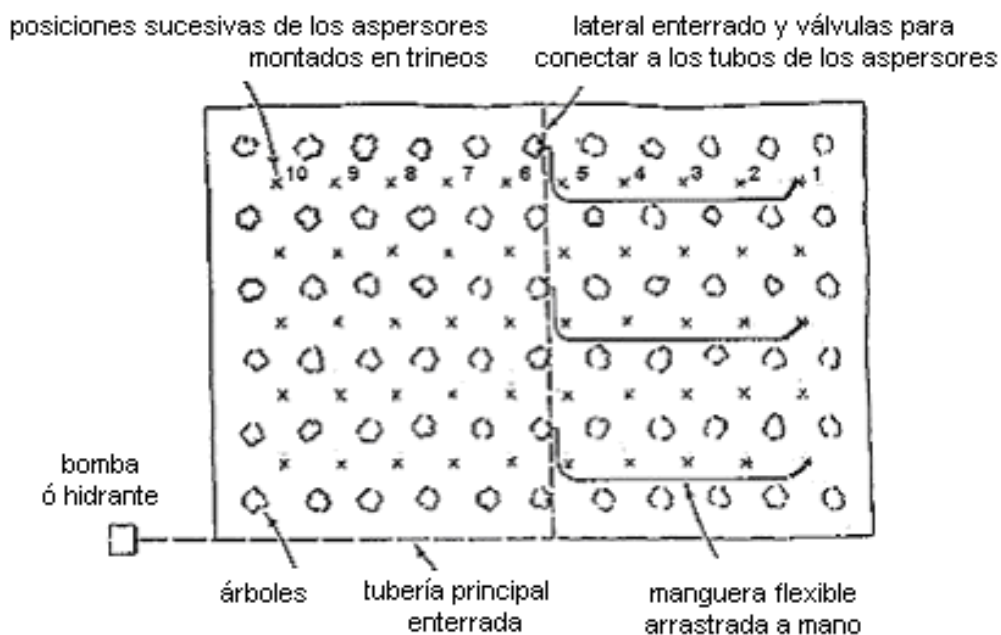


Figura 6.24. Sistema con aspersores sobre trineos, trasladados de una posición a la siguiente tirando de la manguera flexible donde están conectados.

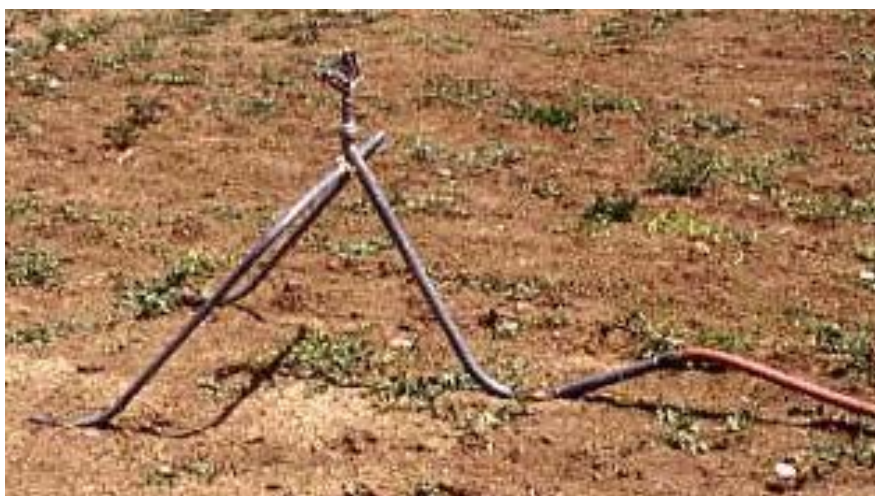


Figura 6.25. Aspersor montado en un trineo conectado a una manguera flexible para cambiarlo de una posición a otra.

En muchos casos, como en el Norte de África, estos sistemas se utilizan para regar cereales y cultivos de porte bajo, si bien son difíciles de trasladar los aspersores para colocarlos en las posiciones adecuadas. Para asegurar el buen posicionamiento de los aspersores en los sucesivos puntos a los que van siendo trasladados, es necesario colocar marcas en los extremos del terreno que definan las líneas de aspersores, y marcas en la manguera flexible que definan las distancias a recorrer cuando se tira de la misma para trasladar el aspersor a la posición siguiente.

6.4.4. Tuberías con ruedas

En estos sistemas, las tuberías ruedan cuando se desplazan de una posición a la siguiente. Se recurre a tuberías de aluminio, o de acero galvanizado, que constituyen el eje de las ruedas (Fig. 6.26). Éstas, de 1,5 a 2,0 m de diámetro, se espacian, entre sí, de 9 a 12 m, y permiten que la tubería se desplace de una posición a otra. Un motor de combustión interna mueve el sistema entre dos riegos sucesivos. Las tuberías tienen que ser resistentes y las conexiones entre tramos deben ser semirrígidas de modo que puedan soportar tensiones elevadas. El motor se ubica frecuentemente en el medio de la tubería para, así, reducir la fuerza necesaria que se requiere para el movimiento del sistema.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.25. Tubería con ruedas.

Se utilizan pequeños aspersores rotativos, o LDN, espaciados de 9 a 12 m sobre los ramales. La tubería principal se coloca a lo largo de uno de los lados de la parcela. En posición de riego, el lateral permanece estacionario hasta que se aplica toda la dosis. Después, la bomba se desconecta y, a su vez, el lateral, también, se desconecta de la tubería principal para que pueda drenar, hasta que se encuentra lo suficientemente ligera de peso para que pueda ser trasladada a la posición siguiente con la ayuda de un pequeño motor. El lateral se conecta otra vez a la tubería principal y el riego comienza en la nueva posición. Para que exista la seguridad de que los aspersores se encuentren siempre en condiciones de describir un círculo en la horizontal, se montan en un soporte giratorio especial que les asegura la verticalidad. Cuando toda la parcela está regada, el lateral es recolocado en su posición inicial. La conexión del lateral a la tubería principal puede hacerse mediante un tubo flexible de conexión al hidrante (Fig. 6.27). El lateral puede trabajar de 3 a 5 posiciones diferentes, en que se abastece desde el mismo hidrante. En este caso, la unidad motriz se dota con un dispositivo de comando que permite interrumpir el riego durante el cambio de posición.

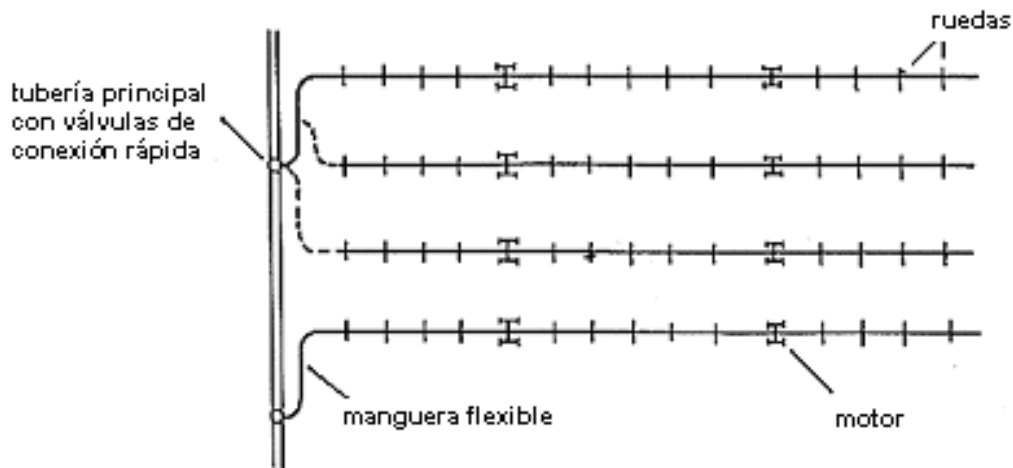


Figura 6.27. Esquema de un sistema de riego con tuberías sobre ruedas, abastecidas por medio de una manguera flexible en uno de los extremos, que permite el riego en 3 posiciones sucesivas.

Estos sistemas se adaptan bien a grandes superficies rectangulares con cultivos de porte bajo, como judías, prados y alfalfa; siguen siendo populares en EE.UU. y en algunos países de Iberoamérica. Pueden surgir problemas cuando los suelos son de textura pesada que, una vez mojados, dificultan el movimiento de las ruedas sobre el terreno.

6.4.5. Sistemas de cobertura total

Cuando el número de tuberías y de aspersores es suficiente para cubrir toda la superficie a regar de modo que ningún elemento necesita ser desplazado, el sistema se denomina de cobertura total, que puede ser temporal, durante el periodo de riego, o permanente (Fig. 6.28).

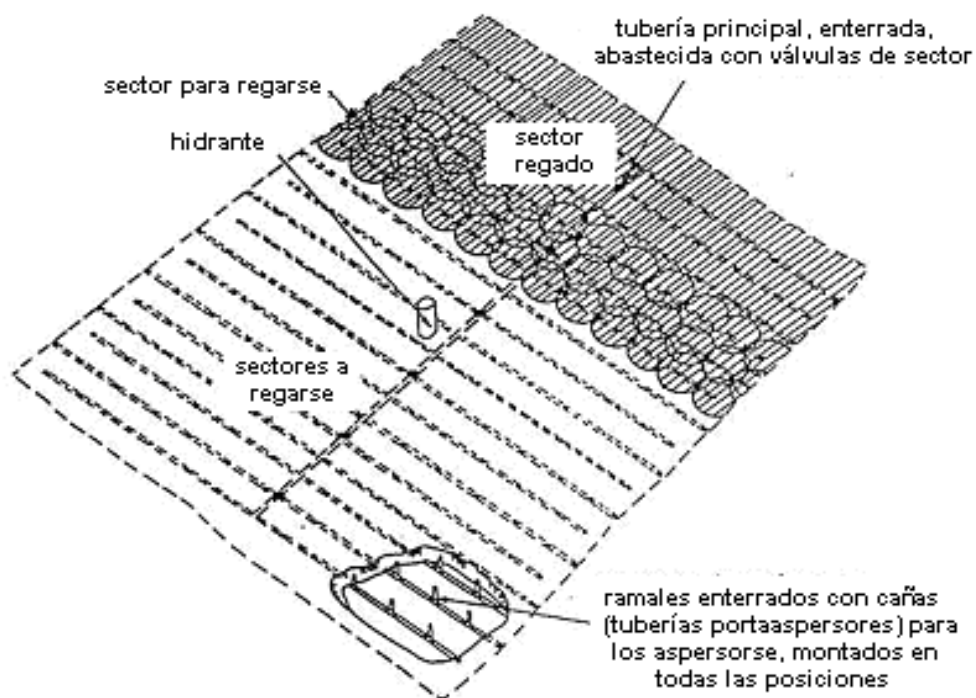


Figura 6.28. Esquema de un sistema de cobertura total permanente, con todas las tuberías enterradas.

Para cultivos anuales, se recurre a las instalaciones temporales (Fig. 6.29). Las tuberías se colocan en el terreno justo después de la siembra, donde permanecen a lo largo de toda la campaña de riego; el equipamiento se retira antes de la recolección y se almacena hasta la campaña siguiente. Las instalaciones temporales, también, se usan en el riego de frutales bajo las copas de los árboles.



Fuente: Nelson (2003).

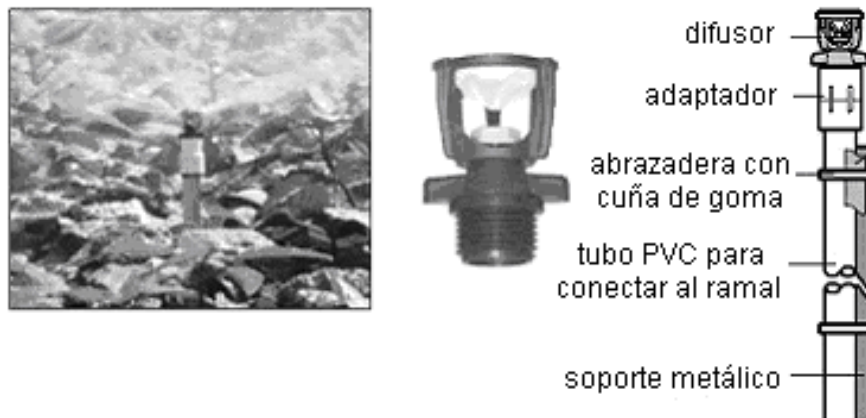
Figura 6.29. Sistema de cobertura total temporal.

En cultivos perennes, como es el caso de los frutales, los conductos y los aspersores (“cañas”) permanecen en el terreno de una estación de riego a la siguiente. En este caso, el sistema se llama permanente. En general, en los sistemas permanentes, tanto las tuberías principales y las secundarias como las laterales son enterradas para evitar los daños causados con el paso de la maquinaria y los aperos agrícolas (Fig. 6.30). Los aspersores se colocan en tubos porta-aspersores altos, para ubicarlos por encima de las copas de los árboles cuando son necesarios los riegos antihelada o se realiza la aplicación de productos fitosanitarios con el agua de riego.



Figura 6.30. Sistema de cobertura total permanente en riego de frutales con aspersores de turbina.

En los sistemas de cobertura total temporal, aumenta el uso de tuberías principales, secundarias y laterales de PVC y polietileno (PE), estando más extendido el uso de PVC en los sistemas permanentes. Puesto que el aspersor, o su chorro, deben girar describiendo planos horizontales, para que el humedecimiento del círculo mojado sea uniforme, los tubos porta-aspersores (“cañas”) deben quedar instalados verticalmente. Para esta finalidad, en el caso de recurrir al PVC, son necesarios soportes rígidos conectados a los tubos por abrazaderas, sea para aspersores o sea para difusores (Fig. 6.31). Como alternativa, se usan apoyos metálicos en la cruceta de unión del tubo portas-aspersor a la tubería (Fig. 6.32). En el caso de las tuberías PE, puesto que éstas no son rígidas, los aspersores se conectan a las tuberías con tubos flexibles y sustentados, por encima del cultivo, con soportes metálicos.



Fuente: Senninger (2003).

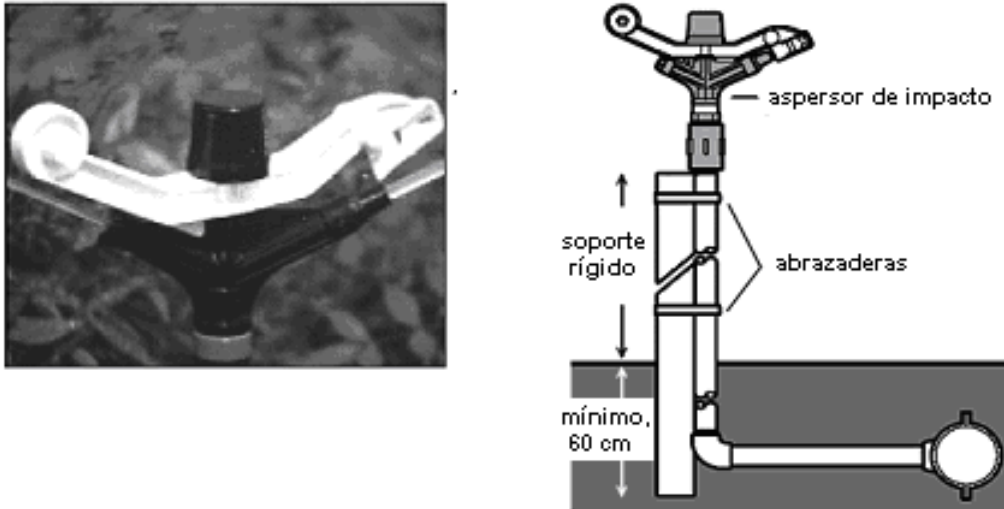
Figura 6.31. Difusor de balanceo “Wobbler” y su instalación en el campo por encima de las copas del cultivo con soporte metálico.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 6.32. Cruceta de conexión de una tubería PVC al tubo porta-aspersor con soporte metálico para asegurar la verticalidad del tubo.

Los sistemas permanentes requieren cuidados especiales en la instalación de las tuberías y sus uniones, ofrecidos como las soluciones previstas y recomendadas por los fabricantes, principalmente en lo que se refiere a la profundidad de la instalación y a la posición del aspersor en la vertical del tubo, así como en lo referente al soporte para asegurar la verticalidad de los tubos porta-aspersores (Fig. 6.33). En el caso de la aspersión por encima de las copas de los árboles (Fig. 6.34), las tuberías se amarran a cabos de alambre estirados entre estacas a la altura de la cima de las copas de los frutales.



Fuente: Senninger (2003).

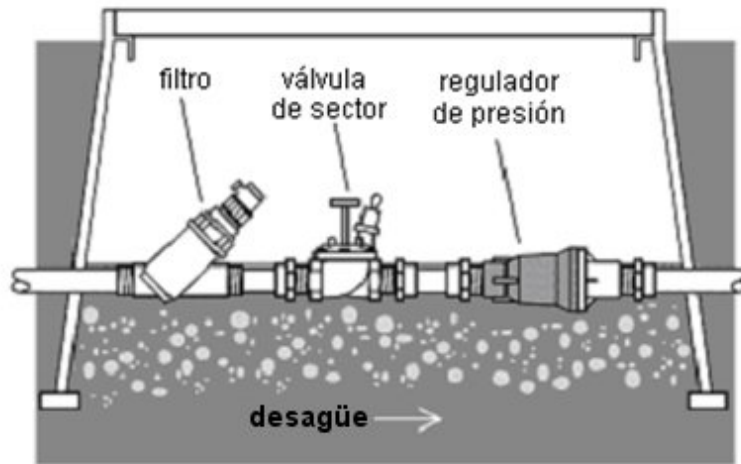
Figura 6.33. Instalación de un aspersor de impacto conectado a una tubería subterránea para proporcionar la rotación del aspersor en la horizontal y minimizar problemas en la unión a la tubería.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.34. Aspersión por encima de las copas de los árboles, para riego y para protección antihelada. Las tuberías se amarran a los soportes y se colocan a la altura de las copas.

La mayoría de los sistemas de cobertura total se dividen en sectores y, sólo, un sector funciona cada vez. El control se efectúa mediante válvulas, frecuentemente automatizadas y con comando eléctrico, o por reguladores del tiempo de riego o del volumen, instaladas en las unidades de comando y control de los sectores (Fig. 6.35). Sin embargo, cuando el sistema se utiliza para los tratamientos fitosanitarios o para protección antihelada, todo el sistema tiene que funcionar al mismo tiempo.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.35. Esquema de una unidad de comando y control en la cabecera de un sector de riego.

El equilibrio de las presiones en el interior de cada sector es esencial para que haya uniformidad en el riego de la parcela, y, más concretamente, uniformidad de los caudales descargados. Una variación de la presión del 20% entre los aspersores en funcionamiento simultáneo produce una variación de los caudales del 10%, por lo que tal variación del 20% es considerada el límite de lo aceptable. Actualmente, dada la facilidad de utilizar válvulas reguladoras de presión, y la gran variedad de equipamientos ofrecidos en el mercado, tiende a considerarse como máxima una variación de presión en el ramal de aspersores, o en la subunidad o sector de riego, de hasta un 10% de la presión media. En estas condiciones, cada vez más se tiende a poner reguladores de presión en la cabecera del sector (Fig. 6.35), en el origen de las tuberías cuando estas están en pendiente, o, también, en cada aspersor o difusor, cuando la topografía es irregular y las tuberías son largas. La adopción de reguladores de presión es especialmente necesaria en sistemas con difusores o aspersores de baja presión, frecuentemente por debajo de 100 kPa, puesto que pequeñas variaciones de cota, de pocos metros, representan variaciones sustanciales de la presión en el sector de riego.

Los sistemas de cobertura total necesitan mucha menos mano de obra que los sistemas desplazables. Inicialmente, son bastante más costosos que los otros debido al coste de inversión en tuberías y aspersores, pero pueden ser económicamente ventajosos debido a los reducidos costes de mano de obra, principalmente cuando se automatizan.

6.4.6. Sistemas de tubos perforados

Por los tubos perforados con pequeños orificios a lo largo de toda su extensión, el agua se expulsa a baja presión. A veces, los orificios se dotan de pequeñas boquillas para que haya mayor control sobre los caudales en cada chorro. Son sistemas estacionarios y se utilizan en cultivos hortícolas y viveros en pequeñas explotaciones agrícolas y en jardinería.

Se trata de tubos portátiles, ligeros, de 50 a 100 mm de diámetro. En la superficie superior del tubo, se hacen orificios, de 1 a 2 mm de diámetro, dispuestos en V, de modo que el agua se proyecte en todas las direcciones, mojando un área rectangular (Fig. 6.36). Pueden ser de dos tipos: estáticos, cuando la disposición de los orificios permite regar uniformemente

una faja rectangular, u oscilantes, cuando los orificios se disponen sólo a lo largo de un eje longitudinal y es necesario rodar el tubo, a izquierda y derecha, para conseguir regar adecuadamente toda la franja rectangular. Funcionan con presiones relativamente bajas, generalmente inferiores a 100 kPa, y pueden regar un área de terreno de 5 a 15 m de ancho y hasta 200 m de largo en una única posición. La tasa de aplicación varía entre 10 y 15 mmh⁻¹, dependiendo del diámetro y del espaciamiento entre orificios. La presión afecta al alcance y, en consecuencia, a la anchura de la faja mojada.



Figura 6.36. Riego con tubos perforados, humedeciendo una franja rectangular (más oscura en la fotografía), en una aplicación en horticultura, Japón.

Cuando el sistema está regando, la tubería principal y las perforadas están dispuestas y colocadas para funcionar de forma similar a los sistemas portátiles que utilizan aspersores rotativos.

Las tuberías oscilantes son una variante de estos sistemas y consisten en tuberías portátiles muy ligeras, de 25 a 50 mm de diámetro, con boquillas de 1 a 2 mm de diámetro, espaciadas a lo largo de la generatriz superior del tubo. La tubería se soporta por encima del cultivo en horquillas que permiten su rotación en un ángulo, aproximado, de 100° de modo que rieguen una parcela de terreno rectangular a ambos lados del tubo. Los tubos se conectan entre sí por uniones especiales que permiten que toda la tubería gire como un todo. La rotación puede conseguirse mediante un oscilador automático.

6.5. Sistemas de cañones móviles

6.5.1. Cañones móviles

Se denominan cañones a los grandes aspersores rotativos que funcionan con alta, o muy alta presión, para regar grandes superficies. El termino cañón es debido al gran tamaño del aspersor y a su capacidad para distribuir grandes cantidades de agua, con gran alcance, cubriendo áreas extensas (Fig. 6.37).



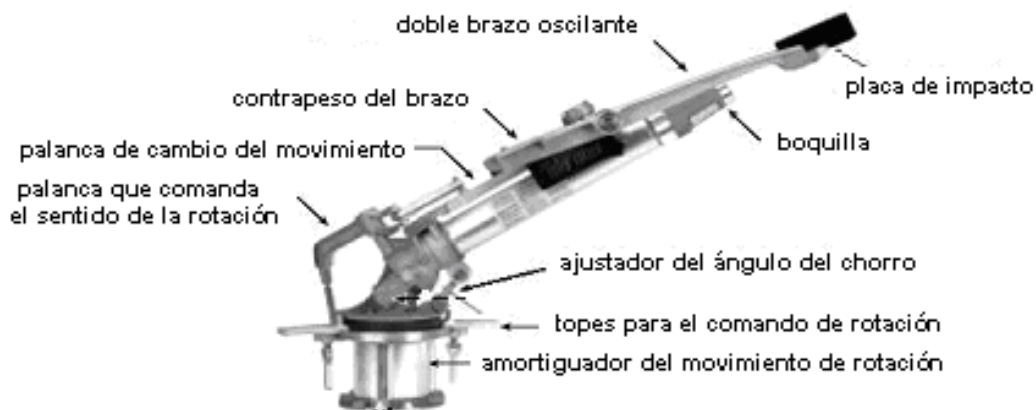
Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.37. Cañón móvil arrastrado por cable.

Los cañones podrán ser utilizados de modo semejante a los otros aspersores en los sistemas de aspersión estacionarios, móviles o de cobertura total, aunque su uso más común es montados sobre un carro o trineo que se desplaza continuamente a lo largo de la parcela durante el riego, arrastrado por el tubo que lo alimenta o por un cable, como se describe más adelante. Su uso se ha generalizado debido a su relativo bajo coste y a sus reducidas necesidades de mano de obra. No obstante, normalmente, tienen un consumo de energía, y su correspondiente coste, muy elevado, excepto los que funcionan a baja presión (entre 2 y 3 bar).

Los cañones funcionan normalmente a presiones de 400 a 800 kPa, con caudales que varían entre los 30 y los 200 m³h⁻¹. Recientemente, están apareciendo cañones pequeños que trabajan entre 200 y 300 kPa, con un caudal de descarga entre 3 y 25 m³h⁻¹ y alcances, entre 15 y 30 m. Pueden regar superficies superiores a 100 m de ancho por 400 de largo (4 ha) en cada sector. La pluviometría media del sistema varia, normalmente, entre 10 y 20 mmh⁻¹.

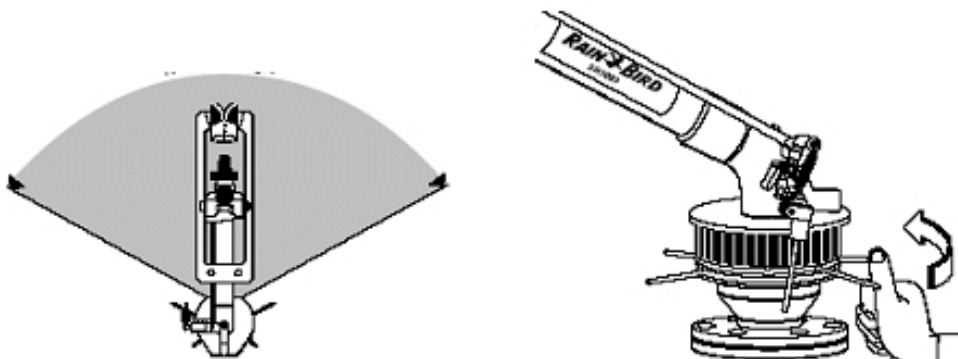
Los cañones modernos son aspersores de impacto de brazo oscilante, disminuyendo el empleo de los de giro con turbina. La rotación se produce por el impacto del chorro sobre la extremidad del brazo, oscilante sobre un eje horizontal o vertical (Fig. 6.38). En los aspersores modernos, el brazo es doble, a cada lado del aspersor, produciéndose el impacto del chorro sobre una pieza que los une. Existe un mecanismo que transforma el movimiento vertical del brazo en movimiento horizontal circular. En algunos casos, existe un amortiguador con aceite para mejorar el control de los movimientos y hacer constante la velocidad de rotación.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.38. Esquema de un cañón de brazo oscilante horizontal.

Los cañones móviles riegan sectores circulares. Para definir el ángulo correspondiente, existen mecanismos con topes en la base que limitan el movimiento de rotación del cañón (Fig. 6.39). Cuando los mecanismos de control del giro (variables de un fabricante a otro) son activados por los topes, inician el movimiento en sentido opuesto.



Fuente: Rainbird (2003).

Figura 6.39. Regulación del ángulo del sector circular mojado.

Se pueden acoplar, a los cañones, boquillas cónicas o de anillas. Las primeras provocan un estrechamiento del chorro antes de su salida por las mismas, lo que hace que el chorro de agua sea más compacto y resistente a los efectos del viento, al producirse una mayor proporción de gotas grandes, además de un alcance mayor (5%), frente a las boquillas de anilla. Puesto que los cañones trabajan con presiones elevadas, es importante que el chorro de agua salga de la boquilla sin grandes perturbaciones (Fig. 6.37), dado que cualquier turbulencia en el flujo reducirá el alcance del aspersor. De ahí, el uso de boquillas cónicas y alargadas que estrechan la salida del chorro y suprimen la turbulencia. Por el contrario, para menores presiones de funcionamiento, las boquillas de anilla provocan una mayor rotura del chorro, aspecto importante a considerar para cultivos y suelo frágiles. Los diámetros típicos de las boquillas varían entre 15 y 50 mm, aunque los de baja presión están entre 4 y 15 mm. Los caudales y los diámetros mojados que corresponden a los diámetros de boquillas más comunes se muestran en la Tabla (6.6). En la Figura 6.40, se presenta un ejemplo de cuadro con las características de un cañón, relacionando la presión de funcionamiento con el caudal y el radio mojado (alcance) para varias boquillas.

Tabla 6.6. Caudales y diámetros mojados característicos de cañones con boquillas cónicas y un ángulo de la trayectoria del chorro de 24°, trabajando en ausencia de viento.

Presión en el aspersor	Diámetro de boquilla, boquilla cónica (mm)									
	20,32		25,40		30,48		35,56		40,64	
	Caudal (l s ⁻¹) y diámetro mojado (m) del aspersor									
kPa	l s ⁻¹	m	l s ⁻¹	m	l s ⁻¹	m	l s ⁻¹	m	l s ⁻¹	m
415	9,0	87	14,2	99	20,8	111	-	-	-	-
480	9,8	91	15,4	104	22,4	116	30,3	133	-	-
550	10,4	94	16,4	108	24,0	120	32,5	139	42,6	146
620	11,0	97	17,4	111	25,6	125	34,4	143	45,1	151
690	11,7	100	18,4	114	26,8	128	36,3	146	47,8	155
760	12,3	104	19,2	117	28,1	131	38,2	149	49,8	158
825	12,9	107	20,2	120	29,3	134	39,8	152	52,0	163

Fuente: Keller y Bliesner (1990).



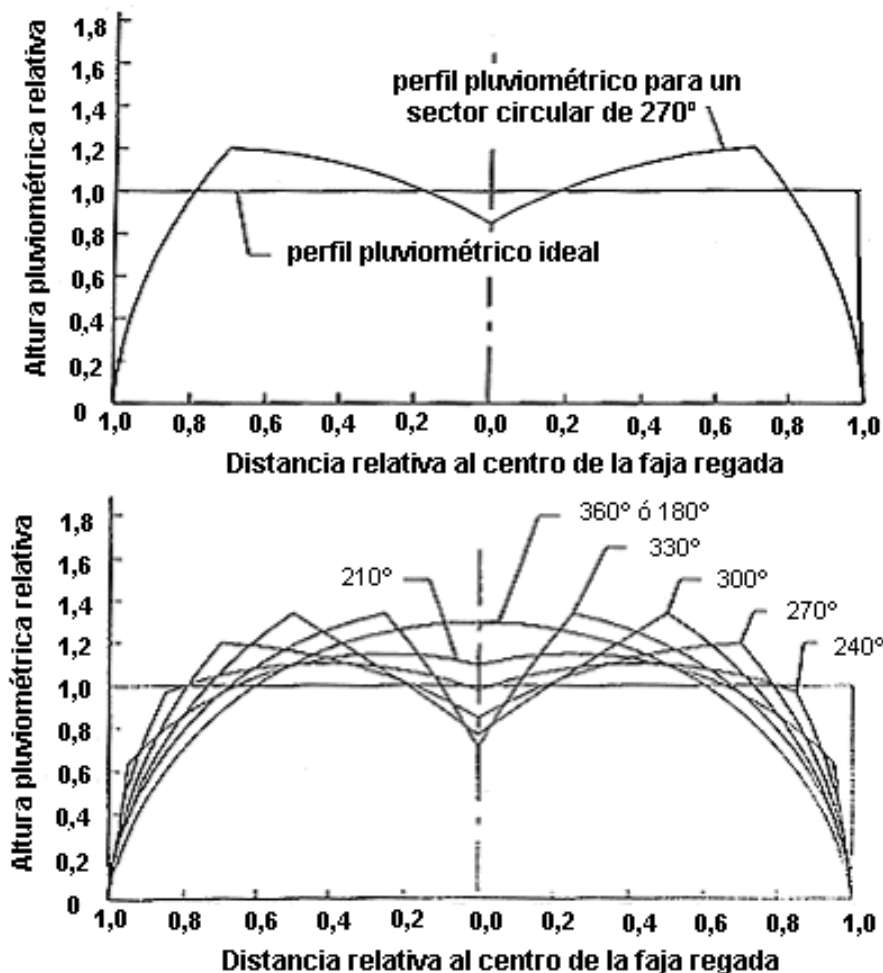
Tamaño de la boquilla												
	21 mm		23 mm		26 mm		28 mm		30 mm		33 mm	
Boquilla (Bares)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)	Radio (m)	Caudal (m ³ /h)
4,0	44,0	32,1	45,0	38,6	46,5	50,0	50,0	58,1	51,5	67,7	54,0	82,4
4,5	45,8	34,0	46,8	40,9	48,8	53,0	52,5	61,7	54,3	71,8	56,0	87,3
5,0	47,5	35,9	48,5	43,1	51,0	56,0	55,0	65,3	57,0	75,8	58,0	92,2
5,5	48,3	37,6	49,5	45,2	51,5	58,6	56,8	68,3	59,3	79,4	58,8	96,6
6,0	49,0	39,3	50,5	47,3	52,0	61,1	58,5	71,3	61,5	83,0	59,5	100,9
6,5	50,3	40,9	51,0	49,3	52,3	63,6	59,3	74,1	63,3	86,4	60,5	104,5
7,0	51,5	42,5	51,5	51,2	52,5	66,1	60,0	76,9	65,0	89,8	-	-
7,5	52,5	43,9	53,0	53,0	53,0	68,4	60,5	79,8	64,0	92,8	-	-

Fuente: Rainbird (2003).

Figura 6.40. Características de un cañón: alcance (radio) y caudal (descarga) para diversas boquillas y presiones de funcionamiento.

El ángulo de la trayectoria del chorro con la horizontal varía normalmente entre 15° y 27°, aunque puede ser superior. Algunos fabricantes poseen modelos en que el ángulo de trayectoria se puede ajustar. Hasta ciertos límites, para una determinada presión de funcionamiento, cuanto mayor es el ángulo del chorro mayor es el alcance. Los ángulos más reducidos son aconsejables para situaciones ventosas, al corresponderles una menor altura de la trayectoria de las gotas, haciéndose menos sensibles a la distorsión por el viento.

La selección del ángulo del sector circular mojado es importante puesto que influye en el perfil pluviométrico y, por lo tanto, en la cantidad de agua aplicada transversalmente a la dirección en que se mueve el cañón, condicionando la pluviometría del sistema. En la Figura 6.41, se muestra el perfil pluviométrico típico de un cañón en movimiento, regando sin viento, con un sector circular de 270° , simétrico respecto a la dirección del movimiento, comparado con el perfil ideal de un aspersor que aplicara de forma uniforme la misma cantidad de agua, expresada como altura pluviométrica relativa. Puede observarse como la pluviometría es menor en el centro del sector circular de 270° y mayor a una cierta distancia del centro (en torno, al 80% del alcance). Variando el ángulo del sector circular mojado, como se muestra en el esquema inferior de la Figura 6.41, se alteran los perfiles de pluviometría relativa, constatándose que el perfil menos uniforme corresponde a un ángulo del sector $\omega = 180^\circ$, siendo más uniforme para $\omega = 240^\circ$, que es incluso mejor que el $\omega = 270^\circ$, el cual es uno de los más utilizados en la práctica. Puede observarse (Fig. 6.41) como siempre quedan infrarregados ambos extremos, en una distancia próxima al 10% del alcance para este caso de $\omega = 270^\circ$. Se comprueba que lo ideal sería adoptar ángulos de $\omega = 240^\circ$ a 270° . De cualquier manera, parece importante que la regulación del aspersor se haga asegurando la simetría del sector mojado o, en otras palabras, que la bisectriz del ángulo del sector coincida con la dirección del movimiento del aspersor cuando riega.



Fuente: Keller y Bliesner (1990).

Figura 6.41. Perfiles pluviométricos de un cañón en movimiento. En la parte superior, para un sector circular de 270° comparado con una distribución uniforme de agua. En la parte inferior, para varios ángulos del sector circular.

6.5.2. Sistema de cañón propulsado por enrollador

Este sistema, también conocido abreviadamente como enrollador, consiste en un cañón montado en un carrito o, en dispositivos más pequeños, en un patín, al que se le suministra el agua a través de una manguera de polietileno (normalmente, de polietileno de media densidad), cuya parte sobrante se enrolla en un tambor de grandes dimensiones, el enrollador (Fig. 6.42). La manguera, además de suministrar el agua, se utiliza para arrastrar el cañón hacia el enrollador, que se posiciona en el centro de la parcela, o en el extremo opuesto de la parcela en que el cañón empieza a regar. La longitud de la manguera suele ser de 200 a 400 m (Fig. 6.43).



Fuente: OCMIS (2003).

Figura 6.42. Cañón con enrollador en posición de transporte.

En un esquema de riego normal, la tubería principal se sitúa en el centro de la parcela (Fig. 6.43). El enrollador se coloca junto a la tubería principal, para conectarse a un hidrante. Para efectuar el riego, se desenrolla la manguera tirando del carro porta - cañón con un tractor hasta situarlo junto al borde de la parcela que se quiere regar, quedando la manguera desenrollada en el centro de la franja, o banda a regar. El cañón se desplaza lentamente por la manguera a lo largo de la parcela, hacia el enrollador, a medida que ésta se enrolla en el tambor de la máquina (Fig. 6.44). El giro del tambor se produce bien por una turbina hidráulica o bien por un motor combustión interna, fuelle o pulmón. Al final del enrollamiento, un tope próximo al carro del cañón desconecta de forma automática el enrollamiento, así como el suministro de agua después de un tiempo preestablecido.

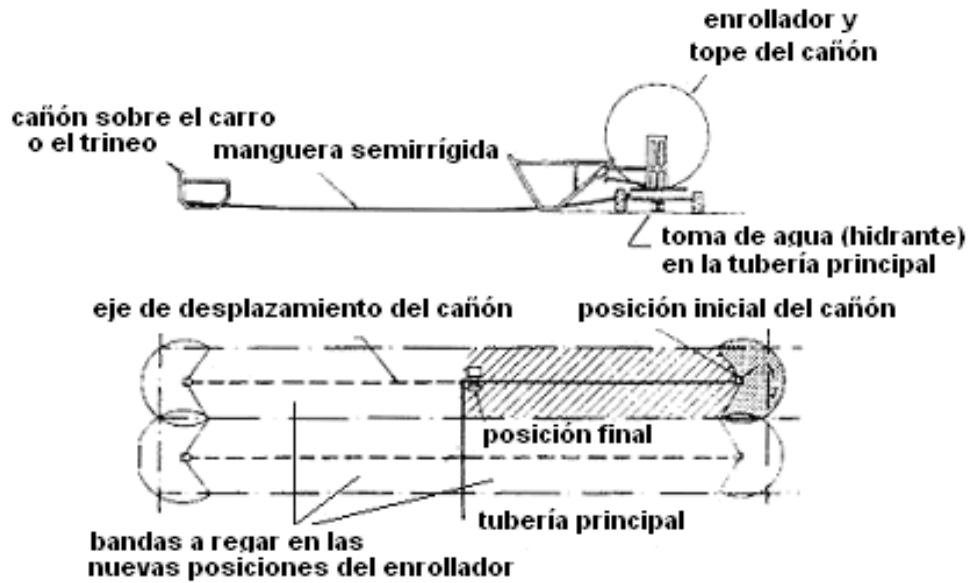


Figura 6.43. Esquema de un sistema de riego con enrollador en el que las bandas de riego se distribuyen a ambos lados de la tubería principal.



Fuente: Irricampo (2003).

Figura 6.44. Cañón aproximándose al enrollador.

Cuando el enrollador se coloca en el centro de la parcela, al finalizar el riego de la primera semibanda, hay que girar el tambor 180° para poder desplazar de nuevo el cañón y la manguera hacia el extremo opuesto de la parcela y realizar el riego de la segunda semibanda. Cuando se completa el riego de esta segunda semibanda, es preciso trasladar la máquina completa con ayuda de un tractor para regar la siguiente banda. Hay algunos sistemas de pequeñas dimensiones que pueden ser autopropulsados con un motor de combustión interna para evitar la necesidad de un tractor, generalmente utilizados en jardinería.



Fuente: Kfico (2003).

Figura 6.45. Enrollador pequeño, para el riego de espacios verdes, con motor de combustión interna.

La regulación fundamental de estos sistemas es la velocidad de movimiento del cañón, ya que, para un mismo cañón, la cantidad de agua aplicada (dosis de riego) será menor cuanto mayor sea la velocidad lineal de desplazamiento del cañón. Ésta, a su vez, se regula por la velocidad de rotación del tambor, que enrolla y tira de la manguera. La velocidad lineal del aspersor determina la dosis de riego que se desea aplicar, y puede calcularse como sigue:

$$V = \frac{1000 \times q_s}{D \times W} \quad (6.6)$$

donde: V , es la velocidad lineal del cañón (mh^{-1}); q_s , es el caudal del cañón (m^3h^{-1}); D , es la dosis de riego (mm); y W , es la anchura de la banda regada (m).

La duración del riego t_i (h) para cada banda es:

$$t_i = \frac{L}{V} \quad (6.7)$$

donde: L , es la longitud de banda a regar (m).

Keller y Bliesner (1990) recomiendan situar el cañón para iniciar el riego de la banda a una distancia del borde de la parcela igual a $2/3$ del radio de alcance del cañón (R_w). Para no dejar mal regadas las zonas del borde de la parcela, puede programarse un tiempo inicial de riego sin desplazamiento del cañón: $t_{ini} = 2/3 (R_w/V)$. De la misma forma, para dejar bien regada la zona final de la banda regada, se recomienda un tiempo de riego sin desplazamiento del cañón: $t_{fin} = 2/3 ((1-(\omega/360))(R_w/V))$. La velocidad y los tiempos de riego sin desplazamiento en los extremos pueden ser controlados de forma automática. Las distancias y los tiempos adicionales en los extremos deben ser tenidas en cuenta a la hora de estimar el tiempo de riego de una banda.

Una vez que se inicia el riego, el sistema no necesita ninguna supervisión ya que, al final del enrollamiento, el sistema dispone de un mecanismo automático para detener el desplazamiento del cañón y el terminar el suministro de agua con el retardo prefijado para regar adecuadamente esa zona. La mano de obra, con ayuda de un tractor, solo es necesaria a la hora de resituar la máquina y la manguera para regar una nueva banda, lo que puede realizarse en una fracción de hora.

6.5.2 Sistema de cañón con tracción por cable (cañón viajero)

En este sistema de riego, el cañón se monta sobre un carro con ruedas, al que se le suministra el agua con una manguera flexible (semejante a las manguera para incendios) arrastrada por el suelo, de más de 200 m de longitud y de 50 a 100 mm de diámetro, que puede enrollarse en un tambor, para su transporte, previamente vaciada de agua.



Figura 6.46. Cañón viajero con dispositivo para el transporte de la manguera y el cable de tracción enrollados en sus correspondientes tambores.

En el esquema de riego típico (Fig. 6.47), se coloca la tubería principal por el centro de la parcela a partir de la estación de bombeo, pudiendo regar una banda o franja de 400 m de largo en cada posición mediante la manguera de 200 m de longitud. El carro del cañón se coloca en uno de los extremos de la parcela, a $2/3$ de R_w (radio de alcance del cañón) de la cabecera de la parcela. La manguera se coloca en el suelo, en la línea de desplazamiento del cañón, conectada a un hidrante de la tubería principal. Es necesario tener cuidado en la colocación de la manguera para que no se produzca el doblado de la misma, dificultando el paso del agua y originando pérdidas de carga adicionales. El cable guía, que estará enrollado en un tambor en el carro del cañón (Fig. 6.47), se extiende hasta el borde opuesto de la parcela, donde se ancla adecuadamente. A continuación, se abrirá el hidrante para comenzar el riego. El carro se moverá por la acción de una turbina, o de un motor de combustión interna, que hace girar el tambor del cable, enrollándolo. Un mecanismo de control automático montado en el carro permite regular la velocidad de enrollamiento del cable y, así, el desplazamiento del carro y los tiempos de parada en los extremos, como tiene lugar en los enrolladores.

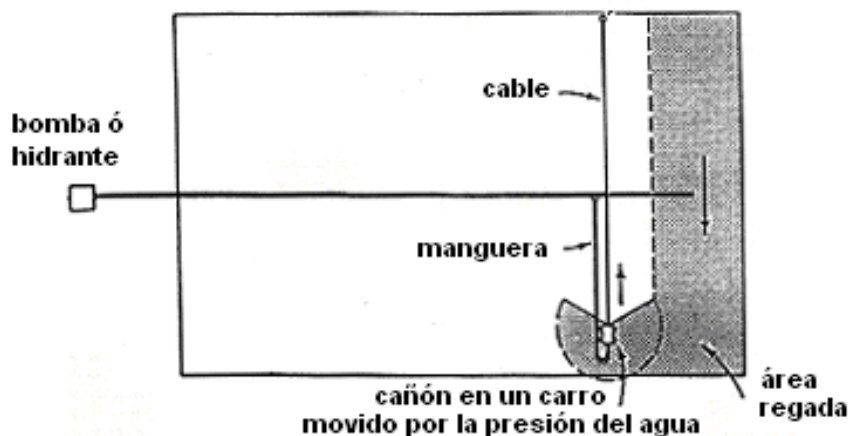


Figura 6.47. Esquema de un sistema de riego con cañón viajero.

6.5.3. Pluviometría del sistema y espaciamiento

En el riego con cañones móviles, se denomina espaciamiento a la distancia entre las líneas de movimiento del cañón cuando riega dos bandas adyacentes, distancia que corresponde a la anchura efectivamente regada por el cañón al moverse a lo largo de la banda regada (Figs. 6.43 y 6.47).

La aplicación uniforme del agua por un cañón está influenciada por la trayectoria del chorro, el tipo de boquilla, el ángulo del sector mojado, las características del modelo radial de distribución del agua aplicada, variaciones en la presión de funcionamiento, y por la uniformidad en la velocidad de desplazamiento del cañón. En menor medida, también, es afectada por el solape entre bandas adyacentes y por la velocidad y dirección del viento. Como puede observarse en la Figura 6.41, las superficies correspondientes a los extremos de la anchura mojada, cerca del 10% para $\omega = 240^\circ$ ó 270° , son infrarregadas, requiriendo, por tanto, que esas áreas reciban agua del cañón cuando se riegan las franjas adyacentes. Ésto quiere decir que un espaciamiento del 80 al 90% del diámetro mojado proporciona, generalmente, un buena uniformidad en ausencia de viento. En condiciones ventosas, es necesario aumentar el solape, es decir, reducir el espaciamiento.

En la Tabla (6.7), se indican los espaciamientos recomendados para cañones con un ángulo de la trayectoria del chorro de 23 a 25° (Keller y Bliesner, 1990). Los espaciamientos se expresan en porcentaje del diámetro mojado por los cañones en función de la velocidad media del viento. Para cada intervalo de velocidades de viento, los valores más altos se deben utilizar para boquillas cónicas y los valores más bajos, para boquillas de anillos. Cuando la velocidad del viento supera los 16 kmh⁻¹, se deben elegir aspersores con un ángulo de la trayectoria del chorro entre 20 y 21°; en regiones no ventosas, los ángulos más adecuados son de 26 a 28°.

Tabla 6.7. Espaciamientos recomendados entre franjas de trabajo según la velocidad del viento.

Intervalo de velocidad del viento (kmh⁻¹)			
Más de 16	8 a 16	3,5 a 8	0 a 3,5
Espaciamiento, como % del diámetro mojado			
60 a 65	70 a 75	80 a 85	90

La pluviometría o pluviosidad media de la aplicación de agua en cañones con ángulo de sector ω viene dada por la expresión siguiente:

$$I_t = \frac{q}{\pi(0.9 \times R_j)^2} \cdot \frac{360}{\omega} \cdot \frac{1}{1000} \quad (6.8)$$

donde: I_t , es la pluviometría media del sistema (mmh⁻¹); q , es el caudal del cañón (m³h⁻¹); $0.9R_j$, es el radio que se considera efectivamente mojado por el cañón (m), siendo R_j el radio efectivo de alcance del cañón; y ω , es el ángulo del sector regado (grados).

El área mojada se reduce a sólo el 90% del radio mojado ya que, conforme se ha indicado (Fig. 6.43), se reduce mucho la cantidad de agua que cae en el 10% exterior del círculo mojado. Cuando se adopte un espaciamiento inferior, conforme a la Tabla (6.7), el radio R_j , debe ser ajustado. Al suponer que disminuye el área mojada por el cañón, aumenta la pluviometría media del sistema, resultando un valor medio que se considera más representativo a efectos de diseño.

En la Figura 6.48, se muestra una fotografía con un cañón regando un sector circular de 180°.7



Figura 6.48. Cañón regando un sector circular de 180°, como se puede ver por la zona mojada en el suelo.

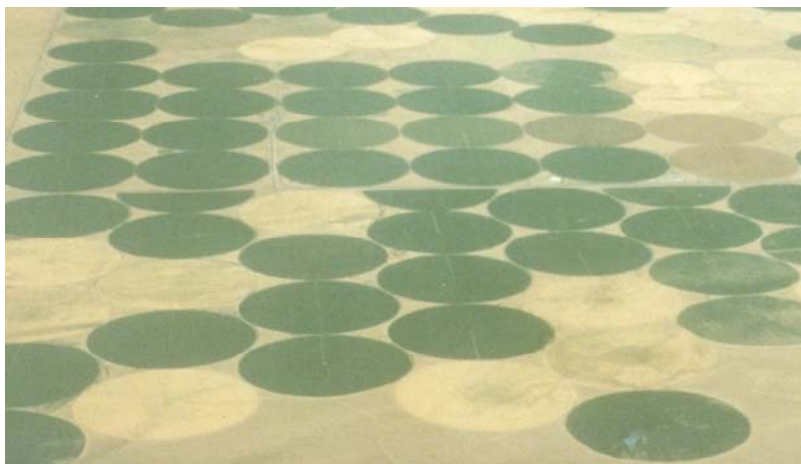
Para que no varíe la dosis de riego a lo largo de la franja regada, la velocidad de avance del cañón tiene que ser constante. Por lo tanto, es esencial la existencia de dispositivos de control que no permitan una variación de velocidad superior al 10%.

6.6. Laterales móviles

6.6.1. Sistema pivote de riego

6.6.1.1. Aspectos generales

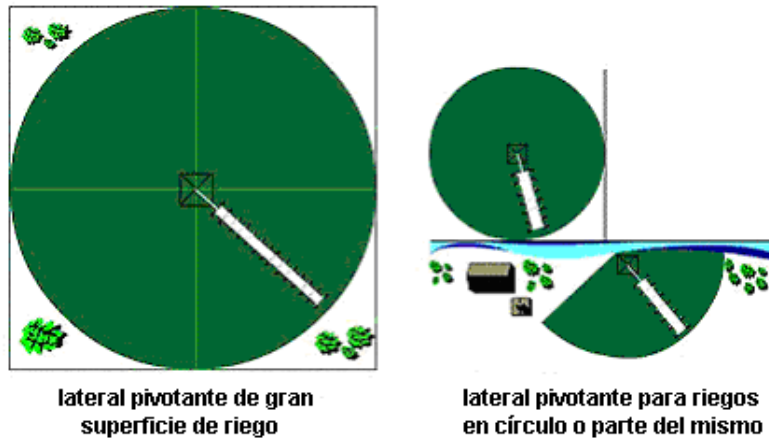
Este sistema consiste en una tubería lateral, de acero galvanizado, que gira en torno a un punto fijo en el centro de la parcela regada (Fig. 6.49); de ahí, su denominación de “pívot”, semejante a su denominación inglesa de “Center Pívot Laterals”.



Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.49. Vista aérea de una superficie regada con sistema pivote en los EE.UU.

Los sistemas, siempre, están constituidos por: el “centro pivote”, donde está el eje de rotación, que se corresponde con un tubo vertical que abastece de agua al lateral de riego; por las “torres”, que son estructuras metálicas motorizadas, donde se apoya la estructura del sistema, y que son las responsables del movimiento del lateral; los “tramos o arcos”, que son estructuras trianguladas, que integran la propia tubería de transporte del agua, para vencer los vanos entre torres; y por la tubería propiamente dicha, donde se montan los aspersores y difusores a los que abastece de agua. Los sistemas pivote de riego pueden tener dimensiones muy variables, pudiendo regar círculos o sectores circulares (Fig. 6.50).



Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.50. Esquema de sistema pivote de diferentes dimensiones.

Las áreas regadas varían entre 10 y más de 200 ha, y longitudes del lateral entre menos de 100 y más de 800 m, pudiendo tener desde 1 ó 2 hasta más de 20 tramos, terminando el último, normalmente, en un alero. Los diámetros más comunes de la tubería del lateral varían entre 100 y 250 mm, en función del área regada. Las estructuras utilizadas para los tramos y las torres son diferentes según el diseño del sistema. Las torres van montadas sobre ruedas y espaciadas a distancias próximas a 30 m, para los tramos cortos, y a 50 m, para los largos. Los equipos más pequeños pueden ser trasladables, arrastrados por un tractor o autotrasladable aprovechando las propias infraestructuras del sistema (Fig. 6.51). En ese caso, la estructura del centro pivote va dotada de las correspondientes ruedas.



Laterales pivotantes desplazables

Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.51. Esquema de equipos pivot trasladables, arrastrados por tractor.

El agua es proporcionada a la máquina a través de una tubería enterrada desde la fuente de suministro. En el centro pivote, existe un tramo de tubería vertical fijo, que se conecta con la tubería del lateral a través de una junta elástica para permitir el giro, que va unido a través de un codo con el lateral móvil (Fig. 6.52).



Fuente: Lagoalva (2003).

Figura 6.52. Ejemplos de centro pivote mostrando la tubería de alimentación, el tramo de la tubería vertical, con junta giratoria que abastece al lateral, y el cuadro de mando, para un sistema trasladable y otro fijo.

El tiempo que tarda en dar una vuelta es variable (entre 20 h y varios días), y es función de la dosis a aplicar. Cuanto más lenta es la velocidad de rotación, mayor es la cantidad de agua aplicada. Las dosis de riego mas frecuentes varían entre 5 y 30 mm, por lo que los sistemas pivote de riego están concebidos para aplicar dosis pequeñas y frecuentes.

6.6.1.2. Aspersores y pluviometría.

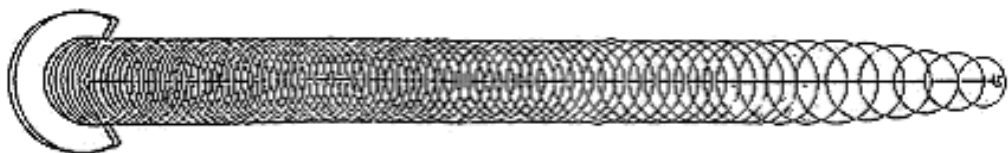
Los sistemas pivote pueden equiparse con aspersores rotativos o con aspersores estáticos (difusores) y, en el extremo de la máquina, puede colocarse un cañón. Los pequeños aspersores rotativos de impacto y los LDN de plato giratorio funcionan a presiones iguales o inferiores a los sistemas convencionales (150 a 350 kPa) mientras que los difusores trabajan a baja presión (70 a 150 kPa). Los cañones del extremo del ramal funcionan a presiones de 350 a 500 kPa. Normalmente, es necesario montar en la última torre una bomba auxiliar para dar la sobrepresión necesaria al cañón (Fig. 6.53).



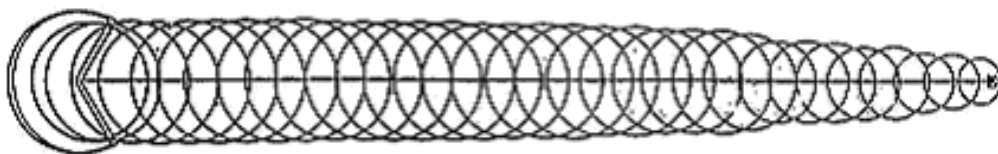
Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.53. Cañón en el extremo del ramal pivotante, con bomba de sobrepresión.

Puesto que el movimiento del lateral pivotante describe un círculo, los aspersores que se encuentran próximos al centro pivote riegan una corona circular de menor área que aquellos que se encuentran más próximos al extremo. Para conseguir una distribución uniforme del agua, se debe aumentar la pluviometría a medida que se avanza hacia el extremo exterior del lateral. Para ello, puede optarse por disminuir el espaciado entre los aspersores, por aumentar el tamaño de las boquillas, o por ambos a la vez. La primera variante, denominada de espaciado variable, utiliza el mismo tipo de aspersores en la mayor parte del lateral (Fig. 6.54), lo que tiene la ventaja de un mantenimiento más simple al ser los aspersores iguales. La segunda variante, conocida como de espaciado constante, requiere ir aumentando el tamaño de los aspersores y de las boquillas al avanzar del centro al extremo del lateral pivotante. Esta variante es la más utilizada con difusores.



aspersores rotativos con espaciado variable y cañón en el extremo



aspersores rotativos con espaciado constante y cañón en el extremo



difusores con espaciado variable

Figura 6.54. Modelos de distribución de agua: a) aspersores con espaciado variable; b) aspersores con espaciado uniforme; y c) difusores.

La pluviometría del sistema y el caudal descargado por unidad de longitud de lateral aumentan con la distancia al centro pivote al tener que regar una corona circular de mayor área en el mismo tiempo por revolución. Para aspersores de impacto y los LDN, la pluviometría del sistema puede variar desde 5 mmh^{-1} , en las proximidades del centro pivote, hasta más de 50 mmh^{-1} a 400 m , en el extremo móvil. Estos valores varían con los caudales de los aspersores, de $0,5$ a $15 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$, y con la anchura mojada.

Los aspersores de impacto de alta presión (más de 350 - 400 kPa) con gran diámetro de boquilla, normalmente dispuestos a espaciamiento constante en el lateral de riego, producen un modelo de distribución de agua extenso (con anchura mojada de 40 ó 50 m), pero tienen grandes necesidades de energía y, por tanto, grandes costes de funcionamiento. Los aspersores de impacto de media presión, con espaciamiento variable o semiuniforme, proporcionan un modelo de distribución similar (con 27 a 37 m de anchura mojada), aunque con una presión de funcionamiento menor (entre 250 y 350 kPa). La utilización de aspersores de impacto de baja presión (150 a 250 kPa) produce anchuras mojadas de 18 a 25 m , y es la que hoy en día se suele mantener dado el creciente coste de la energía. En todos los casos, se montan sobre la tubería del lateral, normalmente a más de 4 m sobre el suelo, por lo que es difícil contrastar los efectos negativos del viento sobre las pérdidas por evaporación y arrastre. Estos aspersores presentan ventajas sobre los difusores en cuanto a su menor pluviometría, lo que reduce los posibles problemas de escorrentía, pero consumen más energía. Los aspersores de baja presión de nueva generación (tipo Rotator, Wobblers, etc.) son los más utilizados, pudiendo montarse en tubos bajantes que los aproximan al suelo según sean las necesidades y posibilidades.

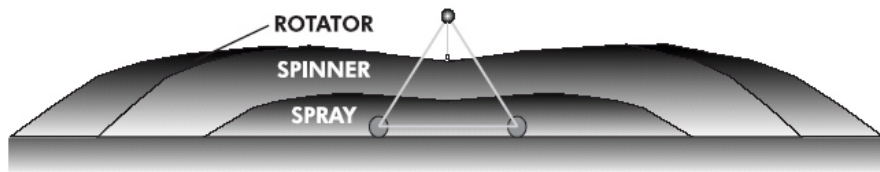
La sustitución de aspersores rotativos por difusores tienen, también, alguna ventaja: exigen una menor presión de funcionamiento (40 a 150 kPa), tienen un menor coste y se pueden montar en tubos bajantes (Fig. 6.55).



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.55. Lateral equipado con difusores montados en bajantes.

El principal problema de la utilización de difusores es la mayor pluviometría del sistema, por tener menor anchura mojada. A 400 m del centro, la pluviometría máxima con difusores de plato plano antiguos puede llegar a 300 mmh^{-1} , lo que supera la velocidad de infiltración de la mayoría de los suelos. La situación se mejora bastante con los nuevos difusores de plato estriado, con formas y movimiento apropiados para mejorar el modelo de distribución de agua (Fig. 6.56). La anchura mojada de los difusores de plato estriado colocados a 0,8 m sobre el suelo es de unos 11 m, mientras que los aspersores giratorios situados a 1,8 m del suelo ofrecen una mayor anchura mojada. Los de giro rápido (“Spinners”) alcanzan una anchura mojada de 16,5 m, mientras que los de giro lento (“Rotators”) llegan a 21 m (Fig. 6.56).



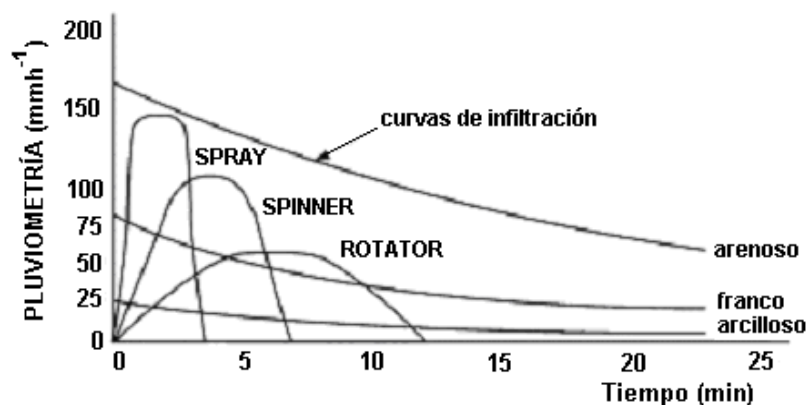
Tipo	Anchura mojada	Especificaciones
Rotator – aspersor de plato giratorio	68 pies (20,7 m)	D4 Plato verde 30 psi (2 bar); 6 pies (1,8 m)
Spinner, difusor de chorro rodante	54 pies (16,5 m)	D6 Plato púrpura 15 psi (1 bar); 6 pies (1,8 m)
Spray, difusor de plato fijo	38 pies (14,6 m)	Plato azul 15 psi (1 bar); 3 pies (0,9m)

Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.56. Anchura mojada en aspersores rotativos y difusores modernos.

Estas anchuras mojadas son muy superiores a las que son posibles obtener con difusores de plato plano, que varían entre 3 y 9 m, cuando van montados en bajantes a 1 m del suelo, y entre 6 y 14 m, cuando se colocan a 2,5 m del suelo. Los nuevos aspersores, como los “Rotator” antes referidos, son capaces de sustituir a los tradicionales aspersores de impacto, aunque han ido apareciendo los aspersores de impacto de bajo ángulo de descarga (unos 7°) para reducir el efecto negativo del viento, que alcanzan anchuras mojadas de 30 m.

Para los mismos aspersores y difusores de la Figura 6.56, las pluviometrías, que siendo elevadas para la mayoría de los suelos, son aceptables, siempre que se realicen prácticas que favorezcan la infiltración del suelo, como se muestra en la Figura 6.57.



Fuente: Nelson (2003).

Figura 6.57. Pluviometría a 400 m del centro pivote de los tipos de aspersores y difusores que aparecen en la Figura 6.56 comparadas con las curvas de velocidad de infiltración típicas de algunos suelos.

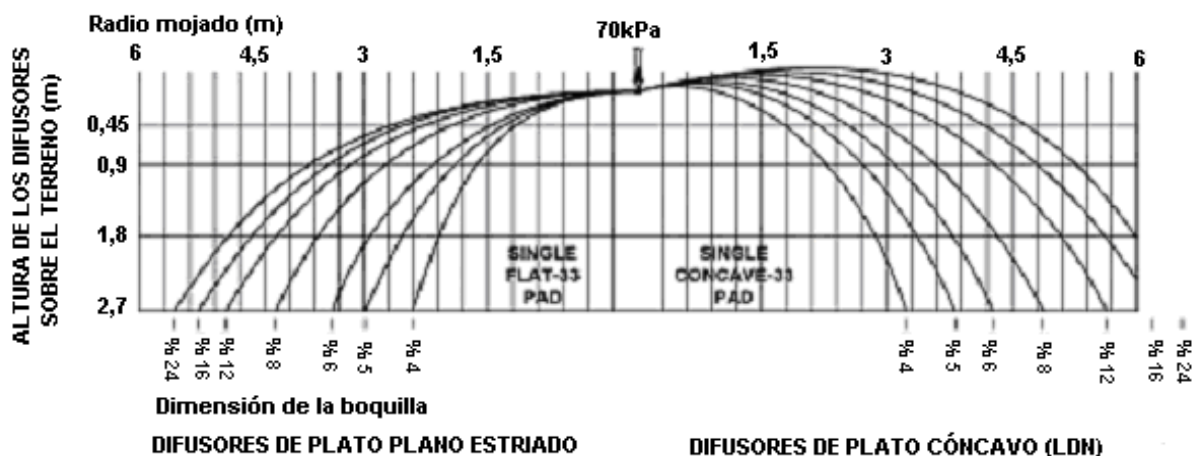
Como puede observarse, la pluviometría es tanto mayor cuanto menor es la anchura mojada, dado que el mismo caudal descargado se aplica en un área menor y durante menor tiempo. Los “Spray”, a los que corresponde una anchura mojada de 11,6 m, originan una pluviometría en torno a 150 mmh^{-1} a 400 m de distancia del centro pivote, mientras que los “Rotator”, con una anchura mojada de 20,7 m, alcanzan alrededor de 60 mmh^{-1} . Cualquiera de estos equipos no presenta problemas de infiltración en suelos arenosos (curva de infiltración superior en la Fig.6.57), pero, en los suelos de capacidad de infiltración media, sólo el “Rotator” no presenta problemas. Para los suelos de baja infiltración (curva inferior en la Fig. 6,57), todos tendrían problemas de infiltración y formación de escorrentía, por lo que esos tipos de suelos necesitan, o bien de una cobertura del suelo muy densa que facilite la retención e infiltración del agua, como prados, praderas o alfalfa, o bien medidas para prevenir pérdidas por escorrentía, como cultivos en líneas, abertura de pequeñas balsillas a lo largo de los surcos, o el montaje de los aspersores en pequeños tubos (“booms”) perpendiculares al lateral con el fin de aumentar la anchura mojada (Fig. 6.58).



Fuente: Lagoalva (2003).

Figura 6.58. Pequeñas tuberías adicionales perpendiculares al lateral para aumentar la anchura mojada en el extremo; destacar el cañón del extremo con bomba de presión.

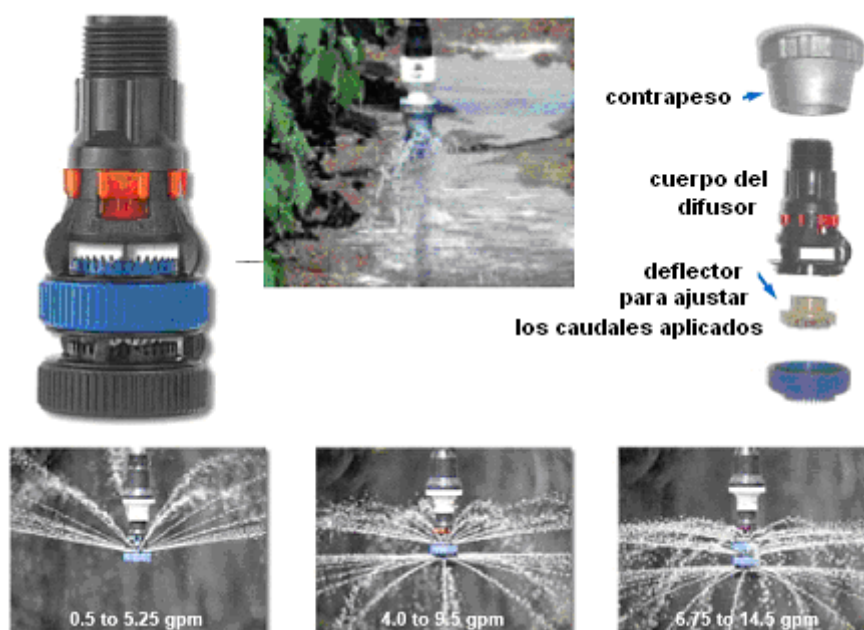
Es de reseñar que las anchuras mojadas dependen no sólo del tipo de aspersor, o difusor, sino, también, de la altura por encima del terreno a la que están montados los aspersores, de su presión de trabajo y de la dimensión de la boquilla, como se puede ver, por ejemplo, en la Figura 6.59 para dos difusores: uno, de placa plana estriada y el otro, de placa cóncava. Las anchuras mojadas aumentan con la presión, con el diámetro de la boquilla y con la altura por encima del suelo. La elección de la presión y de la boquilla se determina por el caudal deseado, y la altura por encima del suelo, por la altura de los cultivos.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.59. Radios mojados por dos difusores a la presión de 70 kPa, de plato plano y de plato cóncavo, para diferentes dimensiones de la boquilla y alturas por encima del suelo.

Una opción que se está desarrollando desde hace cierto tiempo es el uso de difusores para aplicación del agua junto al suelo, en el interior del cultivo, en laterales conocidos como sistemas LEPA (“Low Energy Precision Application”). Una ventaja de los sistemas LEPA es la de evitar los efectos del viento, y las consiguientes pérdidas de agua, y la otra es la de descargar el agua de forma localizada, junto a las raíces de los cultivos. En el caso de cultivos perennes, el equipamiento de los laterales debe tener en cuenta el trazado de las líneas del cultivo. Los modernos difusores para estos sistemas tienen características diferentes de los que se usan con tubos bajantes, como los mencionados anteriormente, y pueden adaptarse a diversos fines (Fig. 6.60).



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.60. Difusor LDN para la aplicación del agua en el interior del cultivo, con distinto tipo de deflector conforme a los caudales aplicados.

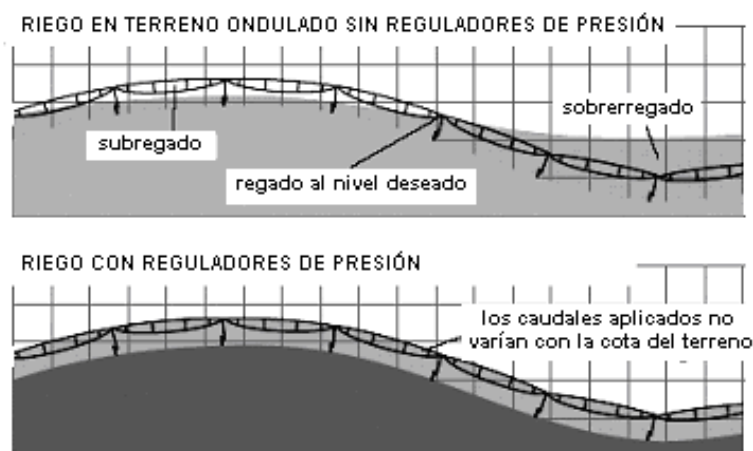
Otra ventaja de los sistemas LEPA es la de favorecer de forma precisa la fertilización y los tratamientos fitosanitarios (fertirriego y quimirriego). En estos casos, los difusores se eligen para tales fines dotándose de deflectores de formas variadas conforme a la finalidad de la operación que se practica (Fig. 6.61).



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.61. Moderno difusor para los sistemas LEPA, adaptados para funcionar con diferentes formas de aplicación del agua, incluso para la aplicación de fitosanitarios.

Cuando los laterales se desplazan por terrenos ondulados, se producen variaciones de presión que causan, a su vez, variaciones de caudal (Ec. 6.1), que son proporcionales a la raíz cuadrada de la presión de trabajo. Por lo tanto, los laterales pivotes equipados con difusores y aspersores de baja presión que se mueven en condiciones topográficas desfavorables pueden tener una uniformidad de distribución muy baja, al menos que los aspersores se doten de reguladores de presión y de caudal. Como muestra la Figura 6.62, pequeñas variaciones en la pendiente del terreno producen variaciones muy grandes en la presión disponible cuando las presiones utilizadas son del orden de 40 a 100 kPa. La utilización de los reguladores de presión, en estos aspersores, es, entonces, absolutamente necesaria.



Fuente: Senninger (2003).

Figura 6.62. Efecto de la variación de la cota del terreno sobre la presión disponible para los aspersores de laterales móviles que riegan terrenos accidentados.

La amplia gama de aspersores disponibles en el mercado y de combinaciones de presión–boquilla–altura dificulta la elección del equipamiento de los ramales móviles. De ahí, que estén disponibles, actualmente, modelos que apoyan estas decisiones (Valín y Pereira, 2006), incluso proporcionados por los mismos fabricantes.

6.6.1.3. Velocidad de desplazamiento y dosis a aplicar

Cada torre tiene su propia unidad motriz, lo que permite que cada una de ellas se desplace a una velocidad diferente. Como la distancia lineal a recorrer aumenta con el alejamiento al centro, a medida que la distancia al mismo aumenta, cada torre deberá desplazarse a mayor velocidad que la precedente para que el ramal pivotante ruede como un todo continuo, con la misma velocidad angular.

La energía que permite el movimiento de los laterales pivotantes es, en la actualidad, eléctrica. Las tuberías movidas por energía hidráulica están desapareciendo; la energía era aportada por la presión del agua que circulaba en la tubería para mover pistones hidráulicos montados en cada torre. En estos sistemas, era muy difícil controlar la velocidad de cada torre y mantener el alineamiento de las mismas. Además, el sistema sólo se movía mientras regaba. Hoy en día, cada torre (Fig. 6.63) se mueve por su propio motor eléctrico (normalmente, de 0,5-1,5 CV). La velocidad de rotación se controla a partir de un panel situado junto al centro pivote (Fig. 6.52), a través de la regulación de la velocidad de la torre exterior. El lateral pivote se mantiene alineada gracias a diversos dispositivos de control que se activan cuando se produce la desalineación de las torres, dispositivos estos que obligan a parar las torres que están más adelantadas.



Fuente: Lagoalva (2003).

Figura 6.63. Torre de un lateral pivote, mostrando abajo, en la parte inferior, el motor y, arriba, en la parte superior, el dispositivo de comando y control de la velocidad y del alineamiento.

La velocidad de rotación V (mh^{-1}) del lateral pivotante es la de la torre exterior:

$$V = \frac{2 R_e}{t_r} \quad (6.9)$$

donde: R_e , es el radio del círculo descrito por la torre exterior (m); y t_r , es la duración de una vuelta (h).

La velocidad de rotación se expresa, normalmente, en porcentaje del tiempo que el motor de la torre exterior está conectado. La velocidad máxima es 100 % y todas las otras velocidades (p.e., el 70 %), corresponden a una razón conexión-desconexión del 70 %. Un ciclo conexión-desconexión tiene normalmente una duración de 1 minuto. Los otros motores tiene un tiempo de parada que aumenta a medida que disminuye la distancia a la última torre, lo que simplifica el alineamiento.

El caudal del sistema Q (m^3h^{-1}) depende de la superficie a regar A (ha), de la dosis aplicada D (mm), y del tiempo de riego necesario para dar una vuelta t_r (h), según se pone de manifiesto en la expresión siguiente:

$$Q = \frac{10 D \times A}{t_r} \quad (6.10)$$

con:

$$A = \pi R_p^2 \quad (6.11)$$

donde: R_p , es el radio mojado, que incluye la corona circular regada por el cañón del extremo, siempre que exista.

Conocido el caudal del sistema, la Ec. (6.10) proporciona el tiempo para describir una rotación, t_r (h), el cual, cuando se introduce en la Ec. (6.9), proporciona la velocidad requerida para aplicar esa dosis.

6.6.1.4. Manejo de la parcela

Los laterales pivotantes son más adecuados para suelos arenosos, de mayor capacidad de infiltración y que soportan mejor el peso de las torres sobre las ruedas. Cuando riegan suelos pesados, surgen problemas importantes, principalmente si el lateral pivotante se encuentra equipada con difusores de plato plano, que producen una pluviometría muy elevada, como se expuso antes. Tales problemas se refieren tanto a la infiltración insuficiente, y consiguiente producción de escorrentía y erosión, como a las dificultades de movimiento de las torres en suelos arcillosos encharcados.

Los principales problemas de manejo tienen que ver con la adopción de dotaciones pequeñas, que no permiten ni el almacenamiento de agua en el suelo para el sistema radicular de la mayor parte de los cultivos ni el lavado de sales. El uso de laterales pivotantes en suelos medios a pesados, en regiones áridas o semi-áridas, requiere una elección cuidadosa de los aspersores y un análisis riguroso de las pluviometrías esperadas. Una solución es la de no utilizar laterales pivotantes muy largos, ya que la pluviometría aumenta con la distancia al centro. Para controlar los efectos del viento, habrá que optar, siempre que sea posible, por los difusores situados en los tubos bajantes, evitando aspersores sobre las tuberías, al menos que se trate de modernos aspersores de bajo ángulo capaces de contrarrestar los efectos del viento. En condiciones áridas y de salinidad, los laterales pivotantes no deberán ser utilizados por ser incapaces de proporcionar el lavado de las sales, aplicando dotaciones pequeñas que solo humedecen la capa superficial del suelo, facilitando la ascensión de sales hacia la zona radicular. En el caso de los suelos menos pesados, con poca arcilla y limo, esa dificultad es menor cuando se usan aspersores de caudal grande y velocidades de rotación muy bajas; pero resulta siempre difícil de manejar.

Una de las principales ventajas de este sistema es la de poder ser totalmente automatizado, con control mediante un panel dispuesto junto al centro (Fig. 6.52), o a través de control remoto. Los mecanismos de control arrancan y separan por temporizadores. Se utilizan diversos dispositivos de seguridad para la protección del sistema. Por ejemplo, si la presión del agua cae accidentalmente, o si uno de los motores de las torres se avería, estos dispositivos pueden parar el riego automáticamente y accionar una alarma que alerta al operador de la anomalía. Adoptando estos mecanismos, pueden existir diversas máquinas funcionando simultáneamente, cubriendo grandes áreas, controladas por pocos operadores, principalmente si estuvieran automatizadas con control remoto. Es, también, posible un buen manejo de la fertirrigación y la aplicación de diversos productos químicos utilizados en la protección de los cultivos. El control remoto no evita, sin embargo, una inspección visual frecuente.

Una de las principales desventajas de los laterales pivotantes es la de regar sólo superficies circulares, sin alcanzar las esquinas de las parcelas cuadradas, que quedan sin regar. En este caso, la utilización de un equipo pívot por si solo no es suficiente, siendo normal la utilización de cañones especiales o de dispositivos para regar las esquinas, como muestra la Figura 6.64. Estos dispositivos se programan para iniciar el riego siempre que la tubería alcance una esquina de la parcela. Sin embargo, estos dispositivos requieren un caudal suplementario cuando están regando, son caros y exigen una capacidad tecnológica de apoyo al usuario por parte del suministrador. La solución más barata y fácil de manejar es la de adoptar sistemas de riego de cobertura total para regar las superficies que no riegan los laterales pivotantes.

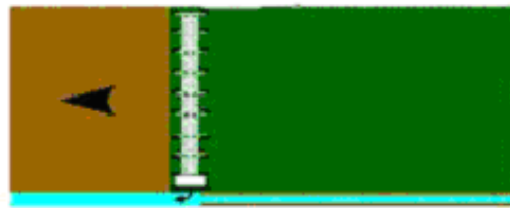


Fuente: Zimmatic (2003).

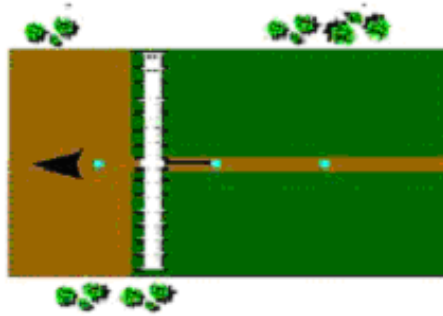
Figura 6.64. Dispositivo para regar las zonas periféricas que no riegan los equipos pívot.

6.6.2. Laterales de avance frontal

Estos sistemas de laterales lineales, o de desplazamiento frontal, llamados abreviadamente “lineales”, son especialmente fabricados para regar las parcelas rectangulares, ya que la tubería se desplaza desde una de las cabeceras de la parcela en dirección al extremo opuesto. En términos de diseño, son sistemas muy similares a los equipos pívot. El agua es suministrada por un extremo de la tubería mediante una manguera, o por bombeo desde un pequeño canal, que transcurre por el borde o por el centro de la parcela (Fig. 6.65). La torre principal está siempre equipada con una bomba.



lateral lineal abastecido por un canal



lateral lineal abastecido por una manguera

Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.65. Esquemas de un lateral de avance frontal abastecido por una manguera o por un canal.

La tubería se mueve impulsada por motores eléctricos en cada torre. La dirección del movimiento se consigue mediante una línea guía que se extiende a lo largo de uno de los lados de la parcela. La torre de control está equipada para recibir señales de esta línea, como se muestra en la Figura 6.66, y poder alinear la tubería perpendicularmente a esta, de forma que el movimiento de la misma se haga paralelamente a la línea guía.

Los laterales de movimiento lineal están equipados con difusores o aspersores de impacto como se describió para los equipos pívot (Epígrafe 6.6.1.2), pero sin cañón en el extremo. El espaciamiento entre aspersores es constante y éstos deben tener las mismas características a lo largo de toda la tubería para que la pluviometría sea uniforme. Como la velocidad lineal es la misma a lo largo de toda la tubería, la pluviometría no varía, pero depende, naturalmente, de la anchura mojada, siendo función del caudal y de la altura de los aspersores o de los difusores con respecto al suelo. Se aplica, pues, lo escrito anteriormente sobre la elección de los aspersores.



Figura 6.66. Torre guía de un lateral lineal abastecido por manguera; en el centro, los sensores de dirección sobre un cable eléctrico de bajo voltaje.

A semejanza de los equipos pívot, estos sistemas se pueden automatizar totalmente. Con todo, una vez que se alcanza uno de los extremos de la parcela, el lateral (Fig. 6.67) tiene que, de nuevo, ser colocado en el extremo opuesto, lo que significa desplazar una máquina pesada a lo largo de un terreno recientemente mojado. En suelos arenosos, ésto no constituye problema, pero, en suelos arcillosos, las torres pueden atascarse en el barro. Una solución es dividir el terreno en dos parcelas; el riego se inicia desde la izquierda, por ejemplo, con desplazamiento de la tubería hasta el centro de la parcela y, a partir de ahí, la tubería se desplaza sin regar, y en terreno seco, hasta el extremo de la parcela de la derecha, donde el riego se inicia otra vez, con la tubería moviéndose hasta el centro, cuando la primera mitad ya debería estar suficientemente seca para que la tubería se desplace hasta la posición inicial y se inicie un nuevo riego, y, así, sucesivamente. Los laterales de avance frontal se diseñan, normalmente, para moverse regando en ambos sentido, con un tiempo de parada en el extremo suficiente para garantizar la infiltración del agua en el suelo. Los tiempos muertos son más pequeños, y se reduce el coste de las instalaciones.



Fuente: Valmont (2003).

Figura 6.67. Lateral de avance frontal bien alineado, abastecido por un canal en el centro.

Los sistemas de desplazamiento continuo son apropiados para aplicar riegos pequeños y frecuentes y, por tanto, presentan problemas similares a los de los equipos pívot en lo que respecta al riego de los suelos pesados, de los suelos salinos o al riego en regiones áridas y semi-áridas. Con estos equipos, se pueden dar también dosis de riego grandes en suelos que no sean muy arcillosos o limosos, pero el manejo del riego en los suelos salinos y los suelos arcillosos es siempre difícil.

6.6.3. Tuberías con enrollador y tracción por cable. Ala sobre carro

Otro sistema con desplazamiento continuo es el que se basa en un equipamiento inicialmente construido para los cañones: un lateral equipado con difusores, montado sobre un carrito transportador, llamado “ala sobre carro”, y desplazado por medio de un cable o por una tubería semirrígida (normalmente, de PE de media densidad) conectada a un enrollador (Fig. 6.68). Antes de iniciar el riego, hay que colocar el carro transportador en uno de los extremos de la parcela, tirando lentamente del mismo para que la tubería se vaya desenrollando. Se inicia, entonces, el riego, que termina automáticamente cuando la tubería se aproxima al enrollador. En una posición es posible regar una franja de terreno de 30 a 50 m de ancho y 200 m de largo.



Fuente: OCMIS (2003).

Figura 6.68. Ala sobre carro traccionada por un enrollador cuyo tubo es visible en el centro.

Si el sistema es tirado por un cable, el “ala sobre carro” se alimenta por una manguera de lona arrastrada por el suelo, conectada a la parte posterior del carro transportador, o por una manguera más rígida, enrollada en el carro transportador, pero que se utiliza sólo para suministrar el agua y no para tirar del carro. Algunos fabricantes proporcionan sistemas en los que los transportadores tienen brazos flexibles y tuberías extensibles, que se adaptan mejor a terrenos de anchuras variadas. Estos sistemas se utilizan generalmente en horticultura.

6.7. Evaluación

La evaluación de los sistemas de riego trabajando es fundamental para mejorar el funcionamiento de los sistemas y originar información para extensionistas, proyectistas y fabricantes de equipamiento. La evaluación (Merriam y Keller, 1978; Keller y Bliesner, 1990; Pereira, 2002; Tarjuelo, 2005), que, generalmente, se hace con apoyo en formularios apropiados, incluye la medida de:

- Los espaciamientos (L_1 y L_2) entre tuberías y entre aspersores, en los sistemas estacionarios, entre las líneas que definen los recorridos sucesivos de cañones móviles, y entre aspersores a lo largo de los laterales móviles.
- La presión en los aspersores (P), recurriendo a manómetros con tubo de Pitot colocados junto a las boquillas, en diferentes localizaciones del sector en funcionamiento, en los sistemas estacionarios; en los cañones y enrollador, en el caso de cañones móviles; en el centro, y a varias distancias del centro, a lo largo de los laterales móviles. Ésto permite verificar si los aspersores y los sistemas móviles funcionan a las presiones recomendadas, y cual es el intervalo de variación de la presión (ΔP) en el sector o en el sistema en funcionamiento, que no debe exceder del 10 al 15% de la presión media deseada, conforme a la calidad de riego pretendida. Los valores altos de ΔP significan que las tuberías están infradimensionadas o hay pérdidas de carga localizadas por un mal funcionamiento de algún equipamiento.
- Los caudales emitidos por los aspersores en diferentes localizaciones del sector en funcionamiento, en el caso de sistemas estacionarios, y a varias distancias del centro, a lo largo de los laterales móviles, lo que permite identificar el correspondiente intervalo de variación de los caudales, que no deben exceder del 5 a 7% del caudal medio previsto.
- La presión y el caudal en la toma de agua, o hidrante, o en la unidad de comando y control del sistema.
- Las láminas de agua recogidas durante el tiempo normal de riego, o próximo al mismo, en una red de pequeños pluviómetros situada en el marco definido por

cuatro aspersores, en el caso de los sistemas estacionarios (Fig. 6.69), o en una línea de pluviómetros situada perpendicularmente al recorrido de los cañones móviles o de los laterales de avance frontal, o colocada según un radio en el caso de equipos pívot. Estas alturas de agua proporcionan los datos necesarios para el cálculo de la uniformidad de distribución (DU) y de la eficiencia de aplicación (e_a), conforme a lo citado en el Capítulo 4, y al cálculo de la tasa de aplicación real (I_a).

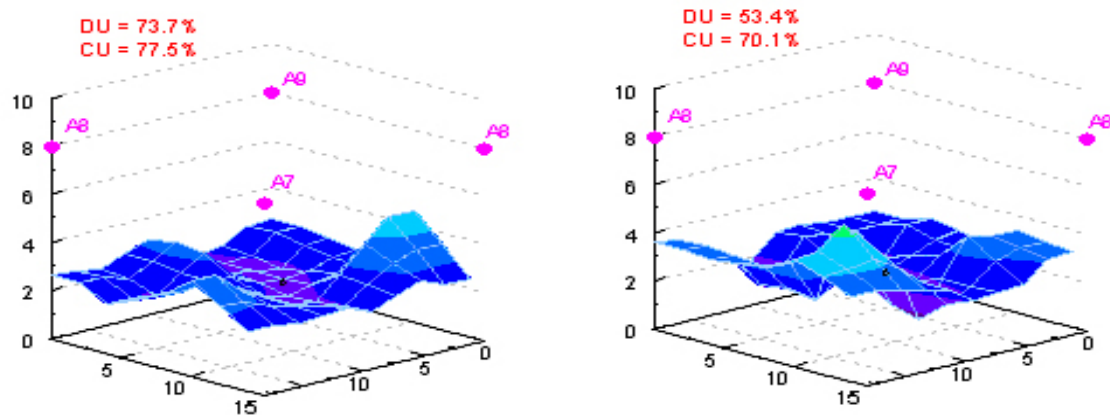


Figura 6.69. Láminas de agua medidas en una cuadrícula de pluviómetros situada entre cuatro aspersores de impacto, con espaciamiento 15 m x 15 m, con viento de $0,9 \text{ ms}^{-1}$, a la izquierda, y $2,3 \text{ ms}^{-1}$, a la derecha.

- A veces, los diagramas referidos a las pluviometrías en laterales móviles, pivotantes y lineales, con auxilio de pluviógrafos.
- El ángulo mojado en los cañones móviles, así como el ángulo entre su bisectriz y la dirección del movimiento del cañón.
- La ocurrencia de escorrentía y de erosión, estimando sus valores.
- La duración del riego que, junto con la tasa de aplicación I_a , permite calcular la dosis realmente aplicada en los sistemas estacionarios, la velocidad de desplazamiento en el caso de cañones móviles y de laterales de avance frontal, y la velocidad de rotación en el caso de equipos pívot.
- El déficit de humedad del suelo (SWD) antes y después del riego, de modo similar al descrito para el riego de gravedad (Cap. 5.4.2), lo que permite estimar el volumen de agua infiltrado.
- La velocidad y la dirección del viento, eventualmente, también, la humedad relativa del aire, así como las medidas de la evaporación de pequeños evaporímetros expuestos a la radiación solar y al viento durante los ensayos para estimar la evaporación y el arrastre por el viento.
- Las prácticas de manejo del riego por el agricultor, incluyendo las que se refieren a la programación del riego y al mantenimiento y conservación de los equipos.

El análisis de los resultados permite calcular indicadores de funcionamiento y formular recomendaciones para introducir modificaciones en los sistemas, incluso recurriendo a simulaciones del funcionamiento de los sistemas sujetos a varias modificaciones alternativas (Jorge y Pereira, 2003), abarcando la perspectiva de las eficiencias del fertirriego y del quimirriego.

A continuación, se comentan dos ejemplos: uno, con cañón móvil y el otro, con equipo pívot. En el primer caso (Fig. 6.70), se comparan, principalmente, los efectos de la presión, 360 kPa en la figura superior, a la que corresponde un valor de UD = 65,3%, que era la presión recomendada, y 540 kPa en la figura inferior, que originó un valor de UD = 26,2%. El agricultor sabía que el caudal aumentaba con la presión alta y retiró el regulador de presión. De hecho, obtuvo una lámina de agua mayor, pero desequilibró totalmente el funcionamiento del sistema, ya que el aumento de la presión hizo que la cantidad de agua caída junto al cañón disminuyese brutalmente. El bajo valor de UD, aún para la presión recomendada, se debe a la peor calidad del aspersor, con rotación irregular, a la falta de simetría del ángulo del sector mojado y a la irregularidad de la topografía. Los resultados de la evaluación explicaron al agricultor como manejar el cañón.

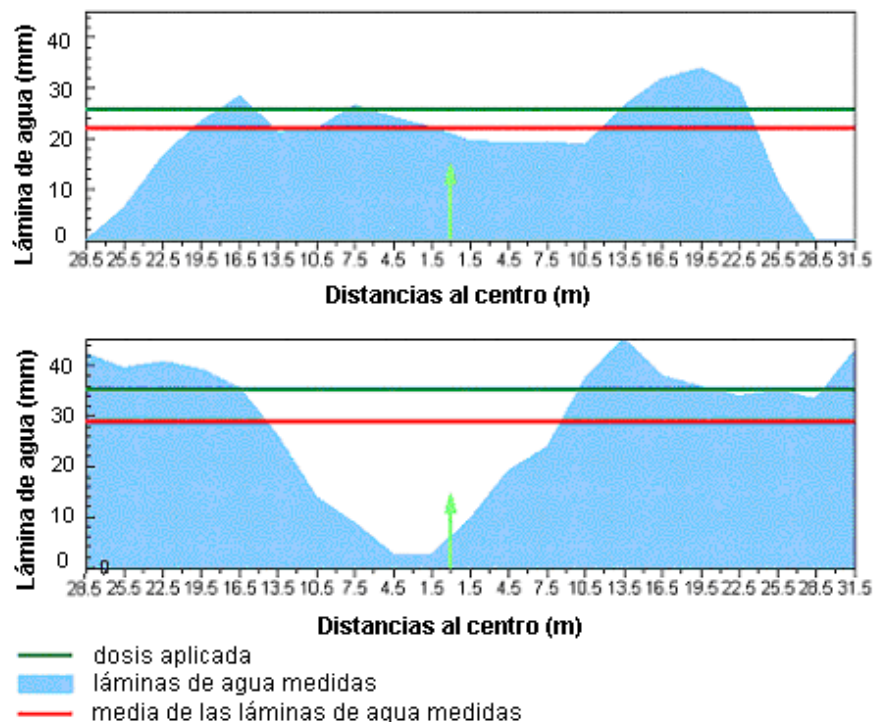


Figura 6.70. Resultados de la evaluación de un cañón móvil trabajando, arriba, a una presión normal (360 kPa), pero con ángulo del sector mojado asimétrico, y, abajo, con una presión exagerada (540 kPa) e inadecuado ángulo del chorro.

En el caso de los equipos pívot (Fig. 6.71), se identifican dos problemas: las elevadas pérdidas por evaporación y arrastre por la acción del viento, puestas de manifiesto por la gran diferencia entre la dosis media aplicada y la cantidad recogida en los pluviómetros, y la irregularidad de las láminas de agua recogida a lo largo de la tubería pivotante. La primera cuestión corresponde a la presión exagerada (627 kPa) en la conexión del centro del pívot, porque el agricultor retiró el regulador de presión. En consecuencia, las gotas producidas por los difusores colocados en la tubería son demasiado finas y, como el viento es superior a 3 ms^{-1} , dieron lugar a enormes pérdidas por evaporación y arrastre, superiores al 50 % de la dosis. El otro problema resulta de una mala elección de las boquillas de los difusores en los tramos de la máquina, provocando caudales exagerados, y de haber sido escogida una solución barata para la alineación de la tubería, que provoca frecuentes alteraciones de la velocidad de cada torre y, por lo tanto, cantidades aplicadas que varían demasiado a lo largo de la tubería. En este caso, parte de los problemas podrían ser resueltos (presión), pero los otros, que resultan de opciones de proyecto, implicarían la modificación del equipamiento de la máquina.

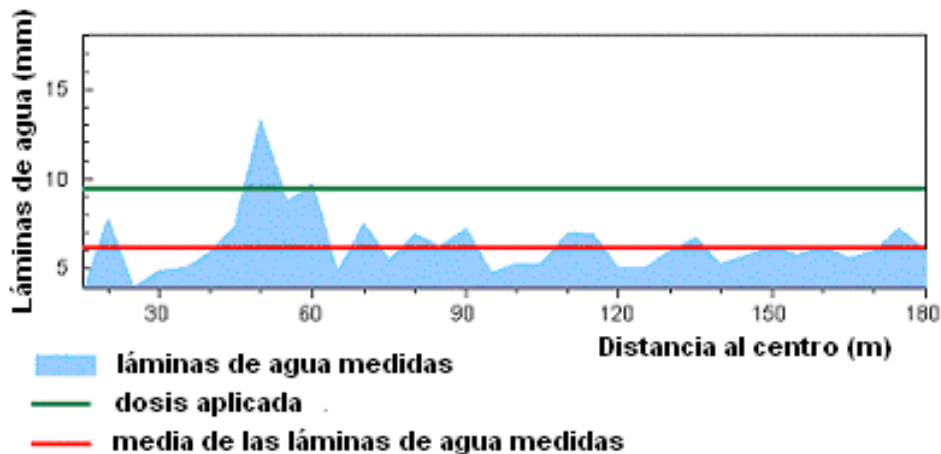


Figura 6.71. Mala uniformidad y fuertes pérdidas por evaporación y arrastre en un equipo pívot equipado con difusores, trabajando con una presión exagerada (627 kPa) y cuyo equipamiento fue deficientemente escogido.

Los ejemplos muestran que, dada la variedad de equipamientos y soluciones en riego por aspersión, es difícil para el agricultor hacer la elección apropiada y que es necesario que haya mecanismos de aprobación de la calidad de los equipamientos y de los proyectos, así como servicios de asesoría que realicen evaluaciones de campo y proporcionen consejos a los regantes.

6.8. Introducción al proyecto

Como se dijo (Cap. 4), al definir uniformidad de distribución (DU) y eficiencia de aplicación (e_a), DU caracteriza el sistema de riego y, por lo tanto depende de las soluciones del proyecto, y e_a caracteriza el manejo, pero está limitada por DU.

Se ha constatado (Pereira y Trout, 1999; Pereira *et al.*, 2002b) que DU está determinada por las variables del proyecto, según la relación funcional siguiente:

$$DU = f(P, \Delta P, S, d_n, WDP, WS, MAN) \quad (6.12)$$

donde: P, es la presión disponible en el aspersor (kPa); ΔP , es la variación de la presión en el sector o en el sistema en funcionamiento (kPa); S, es el espaciamiento (m) de los aspersores; d_n , es el diámetro de la boquilla (mm), que influye en el caudal, la presión, el diámetro mojado y el diámetro de las gotas para cada presión P; WDP, representa el perfil de distribución del agua por el aspersor; WS, es la velocidad del viento (ms^{-1}); y MAN, representa las condiciones de mantenimiento y conservación del sistema.

Todas las variables anteriores (Ec. 6.12), excepto MAN, que depende del agricultor, se escogen al proyectar el sistema, incluyendo un valor previsible para WS, teniendo en consideración los costes, las características del sistema de producción, los cultivos, el suelo y el clima. Al seleccionar el aspersor, se escoge P, S, d_n y WDP. Al dimensionar las tuberías, se define ΔP . El dimensionamiento hidráulico está desarrollado en muchas publicaciones, principalmente Pair *et al.* (1983), Keller y Bliesner (1990), Tarjuelo (2005), Allen *et al.*

(2000). Existen numerosos programas de cálculo; por ejemplo, en portugués, el modelo AVASPER para sistemas estacionarios (Fig. 6.72). Este modelo permite realizar cálculos iterativos de la red para satisfacer las condiciones de funcionamiento predeterminadas.

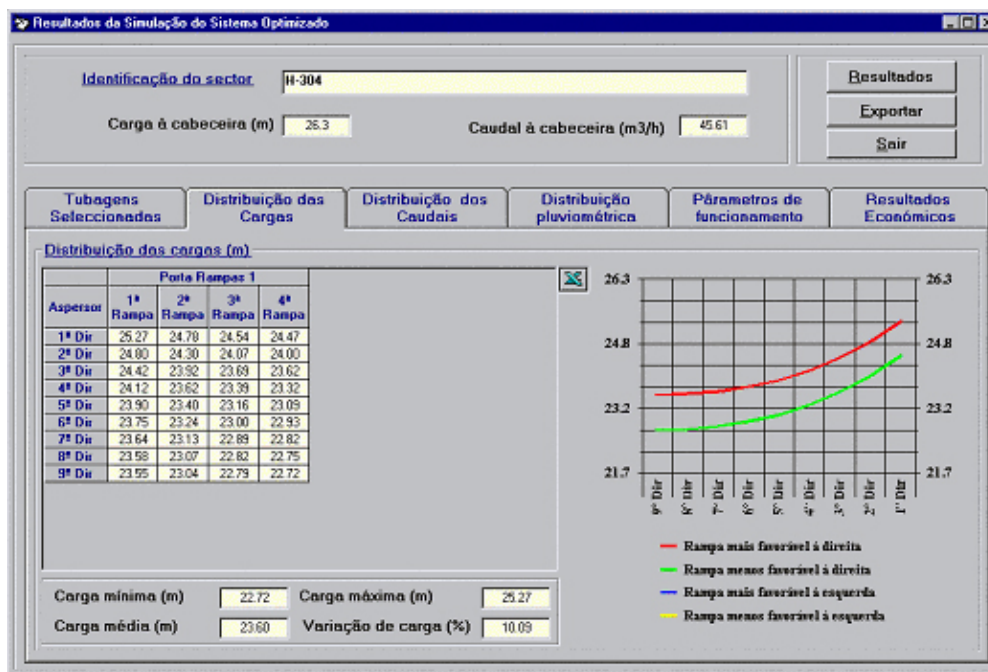
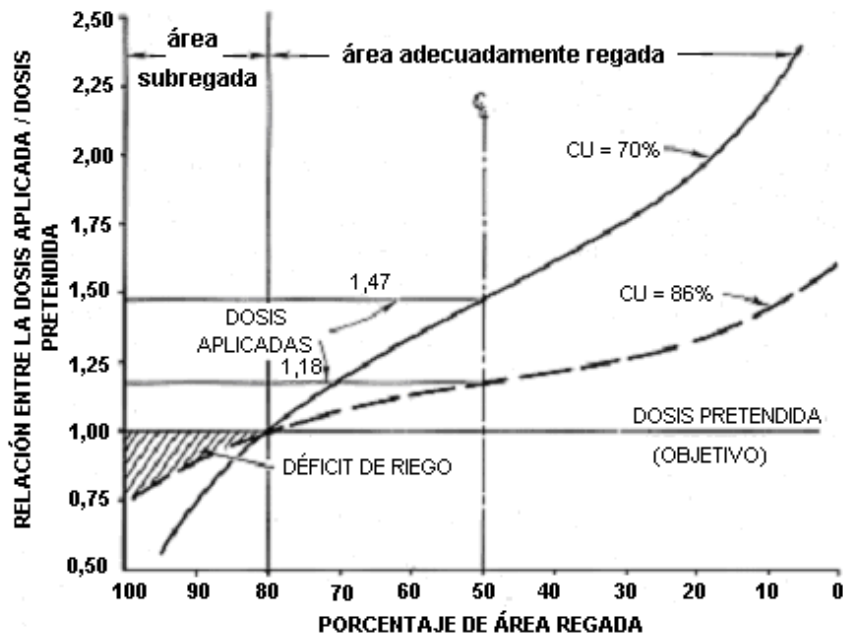


Figura 6.72. Interfaz del modelo AVASPER para el dimensionamiento hidráulico de los sistemas estacionarios.

La uniformidad (DU o CU; Cap. 4.2.2) resultante de los cuatro aspersores adyacentes (Fig. 6.69) se puede estimar simulando la superposición de las láminas de agua de los cuatro aspersores, como hace el modelo AVASPER (Jorge y Pereira, 2003). El efecto del viento se puede considerar en la simulación (Granier *et al.*, 2003; Deumier *et al.*, 2003), o como se describe a continuación.

Considerando que la eficiencia de aplicación del agua depende de la uniformidad, Keller y Bliesner (1990) propusieron un indicador para el proyecto denominado eficiencia de distribución, DE_{pa} (%), referida al porcentaje pa de área adecuadamente regada, es decir, que recibe, al menos, la dosis pretendida, que es función de CU, como se muestra en la Figura (6.73); la dosis requerida (expresada en la figura por la dosis relativa; p.e., la relación entre la dosis real y la dosis neta deseada) para regar adecuadamente un determinado porcentaje pa del área regada es tanto mayor cuanto menor sea la uniformidad CU y mayor sea el porcentaje pa .



Fuente: Keller y Bliesner (1990).

Figura 6.73. Relación entre la dosis relativa y el área adecuadamente regada para diferentes uniformidades CU.

DE_{pa} puede estimarse por la Ec. (6.13):

$$DE_{pa} = 100 + \left(606 - 24,9 pa + 0,349 pa^2 - 0,00186 pa^3 \right) \left(1 - \frac{CU}{100} \right) \quad (6.13)$$

donde: DE_{pa} , es la eficiencia de distribución para un porcentaje pa de área adecuadamente regada (%); CU, es el coeficiente de uniformidad (Ec. 4.2) (%); y pa , es el porcentaje del área regada que recibe la dosis pretendida o área adecuadamente regada (%).

CU puede ser estimado por simulación de cuatro aspersores en cuadrilátero, a semejanza de lo que se hace con los valores obtenidos en una evaluación (Fig. 6.69), que es una solución adoptada en el citado modelo AVASPER. El porcentaje pa se define de acuerdo con el cultivo y con el riesgo correspondiente a someter el cultivo a déficit hídrico; para cultivos productivos y sensibles, pa estará próximo al 90%, mientras que, para cultivos de rendimiento marginal, pa se sitúa entre 55 y 60%.

A partir de DE_{pa} , se calcula la eficiencia de aplicación para el proyecto, o simplemente eficiencia del proyecto, E_{pa} (%), mediante la Ec. (6.14):

$$E_{pa} = DE_{pa} R_e O_e \quad (6.14)$$

donde: E_{pa} , es la eficiencia de proyecto (%) referida a un porcentaje pa de área adecuadamente regada; R_e , es la fracción efectivamente aplicada por los aspersores (0,1 – 1,0), p.e., después de ser descontadas las pérdidas por evaporación y arrastre por el viento; y O_e , es la fracción efectivamente proporcionada a los aspersores (0,9 – 1,0), p.e., después de ser descontadas las pérdidas debidas a fugas en las tuberías.

R_e expresa en que medida la eficiencia de aplicación está influenciada por el viento, para lo que es necesario considerar las dimensiones de las gotas producidas por los aspersores. R_e puede calcularse tomando en consideración las condiciones ambientales previstas durante el funcionamiento del sistema; por lo tanto, considerando los valores previstos para la evapotranspiración de referencia ET_0 (mmdía^{-1}) y para la velocidad del viento, WS (kmh^{-1}), y la dimensión de las gotas dada por el índice CI , se tiene:

$$R_e = 0,976 + 0,005 ET_0 - 0,00017 ET_0 + 0,0012 WS - CI(0,00043 ET_0 - 0,0018 WS + 0,000016 ET_0 WS) \quad (6.15)$$

limitado a $7 \leq CI \leq 17$, en que: R_e , es la fracción efectivamente aplicada por los aspersores ($0,1 - 1,0$); ET_0 , es la evapotranspiración de referencia (mmdía^{-1}) media durante el periodo punta al que se refiere el dimensionamiento; WS , es la velocidad del viento (kmh^{-1}) media para el mismo periodo punta; y CI , es el índice de la dimensión de las gotas tal que $CI = 7$, para $CI < 7$, y $CI = 17$, para $CI > 17$.

El índice CI puede ser estimado en función de la presión y del diámetro de la boquilla por la Ec. (6.16):

$$CI = 0,032 P^{1/3} / d_n \quad (6.16)$$

donde: P , es la presión de funcionamiento de los aspersores (kPa); y d_n , es el diámetro de la boquilla (mm).

La dosis bruta a utilizar en los cálculos de dimensionamiento puede, tener en consideración la uniformidad y las pérdidas operacionales previstas recurriendo a E_{pa} . La dosis bruta D se calcula a partir de la dosis neta I_n (Ec. 3.19), mediante la Ec. (6.17):

$$D = \frac{I_n}{(E_{pa}/100)(1-LR)} \quad (6.17)$$

donde: D , es la dosis bruta para dimensionamiento de los sistemas (mm); I_n , es la dosis neta (mm), calculada para el cultivo, suelo y clima conforme a lo indicado en los Capítulos 1 a 3; E_{pa} , es la eficiencia de proyecto (%); y LR , es la fracción de lavado ($0,05 - 0,3$), como fue referido en el Epígrafe 3.4.3.

Cuando no sea posible calcular E_{pa} , entonces D debe calcularse a partir de un valor estimado para la eficiencia potencial $PELQ$ (Ec. 4.10) obtenido, por ejemplo, a partir de valores dados por tablas (Tabla 4.2), pero considerando las condiciones ambientales y tecnológicas en que los sistemas serán aplicados, o a partir de valores observados en el campo (p. e., Pereira, 2002).

6.9. Gestión del riego; fertirriego y quimirriego

La eficiencia de aplicación e_a (Epígrafes 4.2.3. y 4.2.4) depende de las variables de proyecto que determinan DU y de las variables de manejo, pudiendo explicarse por la relación funcional siguiente:

$$e_a = f(P, \Delta P, S, d_n, WDP, WS, MAN, I_c, i_a, t_i, SWD) \quad (6.18)$$

donde las variables de proyecto son las mismas definidas para la Ec. (6.12) y las variables de manejo son: MAN, representa las condiciones de mantenimiento y conservación del sistema; I_c , son las características de infiltración del suelo (mmh^{-1}); i_a , es la pluviometría del sistema (mmh^{-1}); t_i , es la duración del riego (h), o velocidad en los sistemas móviles; y SWD, es el déficit de agua en el suelo en el momento del riego (mm).

La necesidad de mantenimiento y conservación de los sistemas de riego es, evidentemente, prioritaria, tanto para evitar fugas en las conducciones como pérdidas de carga localizadas debidas a obstrucciones, o estrangulamientos, del flujo debidos a la acumulación de sólidos depositados por el agua, como para asegurar que los aspersores funcionen adecuadamente, sin envejecimiento precoz o deformación y desgaste de las boquillas.

La tasa de infiltración puede ser influenciada por el manejo del suelo. Por ejemplo, la técnica de la siembra directa, con mantenimiento de los residuos en la superficie del terreno, favorece la infiltración, o, en el caso de frutales, el mantenimiento del suelo cubierto con vegetación controlada. En suelos con pendiente, siempre que ésta no sea exagerada, la creación de balsillas en los cultivos en línea evita que el agua aplicada escurra y así pueda tener alguna oportunidad para infiltrarse (Fig. 6.74).



Figura 6.74. Balsillas para evitar el flujo de agua y favorecer la infiltración en riego con equipos pívot en terrenos con pendiente.

Las prácticas de preparación del suelo que evitan la formación de costra en la etapa de establecimiento de los cultivos son de una gran importancia. Las prácticas de conservación del suelo y del agua son esenciales en suelos sensibles, principalmente en los suelos de las zonas tropicales (Unger, 1994; Kirkham, 1999).

La pluviometría se fija al elegir los aspersores, los espaciamientos y el equipamiento de las tuberías móviles, pero puede alterarse como ya se ha escrito para los sistemas estacionarios. En el caso de sistemas de desplazamiento continuo, la tasa de aplicación no se modifica, pero si el tiempo que dura la aplicación del agua al seleccionar la velocidad de los mismos, pudiéndose, así, minimizar el tiempo durante el cual el suelo se expone a una tasa de aplicación excesiva. La información obtenida a través de evaluaciones de campo puede ayudar a escoger las velocidades que producen menos impactos negativos, que pueden ser diferentes durante el periodo de establecimiento del cultivo y cuando el cultivo ya protege el suelo.

Las variables t_i y SWD se refieren a al manejo del riego (Cap. 3.5). t_i es la variable que, combinada con la pluviometría, controla la dosis aplicada en los sistema estacionarios. En los sistemas de desplazamiento continuo, t_i viene dada por la velocidad de desplazamiento, cuya elección depende de la necesidad de favorecer la infiltración. En la práctica, SWD es más importante en sistemas estacionarios y con cañones móviles, con los cuales se pueden aplicar dosis medias a altas, que con laterales móviles, que, con frecuencia, aplican dosis pequeñas. De hecho, en sistemas desplazables, por requerir mano de obra, las dosis suelen ser grandes, 50-90 mm. Con cañones móviles, debido a las limitaciones intrínsecas de los sistemas, D varía entre 15 y 50 mm. En los laterales móviles, diseñados para riegos frecuentes, diarios o casi, las dosis varían entre 6 y 25 mm. Su manejo depende más de la ET_c que de la reserva del agua del suelo.

El manejo de los sistemas de aspersión puede ser facilitado mediante unidades de control, principalmente automatizadas, que permiten definir la duración de los riegos y la secuencia de los sectores a ser regados. Para ello, el mercado ofrece una gran variedad de equipamientos: válvulas de comando y control volumétricas o temporizadas, válvulas con comando manual o eléctrico, así como válvulas de regulación de la presión y de los caudales para mejorar la uniformidad, como se mencionó antes (p. e., Fig. 6.35). Existen, igualmente, sistemas con emisión-recepción para comando a distancia a partir de una central. La automatización puede incluir el funcionamiento de las bombas para desconectarlas durante los periodos menos favorables, principalmente cuando exista diferencia de tarifas eléctricas, o, simplemente, para proteger el motor de cortocircuitos o de descargas. Los sistemas de control pueden estar conectados a sensores, ya sean de la humedad del suelo (Cap. 3.6), ya sean de registro climático, o de estrés de los cultivos. Estos sistemas sofisticados son, sin embargo, de difícil aplicación ya que requieren una adecuada elección de las entradas referidas a las variables medidas que determinan el inicio del riego (Tarjuelo, 2005).

El fertirriego (Threadgill *et al.*, 1990; Burt *et al.*, 1995) se utiliza, normalmente, con laterales móviles, pero es más raro con los restantes sistemas de riego; probablemente, porque la mayoría de los sistemas estacionarios son frecuentemente utilizados por agricultores en pequeñas parcelas y, también, frecuentemente, porque son vendidos por suministradores de equipamiento poco avanzado en el manejo de estas nuevas técnicas. Sin embargo, un sistema de cobertura total automatizado no difiere mucho de un sistema de microrriego, en los cuales el fertirriego está muy extendido. El quimirriego, o sea, la aplicación de productos fitosanitarios en el agua de riego, se practica en los laterales móviles, principalmente cuando

se trata de agricultura de precisión. Tanto para el fertirriego como para el quimirriego, es esencial que los sistemas tengan buen funcionamiento: en términos de uniformidad, para asegurar la aplicación uniforme del producto, y de eficiencia de aplicación, para evitar pérdidas del producto por percolación o su depósito sobre las hojas del cultivo cuando el agua se evapora. Para el fertirriego y el quimirriego, son necesarios equipamientos apropiados, como los tanques de fertilizantes, el sistema de inyección y los filtros, en el caso de que las boquillas de los aspersores sean pequeñas y pudieran obstruirse por el depósito de las partículas de fertilizantes (Epígrafe 7.5.2).

CAPÍTULO 7

RIEGO LOCALIZADO

7.1. Introducción

Se denomina riego localizado, o microrriego, a un riego a presión en el que el agua es aplicada a la parte de la parcela cultivada en la que se desarrollan las raíces de la planta.

La aplicación del agua en riego localizado, a semejanza del riego por aspersión, exige una red de tuberías principales, secundarias y terciarias, y ramales portaemisores; normalmente, enterradas, a excepción de los ramales. Los dispositivos, a partir de los cuales se aplica el agua al suelo, y en la zona radicular, se denominan emisores, los cuales se colocan equidistantes en el lateral, o por grupos en el caso de algunos cultivos leñosos.

Los sistemas de riego localizado se agrupan en cuatro categorías, a los que corresponden trazados y cálculos hidráulicos diferentes:

- Riego por goteo, donde el agua se aplica lentamente a la superficie del suelo a través de pequeños orificios emisores, llamados goteros (Fig. 7.1), con caudales de 2 a 8 lh^{-1} .



Fuente: Antelco (2003).

Figura 7.1. Ejemplo de goteros.

- Microaspersión, en el que el agua se pulveriza sobre la superficie del suelo, como en aspersión, pero produciendo áreas regadas pequeñas y localizadas, de 1 a 5 m de diámetro, siendo los emisores, en general, de caudales de 50 a 150 lh^{-1} , denominados microaspersores (Fig. 7.2), al tener algún elemento móvil.



Fuente: Plastro (2003).

Figura 7.2. Microaspersores de cuerpo rotativo.

- El riego a chorros, en el que pequeños chorros de agua se aplican a pequeñas balsillas a ras del suelo, adyacentes a cada árbol de una parcela de frutales, recurriendo a emisores especiales, designados difusores (“bubblers”), que impulsan el agua (Fig. 7.3) con caudales de 100 a 150 lh⁻¹.



Fuente: Antelco (2003).

Figura 7.3. Emisor impulsor de chorro de agua.

- Riego subsuperficial, en el que el agua se aplica a través de emisores integrados en ramales colocados por debajo de la superficie del suelo, estando, normalmente, toda la red de tuberías enterradas (Fig. 7.4); como alternativa, el agua puede ser aplicada mediante tubos porosos, pero esta variante tecnológica tiende a ser sustituida por tubos de doble cámara con orificios.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.4. Riego subsuperficial mediante tubos de doble cámara con orificios.

La similitud entre el riego localizado y el de aspersión radica en que, en los dos sistemas de riego, el agua se aplica a presión por medio de una red de tuberías y emisores espaciados regularmente. No obstante, en riego localizado, en su variante por goteo, los espaciamientos, los caudales y las presiones de funcionamiento son muy inferiores, lo que conlleva a que, en general, la duración de la aplicación del agua y los intervalos entre riego son menores que en riego por aspersión.

Los sistemas de riego por goteo son, normalmente, sistemas de cobertura total. Las tuberías y los ramales permanecen en el terreno durante todo el periodo vegetativo de los cultivos, o de forma permanente en el caso de los cultivos leñosos y en algunos casos de riego subsuperficial.

Cuando se riegan cultivos herbáceos u hortícolas, las tuberías terciarias y los ramales se colocan en el terreno al inicio de la estación y se recogen antes de que comience la recolección. Para ello, pueden utilizarse tambores enrolladores de las tuberías, inclusive accionados por un tractor. En el caso de riego subsuperficial, la colocación de las tuberías es mecanizada.

7.2. Adaptabilidad y capacidad del riego localizado

El gran interés del riego localizado, principalmente por goteo, se debe a su capacidad de reducir tanto el consumo de agua como los costes asociados al riego, especialmente los de mano de obra. El agua se aplica localmente, sólo allí donde las raíces del cultivo se desarrollan, por lo que los sistemas de riego por goteo pueden regar algunos cultivos con una cantidad de agua inferior a la que necesitarían cuando se recurre a otros métodos de riego. Es el caso de las plantaciones jóvenes de árboles, que pueden necesitar menos de la mitad de lo que necesitan si fuesen regados por aspersión o por superficie, y del riego subsuperficial, en el que la fracción del área mojada expuesta a la radiación solar es menor que la que humedecen otros sistemas de riego. Estos ahorros de agua disminuyen con la edad de los árboles y son menores para los cultivos que cubren totalmente la parcela cultivada. También, pueden ser significativas cuando es necesario hacer frente a la escasez o a un alto precio del agua. El riego localizado reduce los costes de mano de obra al no necesitarla para su funcionamiento. Su regulación y control se realiza, normalmente, con dispositivos automáticos de temporización; sin embargo, los emisores y los sistemas de control necesitan ser inspeccionados frecuentemente.

El riego localizado no favorece el crecimiento de malas hierbas, porque una parte de la superficie del suelo no se moja con el agua de riego (Fig. 7.5), lo que aumenta la eficacia y reduce los costes de las operaciones de control de malas hierbas. Además, los herbicidas pueden ser aplicados con el agua de riego (operación que se denomina herbirriego). Del mismo modo, puesto que las entrelineas no se riegan, las labores y operaciones de cultivo pueden realizarse cuando se quiera, especialmente en frutales y viñas. En los cultivos hortícolas, y en los cultivos herbáceos extensivos en línea, regados por goteo y riego subsuperficial, las entrelineas por donde pasan los trabajadores o las rodadas de las máquinas permanecen relativamente secas (Fig. 7.5), lo que facilita el trabajo.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.5. Líneas humedecidas y entrelíneas secas en riego subsuperficial.

La aplicación de fertilizantes con el agua de riego (fertirriego) se aconseja en riego localizado, ya que permite un mayor control sobre la localización y el momento de actuación de los fertilizantes, lo que puede mejorar su eficiencia y contribuir a eliminar los riesgos de contaminación asociados al uso de los fertilizantes. Además, se evitan los trabajos necesarios para su aplicación por medios tradicionales.

El riego localizado es, especialmente, adecuado para el suministro de pequeñas dosis con alta frecuencia, lo que permite mantener la mayor parte del suelo en buenas condiciones de aireación y de humedad, evitando el estrés hídrico. Por otro lado, cuando el riego es frecuente, se mantiene baja la concentración de la solución del suelo, lo que hace posible la utilización de agua con un contenido en sales más elevado que con los otros métodos de riego. Los sistemas de riego localizado pueden diseñarse para trabajar en, prácticamente, cualquier tipo de topografía. Mientras el agua sea aplicada cerca de cada árbol, los suelos pedregosos y con afloramientos rocosos pueden ser regados con los sistemas de riego por goteo, aunque el espaciamiento entre árboles sea irregular y variable. Además, los suelos con horizontes de textura variable (suelos estratificados), así como los poco profundos, pueden regarse eficientemente con riego localizado, especialmente con riego por goteo.

El riego localizado tiene, también, desventajas y limitaciones. Así, los costes de las instalaciones son, en general, superiores a los de los sistemas de aspersión. Como contrapartida, puesto que operan a presiones inferiores, requieren menos agua, se automatizan con más frecuencia y los costes de energía son inferiores.

Los orificios de los emisores, por ser muy pequeños, pueden obstruirse fácilmente por partículas minerales o materia orgánica. Las obstrucciones reducen el caudal descargado y afectan a la uniformidad de distribución de agua, con los correspondientes perjuicios a los cultivos. Para evitar las obstrucciones, se usan filtros que retengan las partículas antes de entrar en las tuberías de distribución del agua. También, pueden formarse precipitados de sales en el interior de las tuberías, o en los orificios de salida de los emisores por evaporación del agua entre los riegos. Los óxidos de hierro, los carbonatos de calcio, las algas y los limos son las causas más frecuentes de las obstrucciones en el riego localizado. Como consecuencia, puede ser necesario un tratamiento químico del agua para prevenir, o corregir, estas obstrucciones.

La mayoría de los emisores de los riegos localizados, sobre todo los de goteo, funcionan a presiones muy bajas, normalmente inferiores a 10 m. En terrenos ondulados, en el caso de que no se disponga de reguladores de presión adecuados, los caudales descargados varían fácilmente de un valor a más del doble, además de que las tuberías drenan a través de los emisores situados a menor cota después que el agua haya sido cortada, lo que aumenta la heterogeneidad de los caudales aplicados. En terrenos ondulados, o en pendiente, es necesario un adecuado diseño hidráulico de las instalaciones y/o la utilización de reguladores de caudal y presión.

Algunos suelos no tienen capacidad de infiltración suficiente para infiltrar los caudales descargados, encharcándose o escurriéndose el agua en exceso. Por ejemplo, para un caudal de 4 lh^{-1} , el suelo debe tener una capacidad de infiltración de 13 mmh^{-1} . El problema puede resolverse con emisores de menor caudal o bien con riegos más cortos y frecuentes.

Los suelos arenosos no son adecuados para el riego por goteo, excepto cuando tienen extratificación horizontal que favorece el movimiento horizontal del agua; en caso contrario, hay percolación en profundidad. En estas circunstancias, se opta o por la microaspersión o por ramales con goteros muy próximos funcionando con dosis pequeñas y frecuentes. Los suelos de textura media y fina se adaptan, generalmente bien, al riego por goteo.

Particularmente, en riego por goteo, las sales se concentran generalmente en la superficie del suelo y en los bordes del bulbo mojado, constituyendo un riesgo potencial de que la lluvia, incluso ligera, pueda arrastrarlas dentro de la zona radicular. Por eso, cuando llueve después de un periodo en que ha habido acumulación de sales en superficie, al menos que la lluvia haya sido importante (alrededor de 50 mm), se debe regar de inmediato para asegurar el lavado de las mismas, transportándolas fuera de la zona radicular. Por otro lado, al dejar secar demasiado el suelo entre riegos sucesivos, puede producirse el ascenso capilar e invertirse el movimiento del agua en el suelo, introduciendo las sales en la zona radicular, lo que puede causar daños al cultivo. Para evitar este tipo de problemas, y hacer que el movimiento del agua sea siempre desde los emisores hacia el exterior del bulbo mojado, los riegos en suelos salinos, o con aguas salinas, deben ser muy frecuentes.

El manejo de riegos de pequeñas dosis y frecuentes puede causar problemas en los cultivos en caso de averías, tanto en las redes de abastecimiento como en los sistemas de riego, que interrumpan la aplicación del agua en la parcela en largos periodos de tiempo. La capacidad de las raíces para absorber los nutrientes minerales y el agua es limitada ya que se concentran sólo en un pequeño volumen de suelo, donde las disponibilidades de humedad y nutrientes son muy favorables. El área mojada debe representar, al menos, el 66% de la zona potencial del suelo para el desarrollo de las raíces en climas secos y el 33%, en climas húmedos.

Los roedores pueden deteriorar las tuberías de polietileno; para evitar estos daños, en tuberías terciarias, se recurre al PVC, resultando incluso más baratas; no es posible hacerlo con los ramales portagoteros que están en superficie. Cuando una tubería se rompe, pueden entrar elementos contaminantes en el sistema, produciendo obstrucciones en los emisores. Para evitar estos problemas, se utilizan filtros de seguridad a la entrada de las subunidades de riego, sobre todo en las tomas de parcela, en el caso de redes colectivas de riego.

7.3 Distribución del agua en el perfil del suelo

Los orificios de los goteros se diseñan especialmente para trabajar con baja presión (5 a 10 m), descargando pequeños caudales (generalmente, 2, 4 ó 8 $l\ h^{-1}$). El agua descargada por los goteros sobre la superficie del suelo se infiltra y se redistribuye vertical y horizontalmente, resultando un volumen mojado en forma de bulbo donde se concentran las raíces de las plantas (Fig. 7.6). La dimensión y la forma del bulbo mojado depende del caudal del gotero, de la duración del riego y del tipo de suelo. Si las demás condiciones fuesen las mismas, los suelos de textura media o fina producen bulbos más anchos y menos profundos que los suelos arenosos. En los primeros, el movimiento del agua en el suelo se debe principalmente a fuerzas capilares, mientras que, en los suelos arenosos, el movimiento del agua es debido principalmente a la gravedad, resultando un bulbo más estrecho y más profundo (Fig. 7.6), originando frecuentemente percolación de agua fuera de la zona radicular.

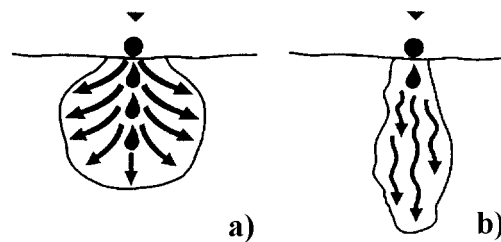
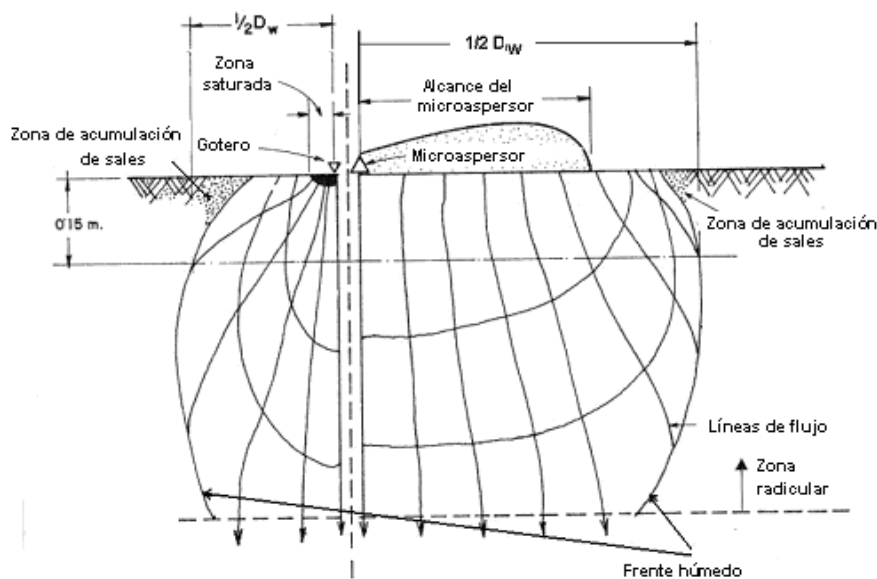


Figura 7.6. Distribución del agua en un bulbo mojado por un gotero: (a) en un suelo de textura media y fina; (b) en un suelo de textura arenosa.

En el caso de la microaspersión, la aplicación del agua humedece círculos relativamente grandes, de 1 a 5 m de diámetro mojado (D_w). El diámetro mojado se mide siempre entre 15 y 30 cm por debajo de la superficie del suelo (Fig. 7.7). Cuando se riegan suelos arenosos, para evitar la percolación profunda, es preferible recurrir a la microaspersión, ya que el agua se distribuye en una superficie mayor y puede controlarse la percolación más fácilmente.



Fuente: Keller y Bliesner (1990).

Figura 7.7. Líneas de flujo del agua, líneas equipotenciales, frente húmedo y diámetros mojados en riego por goteo (izquierda) y en riego con microaspersión (derecha).

La distribución de agua en el perfil del suelo bajo un gotero se diferencia en tres zonas (Fig. 7.7): por debajo del emisor, se forma una pequeña zona de transición, casi saturada y de poca superficie; alrededor y bajo la zona de transición, se forma una zona muy humedecida, donde se concentran la mayor parte de las raíces, y donde el agua se mueve tanto por efecto de las fuerzas capilares como de gravedad, disminuyendo el contenido de humedad con la distancia al punto de emisión; finalmente, en el borde del bulbo mojado, aparece el frente húmedo, donde el contenido de humedad es aproximadamente igual al que tenía antes del riego. En microaspersión, la zona de transición no se manifiesta ya que la saturación originada por el riego en la superficie del suelo se disipa rápidamente.

En la superficie del suelo, se forman círculos (Fig. 7.8), o bandas continuas de humedad cuando los goteros o los microaspersores están suficientemente próximos. En frutales y viñas, la zona entre las líneas de las plantas se mantiene seca, ya que el riego se aplica solo en una pequeña porción del terreno, donde las raíces se desarrollan en gran parte. Lo mismo ocurre en los cultivos en líneas cuando los espaciamientos son pequeños, donde sólo se pretende humedecer la zona explorada por las raíces. Este es, precisamente, uno de los objetivos del diseño del riego localizado.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.8. Círculos mojados en suelos de textura fina suficientemente próximos para dar continuidad a los bulbos mojados, que serán mayores a medida que el cultivo crece por la aplicación de mayores volúmenes de agua.

Las raíces de las plantas se desarrollan preferentemente dentro de los bulbos mojados, por lo que la masa radicular está restringido. No obstante, los rendimientos exceden muchas veces a los obtenidos cuando se utilizan otros métodos de riego a pesar de aplicarse menos agua. Las condiciones de crecimiento de las raíces dentro del bulbo mojado están próximas al óptimo, ya que el agua y los nutrientes se encuentran ahí fácilmente disponibles para la planta como resultado de que los riegos sean frecuentes y las aplicaciones sean de pequeños volúmenes de agua y nutrientes. Los intervalos entre riegos, generalmente, no sobrepasan los 2 ó 3 días, o, incluso, se dan varios riegos por día.

Ya que los bulbos mojados tienen dimensiones y formas que dependen del tipo de emisor, del caudal, de la duración de la aplicación del agua y de las características del suelo, el espaciamiento de los emisores (Epígrafe 7.6.1) se ajustará a que el suelo esté adecuadamente mojado, tanto en la horizontal como en la vertical, y que, cuando sea necesario, permita la percolación para la lixiviación de las sales en exceso. El bulbo mojado

en un suelo pesado, de textura fina, es más superficial y más ancho que en un suelo ligero, de textura gruesa. En consecuencia, se adoptan espaciamientos mayores en los suelos más pesados. Los espaciamientos dependen, también, de la profundidad pretendida con el riego. Considerando emisores con caudal constante, un aumento del volumen del agua aplicada aumenta tanto la profundidad como la distancia horizontal que el agua alcanza en el suelo. Manteniendo un volumen dado de aplicación, el aumento del caudal da lugar a bulbos más anchos y más superficiales. En estas condiciones, los emisores deberán estar espaciados más, sobretodo si los cultivos tuviesen un sistema radicular profundo.

En cualquier suelo, puede darse percolación profunda, por debajo de la zona principal de raíces, sobretodo si los goteros estuvieran demasiado separados entre ellos. El espaciamiento tiene que ser decidido en la fase de diseño porque, una vez que un sistema entre en funcionamiento, la alteración del espaciamiento de los emisores implica generalmente la sustitución de las tuberías.

Las sales del suelo se mueven junto con el agua hacia la periferia del bulbo mojado (Fig. 7.7). Dentro del bulbo, donde se da la actividad radicular máxima, la concentración de sales es generalmente baja e inofensiva para las plantas, siempre que haya flujo suficiente para la lixiviación de las sales en exceso. Los largos periodos secos, sobretodo en años sucesivos, pueden propiciar un aumento de la concentración de sales en el suelo, pudiendo alcanzarse niveles nocivos. Sin embargo, ésto puede evitarse si se hace un lavado periódico de sales. Si tal lavado se hace tan sólo en el inicio o al final de la estación de crecimiento del cultivo, se requieren mayores volúmenes de agua, pudiendo ser preferible recurrir a la aspersión para efectuar ese lavado.

7.4. Emisores

7.4.1. Tipos de emisores

Se denominan emisores a los dispositivos usados en el riego localizado con la finalidad de disipar la carga hidráulica y liberar un pequeño caudal de modo constante. Las características hidráulicas de los emisores determinan los caudales descargados. Cuando los emisores están alejados entre si, dando origen a bulbos mojados individuales, aislados o continuos, la aplicación es por puntos concretos o, más simplemente, por punto (Fig. 7.8). Cuando el agua se descarga a través de salidas muy próximas unas de otras creando un bulbo continuo, la aplicación es por líneas continuas (Fig. 7.5).

Los emisores por punto más extendidos son los goteros (Fig. 7.1), y los menos son los difusores (“bubblers”) (Fig. 7.3). Éstos aplican caudales relativamente grandes, llenando rápidamente las balsillas que rodean a los frutales o a las plantas ornamentales cuando se usan en jardinería. Los microaspersores (Fig. 7.2) son emisores semejantes a los aspersores pequeños concebidos para disipar la presión y soltar un pequeño chorro de agua uniforme que cubre una superficie de 1 a 10 m²; algunas veces, más. Deben tener una aplicación de agua uniforme en el área humedecida y un ángulo de trayectoria del agua próximo a la horizontal.

Los emisores pueden ser clasificados según numerosos criterios: el régimen de descarga, la disipación de la presión, la conexión a la tubería, la distribución del agua, la forma de la sección transversal, la capacidad de obstruirse, la capacidad de compensar las

variaciones de presión, el material de construcción, etc. Se tratan a continuación los principales aspectos que caracterizan los emisores.

7.4.2. Características hidráulicas de los emisores

Tradicionalmente, la mayor parte de los emisores pueden clasificarse en: emisores de largo recorrido, de orificio, de vórtice, autocompensantes de la variación de presión y de tubo poroso. Las características hidráulicas de cada emisor están directamente relacionadas con el régimen de flujo del agua cuando ésta atraviesa el emisor, el cual se caracteriza por el número de Reynolds, Re ($Re = VD/\nu$, donde: V , es la velocidad media; D , es el diámetro; y ν , la viscosidad cinemática). Los regímenes de flujo son: (a) laminares, $Re < 2000$; (b) de transición, $2000 < Re \leq 4000$; (c) parcialmente turbulentos, $4000 < Re \leq 10000$; y (d) turbulentos, $10000 < Re$.

El flujo a través de un emisor de orificio es, generalmente, turbulento y el caudal viene dado por la ecuación:

$$q = 3,6 A C_o \sqrt{2 g H} \quad (7.1)$$

donde: q , es el caudal del emisor (lh^{-1}); A , es el área del orificio (mm^2); C_o , es el coeficiente de descarga (normalmente próxima a 0,6); H , es la carga hidráulica en el orificio (m); y g , es la aceleración de la gravedad ($9,81 ms^{-2}$).

Cuando el flujo es turbulento, las pequeñas modificaciones de la viscosidad causadas por las alteraciones de la temperatura del agua no afectan, normalmente, al funcionamiento del emisor; es el caso de los microaspersores con funcionamiento semejante a los aspersores de baja presión y difusores (Fig. 7.9), de los "bubblers" y de un buen número de goteros. Los microaspersores pueden tener boquillas de varias dimensiones, identificadas por el color, y varias formas de aplicación del agua (Fig. 7.20).



Fuente: Toro (2003).

Figura 7.9. Varios tipos de microaspersores rotativos.

El causal en un emisor de recorrido largo (p.e., Fig. 7.10) puede expresarse por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$q = 113,8 A \sqrt{2 g H D / f L} \quad (7.2)$$

donde: D, es el diámetro interior (mm); L, es la longitud del microtubo de recorrido interno (m); y f, es el factor de rugosidad o de fricción (adimensional).



Fuente: Bowsmith (2003).

Figura 7.10. Gotero de largo recorrido, con laberinto, y de colocación exterior en la tubería.

La forma de la sección transversal del microtubo afectará más a las características hidráulicas del emisor con flujo laminar que con flujo turbulento. Si el régimen es laminar, el caudal del emisor pasa a ser directamente proporcional a H, por lo que, para la misma variación de carga, se producen mayores variaciones del caudal que en los de régimen turbulento. Por esta razón, los emisores de régimen laminar están siendo abandonados.

Como emisores de vórtice, se encuentran varios tipos de microaspersores (Fig. 7.11); tienen un recorrido de flujo en una cámara circular que provoca un flujo centrífugo. La entrada del agua se realiza tangencialmente a la pared exterior, lo que produce un movimiento rotacional rápido, creando un remolino en el centro de la cámara (Fig. 7.11). En consecuencia, tanto la resistencia al flujo como la pérdida de carga son menores en un emisor de vórtice que en un emisor de orificio con el mismo diámetro. Los emisores de vórtice pueden ser contruidos de acuerdo a:

$$q = 3,6 A C_o \sqrt{2g} H^{0,4} \quad (7.3)$$

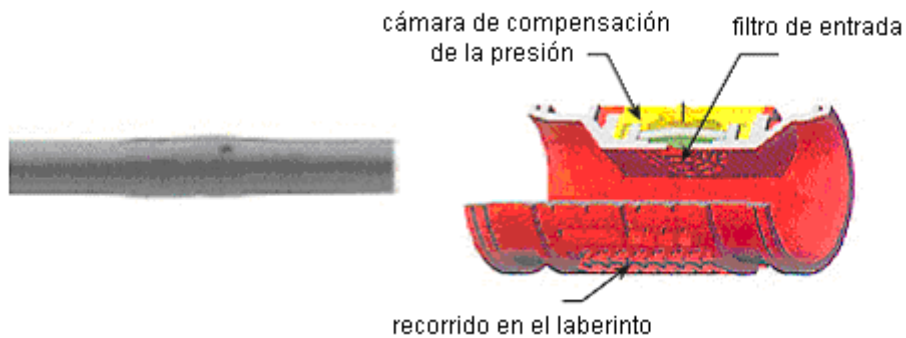
En estos emisores, pueden utilizarse orificios de dimensiones relativamente grandes, que son menos susceptibles a las obstrucciones, Las variaciones de la presión debidas a las diferencias de cota topográfica y a la pérdida de carga en los tubos causan variaciones relativamente pequeñas de los caudales.



Fuente: Plastro (2003).

Figura 7.11. Microaspersor de vórtice y su montaje en derivación.

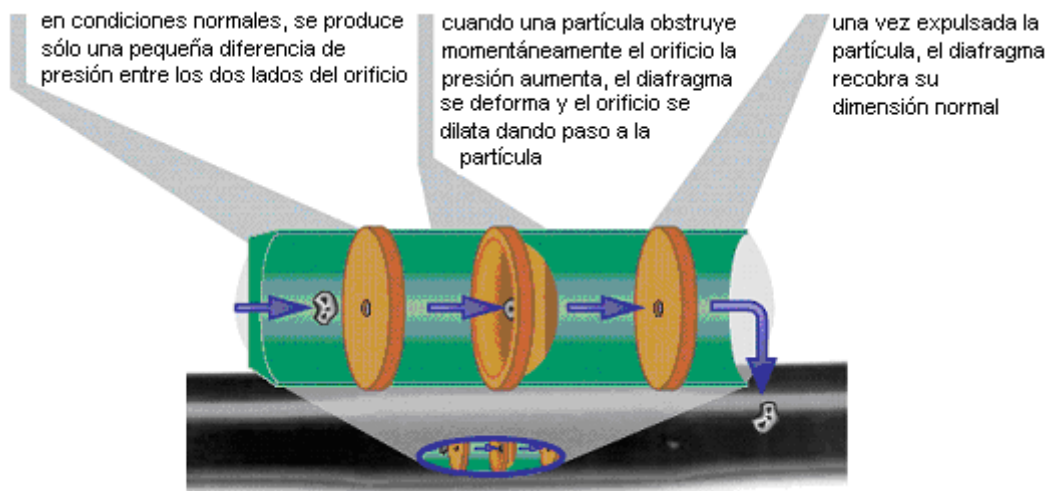
Los emisores autocompensantes son capaces de superar las variaciones de carga hidráulica y, así, proporcionar caudales, aproximadamente, constantes cuando la presión varía dentro del intervalo para el cual el dispositivo fue construido; por ejemplo, entre 50 y 250 kPa (Fig. 7.12). Habitualmente, se utiliza un material elástico que altera las dimensiones del orificio de salida en función de la presión, por separado o en combinación con otros orificios o tuberías de pequeño diámetro. Tanto los goteros como los microaspersores autocompensantes son cada vez más populares porque permiten tuberías más largas y de menor diámetro, pudiendo utilizarse con ventaja en laderas o cuando la topografía es accidentada.



Fuente: Bowsmith (2003).

Figura 7.12. Gotero autocompensante incorporado en la tubería con compensación de la presión por deformación de la pared de silicona en la que está abierto el orificio.

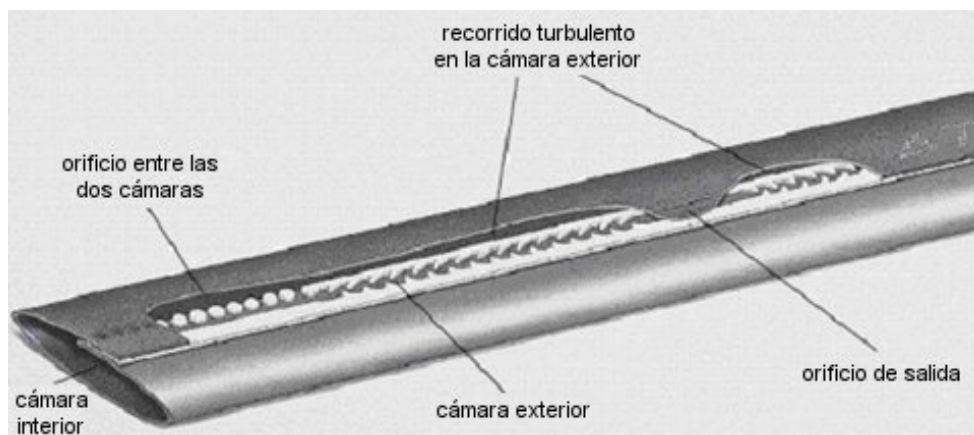
Ciertos goteros son de limpieza automática, o autolimpiantes, lo que reduce su susceptibilidad a la obstrucción (Fig. 7.13). En estos goteros, los pasos por donde el agua fluye se abren cuando la presión se altera debido a la presencia de partículas en los orificios, lo que permite arrastrarlas por el flujo de salida. Hay dos tipos de emisores autolimpiantes: los de limpieza intermitente y los de limpieza continua. Los de limpieza intermitente operan solo por poco tiempo, cuando el sistema se conecta y cuando se desconecta. Son, en general, del tipo autocompensante. Los de limpieza continua se construyen de manera que expulsan partículas relativamente grandes cuando están en funcionamiento; lo hacen mediante orificios flexibles, que se dilatan cuando la presión aumenta (Fig. 7.13).



Fuente: Bowsmith (2003).

Figura 7.13. Gotero autolimpiante incorporado en la tubería.

Hay tres tipos principales de tuberías para aplicar el agua de forma continua en las líneas de cultivo: las de cámara única, que son tubos de pequeño diámetro (< 25 mm) con orificios insertados en una misma cámara donde se disipa el exceso de carga; los tubos de cámara doble, de pequeño diámetro, que tienen una cámara principal, interior, y una cámara auxiliar, exterior, separadas por una pared, y en la que, por cada orificio interno, existen varios orificios de salida abiertos a pequeños intervalos, de 0,15 a 0,30 m, en la pared exterior del tubo (Fig. 7.14); y los tubos de pared porosa, que consisten en tubos de pequeño diámetro con pared porosa, enterrados, en donde el movimiento del agua hacia el exterior se hace por capilaridad. Los caudales en los tubos porosos dependen de la geometría del material y de la presión aplicada. Normalmente, los caudales de estos emisores se calculan por métodos empíricos.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.14. Tubo de doble cámara para el riego continuo en línea, superficial o subsuperficial.

Los tubos de cámara simple están siendo substituídos por los de cámara doble, ya que éstos permiten obtener una excelente uniformidad de los caudales librados. Por su parte, los tubos porosos están sustituyéndose, también, por los de cámara doble en riego subsuperficial, no sólo por la mayor uniformidad sino, también, por la facilidad de la extensión mecanizada de estos últimos (Fig. 7.15).



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.15. Colocación mecanizada de tubos de cámara doble. El tubo, flexible, está enrollado en carretes y, en riego subsuperficial, es regulable a la profundidad de colocación.

7.4.3. Variabilidad de los caudales. Exponente característico del caudal de un emisor

La relación caudal – presión de los emisores está bien caracterizada por la Ec. (7.4):

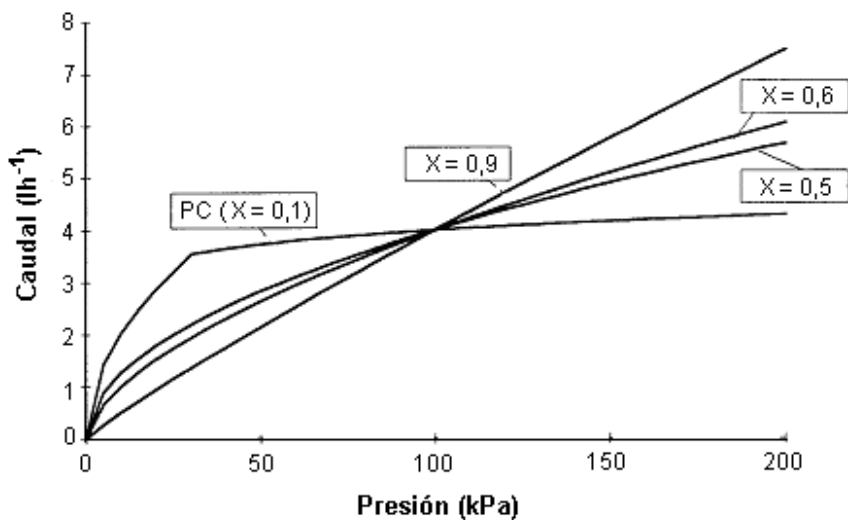
$$q = K_e H^x \quad (7.4)$$

donde: q , es el caudal del emisor ($l\cdot h^{-1}$); K_e , es el factor que caracteriza las dimensiones del emisor (Ecs.7.1 a 7.3); H , es la presión a la que opera el sistema (kPa); y x , es el exponente característico del régimen de flujo del emisor.

Los coeficientes K_e y x se determinan representando q versus H (Fig. 7.16) en un gráfico de escala logarítmica. La pendiente de la recta de ajuste es x y la intersección de esta línea para $H = 1$ es K_e :

$$x = \frac{\log(q_1 / q_2)}{\log(H_1 / H_2)} \quad (7.5)$$

A medida que x se aproxima a cero ($x = 0$ es el exponente característico de los emisores autocompensantes), el caudal varía menos con las variaciones de presión. Pese a todo, las relaciones reales entre caudal y presión pueden diferir significativamente de las indicadas por los fabricantes (Ozekici y Sneed, 1995), al contrario de lo que sucede con las informaciones de los laboratorios de pruebas.



Fuente: Pereira y Trout (1999).

Figura 7.16. Curvas caudal - presión para condiciones típicas.

Los bajos valores de x indican una pequeña sensibilidad a las variaciones de presión, lo que permite el uso de tuberías largas o de pequeño diámetro, así como su empleo en terrenos inclinados y de topografía irregular. Los emisores autocompensantes de buena calidad deben tener $x < 0,1$ para la gama de presiones para la que fueron fabricados. Los emisores de régimen laminar tienen un valor de x próximo a 1, lo que implica que los sistemas se diseñen para variaciones de presión en el intervalo $\pm 5\%$ de su valor medio. Para los emisores de régimen turbulento, con x próximo a 0,5, la variación de presión debe situarse en el intervalo $\pm 10\%$ de la media pretendida o, preferiblemente, en un intervalo menor.

7.4.4 Sensibilidad a temperatura

Se produce variación de los caudales cuando las secciones de los recorridos del agua en los emisores se expanden, o se contraen, debido a la influencia de la temperatura sobre el material con el que se han fabricado. En el caso de los emisores de recorrido largo y de régimen laminar, el caudal varía, también, debido al impacto de la temperatura sobre la viscosidad del agua. Los efectos de la temperatura pueden ser significativos para tuberías PE expuestas al sol, alcanzando temperaturas muy por encima de 20 °C, casos en que no se debe recurrir a los emisores de régimen laminar. La información sobre la repercusión de la variación de temperatura debe ser proporcionada por los fabricantes. Una información adicional sobre el tema puede leerse en Keller y Bliesner (1990), por ejemplo.

7.4.5. Susceptibilidad a la obstrucción

La susceptibilidad de los emisores a la obstrucción depende, principalmente, de la mayor o menor dimensión para el paso del agua y de su velocidad en el paso por los orificios de salida. Las velocidades de paso del agua entre 4 y 6 ms⁻¹ reducen, sustancialmente, la obstrucción por las partículas finas.

En lo que se refiere a la dimensión de la sección de paso, los emisores se clasifican en (Keller y Bliesner, 1990; Boman, 1995):

- Muy susceptible < 0,7 mm
- Susceptible 0,7 a 1,5 mm
- Poco susceptible > 1,5 mm y emisores autolimpiantes

Las recomendaciones de los fabricantes en cuanto al filtrado necesario para cada tipo de emisor dan una buena indicación acerca de la sensibilidad a la obstrucción (Rieul y Ruelle, 2003):

- Extremamente susceptible filtros < 80 micras
- Muy susceptible filtros 80 micras
- Susceptible filtros 100 micras
- Poco susceptible filtros 125 micras
- Muy poco susceptible filtros 150 micras

7.4.6. Coeficiente de variación de fabricación

El coeficiente de variación (C_v) de fabricación de un emisor es un buen indicador de la variabilidad de los caudales proporcionados por emisores nuevos, debiendo suministrarse por los fabricantes los valores esperados para los C_v de los respectivos goteros, microaspersores, "bubblers" y tubos de cámara doble. El C_v de fabricación puede ser obtenido a través de ensayos en el laboratorio o puede ser calculado por los usuarios recurriendo a, por lo menos, 50 emisores en funcionamiento simultáneo. La expresión es:

$$C_v = \frac{\sqrt{(q_1^2 + q_2^2 \dots + q_n^2 - nq_a^2)} / (n-1)}{q_a} \quad (7.6)$$

donde: q_1, q_2, \dots, q_n , son los caudales observados ($l h^{-1}$); n , es el número de emisores en la muestra; y q_a , es el caudal medio de la muestra ($l h^{-1}$).

La variabilidad de fabricación se clasifica conforme a la Tabla (7.1) (EP 405.1, ASAE, 2003). Numerosos emisores tienen los valores de C_v en la gama de 0,03 a 0,05.

Tabla 7.1. Clasificación de la calidad de los emisores según el coeficiente de variación de fabricación (C_v).

Clasificación	C_v
Emisores por punto	
Excelente	< 0,05
Buena	0,05 a 0,07
Marginal	0,07 a 0,11
Mala	0,11 a 0,15
Inaceptable	> 0,15
Emisores en línea continua	
Buena a excelente	< 0,10
Media	0,10 a 0,20
Mala a inaceptable	> 0,20

7.4.7. Clasificación de los emisores en riego localizado

Como se ha dicho anteriormente, existe gran variedad de emisores (con sus características), lo que hace difícil su elección. Para apoyar tal elección, se resumen en la Tabla (7.2) algunas de las características más importantes de los grandes grupos en que se pueden clasificar los emisores, con indicación de las principales ventajas e inconvenientes que les corresponden.

Tabla 7.2. Tipos de emisores y sus características principales, ventajas e inconvenientes.

Tipo de recorrido	Descripción	Ventajas	Inconvenientes	Exponente característico, x
Microtubo	Tubos largos de pequeño diámetro (tipo “spaghetti”) con régimen laminar	a	2, 5, 6	0,7 – 0,8
Recorrido largo en el emisor	Recorrido largo, en espiral o en serpentina, en el cuerpo del gotero, con régimen casi laminar		2, 4	0,7
Vórtice	El agua entra tangencialmente en una cámara en la cual gira saliendo por un orificio situado en la pared opuesta con régimen turbulento	a, b, c	3, 4	0,4
Tortuoso	Recorrido en laberinto o zig-zag, en régimen casi turbulento	c, d, e		0,5 – 0,55
Tubería porosa	Orificios muy pequeños en la pared de la tubería		2, 3, 5, 6	≥1,0
Emisores con compensación de la presión	Emisores dotados de una membrana flexible, anillo u otro sistema que reduce el diámetro del paso del agua cuando la presión aumenta, pero de calidad variable según el proceso de fabricación	b, c, d, e (posibles)	1, 4, 6, 7 (posibles)	0 – 0,5
Con orificios múltiples	El agua pasa a través de varios orificios abiertos en membranas flexibles, por lo que una partícula presa en uno de los orificios crea una presión suplementaria que expande el orificio y permite la salida de la partícula	d, e	1, a veces 7	0,7
Orificio	Existe un único orificio simple; caso típico de los microaspersores	a, b, c	7	0,5
Ventajas:		Inconvenientes:		
a. Barato.		1. Caro.		
b. Caudal no influenciado por la variación de temperatura.		2. Caudal influenciado por las variaciones de la temperatura.		
c. Pequeño coeficiente de variación (Cv) de fabricación (pequeñas variabilidades entre emisores).		3. Normalmente, es un orificio “pequeño”.		
d. Normalmente, es un orificio “grande”.		4. Susceptible a la obstrucción.		
e. Baja susceptibilidad a la obstrucción cuando es comparado con otros emisores con el mismo diámetro.		5. Muy susceptible a la obstrucción.		
		6. Gran coeficiente de variación (Cv) de fabricación en algunas marcas y modelos.		
		7. Las características de caudal de algunas marcas y modelos pueden alterarse después de pocos años de uso.		

Fuente: (Pereira y Trout, 1999).

7.4.8. Conexión a las tuberías

Los goteros se clasifican como: insertados en la tubería o colocados en el exterior de la tubería. Los primeros se insertan uniendo longitudes adyacentes de la tubería (Fig. 7.17) o se integran en ella durante la fabricación (Fig. 7.18). En este caso, las tuberías pueden ser más largas, ya que las pérdidas de carga debidas a la presencia de los goteros son menores. Los goteros colocados en el exterior de la tubería se ubican en aberturas hechas en la pared lateral de esta. Algunos goteros exteriores poseen salidas múltiples. En este caso, se dotan de tubos de pequeño diámetro que se utilizan para dirigir el agua a los puntos deseados, alrededor de las plantas. Los extremos de estos tubos deben estar al mismo nivel para garantizar una distribución uniforme del caudal.

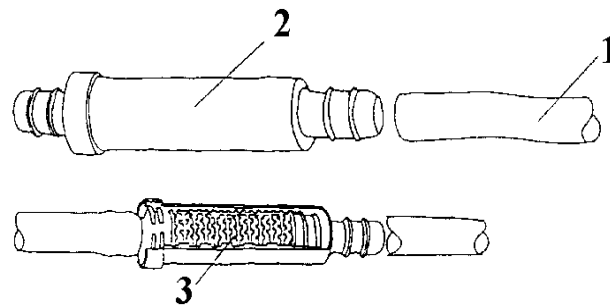


Figura 7.17. Esquema de un gotero inserto en la tubería, de recorrido largo y tortuoso: 1 - tubería; 2 – gotero con extremos macho para una fácil inserción en la tubería; 3 – recorrido tortuoso del agua.

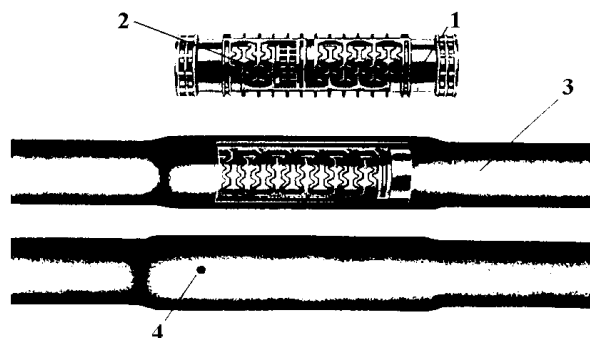


Figura 7.18. Esquema de gotero de recorrido largo y tortuoso, integrado en la tubería en la fabricación: 1 – tubo interior; 2 – recorrido tortuoso del agua; 3 – tubería; 4 – orificio de salida.

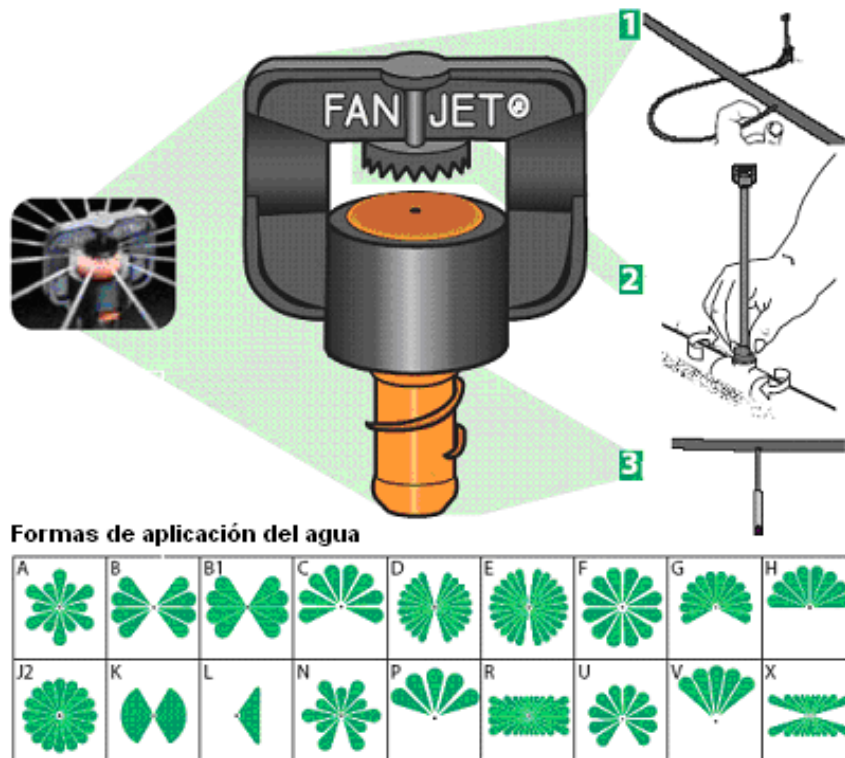
La tendencia actual, en lo que se refiere a los goteros insertados, es la adopción de los que son integrados en la tubería en la fabricación, ya que se encuentran disponibles para una gran variedad de espaciamientos, desde 0,15 m a 1,20 m, al contrario de lo que sucedía hace tiempo, en que muchos espaciamientos sólo eran posibles cortando las tuberías e insertando manualmente los goteros. Están muy extendidos los goteros colocados exteriormente en la tubería, principalmente para uso en la jardinería y en los invernaderos (Fig. 7.19). La conexión a la tubería se hace, generalmente, por una extremidad macho que se inserta en la pared de la misma por medio de un pequeño tubo-mástil, o en derivación con un tubo flexible adicional. Como principal ventaja, tienen la facilidad de poderse limpiar manualmente, sobre todo cuando no se haga aconsejable el tratamiento químico para la destrucción de los taponamientos.



Fuente: Toro (2003).

Figura 7.19. Goteros colocados en el exterior de la tubería, con conexión a ésta por medio de un tubo-mástil, de extremo machado, y en derivación con tubo flexible adicional.

Los microaspersores y los “bubblers” se colocan en la pared exterior de la tubería. Los microaspersores pueden conectarse en derivación mediante un tubo flexible y montados sobre un pequeño mástil metálico o de plástico duro, montados en un tubo-mástil encima de la tubería o suspendidos de la tubería cuando el trazado de ésta es aéreo (Fig. 7.20). Estas soluciones dependen del tipo de cultivo a regar, de la forma de aplicación del agua que proporcionan y, naturalmente, de la preferencia del regante.



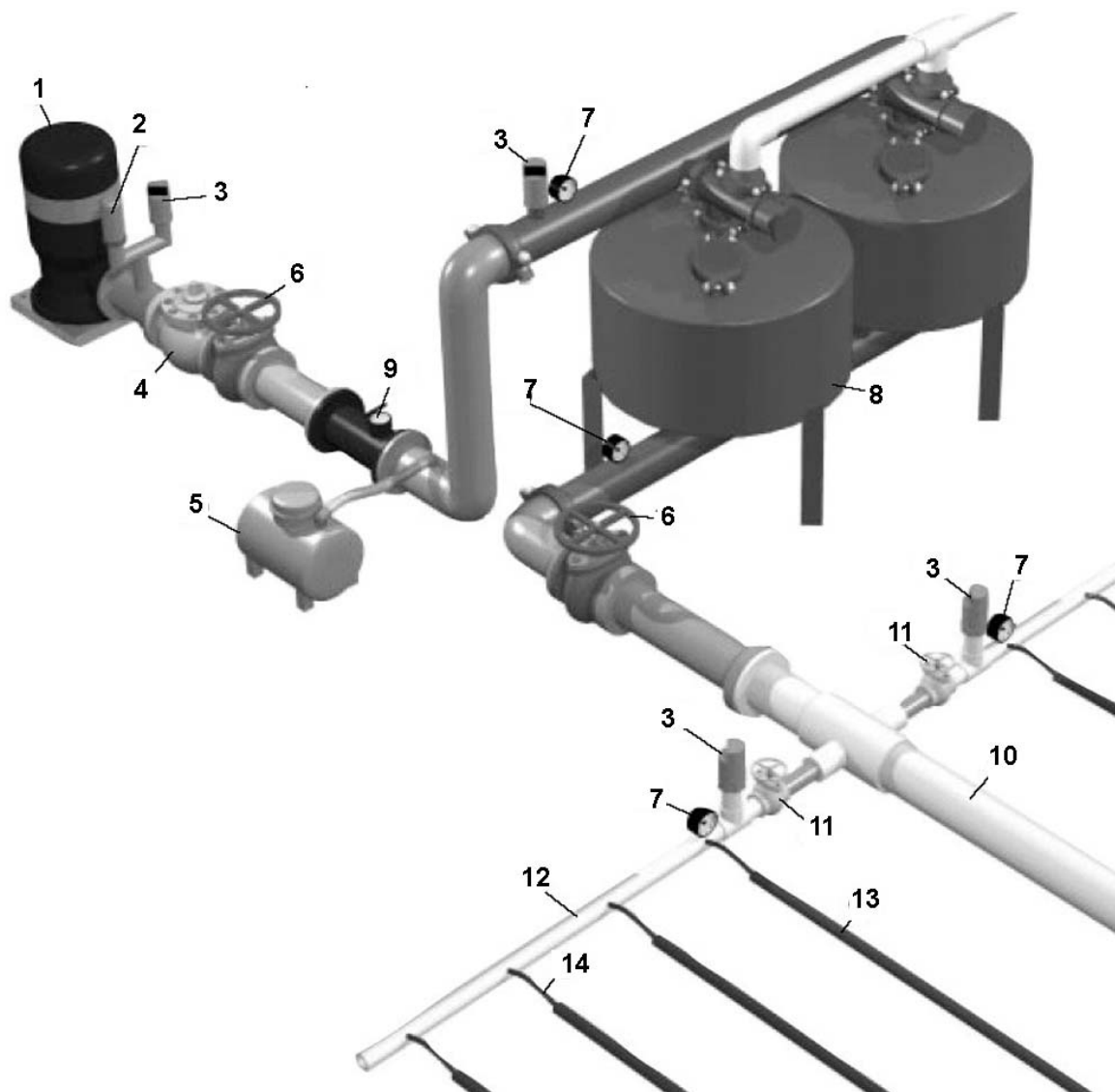
Fuente: Bowsmith (2003).

Figura 7.20. Microaspersor autocompensante con distintas formas de conexión a la tubería (en derivación (1); por tubo mástil (2); y suspendido (3)) y diferentes formas de chorro conforme al tipo de plato difusor escogido.

7.5. Sistemas de riego localizado y sus componentes

7.5.1. Componentes básicos

La Figura 7.21 presenta una disposición típica de un sistema de riego localizado. La unidad de regulación y de control incluye la estación de bombeo, el equipo de filtrado, los controladores y reguladores de la presión y del caudal, y las válvulas y los dispositivos de medición del agua a aplicar. Las tuberías principales llevan el agua a las tuberías secundarias, que, a su vez, abastecen de agua a las tuberías portarramales con los goteros. Las tuberías secundarias y las tuberías portarramales con goteros pueden estar en superficie o, más frecuentemente, enterradas.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.21. Esquema de un sistema de riego localizado: 1, bomba; 2, válvula de equilibrio de la presión; 3, válvula de vacío y de escape del aire; 4, válvula de regulación de la presión; 5, tanque de fertilizante; 6, válvula comando de la tubería principal; 7, manómetro; 8, filtro; 9, caudalímetro; 10, tubería principal; 11, válvulas de sector; 12, tubería portarramales con goteros; 13, tuberías portagoteros; 14, conexión entre las tuberías portarramales y ramales con goteros.

Las tuberías portarramales con goteros se utilizan para servir varios ramales portagoteros. Estas tuberías tienen, normalmente, de 9,5 mm a 25 mm de diámetro, y se fabrican en polietileno (PE) o PVC. Las restantes tuberías pueden ser fabricadas con diversos materiales (PE, PVC), incluyendo materiales plásticos flexibles (Fig. 7.22). Los ramales portagoteros abastecen los emisores o humedecen el suelo directamente en el caso de tubos porosos o de tubos con cámara doble o simple de aplicación del agua en línea, en superficie o subsuperficial.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 7.22. Tubo plástico flexible para la tubería secundaria o porta-tuberías en sistemas de riego localizado de baja presión.

Los ramales portagoteros pueden colocarse pareados en un caballón de cultivo (Fig. 7.23) o a ambos lados de cada línea de árboles en cultivos leñosos regados por goteo, o disponerse para regar sólo en una línea de cultivo o, cuando el suelo presente buena difusión lateral del agua, recurrir a una sola una tubería por cada dos líneas de cultivo (Fig. 7.24).



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.23. Riego con dos ramales portagoteros por caballón de cultivo en suelos de textura ligera. Puede observarse, en el primer plano, la tubería secundaria, un sistema de control y la tubería portarramales con goteros.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.24. Riego con una tubería portagoteros por dos líneas de cultivo en un suelo con buena difusión lateral.

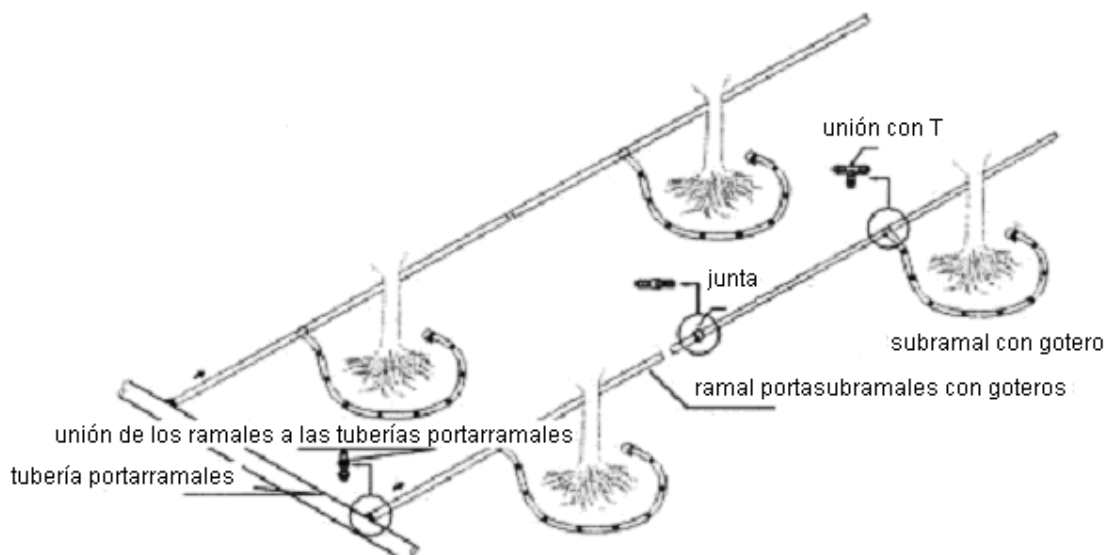
En parcelas de frutales y en viñedos, las tuberías se pueden colocar sobre el suelo o estar suspendidas de los alambres, o de los propios árboles, de forma que se evite su deterioro cuando se realizan labores de cultivo. En este caso, los goteros pueden ser tanto insertados en las tuberías (Fig. 7.25) como suspendidos (Fig. 7.26) para humedecer el suelo en la zona de mayor densidad radicular. El riego de frutales con goteros o con tubos de doble cámara, en suelos de textura ligera, exige trazados especiales que permitan un número adecuado de goteros por planta, como es el caso de la utilización de subramales con los goteros alrededor de cada árbol para proporcionar el humedecimiento adecuado de la zona radicular (Fig. 7.27).



Figura 7.25. Tubería suspendida en los alambres de las vides con goteros insertados (2 goteros por cepa).



Figura 7.26. Riego de frutales con tubería sujeta en los alambres y gotero suspendido, en el caso de suelos con una buena difusión lateral (2 goteros por planta, en condiciones climáticas con precipitaciones durante la época de riego).



Fuentes: Toro e Irrimac (2003).

Figura 7.27. Riego de frutales con subtuberías portagoteros en suelos de textura ligera.

Los reguladores de presión o de caudal (manuales o automáticos), las válvulas de control (eléctricas, hidráulicas, o manuales), y los filtros secundarios se localizan en las entradas de las tuberías secundarias, de los sectores (conjunto de tuberías y portarramales en funcionamiento simultáneo), de los ramales con los portarramales con gotero o, incluso, de las tuberías portagoteros (Fig. 7.28).

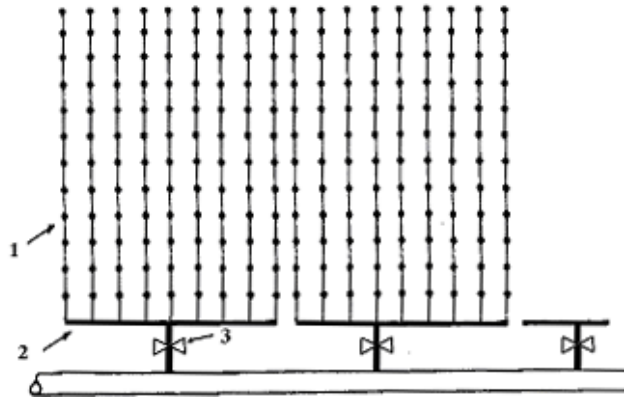


Figura 7.28. Esquema de un sistema de riego localizado con válvulas automáticas para el control del riego en los distintos sectores (A, B, ...) y en el que se muestran: 1, ramales portagoteros; 2, tubería portarramales; 3, válvulas automáticas y reguladores de presión y caudal a la entrada en las tuberías portarramales.

7.5.2. Unidades de regulación y control

Una unidad de regulación y control (Fig. 7.21) incluye los siguientes elementos: una válvula de seguridad de corte, una válvula de salida de aire, una válvula automática con regulación por tiempo o por volumen, un tanque de fertilizante, uno o más filtros, y un regulador de presión o caudal. Las pérdidas de carga en estos elementos tienen que ser consideradas en el diseño hidráulico, ya que los sistemas de riego localizado operan con una presión muy baja.

Válvulas. Las válvulas de seguridad se instalan en el extremo aguas arriba de la red y se utilizan para evitar que el caudal, cuando se corta el agua, que puede contener fertilizantes, vuelva hacia la bomba o hacia el sistema principal de abastecimiento. Se pueden asociar a válvulas de equilibrio de la presión que pretenden asegurar que la presión en la red fluctúe en intervalos adecuados conforme a lo proyectado.

Las válvulas de salida, o de purga, del aire (Fig. 7.29) se deben localizar en los puntos altos de la red, donde el aire tiene tendencia a acumularse; se utilizan para extraer el aire que se acumula en la red de tuberías, el cual no sólo provoca perturbaciones en el flujo sino que puede originar el deterioro de las tuberías. En redes extensas, son necesarias varias válvulas de purga.



Fuente: Irricampo (2003).

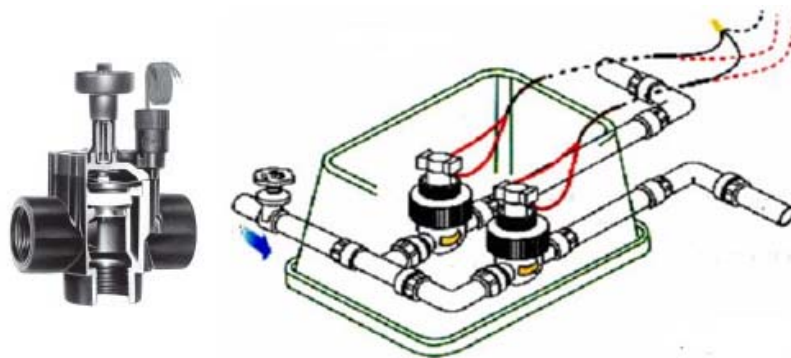
Figura 7.29. Válvula de purga.

Las válvulas volumétricas (Fig. 7.30) son la base de la automatización de los sistemas y se programan para permitir el paso de un volumen dado de agua, o un cierto caudal durante un determinado tiempo, tras lo cual se cierran automáticamente. Las válvulas pueden actuar hidráulicamente, en secuencia, minimizando las exigencias de trabajo y permitiendo mejorar la eficiencia de la aplicación del agua. Estas válvulas volumétricas automáticas se seleccionan teniendo en cuenta el volumen de agua y el caudal. Su comando puede ser efectuado a través de sensores de presión o eléctricamente (Fig. 7.31). En vez de las válvulas volumétricas, pueden usarse válvulas temporizadoras, que cortan el flujo tras terminar el tiempo programado. Estas válvulas trabajan en secuencia, haciendo que el riego de los distintos sectores se de según un orden determinado.



Fuente: Lagoalva (2003).

Figura 7.30. Válvula automática de sector.

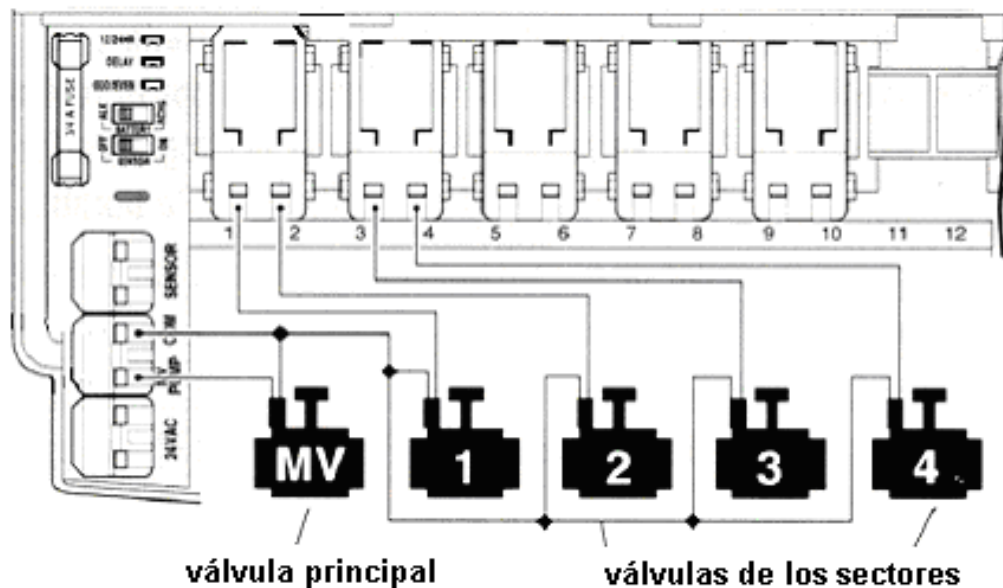


Fuente: Toro e Irrimac (2003).

Figura 7.31. Instalación de las válvulas de sector con comando eléctrico para jardín.

Dispositivos de control automático. Los sistemas de riego gota a gota, generalmente, se automatizan. Normalmente, se adopta una unidad principal de control aguas arriba del sistema conectada a las unidades de campo, localizadas a lo largo de la tubería principal (Fig. 7.28). A su vez, cada unidad de campo controla un cierto número de válvulas hidráulicas instaladas en las entradas a las tuberías secundarias. El sistema activa automáticamente sucesivos grupos de tuberías secundarias o de portarramales con gotero de manera que se apliquen las cantidades de agua y fertilizante deseadas en los sectores a regar. Las válvulas automáticas se conectan a los centros de control, donde se localizan los

controladores/programadores del riego (Fig. 7.32). Una buena elección de las válvulas automáticas de sector y de los programadores del riego, que, fácilmente, permitan alterar las secuencias y tiempos de riego y de fertirrigación, constituye un elemento importante para un manejo adecuado del riego.



Fuente: Toro e Irrimac (2003).

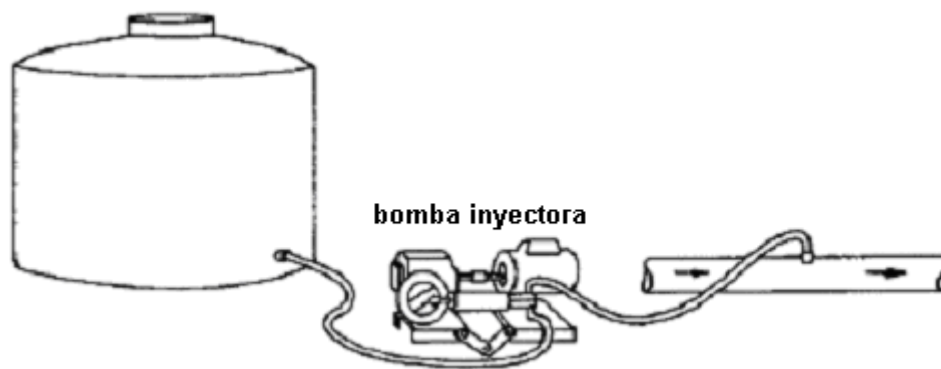
Figura 7.32. Controlador y programador del riego para 4 sectores.

Fertirrigación. Los tanques de fertilizantes sirven para: la inyección de fertilizante líquido en el agua de riego (fertirrigación); eventualmente, para la inyección de herbicidas o de productos fitosanitarios convenientemente disueltos (quimirrigación) y para la inyección de productos químicos que frenen la obstrucción de los emisores. Si se pretenden obtener mayores producciones con riego localizado, es esencial una aplicación correcta de fertilizantes y, en una agricultura con una avanzada tecnología, ejecutar los tratamientos con agroquímicos en combinación con los de riego (Threadgill *et al.*, 1990; Burt *et al.*, 1995; Papadopoulos, 1996).

La aplicación de los fertilizantes deberá hacerse en no más del 70 al 80% de la duración del riego, dando tiempo suficiente para limpiar el sistema tras la aplicación con agua de riego limpia. Los tanques de los fertilizantes están, generalmente, disponibles en volúmenes que van de los 30 litros a varios cientos de litros. Pueden asociarse a pequeñas válvulas volumétricas automáticas para controlar los volúmenes aplicados. Tales equipamientos facilitan la utilización de tanques portátiles.

La inyección puede hacerse de varias maneras:

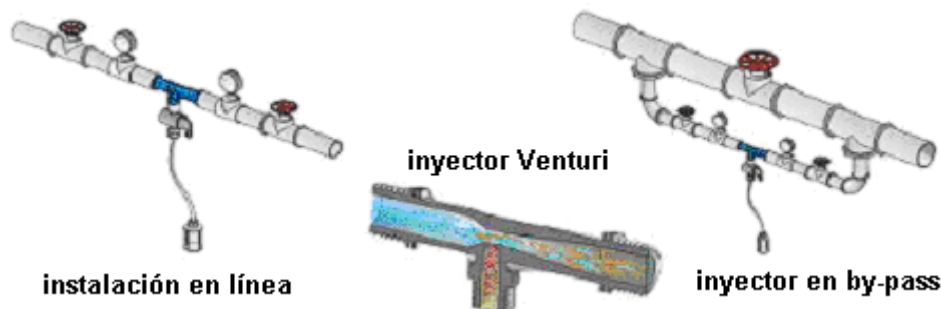
- Recurriendo a una bomba inyectora (Fig. 7.33), que requiere mayor presión de la del agua que circula en la red para inyectar en ésta un caudal continuo de solución fertilizante.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.33. Tanque de fertilizantes y bomba inyectora.

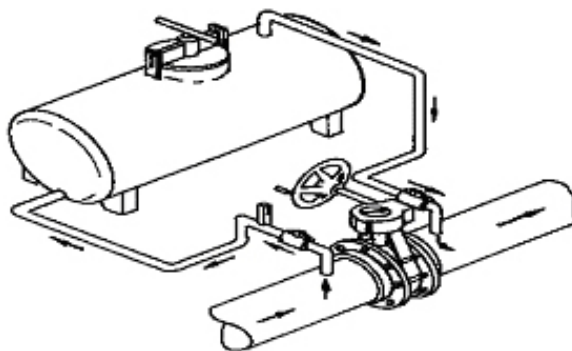
- A través de un inyector Venturi (Fig. 7.34), que produce una diferencia de presión entre dos puntos de la tubería, suficiente para aspirar la solución de forma aproximadamente continua y sin alterar la concentración de los fertilizantes en el agua de riego. El Venturi puede ser montado directamente en la tubería, pero se prefiere en derivación, principalmente, para permitir que el tiempo de la fertirrigación sea menor que el tiempo de riego, así como para permitir regar sin aplicar fertilizantes.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.34. Inyector Venturi y tipos de instalación, en línea y en derivación.

- Por un sistema de diferencial de presión regulable por el operador, en el que una parte del agua que circula en la tubería es desviada hacia el tanque y, circulando por él, vuelve a la tubería con el fertilizante, como se esquematiza en la Figura (7.35). La cantidad de solución inyectada es tanto mayor cuanto mayor es la diferencia de presión entre la sección de aguas arriba, donde el agua es retirada de la tubería hacia el tanque, y la de aguas abajo, donde la solución fertilizante se añade. Para evitar grandes concentraciones del fertilizante en el agua de riego, es necesario proceder a ajustes en la presión y en la cantidad de fertilizante. Como alternativa, puede usarse un tanque modificado en el que el fertilizante está contenido en una vasija que lo va liberando a medida que el agua va agitando la vasija.



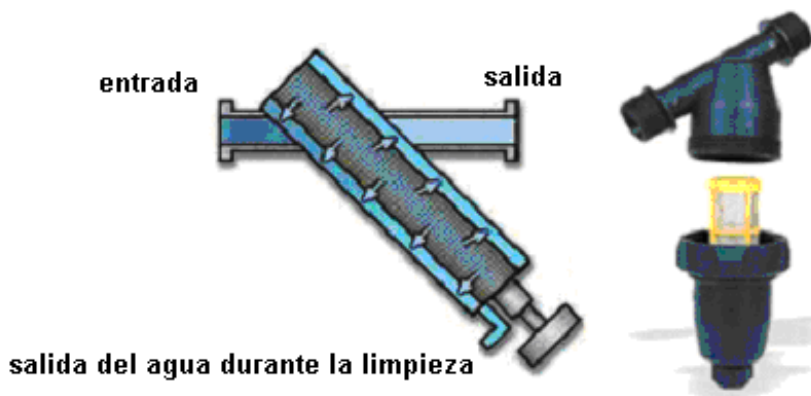
Fuente: TTape (2003).

Figura 7.35. Tanque fertilizante funcionando por diferencial de presión regulable por el operador.

Filtros. Los filtros son necesarios para reducir el riesgo de obstrucción de los goteros debido a las partículas sólidas y/o materia orgánica suspendida en el agua. Hay una gran variedad de filtros. El tipo, dimensión y número de filtros depende de la calidad del agua y del caudal.

La obstrucción de los filtros aumenta las pérdidas de carga. Por eso, si se observa un aumento de la pérdida de carga al atravesar un filtro, ello indica que es necesario limpiarlo. Las limpiezas deben hacerse periódicamente por el regante, cada 24 horas por ejemplo, o programarse para que tenga lugar a lo largo del riego. La limpieza se realiza haciendo circular el agua en sentido inverso en el cuerpo del filtro y lanzando al exterior el efluente resultante; para ello, los filtros poseen válvulas apropiadas que comandan los circuitos en operación normal y en limpieza. En el caso de filtros de limpieza manual, éstos son abiertos.

El filtro de malla (Fig. 7.36), tal vez el más extendido, se usa principalmente para material sólido transportado en el agua de riego, incluso partículas no disueltas de abono usado en la fertirrigación. Estos filtros pueden tener una malla única o una malla doble; en este caso, una es para el material más grueso y la otra, para las partículas más finas. La dimensión de las aberturas de la malla está condicionada por la susceptibilidad de los emisores a la obstrucción, y debe ser recomendada por sus fabricantes (Epígrafe 7.4.5). El agua a filtrar circula del interior al exterior y, para el lavado, circula del exterior al interior y se drena por una válvula que se abre cuando esta operación, de corta duración, se produce.



Fuente: Toro (2003).

Figura 7.36. Esquema y ejemplo de un filtro de malla.

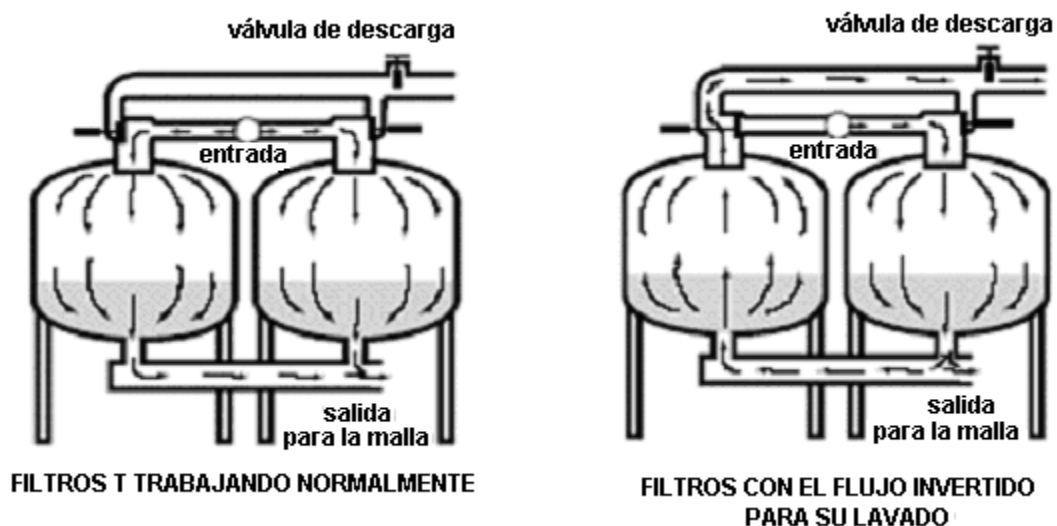
El filtro de discos, o anillas concéntricas, dispuestos en un eje longitudinal, se usa como alternativa al filtro de malla. Cuando se aprietan entre sí, los discos forman un cuerpo cilíndrico filtrante (Fig. 7.37). Al igual que en los filtros de malla, el agua circula del interior al exterior y, cuando se lava, en sentido inverso. El grado de filtración depende de la calidad del agua de riego, y viene dado por el número de discos.



Fuente: Heliflex (2003).

Figura 7.37. Filtro de discos.

Para eliminar microorganismos y partículas coloidales muy finas, puede usarse el filtro de arena y gravilla, en el que se recurre a capas ordenadas de partículas de arena y gravilla de diferentes diámetros. Este tipo de filtro, especialmente cuando es secundado por un filtro de malla o por un filtro de anillos, es particularmente apropiado para aguas de menor calidad y para aguas superficiales, frecuentemente con algún grado de eutrofización, y en las cuales se desarrollan fácilmente algas, y microorganismos diversos, como sucede con el agua procedente de balsas superficiales, lagos, cursos de agua y canales de riego. Estos filtros deben, igualmente, lavarse con frecuencia. Cuando se recurre a varios filtros en paralelo (Fig. 7.38), el lavado puede ser automatizado y darse durante el riego.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.38. Filtros de arena y gravilla; a la izquierda, en funcionamiento normal y, a la derecha, con uno de los filtros en flujo invertido para lavado.

El filtro de vórtice, o hidrociclón, es menos frecuente y se recurre a él para eliminar del agua el material sólido disperso, en especial partículas de suelo; generalmente, se utiliza en conjunto con otro tipo de filtros. Se trata de un cuerpo cónico vertical, más ancho por arriba, con una cámara en el fondo para recoger el material filtrado (Fig. 7.39). Esta cámara es

drenada periódicamente. El agua, que viene de la tubería, entra tangencialmente por arriba y fluye hacia abajo con una gran velocidad angular. Tal velocidad activa las partículas sólidas contra las paredes del filtro, de donde son transportadas hacia abajo en un recorrido en espiral en dirección a la cámara colectora. El agua limpia, al alcanzar el fondo, cambia de dirección y fluye, por el eje del filtro, de regreso a la tubería.



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.39. Filtro de vórtice o hidrociclón.

En general, los filtros no resuelven completamente el problema de la obstrucción, por lo que es de esperar que los sistemas de riego por goteo tengan un cierto porcentaje de goteros obstruidos u operando de forma insuficiente. Sin embargo, un sistema eficiente de filtración puede reducir la obstrucción a un nivel razonablemente bajo. Lo importante es la instalación de los filtros inmediatamente después de las unidades de fertirrigación (Fig. 7.40) para impedir que las partículas sólidas de los fertilizantes sean causa de las obstrucciones.



Figura 7.40. Equipo de regulación y control de un sector, incluyendo válvulas automáticas volumétricas, filtros, tanque de fertilizante, manómetros y regulador de caudal.

Los filtros no pueden impedir las obstrucciones debidas a la precipitación de carbonato de calcio o a la materia orgánica transportada en el agua de riego. Para eliminar los depósitos de carbonato de calcio, el sistema debe lavarse con una solución de ácido nítrico (0,2 a 0,5%) hasta una vez por mes, durante 30 minutos seguidos durante el mismo tiempo con agua de buena calidad. Los depósitos de materia orgánica se eliminan lavándose el sistema con una solución de cloro (0,05%), con frecuencia y modo de aplicación idéntica a la del ácido nítrico.

Reguladores de presión o de caudal. Estos elementos se necesitan para garantizar caudales constantes dentro del sistema de riego. Los reguladores de presión funcionan por la deformación de una membrana que, con una mayor presión, restringe la sección de paso del agua, provocando ahí una pérdida de carga localizada, tanto mayor cuanto más la presión se sitúe por encima de la deseada, dando caudales aproximadamente constantes en la red así regulada. Los reguladores de caudal funcionan por la actuación en la sección de paso del agua. Estos elementos se elegirán teniendo en cuenta la gama de caudales que se estima puedan circular en la sección donde se montan y para la gama de variación de presión que se puede prever. El uso de reguladores, cuya gama de funcionamiento no corresponda a las condiciones que se verifican en la práctica, no produce, los efectos deseados, por lo que se requiere mucha atención en esa elección durante la fase de concepción de la red.

En general, siempre, es necesario que haya un regulador de presión en la unidad de aguas arriba de la red para obviar las variaciones de presión que, frecuentemente, se dan en las redes de distribución o, incluso, en las estaciones de bombeo. Normalmente, una única parcela no requiere más de un regulador de presión en la unidad de control de aguas arriba. Sin embargo, en las parcelas de gran dimensión, o cuando se da la variación de la presión en la red debido a la topografía, puede ser necesaria la instalación de reguladores de presión o de caudal en la entrada de las tuberías secundarias y de los ramales portagoteros. En las instalaciones en las que los ramales portagoteros se instalan a lo largo de una ladera (por lo tanto, en que la presión varía a lo largo del declive) se aconseja instalar tales reguladores en la entrada de los ramales porta-emisores.

7.6. Bases para el proyecto

7.6.1. Selección, localización y espaciamiento de los emisores

La primera decisión a tomar en el diseño agronómico es escoger el tipo de emisor. Generalmente, se usan goteros, en cultivos en línea, y microaspersores, en frutales, pero pueden utilizarse goteros en frutales cuando el riego sea poco frecuente (riego de complemento o de apoyo), o donde la conductividad hidráulica horizontal del suelo sea elevada, propiciando el uso de pocos (2 a 4) goteros por planta (Fig. 7.27). Como alternativa, pueden usarse "bubblers" para abastecer agua a las balsillas hechas en los troncos de los árboles. En viñas y frutales en espaldera, generalmente, se recurre a goteros pero, como el objetivo es crear un bulbo continuamente mojado a lo largo de la línea de las plantas, se emplean dos o más goteros por planta (Fig. 7.25). Cuando los goteros están demasiado espaciados, en suelos arenosos, la viña sufre estrés hídrico (Fig. 7.41).



Figura 7.41. Viña en suelo arenoso regada sólo con un gotero por planta, dando lugar a un bulbo humedecido demasiado pequeño.

En suelos ligeros, la mejor opción es utilizar microaspersores, principalmente en frutales y viñas con gran espaciamiento, pero, también, en cultivos hortícolas y otros cultivos de porte bajo. En estos suelos, el bulbo mojado por los goteros tiene un diámetro pequeño y, debido a que el movimiento del agua es predominantemente gravitacional, tiende a ser demasiado alargado en la vertical (Fig. 7.6). De este modo, es difícil controlar la percolación del agua más allá de la zona radicular. Los espaciamientos entre goteros deberían ser muy pequeños para asegurar la continuidad de los bulbos mojados, encareciendo la instalación por el aumento del número de goteros. Si se decide espaciar demasiado los goteros entre sí en los suelos arenosos, se hará pasar sed al cultivo (Fig. 7.42).



Figura 7.42. Bulbos mojados demasiado pequeños y discontinuos producidos por un ramal portagoteros para dos líneas de pimiento en un suelo arenoso, causando una clara deficiencia hídrica al cultivo.

El riego subsuperficial se usa principalmente en los cultivos en línea, hortícolas y herbáceos en régimen extensivo; es el caso del maíz, frecuentemente con las tuberías enterradas entre dos líneas de cultivo. Es menos frecuente, pero se utiliza, también, en frutales y viñas, con las tuberías enterradas en la proximidad de la línea de los árboles o de las cepas, creando un bulbo mojado continuo. Es más raro para el riego de cultivos que cubren totalmente el suelo, como cereales de invierno o praderas y prados, sobre todo por razones económicas. La condición esencial para el uso del riego subsuperficial es la de que el suelo favorezca la difusión lateral y la ascensión capilar (Fig. 7.43).



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.43. Buena difusión vertical del agua en un suelo, con textura fina, con riego subsuperficial.

El porcentaje P_w de área mojada, entendido como el porcentaje de área ocupada por las raíces que se riega con el riego localizado, es un factor determinante de la elección del espaciamiento. Cuando P_w es pequeño, se limita el desarrollo radicular y la reserva de agua disponible para las plantas. Si el riego es de complemento (por lo tanto, cuando llueve para abastecer de agua todo el sistema radicular), se puede admitir un P_w de 1/3 del área ocupada por las raíces (Fig. 7.26). Sin embargo, si el riego es la fuente de agua principal, o única, durante largos periodos, P_w debe ser, por lo menos, 2/3 del área ocupada por las raíces (Figs. 7.5 y 7.27). En caso contrario, las raíces tienen un desarrollo muy pequeño y las plantas sufrirán de estrés hídrico (Figs. 7.42 y 7.43). Es, por esta razón, que lo más frecuente es recurrir a la microaspersión en frutales.

Para prever el diámetro de los bulbos mojados, el mejor procedimiento es medir lo que pasa en suelos semejantes, evaluando tal diámetro a 30 cm bajo la superficie. El diámetro mojado en superficie es de, aproximadamente, 2/3 a 3/4 del medido a 30 cm. Keller y Bliesner (1990) propusieron una ecuación empírica para calcular tal diámetro en el caso de goteros:

$$D_w = C_2 (V_w)^{0,22} \left(\frac{K_s}{q} \right)^{-0,17} \quad (7.7)$$

donde: D_w , es el diámetro mojado bajo la superficie del terreno (m); V_w , es el volumen de agua aplicada (l); K_s , es la conductividad hidráulica saturada del suelo (ms^{-1}); q , es el caudal del gotero (lh^{-1}); y C_2 , es el coeficiente empírico, 0,031 para las unidades expuestas.

El uso de modelos mecanicistas, recurriendo a las formas bidimensionales y tridimensionales de la ecuación de Richards, dan una buena estimación, pero requieren el conocimiento de las curvas de retención de agua y de la conductividad hidráulica del suelo, con las cuales rara vez se puede contar.

La Tabla (7.3) proporciona información empírica sobre D_w para los goteros más frecuentes, con caudales de 4 lh^{-1} , y para riegos alternos (un día, si y otro, no), es decir, aplicando volúmenes generalmente superiores a los normales en riegos diarios. La utilización de los valores de la tabla exige que la naturaleza del suelo se conozca.

Tabla 7.3. Diámetros mojados (D_w) para un gotero de 4 lh^{-1} .

Profundidad de la zona radicular y textura ¹ del suelo	Diámetro mojado (m)		
	Grado de estratificación del suelo ²		
	Homogéneo	Estratificado	En capas
0,75 m:			
Ligera	0,5	0,8	1,1
Media	0,9	1,2	1,5
Fina	1,1	1,5	1,8
1,5 m:			
Ligera	0,8	1,4	1,8
Media	1,2	2,1	2,7
Fina	1,5	2,0	2,4

¹Ligera, incluye arenas gruesas a medias; media, se refiere a suelos franco-arenosos a francos; fina, incluye desde suelos arcillo-arenosos a arcillosos. Los suelos que se agrietan deben ser tratados como los de textura ligera a media.

² Se conoce como estratificados, los suelos con texturas relativamente uniformes, presentando alguna compactación u orientación de las partículas que les confiere una conductividad hidráulica horizontal superior a la vertical. Los suelos en capas son aquellos en los que existe una alteración de la textura y la conductividad hidráulica horizontal es marcadamente superior a la vertical.

Fuente: Keller y Bliesner (1990).

Una vez que se haya establecido el modelo de humedecimiento deseado, se determinan los espaciamientos entre tuberías teniendo en cuenta el espaciamiento entre las líneas de cultivo y entre los emisores en la tubería, sean goteros o microaspersores. En los cultivos en línea, el espaciamiento entre ramales portagoteros corresponde a una tubería por una línea o por un par de líneas; eventualmente, a dos tuberías por caballón, si este es ancho. En frutales de pequeño porte, cultivos arbustivos y viña, se adopta generalmente un ramal portagoteros por línea de plantas. En frutales adultos, la elección es, generalmente, entre uno o dos ramales portagoteros por línea de árboles; un ramal en cultivos de menor exigencia hídrica, como los olivos, y dos ramales en frutales de gran exigencia hídrica por planta. En el caso de microaspersores, se trata generalmente de escoger entre un emisor a la mitad de la distancia entre plantas o uno a cada lado del árbol; el espaciamiento en la tubería se determina por la distancia entre árboles y teniendo en cuenta el diámetro mojado por los microaspersores.

Con el objeto de asegurar un apropiado contacto entre bulbos adyacentes, el espaciamiento entre goteros a lo largo de la tubería, S_e (m), debe ser:

$$S_e = 0,8 D_w \quad (7.8)$$

donde: D_w , se calcula mediante la Ec. (7.7), o viene dada por la Tabla (7.3).

Los ramales portagoteros, frecuentemente, se suspenden por encima del suelo en las viñas y en frutales en espaldera, pero se colocan sobre el terreno en parcelas de frutales cuyos árboles desarrollan las copas normalmente.

En el caso de los cultivos en línea, los ramales portagoteros se colocan tanto sobre el terreno como bajo la superficie del suelo (enterrados) (riego subsuperficial), por debajo de la profundidad de laboreo (20 a 50 cm) o, en el caso de tubos plásticos con orificios perforados,

que se usan solo una vez, a 4-10 cm; estas pequeñas profundidades son buenas para apoyar la germinación y el arraigo de las plántulas.

7.6.2 Uniformidad

La uniformidad de emisión, EU (%), es útil como indicador de la previsión de la variación de los caudales de los emisores a lo largo de un ramal portagoteros, o de un sector operando simultáneamente:

$$EU = 100 \left(1,0 - 1,27 \frac{C_v}{\sqrt{N}} \right) \frac{q_n}{q_a} \quad (7.9)$$

donde: C_v , es el coeficiente de variación de fabricación del emisor (Ec. 7.6); N , es el número de emisores por planta (>1 , en el caso de goteros y, en algunos casos, de microaspersores en los frutales y cultivos arbustivos; $= 1$, en el caso de los cultivos en línea, aunque un gotero riegue varias plantas); q_n , es el caudal mínimo (lh^{-1}), calculado (Ec. 7.4) para la presión mínima prevista en el ramal portagoteros o en el sector; y q_a , es el caudal medio proyectado (lh^{-1}).

La razón q_n/q_a expresa las consecuencias de la variación de presión en el ramal portagoteros o en el sector en términos de variación de los caudales, mientras que el factor $(1 - 1,27C_v/\sqrt{N})$ traduce los efectos probables de la variabilidad de fabricación en la aplicación a cada planta. Los valores de EU aconsejados se muestran en la Tabla (7.4).

Tabla 7.4. Intervalos aconsejables para la uniformidad de emisión, EU (%).

Tipo de emisor	Espaciamiento (m)	Topografía	Pendiente (%)	EU (%)
Emisor en punto, cultivos perennes	> 4	Uniforme u ondulada	< 2	90 a 95
			> 2	85 a 90
Emisor en punto, cultivos anuales y semi-permanentes	< 4	Uniforme u ondulada	< 2	85 a 90
			> 2	80 a 90
Emisores en línea continua	cualquiera	Uniforme u ondulada	< 2	80 a 90
			> 2	70 a 85

Fuentes: EP 405.1., ASAE (2003).

Algunos autores prefieren usar como indicador la variabilidad, o coeficiente de variación, de los caudales, V_q :

$$V_q = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - q_a)^2}{n-1} \right]^{1/2} / q_a \quad (7.10)$$

donde: q_i , caudales (lh^{-1}) observados (en evaluación de campo) o calculados en función de la presión en varios puntos del ramal portagotero o del sector; q_a , es el caudal medio (lh^{-1}); y n , es el número de observaciones.

V_q es la resultante de diferentes causas: fabricación, variación de la presión y obstrucción, por lo que:

$$V_q = \frac{\left(V_p^2 + V_k^2 + X^2 V_h^2 \right)^{1/2}}{N^{1/2}} \quad (7.11)$$

donde: N , es el número de emisores por planta; V_p , es el coeficiente de variación relativo a la obstrucción de los emisores; V_k , es el coeficiente de variación del coeficiente K_e (Ec. 7.4); X , es el exponente característico (Ec. 7.4); y V_h , es el coeficiente de variación relativo a la presión.

La uniformidad de distribución DU (Ec. 4.1) puede utilizarse en riego localizado para evaluar los sistemas trabajando como alternativa, o conjuntamente con V_q , en el caso que la EU no se aplique.

En la Tabla (7.5), se muestran cifras de costes y eficiencias de aplicación esperadas para los principales grupos de sistemas de riego localizado.

Tabla 7.5. Costes y eficiencias de diferentes tipos de sistemas de riego localizado.

Tipo de sistema	Costes iniciales €/ha	Duración, vida útil (años)	Coste anual de mantenimiento (% del coste)	Eficiencia de aplicación (%)
<i>Frutales</i>				
Goteros y micro-aspersión	1.500-3.500	10-20	3	75-90
los "Bubbler"	2.500-4.000	15	2	60-85
<i>Cultivos en línea</i>				
Goteros en ramales	2.000-5.000	10-20	3	65-90
Tubos de emisores en línea continua y riego subsuperficial	1.650-3.000	1-20	20	60-80

Fuente: Keller (1992).

7.6.3. Dosis y capacidad de los sistemas

Los sistemas de riego localizado se diseñan con la capacidad adecuada para satisfacer las necesidades de riego de los cultivos, el lavado de las sales, la falta de uniformidad de los sistemas y las necesidades creadas por los tiempos de parada del funcionamiento. Se diseñan en base a las necesidades de agua del mes punta, debiendo recurrir a los coeficientes de cultivo basales (Epígrafe 2.4) para tener en cuenta a los componentes suelo y cultivo en la evapotranspiración del cultivo. Una vez determinadas las necesidades netas de agua de los cultivos, I_n (mmdía^{-1}), este valor se ajusta con los restantes requerimientos para calcular la capacidad de los sistemas.

Cuando la salinidad del agua se considera de baja a moderada, las necesidades de lavado son normalmente satisfechas mediante el riego inicial o final, lo que no tiene repercusión alguna en la capacidad de los sistemas. Sin embargo, para niveles de salinidad altos, habrá que aplicar continuamente una fracción de lavado del 5 al 20%. Para considerar la

inevitable percolación, que es mayor cuanto más baja sea la uniformidad (EU), se tiene en cuenta un coeficiente de transmisión, T_r (Keller y Bliesner, 1990). En consecuencia, la dotación bruta a aplicar, D (mmdía⁻¹), se calculará mediante la Ec. (7.12):

$$D = \frac{I_n}{(EU/100)(1-LF)} T_r \quad (7.12)$$

donde: I_n , son las necesidades de agua diarias netas (mmdía⁻¹); EU, es la uniformidad de emisión (%); LF, es la fracción de lavado (0,05-0,20); T_r , es el coeficiente de transmisión (1,0-1,15), menor en el caso de los suelos pesados y mayor en el de los suelos ligeros.

Dado que, en el riego localizado, se recurre a aportes de agua con alta frecuencia, y no se riega bien toda la zona radicular, se ha de considerar, también, un añadido para el caso de haberse producido un tiempo de parada del sistema, que supone, generalmente, aumentar la dosis a aplicar un 25 %. En este caso, la capacidad del sistema, Q (m³ h⁻¹), viene dada por:

$$Q = 10 \frac{24}{1-DT/100} D A \quad (7.13)$$

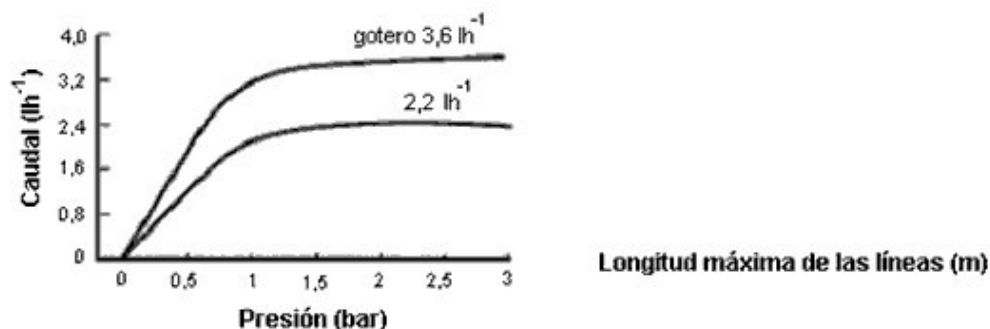
donde: DT, es el añadido para suplir las paradas del sistema (%); D, es la dosis bruta diaria (mmdía⁻¹); y A, es la superficie a regar (ha).

Conocido el caudal (Q), se definen los tiempos de riego para cada cultivo o parcela, generalmente en correspondencia con un sector, a partir de las respectivas necesidades diarias y de los caudales de los emisores escogidos. Los cálculos se realizan diariamente por tratarse de riegos frecuentes.

7.6.4. Diseño hidráulico

El dimensionamiento hidráulico de las tuberías, tuberías portarramales con gotero y ramales portagoteros exige mucha atención, puesto que las cargas hidráulicas son pequeñas (generalmente, de 7 a 15 m), en numerosas ocasiones, del mismo orden de valor, o superiores, a las variaciones de cota en el sistema. Las bases y metodologías de cálculo se exponen y desarrollan bien en varios manuales (Keller y Bliesner, 1990; Burt y Styles, 1994; Tiercelin y Vidal, 2006).

En general, los fabricantes proporcionan tablas o gráficos con las relaciones presión-caudal, para los goteros, y presión-caudal-diámetro mojado, para los microaspersores, lo que permite estimar los parámetros de la ecuación característica de los emisores (Ec. 7.4), así como obtener las ecuaciones que relacionan la presión con el diámetro mojado. Pueden, igualmente, suministrarse en los catálogos otras características relevantes, incluyendo las relacionadas con la regulación de los "bubblers" o con la longitud máxima de las tuberías para que la pérdida de carga se mantenga en límites aceptables cuando los emisores están incorporados en los ramales portagoteros a diversos espaciamientos (Fig. 7.44). Como complemento de los datos de los catálogos, es posible encontrar, igualmente, información valiosa en los informes de los bancos de ensayos.



Caudal (lh ⁻¹)	Espaciamiento (cm)	16 mm					20 mm				
		1,0	1,4	2,0	2,4	3,0	1,0	1,4	2,0	2,4	3,0
		(bar)					(bar)				
2,2	20	43	63	80	89	99	57	83	105	116	130
	30	61	89	113	125	140	79	116	148	164	182
	40	76	112	144	159	177	99	146	186	206	230
	50	91	134	171	190	212	118	174	222	246	275
	60	104	154	197	218	244	135	199	255	282	316
	70	118	173	221	245	274	151	223	286	316	355
	80	130	191	245	271	303	166	246	315	350	391
	100	152	225	288	319	357	195	290	371	411	460

Fuente: Heliflex (2003).

Figura 7.44. Curva caudal-presión para goteros autocompensantes (por encima de 1 bar, en el caso de 2,2 lh⁻¹) y tabla de longitudes máximas de ramales portagoteros, con el mismo gotero incorporado, en función del espaciamiento, de la presión y del diámetro del ramal.

El recurrir a modelos está justificado por la complejidad de las redes, variedad de equipos y por la necesidad de realizar cálculos reiterativos para conseguir encontrar soluciones adecuadas para las bajas presiones utilizadas y para la uniformidad de los caudales aplicados. Además, los modelos permiten respetar fácilmente los criterios de uniformidad y eficiencia (Bralts *et al.*, 1990; Kang y Nishiyama, 1995; 1996a,b). Pedras y Pereira (2002) desarrollaron el modelo AVALOC, que permite el cálculo iterativo en los sistemas de riego localizado respetando variaciones mínimas de presión y caudal para satisfacer objetivos de uniformidad (Fig. 7.45). Posteriormente, este modelo evolucionó a un sistema de apoyo a la decisión, el modelo MIRRIG (Fig. 7.45) (Pedras, 2003; Pedras y Pereira, 2006), que permite un mejor apoyo al diseño, por tomar en consideración criterios de decisión económicos y ambientales, entre otros.

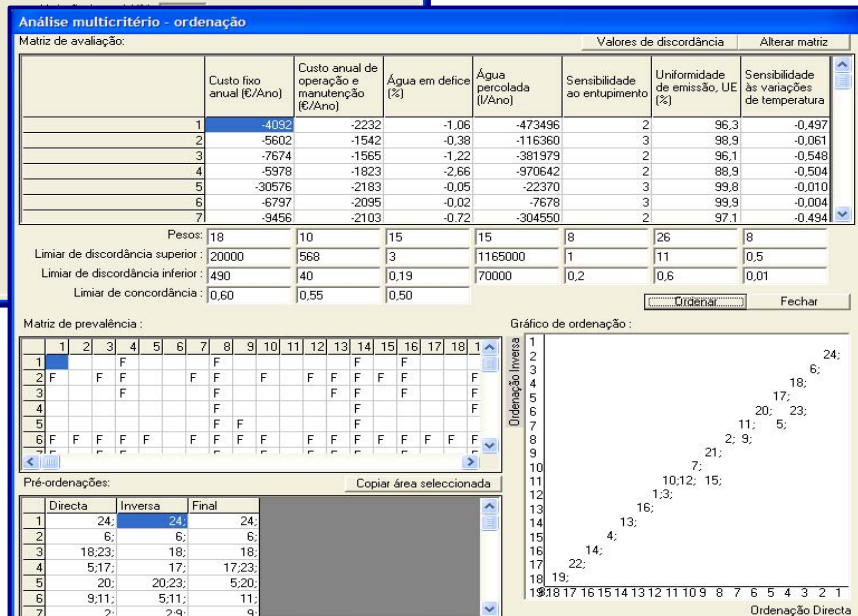
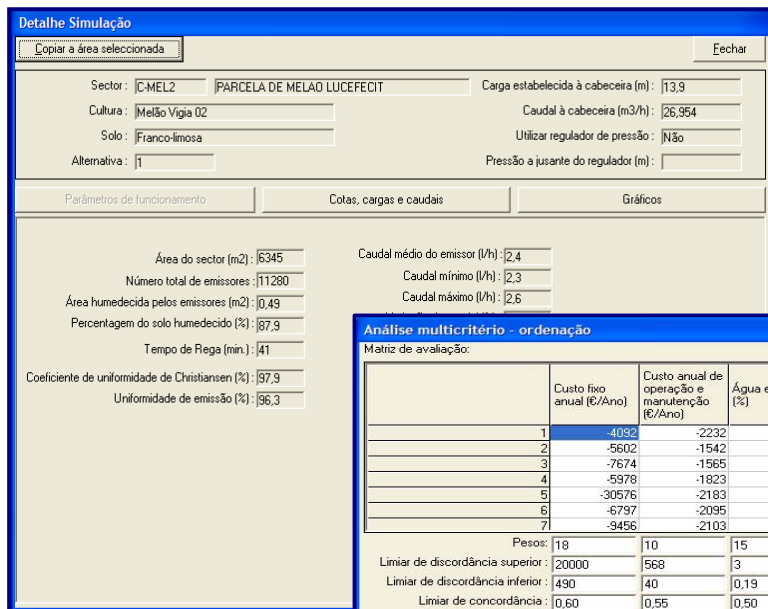
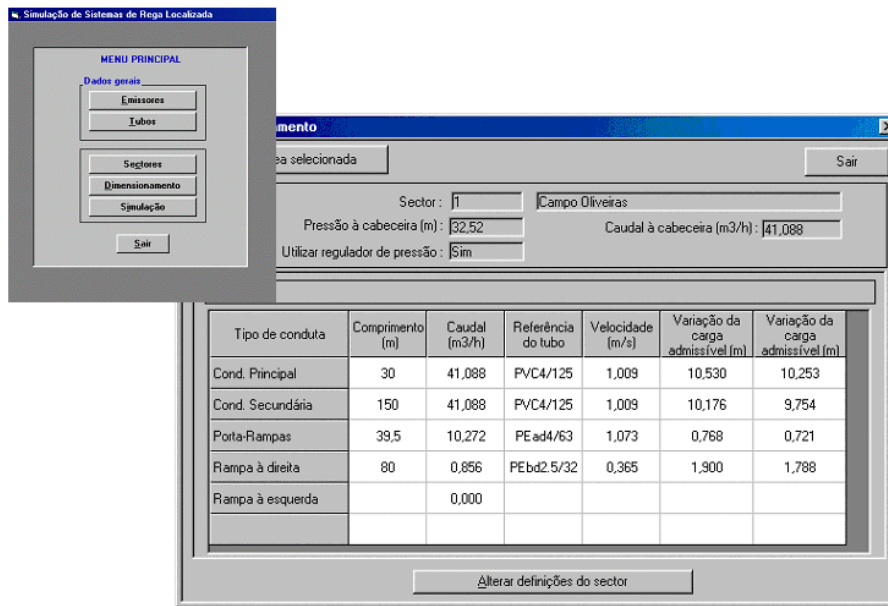


Figura 7.45. Menú principal y ventana de resultados del modelo AVALOC (parte superior). Ejemplo de resultados de diseño de un sector de riego por goteo con el Sistema de Apoyo a Decisión MIRRIG: superior, indicadores relativos a una alternativa de diseño; inferior, ordenación de las alternativas considerando criterios técnicos y económicos.

El proyecto debe considerar los requisitos de regulación de caudales y presiones recurriendo a las válvulas apropiadas, colocadas estratégicamente en la red, así como a los dispositivos de control automático de los suministros a los diversos sectores que componen el

sistema. Es de reseñar que la regulación de la presión puede efectuarse mediante el uso de emisores autocompensantes, y con controladores en el inicio de los ramales portagoteros, de las tuberías portarramales con goteros y de las tuberías que abastecen a los sectores. Un buen diseño es un requisito exigido para el buen funcionamiento y obtener buenos rendimientos (Fig. 7.46).



Fuente: TTape (2003).

Figura 7.46. Uniformidad del riego y del cultivo en riego subsuperficial en Ribatejo (Portugal).

Anexo 1

Unidades y sus símbolos

TEMPERATURA

Unidad patrón: grados Celsius (°C)

Grados Fahrenheit (°F)	(°C) = (°F-32) 5/9
Grados Kelvin (K)	(K) = (°C) + 273,16

PRESIÓN

Unidad patrón: kilopascal (kPa)

Milibar (mbar)	1 mbar = 0,1 kPa
Bar	1 bar = 100 kPa
Centímetro de agua (cm)	1 cm de agua = 0,09807 kPa
Milímetro de mercurio (mmHg)	1 mmHg = 0,1333 kPa
Atmósfera (atm)	1 atm = 101,325 kPa
“Pound per square inch” (psi)	1 psi = 6,896 kPa

VELOCIDAD DEL VIENTO

Unidad patrón: metro por segundo (ms⁻¹)

Kilómetro por día (kmdía ⁻¹)	1 kmdía ⁻¹ = 0,01157 ms ⁻¹
Kilómetro por hora (kmh ⁻¹)	1 kmh ⁻¹ = 0,2778 ms ⁻¹
Milla náutica por hora (nó)	1 nó = 0,5144 ms ⁻¹
“Foot per second” (ft s ⁻¹)	1 ft s ⁻¹ = 0,3048 ms ⁻¹

RESISTENCIA AL TRANSPORTE DE CALOR Y VAPOR DE AGUA

Unidad patrón: segundo por metro (sm⁻¹)

“Second per foot” (sft ⁻¹)	1 sft ⁻¹ = 3,2808 sm ⁻¹
--	---

RADIACIÓN SOLAR

Unidad patrón: megajulio por metro cuadrado y por día ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$)

Evaporación equivalente (mmdía^{-1})	$1 \text{ mmdía}^{-1} = 2,45 \text{ MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$
Julio por centímetro cuadrado y día ($\text{Jcm}^{-2}\text{día}^{-1}$)	$1 \text{ J cm}^{-2}\text{día}^{-1} = 0,01 \text{ MJ m}^{-2}\text{día}^{-1}$
Caloría por centímetro cuadrado y día ($\text{calcm}^{-2}\text{día}^{-1}$)	$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J} = 4,1868 \cdot 10^{-6} \text{ MJ}$ $1 \text{ calcm}^{-2}\text{día}^{-1} = 4,1868 \cdot 10^{-2} \text{ MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$
Watt por metro cuadrado (Wm^{-2})	$1 \text{ W} = 1 \text{ Js}^{-1}$ $1 \text{ Wm}^{-2} = 0,0864 \text{ MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$

EVAPORACIÓN Y EVAPOTRANSPIRACIÓN

Unidad patrón: milímetro por día (mmdía^{-1})

Metro cúbico por hectárea y por día ($\text{m}^3\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1}$)	$1 \text{ m}^3\text{ha}^{-1}\text{día}^{-1} = 0,1 \text{ mmdía}^{-1}$
Litros por segundo y por hectárea ($\text{ls}^{-1}\text{ha}^{-1}$)	$1 \text{ ls}^{-1}\text{ha}^{-1} = 8,640 \text{ mmdía}^{-1}$
Radiación equivalente, en megajulios por metro cuadrado y por día ($\text{MJm}^{-2}\text{día}^{-1}$)	$1 \text{ MJm}^{-2}\text{día}^{-1} = 0,408 \text{ mmdía}^{-1}$

PREFIJOS

Las unidades se pueden utilizar como tales o con sus múltiplos y submúltiplos identificados mediante los siguientes prefijos:

Tera (T)	corresponde a	10^{12}	Centi (c)	10^{-2}
Giga (G)		10^9	Mili (m)	10^{-3}
Mega (M)		10^6	Micro (μ)	10^{-6}
Kilo (k)		10^3	Nano (n)	10^{-9}
Hecto (h)		10^2	Pico (p)	10^{-12}
Deca (da)		10^1	Femto (f)	10^{-15}
Deci (d)		10^{-1}	Ato (a)	10^{-18}

Anexo 2

Algunas características físicas del suelo y definiciones en relación con el agua del suelo

Características físicas del suelo que influyen en su comportamiento como almacenador de agua

Las características físicas del suelo definen las dimensiones y el volumen de poros del suelo, determinantes para la retención y movimiento del agua en el mismo. Tales características difieren, horizonte a horizonte, a lo largo del perfil del suelo. Las principales características del suelo, que definen su capacidad de retención de agua y su comportamiento como medio poroso por donde el agua circula, se exponen a continuación.

Textura. Expresa las proporciones relativas de las distintas partículas minerales inferiores a 2 mm, agrupadas por claves de tamaños, en fracciones granulométricas, tras la destrucción de los agregados. La textura es una expresión simétrica de las características de cada horizonte que dependen de la proporción de los distintos tamaños de partículas. Los suelos, texturalmente, se clasifican según el diagrama de la Figura A.2.1, hecho de acuerdo a las dimensiones de las partículas dadas por FAO:

- Arcilla, < 0,002 mm
- Arena fina, 0,063 – 0,200 mm
- Limo, 0,002 – 0,063 mm
- Arena gruesa, 0,200 – 2,00 mm

La correspondencia entre los términos ingleses y castellanos es como sigue:

- Arenoso – “Sand”
- Franco-arenoso – “Sandy loam”
- Areno-arcilloso – “Sandy clay”
- Franco-limoso – “Silt loam”
- Franco-arcillo-limoso – “Silty clay loam”
- Arcilloso – “Clay”
- Arenoso-franco – “Loamy sand”
- Arenoso-franco-arcilloso – “Sandy clay loam”
- Franco – “Loam”
- Limoso – “Silt”
- Franco-arcilloso – “Silty clay”

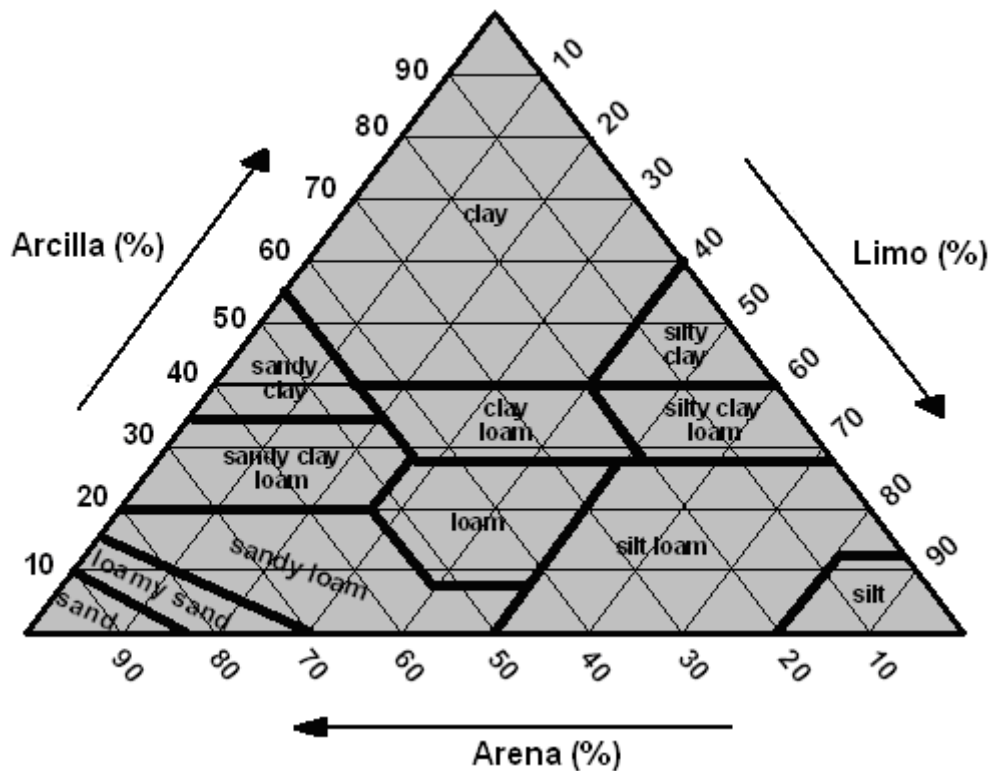


Figura A.2.1. Triángulo de la clasificación de las clases texturales.

Cuanto mayores son las dimensiones de las partículas del suelo, menor es la capacidad de retención de agua y, por el contrario, mayor es la conductividad hidráulica. En tales suelos, es mayor la cantidad de agua que puede ser almacenada bajo forma de agua gravitacional, o libre, es decir, agua que no es retenida por las partículas del suelo, mientras que la cantidad total de agua almacenable es mayor en los suelos en que la fracción dominante es la arcilla. Estos suelos se denominan suelos finos o pesados, mientras que los suelos donde dominan las partículas de dimensiones mayores reciben el nombre de suelos groseros o ligeros.

Estructura. Describe la forma de agregarse las partículas individuales del suelo en unidades de mayor tamaño (agregados) y el espacio de huecos asociado a ella. Los agregados del suelo son fundamentales para la circulación del agua y del aire, el crecimiento del sistema radicular y el desarrollo y multiplicación de los microorganismos.

La estructura más favorable es la grumosa fina, definida por pequeños agregados que dan lugar a espacios porosos abundantes en número y que, debido a las características de los materiales agregados (minerales de arcilla y materia orgánica), son más estables, resistiendo mejor las acciones físicas del agua de riego, de la lluvia y de los aperos de labranza. En el extremo opuesto, se encuentra la estructura columnar maciza, muy poco estable y propia de los suelos que se agrietan.

Materia orgánica. Actúa, esencialmente, como agente cementador de las partículas del suelo. Cuando abunda en el suelo, favorece la formación de agregados estables en el suelo, con el consiguiente aumento de su capacidad para retener el agua y la infiltración de ésta. Cuando es escasa, o falta, la estructura es pobre y débil, y los suelos tienden a encostrarse, con la consiguiente reducción de la tasa de infiltración, e incluso a agrietarse.

Densidad aparente (ρ_b). Se define como la masa por unidad de volumen. Viene dada por la relación entre la masa de suelo seco y el correspondiente volumen total del suelo; se expresa en Mgm^{-3} o gcm^{-3} . Permite inferir las dificultades para la emergencia de las plántulas, el enraizamiento y la circulación del agua y el aire. Generalmente, varía entre $1,9 \text{ Mgm}^{-3}$ y $1,1 \text{ Mgm}^{-3}$, pudiendo ser inferiores en suelos de origen volcánicos recientes. Cuando los suelos se encuentran muy compactados, la densidad aparente alcanza valores de $1,6$ a $1,7 \text{ Mgm}^{-3}$, y el crecimiento radicular se ve afectado, inhibiéndose a densidades $> 1,8 \text{ Mgm}^{-3}$. La infiltración y el drejane se ven dificultados cuando las densidades son $> 1,65 \text{ Mgm}^{-3}$.

Porosidad total (n). El volumen de las fases líquida y gaseosa, o el de esta última si el suelo está seco, definen el espacio de huecos. La relación entre el volumen de huecos y el volumen total se define como porosidad (que incluye los poros y otro tipo de huecos). Puede calcularse a partir de los valores de las densidades real y aparente:

$$n = \frac{(\rho_p - \rho_b)}{\rho_p}$$

donde: n , es la porosidad total del suelo [$\text{m}^3(\text{poros})/\text{m}^3(\text{volumen del suelo})$]; ρ_p , es la densidad real del suelo ($2,65 \text{ Mgm}^{-3}$); y ρ_b , es la densidad aparente (Mgm^{-3}). Tanto la textura como la estructura, conjuntamente con la compactación del suelo, son determinantes de los valores de ρ_b y, en consecuencia, de n . Los suelos arenosos, generalmente, tienen una porosidad total menor (mayor número de macroporos) y una mayor densidad aparente que los suelos pesados, o de textura fina.

El agua del suelo.

El agua del suelo puede definirse por medio de los contenidos de humedad y de los potenciales del agua. El potencial del agua del suelo es la cantidad de trabajo necesario por unidad de cantidad de agua pura, que debe realizarse por fuerzas externas al sistema, para transferir reversible e isotérmicamente una cantidad infinitesimal del agua desde el estado de referencia a la fase líquida del suelo en el punto considerado. En otras palabras, la transferencia de agua desde el estado de referencia a la fase líquida de un suelo de matriz rígida suele dividirse en una serie de etapas o subestados de referencia, que se alcanzan de forma reversible e isotérmicamente. Cada paso representa una variación en el potencial y puede considerarse como componente del potencial total.

Las condiciones que definen el estado de referencia del agua son: el agua pura (sin sales disueltas), libre (de las fuerzas de adsorción), a una temperatura y elevación especificadas, y expuesta a la presión atmosférica. El potencial del agua en el estado de referencia es cero.

Si la cantidad especificada es un volumen, el potencial se expresa como una presión (Pascal, Pa); es energía / volumen, $\text{Jm}^{-3} = \text{Nmm}^{-3} = \text{Nm}^{-2} = \text{Pa}$ (Tabla A.2). Si la cantidad especificada es un peso, el potencial se expresa como una altura de agua (m); energía / peso, $\text{JN}^{-1} = \text{NmN}^{-1} = \text{m}$. Si la cantidad especificada es masa, el potencial se expresa normalmente en Jkg^{-1} ; energía / masa, Jkg^{-1} .

La intensidad con la que el agua es retenida en un capilar puede, también, expresarse como diferencia entre la energía libre que posee el agua en el capilar y en un recipiente con interfase aire – agua – planta, pudiendo expresar esta diferencia en centímetros de altura de agua. Para evitar escribir números de muchas cifras, se emplea el logaritmo de este número, que es llamado pF por su similitud con el concepto químico de pH. Aunque, en la actualidad, el concepto de pF está prácticamente en desuso, habiendo sido desplazado en el estudio de las relaciones energéticas agua – suelo por el de potencial mátrico (matricial), aún se puede ver en la literatura como expresión del potencial matricial.

Tabla A.2. Unidades de potencial del agua del suelo

Energía / volumen	Factor de conversión (1/ ρ_w g)	Energía / peso
- 10 kPa = - 10000 Pa - 1/3 bar = - 33,3 kPa = -33,3 10^3 Pa - 15 bar = - 1,5 MPa = - 1,5 10^6 Pa	Multiplicar por $0.1020 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ s}^2 \text{ kg}^{-1}$	- 1,0197 m pF 2,0 - 3,3991 m pF 2,5 - 152,96 m pF 4,2
1 bar = 10^5 Pa $\rho_w \cong 1.000 \text{ kg m}^{-3}$	$g = 9.80665 \text{ ms}^{-2}$	

Son esenciales las siguientes definiciones, todas relacionadas con el contenido de humedad del suelo:

- Contenido mátrico de agua. Cantidad de masa de agua que se halla en cada posición de un suelo en un momento determinado. Se expresa como sigue:

$$\theta_p = \frac{M_w}{M_s}$$

donde: M_w , es la masa de agua (kg); y M_s , es la masa de suelo seco (kg).

- Contenido volumétrico de agua. Cantidad de volumen de agua que se halla en cada posición de un suelo en un momento determinado. Se expresa como sigue:

$$\theta_v = \theta = \frac{V_w}{V_T}$$

donde: V_w , es el volumen de agua (m^3); y V_T , es el volumen total del suelo (m^3). Ambos contenidos de agua, mátrico y volumétrico, se relacionan mediante la densidad aparente (ρ_a): $\theta_v = \rho_a \theta_m$.

- Humedad de saturación. Se expresa como θ_s ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$) y corresponde a la cantidad de agua retenida por el suelo cuando todo el volumen poroso está ocupado por el elemento líquido; corresponde, aproximadamente, a la porosidad total.
- Capacidad de campo (θ_{FC} , $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$). La cantidad de agua que queda en el suelo después de que un exceso de agua ha drenado y de que ha disminuído de forma importante el movimiento en profundidad, el cuál tiene lugar entre 2 y 3 días después de una lluvia o del riego en un suelo con textura y estructura uniforme. Se estima por el contenido de agua en el suelo que se corresponde con un potencial matricial de - 10 kPa (pF 2,0) a - 33 kPa (pF = 2,5 ó 1/3 bar). Este contenido de

humedad depende fundamentalmente de la textura y el contenido de materia orgánica.

- Punto de marchitamiento permanente. Se estima por el contenido de agua en el suelo a -1.500 kPa ($pF = 4,2$) de potencial mátrico. Es un valor característico y constante para un suelo dado. Por debajo de este límite, se considera que las plantas no pueden extraer agua. No se puede utilizar como límite inferior de extracción desde un punto de vista absoluto, ya que, posiblemente, existan plantas que extraen agua del suelo por debajo de este umbral. Al igual que el contenido de humedad del suelo en la capacidad de campo, depende de la textura y de otras propiedades del suelo: densidad aparente y materia orgánica.

BIBLIOGRAFÍA

8.1. Referencias principales

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration. Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 56, FAO, Rome, Italy. (<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>).
- Ayers, R.S., Westcot, D.W., 1985. Water Quality for Agriculture. Rev.1. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 29, FAO, Rome, Italy.
- Domínguez, A., de Juan, J.A. 2008. Agricultural water management in Castilla – La Mancha (Spain). In: M.L. Sorensen (ed.), Agric. Water Manag. Res. Trends. Nova Science Publishers, Inc., New York, NY, USA. pp. 69-128.
- Drogger, P., Kite, G., Murray-Rust, H. 2000. Use of simulation models to evaluate irrigation performance including water productivity, risk and system analysis. Irrig. Sci.19: 139-145.
- Doorenbos, J., Kassam, A.H., 1979. Yield Response to Water. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 33, FAO, Rome, Italy.
- Hartkamp, A. D., White, J. W., Hoogenboom, G. 1999. Interfacing geographical information systems with agronomic modeling: A review. Agr. J. 91:761-772.
- Jensen M. E. (ed.), 1980. Design and Operation of Farm Irrigation Systems, ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Jensen, M.E., Burman, R.D., Allen, R.G. (eds.), 1990. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices N° 70, Am. Soc. Civil Engrs., New York, NY, USA.
- Keller, J., Bliesner, R.D., 1990. Sprinkle and Trickle Irrigation. Van Nostrand Reinhold, New York, NY, USA.
- Lorite, I.J., Mateos, L., Fereres, E. 2004a. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. I. Model and general assessment of an irrigation scheme. Irrig. Sci.23: 77-84.
- Lorite, I.J., Mateos, L., Fereres, E. 2004b. Evaluating irrigation performance in a Mediterranean environment. II. Variability among crops and farmers. Irrig. Sci. 23: 85-97.
- Lorite, I.J., Mateos, L., Fereres, E. 2005. Modelos para la evaluación del uso y la productividad del agua de riego. En: F. Martín de Santa Olalla, P. López Fuster, A. Calera (coords.). Agua y Agricultura. Mundi – Prensa, pp. 487-519.
- Martin, D.L., Gilley, J.R., 1993. Irrigation Water Requirements. In: SCS National Engineering Handbook, Chapter 2. Soil Conservation Service, Washington D.C., WA, USA.
- Mayer, R., 1945. A Técnica do Regadio. Livraria Sá da Costa, Lisboa, Portugal.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H., 1990. Principles of Environmental Physics. 2nd ed., Edward Arnold, London, UK.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Ait Kadi, M., Kabat, P. (eds.), 1992. Crop Water Models. ICID Bulletin 41 (Special Issue).
- Pereira, L.S., van den Broek, B.J., Kabat, P., Allen, R.G. (eds.), 1995. Crop-Water Simulation Models in Practice. Wageningen Press, Wageningen, The Netherlands.
- Pereira, L.S., Feddes, R.A., Gilley, J.R., Lesaffre, B. (eds.), 1996. Sustainability of Irrigated Agriculture, NATO ASI Series N° 312, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002a. Irrigation management under water scarcity. Agric. Water Manag. 57: 175-206.
- Pereira, L.S., Cordery, I., Iacovides, I., 2002b. Coping with Water Scarcity. UNESCO IHP VI, Technical Documents in Hydrology No. 58, UNESCO, Paris, France. (<http://unesdoc.unesco.org/images/0012/001278/127846e.pdf>).
- Rhoades, J.D., Kandiah, A., Mashali, A.M., 1992. The Use of Saline Water for Crop Production. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 48, FAO, Rome, Italy.
- Rieul, L., Ruelle, P., 2003. Irrigation – Guide Pratique. Cemagref Editions, Antony, France.

- Smith, M., Pereira, L.S., Beregena, J., Itier, B., Goussard, J., Ragab, R., Tollefson, L., van Hoffwegen, P. (eds.), 1996 Irrigation Scheduling: From Theory to Practice. FAO Water Report 8, ICID and FAO, Rome, Italy.
- Tarjuelo, J. M^a., 1999. El Riego por Aspersión y su Tecnología (2^a ed.), Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Tiercelin, J.R. (ed.), 1998. Traité d'Irrigation. Lavoisier, Technique & Documentation, Paris, France.
- Utset Suastegui, A. 2008. Introducing modelling tools to support water-management decision-making under climate change conditions : A spanish experience. In : M.L. Sorensen (ed.), Agric. Water Manag. Res. Trends. Nova Science Publisher, Inc., New York, NY, USA. pp. 9-67.
- van Lier, H., Pereira, L.S., Steiner, F.R. (eds.), 1999. CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1987. Surface Irrigation, Theory and Practice. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.

8.2. Evapotranspiración

- Aboukhaled, A., Alfaro, A., Smith, M., 1982. Lysimeters. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 39, FAO, Rome, Italy.
- Adaixo, M., 1997. Validação de Metodologias de Cálculo da Evapotranspiração de Referência. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., Burman, R.D., 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81: 650-662.
- Allen, R.G., Smith, M., Perrier, A., Pereira, L.S., 1994a. An update for the definition of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43 (2): 1-34.
- Allen, R.G., Smith, M., Pereira, L.S., Perrier, A., 1994b. An update for the calculation of reference evapotranspiration. ICID Bulletin 43 (2): 35-92.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Businger, J.A., Fritschen, L.J., Jensen, M.E., Quinn, F.H., 1996. Evaporation and Transpiration. In: Wootton *et al.* (eds.). Hydrology Handbook (2nd ed.), ASCE, 125-252. New York, NY, USA.
- Allen, R.G., Pruitt, W.O., Raes, D., Smith, M., Pereira L.S., 2003a. Predicting evaporation from bare soil and the crop coefficient for the initial period using common soils information. J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.
- Allen, R.G., Pereira L.S., Smith, M., Raes, D., Wright, J.L., 2003b. The FAO-56 dual crop coefficient method for predicting evaporation from soil and application extensions. J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.
- Alves, I., Perrier, A., Pereira, L.S., 1998. Aerodynamic and surface resistances of complete cover crops: How good is the “big leaf” approach? Trans. ASAE 41: 345-351.
- Alves, I., Pereira, L.S., 2000. Modelling surface resistance from climatic variables. Agric. Water Manag. 42: 371-385.
- Alves, I., Pereira, L.S., 2000. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. Irrig. Sci. 19: 101-106.
- Alves, I., Fontes, J.C., Pereira, L.S., 2000a. Evapotranspiration estimation from infrared surface temperature. I: The performance of the flux equation. Trans. ASAE 43: 591-598.

- Alves, I., Fontes, J.C., Pereira, L.S., 2000b. Evapotranspiration estimation from infrared surface temperature. II: The surface temperature as a wet bulb temperature. *Trans. ASAE* 43: 599-602.
- Baldocchi, D.D., Luxmore, R.J., Hatfield, J.L., 1991. Discerning the forest from the trees: an essay on scaling canopy stomatal conductance. *Agric. and Forest Meteorol.* 54: 197-226.
- Ferreira, M.I., Paço, T.A., Silvestre, J., Silva, R.M. 2008. Evapotranspiration estimates and water stress indicators for irrigation scheduling in woody plants. In: M.L. Sorensen (ed.), *Agr. Water Manag. Res. Trends*. Nova Science Publishers, Inc., New York, NY, USA. pp. 129-170.
- Gavilán, P.D. 2002. La advección de calor sensible en el Valle Medio del Guadalquivir y su influencia en la medida y estimación de la evapotranspiración. Tesis Doctoral. Universidad de Córdoba, Córdoba, España.
- Hanks, R.G., Hill, R.W. 1980. *Modeling Crop Response to Irrigation in Relation to Soils, Climate and Salinity*. Pergamon Press, New York, NY, USA.
- Heinemann, A.B., Hoogenboom, G., de Faria, R.T. 2002. Determination of spatial water requirements at country and regional levels using crop models and GIS. An example for the State of Paraná, Brazil. *Agr. Water Manag.* 52: 177-196.
- Kanemasu, E.T., Stone, L.R., Powers, W.L., 1976. Evapotranspiration model tested for soybean and sorghum. *Agron. J.* 68: 569-572.
- Kite, G.W. 2000. Using a basin-scale hydrological model to estimate crop transpiration and soil evaporation. *J. Hydrol.* 229:59-69.
- Hashmi, M.A., García, L.A., Fontane, G. A. 1994. Spatial estimation of regional crop evapotranspiration. *Trans. ASAE* 38: 1.345-1.351.
- Lecina, S., Martínez-Cob, A., Pérez, P.J., Villalobos, F.J., Baselga, J.J., 2003. Fixed versus variable bulk canopy resistance for reference evapotranspiration estimation using the Penman-Monteith equation under semiarid conditions. *Agric. Water Manag.* 60: 181-198.
- López Urrea, R. 2004. Evapotranspiración de referencia: Métodos de cálculo y de medición directa en una estación lisimétrica en ambiente semiárido. Tesis Doctoral. Universidad de Castilla – La Mancha, Albacete, España.
- Liu, Y., Pereira, L.S., Qian, Y.B., 1999. Computation of the FAO-PM reference evapotranspiration with limited weather data. In: M.S.M., Amin (ed.). *Biological and Agricultural Engineering, Proc. World Engng. Congress, University Putra Malaysia, Serdang vol.2*: 79-85.
- Martínez-Cob, A., 2001., Adequacy of Villalobos method to adjust eddy covariance latent heat flux. *Irrig. Sci.* 20: 175-188.
- Martínez-Cob, A., Tejero-Juste, M., 2004. A wind-based qualitative calibration of the Hargreaves ETo estimation equation in semiarid regions. *Agric. Water Manag.* 64: 251-264.
- Medina, J.L., Camacho, E., Reca, J., López, R., Roldán, J. 1998. Determination and analysis of regional evapotranspiration in southern Spain based on remote sensing and GIS. *Phys. Chem. Earth* 23:427-432.
- Monteith, J.L., 1965. Evaporation and the environment. In: *The State and Movement of Water in Living Organisms (XIXth Symp. Soc. for Exp. Biol., Swansea, UK)*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 205-234.
- Monteith, J.L., 1973. *Principles of Environmental Physics*. Edward Arnold, London, UK.
- Paço, T.A., Conceição, N. 2006. Peach orchard evapotranspiration in a sandy soil: comparison between eddy covariance measurements and estimates by the FAO 56 approach. *Agric. Water Manag.* 85: 305-313.
- Penman, H.L., 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Roy. Soc. London A*193: 120-146.

- Penman, H.L., 1963. Vegetation and Hydrology. Tech. Comm. N° 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, U.K.
- Pereira, L.S., Allen, R.G., 1999. Crop Water Requirements. In: H., van Lier, L.S., Pereira and F.R., Steiner (eds.). CIGR Handbook of Agricultural Engineering, Vol I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 213-262.
- Pereira, L.S., Perrier, A., Allen, R.G., Alves, I., 1999. Evapotranspiration: Review of concepts and future trends. J. Irrig. Drain. Engng. ASCE. 125: 45-51.
- Perrier, A., 1975. Etude de l'évapotranspiration dans les conditions naturelles. III-Évapotranspiration réelle et potentielle des couverts végétaux. Ann. Agron. 26: 229-245
- Perrier, A., 1977. Evapotranspiration et bilan hydrique. La Météorologie 6: 7-16.
- Perrier, A., 1982. Land surface processes: vegetation. In: P.S., Eagleson (ed.). Land Surface Processes in Atmospheric General Circulation Models. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, pp. 395-448.
- Rijtema, P.E., 1965. Analysis of Actual Evapotranspiration. Agric. Res. Rep. No. 69, Centre for Agric. Publ. and Doc., Wageningen, The Netherlands.
- Ritchie, J.T., 1974. Evaluating Irrigation Needs for Southeastern U.S.A. Proc. Irrig. and Drain. Spec. Conf., ASCE, New York, NY, USA, pp. 262-273.
- Ritchie, J.T., Johnson, B.S., 1990. Soil and plant factors affecting evaporation. In: B.A., Stewart, D.R., Nielsen (eds.). Irrigation of Agricultural Crops, Agronomy Series 30. Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA, pp. 363-390.
- Rochette, P., Pattey, E., Desjardins, R.L., Dwyer, L.M., Stewart, D.W., Dube, P.A., 1991. Estimation of maize (*Zea mays* L.) canopy conductance by scaling up leaf stomatal conductance. Agric. and Forest Meteorol. 54: 241-261.
- Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., Machado, T.G., 2000. KCISA, a program to compute averaged crop coefficients. Application to field grown horticultural crops. In: M.I., Ferreira, H.G., Jones (eds.). Proceedings of the Third International Symposium on Irrigation of Horticultural Crops (Estoril, Jun-Jul 1999), Acta Horticulturae N° 537, ISHS, Leuven, Belgium, pp. 535-542.
- Shaw, R.H., Pereira, A.R., 1982. Aerodynamic roughness of a plant canopy. A numerical experiment. Agric. Meteorol. 26: 51-65.
- Slatyer, R.O., McIlroy, I.C., 1961. Evaporation and the principle of its measurement. In: Practical Meteorology, CSIRO (Australia) and UNESCO, Paris, France.
- Smith, M., Allen, R.G., Monteith, J.L., Perrier, A., Pereira, L.S., Segeren, A., 1992. Report of the Expert Consultation on Procedures for Revision of FAO Guidelines for Prediction of Crop Water Requirements. UN-FAO, Rome, Italy.
- Szeicz, G., Long, I.F., 1969. Surface resistance of crop canopies. Water Resour. Res. 5: 622-633.
- Utset, A., Farré, I., Martínez-Cob, A., Cavero, J., 2004. Comparing Penman-Monteith and Priestley-Taylor approaches as reference-evapotranspiration inputs for modeling maize water-use under Mediterranean conditions. Agric. Water Manag. 66: 205-219.
- Villalobos, F.J., Mateos, L., Orgaz, F., Fereres, E. 2002. Fitotecnia. Bases y tecnologías de la producción agrícola. Mundi – Prensa, S. A., Madrid, España.
- Wright, J.L., 1982. New evapotranspiration crop coefficients. Irrig. and Drain. Div., ASCE, 108: 57-74.
- Zapata, N., Martínez-Cob, A., 2001. Estimation of sensible and latent heat flux from natural sparse vegetation surfaces using surface renewal. J. Hydrol. 254: 215-228.
- Zapata, N., Martínez-Cob, A., 2002. Evaluation of the surface renewal method to estimate wheat evapotranspiration. Agric. Water Manag. 55: 141-157.

8.3. Balance hídrico y conducción del riego

- Brufau, P., García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N., 2002. Numerical modelling of basin irrigation with an upwind scheme. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 128: 212-223.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2002. Dinâmica da macroporosidade num solo regado. *Revista de Ciências Agrárias XXV* (3 & 4): 193-205.
- Cameira, M.R., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2003. Monitoring water and NO₃-N in irrigated maize fields in the Sorraia watershed, Portugal. *Agric. Water Manag.* 60: 199-216.
- Campos, A.A., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., Fabião, M.S., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z., Dong, B., 2003. Water Saving in the Yellow River Basin, China. 1. Irrigation Demand Scheduling. *Agricultural Engineering International Vol. V.* (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Dane, J.H., Topp, G.C. 2002. *Methods of Soil Analysis: Part-4-Physical Methods*. Book Series: 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA.
- Dastane, N.G., 1977. *Précipitations Efficaces en Agriculture Irriguée*. FAO Irrig. and Drain. Paper N° 25, FAO, Rome, Italy.
- DeTar, W.R., Browne, G.T., Phene, C., Sanden, B.L., 1996. Real-time scheduling of potatoes with sprinkler and subsurface drip systems. In: C. R., Camp, E. J., Sadler, and R. E., Yoder (eds.). *Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*, ASAE, S. Joseph, MI, USA, pp. 812-824.
- Doorenbos, J., Pruitt, W.O., 1975. *Guidelines for Predicting Crop Water Requirements*, FAO Irrig. and Drain. Paper N° 24, FAO, Rome, Italy.
- El Amami, H., Zairi, A., Pereira, L.S., Machado, T., Slatni, A., Rodrigues, P.N., 2001. Deficit Irrigation of Cereals and Horticultural Crops. 2. Economic Analysis. *Agricultural Engineering International Vol. III.* (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Fernando, R. M. 1993. *Quantificação do Balanço Hídrico de um Solo Regado em Presença de uma Toalha Freática. Simulação com o Modelo SWATRER*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Fernando, R.M. 1998. *Balanço hídrico do solo*. DER/ISA, Lisboa, Portugal.
- Fernando, R.M., Pereira, L.S., Liu, Y., 2001. Simulation of capillary rise and deep percolation with ISAREG. In: M.H., Wang, L.J., Han, T.W., Lei, , B.J., Wang (eds.). *International Conference on Agricultural Science and Technology, Vol. 6: Information Technology for Agriculture*, ICAST, Ministry of Science and Technology, Beijing, China, pp. 447-455.
- Fortes, P.S., Pereira, L.S., Rodrigues, P.N., Calejo, M.J., Teixeira, J.L., Platonov, A.E., 2003. GISAREG - A GIS based irrigation scheduling simulation model to support improved water use and environmental control. In: J.M^a, Tarjuelo, F.M., de Santa Olalla, L.S., Pereira (eds.). *Envirowater 2003. Land and Water Use Planning and Management (Proceedings 6th Inter-Regional Conf. on Environment-Water, Albacete)*, CREA, Univ. Castilla-La Mancha, Albacete, CD-ROM Paper N° C-091.
- Gonçalves, M.C., 1994. *Características hidrodinâmicas dos solos: sua determinação e funções de pedo-transferência*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Gonçalves, M.C., Pereira, L.S., Leij, F.J., 1997. Pedo-transfer functions for estimating unsaturated hydraulic properties of portuguese soils. *Eur. J. Soil Sci.* 48: 387-400.
- Gonçalves, M.C., Almeida, V.V., Pereira, L.S., 1999. Estimation of hydraulic parameters for Portuguese soils. In: M.T., van Genuchten, F.J., Leij, and L., Wu (eds.). *Characterization and Measurement of the Hydraulic Properties of Unsaturated Porous Media*. USDA-ARS US Salinity Lab. and Dept. Environ. Scien., University of California, Part 2: 1199-1209, Riverside, CA, USA.
- Itier, B. 1996. Applicability and limitations of irrigation scheduling methods and techniques. In: ICID-FAO. *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. Proceedings of the ICID/FAO Workshop on Irrigation Scheduling. Rome, Italy.

- Kirkham, M.B. (ed.), 1999. *Water Use in Crop Production*. The Haworth Press, New York, NY, USA.
- Lecina, S., Playán, E., Isidoro, D., Dechmi, F., Causapé, J., Faci, J.M., 2005. Irrigation evaluation and simulation at the Irrigation District V of Bardenas (Spain). *Agric. Water Manag.* 73: 223-245.
- Liu, Y., Teixeira, J.L., Zhang, H.J., Pereira, L.S., 1998. Model validation and crop coefficients for irrigation scheduling in the North China Plain. *Agric. Water Manag.* 36: 233-246.
- Liu, Y., 1999. *Improving Irrigation Scheduling in North China: Modelling and Application*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Liu, Y., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 2001. Water balance simulation with ISAREG considering water table interactions. In: F.S., Zazueta, and J.N., Xin (eds.). *World Congress on Computers in Agriculture and Natural Resources (Foz do Iguacu, Brasil)*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 857-863.
- Martin, D.L., Stegman, E.C., Fereres, E., 1990. Irrigation scheduling principles. In: G. J., Hoffman, T. A., Howell and K. H., Solomon (eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*. ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 155-203.
- Matias, P.G.M., 1992. *SWATCH, um modelo matemático para a simulação contínua de processos hidrológicos num sistema vegetação-solo-aquífero-rio*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Mateos, L., Young, C.A., Wallender, W.W., Carlson, H.L. 2000. Simulating spatially distributed water and salt balance. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 126: 288-295.
- Mateos, L. López-Cortijo, I., Sagardoy, J.A. 2002. SIMIS: The FAO decision support system for irrigation scheme management. *Agric. Water Manag.* 14: 299-306.
- Naor, A. 2006. Irrigation Scheduling and evaluation of tree water status in deciduous Orchards. In: J. Janick, *Horticultural Reviews*. John Wiley & Sons. pp. 32: 111-166.
- Neale, C.M.U., Jayanthi, H., Wright, J.L. 2003. Crop and irrigation water management using high resolution airborne remote sensing. In: R.G. Allen and W.G.M. Bastiaanssen (eds.), *Use of Remote Sensing of Crop Evapotranspiration for Large Regions*. ICID-CIID, Montpellier, France.
- Ortega, J.F., de Juan, J.A., Tarjuelo J.M^a. 2005. Improving water management: The Irrigation Advisory Service of Castilla – La Mancha (Spain). *Agric. Water Manag.* 77: 37-58.
- Pereira, L.S., Smith, M., Allen, R.G., 1998. Méthode pratique de calcul des besoins en eau. In: J.R., Tiercelin (ed.). *Traité d'Irrigation*, Lavoisier, Technique & Documentation, Paris, France, pp. 206-231.
- Pereira, L.S., 1999. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: A discussion. *Agric. Water Manag.* 40: 153-169.
- Pereira, L.S., Oweis, T., Zairi, A., 2002. Irrigation management under water scarcity. *Agric. Water Manag.* 57: 175-206.
- Pereira, L. S., 2003. Irrigation demand management to cope with drought and water scarcity. In: G., Rossi, A., Cancelliere, L. S., Pereira, T., Oweis, M., Shatanawi, A., Zairi (eds.). *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 19-33.
- Pereira, L. S., Teodoro, P. R., Rodrigues, P. N., Teixeira, J. L., 2003. Irrigation scheduling simulation: the model ISAREG. In: G., Rossi, A., Cancelliere, L. S., Pereira, T., Oweis, M., Shatanawi, A., Zairi (eds.). *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 161-180.
- Ritchie, J.T., Godwin, D.C., Singh, U., 1989. Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. *Proceedings of the IBSNAT Symposium: Decision Support System for Agrotechnology Transfer. Part I*, IBSNAT, Dept. Agronomy and Soil Science, College of

- Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu, HA, USA, pp. 31-45.
- Rodrigues, P.N., Pereira, L.S., Zairi, A., El Amami, H., Teixeira, J.L., Slatni, A., Machado, T., 2001. Deficit Irrigation of Cereals and Horticultural Crops. 1 Simulation of strategies to cope with droughts. *Agr. Engng. Intern.* Vol. III (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Rodrigues, P.N., Machado, T., Pereira, L.S., Teixeira, J.L., El Amami, H., Zairi, A., 2003. Feasibility of deficit irrigation with center-pivot to cope with limited water supplies in Alentejo, Portugal. In: G., Rossi, A., Cancelliere, L. S., Pereira, T., Oweis, M., Shatanawi, A., Zairi (eds.). *Tools for Drought Mitigation in Mediterranean Regions*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 203-222.
- Royo, A., Aragüés, R., Playán, E., Ortiz, R., 2000. Salinity-grain yield response functions of barley cultivars assessed with a drip-injection irrigation system. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 64: 359-365.
- Salvatierra, B. 2009. Cuaderno de campo de riego. Una herramienta muy útil para la programación de riegos. *Agricultura* 921: 662-665.
- Santos, F.L., 2003. *Transferência de Água e Solutos no Solo* (2ª ed.). Publicações Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- Scanlon, B.R., Andraski, B.J., Bilskie, J. 2002. Miscellaneous methods for measuring matric or water potential. In: J.H. Dane and G.C. Topp (eds.), *Methods of Soil Analysis, Part. 4. Physical Methods*. Soil Science society of America, Madison, WI, USA. pp. 643-670.
- SCS, 1982. *National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, U.S. Printing Office, Washington D.C, WA, USA.
- Smith, M., 1992. CROPWAT: A Computer Program for Irrigation Planning and Management, FAO Irrig. and Drain. Paper N° 46, FAO, Rome, Italy.
- Smith, M., Pereira, L.S., Berenjena, J., Itier, B., Goussard J., Ragab R., Tollefson, L., van Hoffwegen, P. (eds.), 1996. *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. FAO Water Report 8, Rome, Italy.
- Sousa, V., Pereira, L.S., 1999. Regional analysis of irrigation water requirements using krigging. Application to potato crop (*Solanum tuberosum* L.) at Trás-os-Montes. *Agric. Water Manag.* 40: 221-233.
- Teixeira, J.L., Pereira, L.S., 1992. ISAREG, an irrigation scheduling model. *ICID Bulletin*, 41: 29-48.
- Teixeira, J.L., Fernando, R.M., Pereira, L.S., 1995. Irrigation scheduling alternatives for limited water supply and drought. *ICID J.* 44: 73-88.
- Villar, J.M., Ferrer, F. 2005. Técnicas de medidas y control del agua en el suelo. En: F. Martín de Santa Olalla, P. López Fuster, A. Calera (coords.). *Agua y Agronomía*. Universidad de Castilla – La Mancha y Mundi – Prensa, S. A., Madrid, España. pp. 23-86.

8.4. Métodos de riego y funcionamiento de los sistemas de riego

- Allen, R.G., Willardson, L.S., Frederiksen, H.D., 1997. Water use definitions and their use for assessing the impacts of water conservation. In: J.M., de Jager, L.P., Vermes, and R., Ragab (eds.). *Sustainable Irrigation in Areas of Water Scarcity and Drought* (Proc. ICID Workshop, Oxford), British Nat. Com. ICID, Oxford, UK, pp. 72-81.
- ASAE, 1997. *ASAE Standards 1997: Standards, Engineering Practices, Data*. ASAE, St. Joseph, MI, USA.
- Burt, C., O' Connor, K., Ruehr, T., 1995. *Fertigation*. Irrigation Training and Research Center, Cal Poly, San Luis Obispo, CA, USA.

- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E., 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 123: 423-442.
- Clemmens, A. J., El Haddad, Z., Strelkoff, T.S., 1999. Assessing the potential for modern surface irrigation in Egypt. *Trans. ASAE* 42: 995-1008.
- Darouich, H., Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., 2007. Water saving scenarios for cotton under surface irrigation: analysis with the DSS SADREG. In: N., Lamaddalena, C., Boglioti, M., Todorovic, A., Scardigno (eds.). *Water Saving in Mediterranean Agriculture and Future Research Needs (Proc. Int. Conf., Valenzano, Italy, Feb. 2007)*, CIHEAM, Options Mediterranéennes, Série B, 56, vol.I: 381-396.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., 2003. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: I: Characterisation and water use assessment. *Agric. Water Manag.* 61: 75-92.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., Bercero, A., 2003. Analysis of an irrigation district in northeastern Spain: II: Irrigation evaluation, simulation and scheduling. *Agric. Water Manag.* 61: 93-109.
- Duke, H.R., Stetson, L.E., Ciancaglini, N.C., 1990. Irrigation system controls. In: G.J., Hoffman, T. A., Howell, and K. H., Solomon (eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 265-312.
- El-Haddad, Z., Clemmens, A.J., El-Ansary, M., Awad, M., 2001. Influence of cultural practices on the performance of long level basins in Egypt. *Irrig. Drain. Syst.* 15: 327-353.
- Fangmeier, D.D., Clemmens, A.J., El-Ansary, M., Strelkoff, T.S., Osman, H.E., 1999. Influence of land leveling precision on level-basin advance and performance. *Trans. ASAE* 42: 1019-1025.
- Fernando, R.M., Pereira, L.S., Liu, Y., Li, Y.N., Cai, L.G., 1998. Reduced demand irrigation scheduling under constraint of the irrigation method. In: L.S., Pereira, J.W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, UK, pp. 407-414.
- García-Navarro, P., Playán, E., Zapata, N., 2000. Solute transport modelling in overland flow applied to fertigation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 126: 33-40.
- Gonçalves, J. M., Muga, A., Pereira, L. S., Rolim, J., Horst, M. G., 2006a. SADREG, a client-server application DSS for design and management of surface irrigation. In: F., Zazueta, J., Xin, S., Ninomiya, G., Schiefer (eds.). *Computers in Agriculture and Natural Resources (Proc. 4th World Congress, Orlando, FL, USA)*, pp. 427-432.
- Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., Fang, S.X., Dong, B., 2007. Modelling and multicriteria analysis of water saving scenarios for an irrigation district in the Upper Yellow River Basin. *Agric. Water Manag.*
- Heermann, D.F., Wallender, W.W., Bos, G.M., 1990. Irrigation efficiency and uniformity. In: G. J., Hoffman, T. A., Howell and K. H., Solomon (eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*. ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 125-149.
- Hlavec, R., 1992. *Selection Criteria for Irrigation Systems*. ICID, New Delhi, India.
- Israelsen, O. W., 1932. *Irrigation Principles and Practices*. John Wiley & Sons, New York, NY, USA.
- Jensen, M.E., 1996. Irrigated agriculture at the crossroads. In: L. S., Pereira, R. A., Feddes, J. R., Gilley, B., Lesaffre (eds.). *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 19-33.
- Keller, J., 1992. Irrigation scheme design for sustainability. In: J., Feyen, E., Mwendera, and M., Badji (eds.). *Advances in Planning, Design and Management of Irrigation Systems as Related to Sustainable Land Use*, Center for Irrigation Engineering, U. K., Leuven, Belgium, pp. 217-234.

- Lamaddalena, N., 1997. Integrated Simulation Modeling for Design and Performance Analysis of On-Demand Pressurized Irrigation Systems. Tese de Doutoramento, ISA, UTL, Lisboa, Portugal.
- Lamaddalena, N., Pereira, L.S., 1998. Performance analysis of on-demand pressurized irrigation systems. In: L.S., Pereira, and J.W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, UK, pp. 247-255.
- Li, Y.N., Calejo, M.J., 1998. Surface irrigation. In: L.S., Pereira, R.J., Liang, A., Musy, M.J., Hann (eds.). *Water and Soil Management for Sustainable Agriculture in the North China Plain*, DER, ISA, Lisbon, Portugal, pp. 236-303.
- Losada Villasante, A. 2000. *El riego. Fundamentos hidráulicos*. Mundi – Prensa, S. A., Madrid, España.
- Losada Villasante, A. 2005. *El riego. II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica*. Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España.
- Mao, Z., Dong, B., Pereira, L.S., 2004. Assessment and water saving issues for Ningxia paddies, upper Yellow River Basin. *Paddy and Water Environment* 2: 99-110.
- Martinez Saldaña, T., Pereira, L.S., Castro, M., Palerm, J. (eds.), 2007. *Riegos Ancestrales de Iberoamerica*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Mexico D. F., México.
- Merriam, J.L., Keller, J., 1978. *Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management*. Dept. Agricultural and Irrigation Engineering, Utah St. University, Logan, UT, USA.
- Morales Gil, A., 2002. El riego con aguas de avenida en las laderas subáridas. In: J., Palerm (ed.). *Antología sobre Pequeño Riego. Vol. III: Sistemas de Riego no Convencionales*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México, pp. 117-136.
- Ortega, J.F., de Juan, J.A., Domínguez, A., Picornell, M^a.R., Tarjuelo, J.M^a. 2006. Uniformidad y eficiencia de aplicación en parcela con sistemas de riego por aspersión. *Tierras de Castilla y León* 121: 102-121.
- Oweis, T., Hachum, A., Bruggeman, A., 2004. *Indigenous Water-Harvesting Systems in West Asia and North Africa*. ICARDA, Aleppo, Siria.
- Pair, C. H., Hinz, W. H., Frost, K. R., Sneed, R. E., Schiltz, T. J., 1983. *Irrigation (5th Edition)*, The Irrigation Association, Arlington, VA, USA.
- Palerm, J. (ed.), 2002. *Antología sobre Pequeño Riego. Vol. III: Sistemas de Riego no Convencionales*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, México
- Pereira, L.S., 1996b. Inter-relationships between irrigation scheduling methods and the on-farm irrigation systems. In: M., Smith, *et al.* (eds.). *Irrigation Scheduling: From Theory to Practice*. FAO Water Reports 8, ICID and FAO, Rome, Italy. pp. 91-104.
- Pereira, L. S., 1999. Higher performances through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agric. Water Manage.* 40: 153-169.
- Pereira, L.S., Trout, T.J., 1999. Irrigation methods. In: H.N., van Lier, L.S., Pereira, F.R., Steiner (eds.). *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*, vol. I: Land and Water Engineering, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 297-379.
- Pereira, L.S., 2001. Desempenho de sistemas de rega. *Ingeniería del Agua* 8: 329-338.
- Pereira, L.S. (Coord.), 2002. *Diagnóstico dos sistemas de rega em pressão. Relatório Final do Projecto Pediza nº 1999.64.0008326.1*, Departamento de Engenharia Rural, ISA, Lisboa, Portugal.
- Pereira, L.S., 2002/2003. *Inovações em engenharia da rega. Caso português. Rega e Drenagem*, Nov. 2002: 26-32 y Jun. 2003: 34-41.
- Pereira, L.S., Cai, L.G., Hann, M.J., 2003a. Farm water and soil management for improved water use in the North China Plain. *Irrig. Drain.* 52: 299-317.
- Pereira, L.S., Cai, L.G., Musy, A., Minhas, P.S. (eds.), 2003b. *Water Savings in the Yellow River Basin: Issues and Decision Support Tools in Irrigation*. China Agricultural Press, Beijing, China.

Pereira, L.S., Gonçalves, J. M., Dong, B., Mao, Z., Fang, S. X., 2007. Assessing basin irrigation and scheduling strategies for saving irrigation water and controlling salinity in the Upper Yellow River Basin, China. *Agric. Water Manag.*

Pitts, D., Peterson, K., Gilbert, G., Fastenau, R., 1996. Field assessment of irrigation system performance. *App. Engin. Agric.* 12: 307-313.

Playán, E., Walker, W.R., Merkley, G.P., 1994. Two-dimensional simulation of basin irrigation. I. Theory. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 120: 837-856.

Playán, E., Martínez-Cob, A., 1999. Simulation of basin irrigation scheduling as a function of discharge and leveling. *Invest. Agr. Prod. Prot. Veg.* 14: 545-554,

Santos, F.L., 1998. Evaluation of alternative irrigation technologies based upon applied water and simulated yields. *J. Agric. Engng. Res.* 69: 73-83.

Steduto, P., 1993. Water use efficiency. In: L. S., Pereira, R. A., Feddes, J. R., Gilley, B., Lesaffre (eds.). *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp. 193-209.

Trout, T.J., Sojka, R.E., Okafor, L.I., 1990. Soil management. In: G.J., Hoffman, T. A., Howell, and K. H., Solomon (eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 875-896.

Unger, P.W., 1994. *Tillage Systems for Soil and Water Conservation*, FAO Soils Bull. 54, FAO, Rome, Italy.

Warrick, A.W., Yates, S.R., 1987. Crop yield as influenced by irrigation uniformity. In: D., Hillel (ed.). *Advances in Irrigation* (vol. 4), Academic Press, Orlando, FL, USA, pp. 169-180.

Wolters, W., 1992. *Influences on the Efficiency of Irrigation Water Use*. ILRI Public. N° 51, ILRI, Wageningen, The Netherlands.

Zapata, N., Playán, E., 2000. Simulating elevation and infiltration in level-basin irrigation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 126: 78-84.

Zapata, N., Playán, E., 2000. Water reuse in sequential basin irrigation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 126: 362-370.

Zapata, N., Playán, E., 2000b. Elevation and infiltration in a level basin. I. Characterizing variability. *Irrig. Sci.* 19: 155-164.

Zapata, N., Playán, E., Faci, J.M., 2000. Elevation and infiltration in a level basin. II. Impact on soil water and corn yield. *Irrig. Sci.* 19: 165-173.

8.5. Riego por superficie

Alazba, A.A. 1997. Design procedure for border irrigation. *Irrig. Sci.* 18: 33-43.

Bondurant, J.A., Kemper, W.D., 1985. Self-cleaning non-powered trash screens for small irrigation flows. *Trans. ASAE* 28: 113-117.

Calejo, M.J., Sousa, P.L., Pereira, L.S., 1998. Evaluation of performance of surface irrigation systems: optimization of infiltration and roughness parameters. In: L. S., Pereira, and J. W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation and Issues in Irrigation and Drainage*, E & FN Spon, London, UK, pp.140-148.

Camacho, E., Clemmens, A. J., Strelkoff, T. S. 1998. Nuevo método de diseño del riego por surcos. XVI Congreso Nacional de Riegos, Palma de Mallorca, España. pp. 307-339.

Cameira, M.R., Sousa, P.L., Farahani, H.J., Ahuja, L.R., Pereira, L.S., 1998. Evaluation of model RZWQM for the simulation of water and nitrates in level-basin, fertigated maize. *J. Agri. Engng. Res.* 69: 331-341.

Cavero, J., Playán, E., Zapata, N., Faci, J. M., 2001. Simulation of maize grain yield variability within a surface-irrigated field. *Agron. J.* 93: 773-782.

- Clemmens, A. J., 1991. Direct solution to surface irrigation advance inverse problem. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 117: 578-594.
- Clemmens, A.J., 1998. Level basin design based on cutoff criteria. *Irrig. Drain. Syst.* 12 :85-113.
- Clemmens, A. J., 2000. Level basin irrigation systems: Adoption, practices, and the resulting performance. In: R.G., Evans, B.L., Benham, T.P., Trooien (eds.). *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, USA*, pp. 273-282.
- Clemmens, A.J., Wahl, T.L., Bos, M.G., Replogle, J.A., 2001. *Water Measurement with Flumes and Weirs*. ILRI Publ. 58, Wageningen, The Netherlands.
- Clemmens, A. J., Strelkoff, T.S., Playán, E., 2003. Field verification of two-dimensional surface irrigation model. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 129:402-411.
- Clyma, W., Clemmens, A.J., 2000. Farmer management strategies for level basin using advance distance criteria. In: R.G., Evans, B.L., Benham, T.P., Trooien (eds.). *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, USA*, pp. 573-578.
- Clyma, W., Reddy, J.M., 2000. Optimal design and management of surface irrigation systems. In: R.G., Evans, B.L., Benham, T.P., Trooien (eds.). *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium, ASAE, St. Joseph, MI, USA*, pp. 298-303.
- Dedrick, A.R., 1989. Improvements in design and installation of mechanised level-basin systems. *Appl. Engng. Agric.* 5: 372-378.
- Eisenhauer, D.E., Heermann, D.F., Klute, A., 1992. Surface sealing effect on infiltration with surface irrigation. *Trans. ASAE* 35: 1799-1807.
- Eisenhauer, D.E., Yonts, C.D., Cahoon, J.E., Brown, B., 1993. Reactive irrigation scheduling for sloping furrow irrigation. In: R. G., Allen (ed.). *Management of Irrigation and Drainage Systems*, ASCE, New York, NY, USA, pp. 198-205.
- Elliott, T.L., Walker, W.R., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASAE* 25: 396-400.
- Elliott, R.L., Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1983. Infiltration parameters from furrow irrigation advance data. *Trans. ASAE* 26: 1726-1730.
- Esfandiari, M., Maheshwari, B.L. 1998. Suitability of selected flow equations and variation of Manning's in furrow irrigation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 124: 89-95.
- Fabião, M.S., Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., Campos, A.A., Liu, Y., Li, Y.N., Mao, Z., Dong, B., 2003. Water saving in the Yellow River Basin, China. 2. Assessing the potential for improving basin irrigation. *Agr. Engng. Intern. Vol. V.* (www.cigr-ejournal.tamu.edu).
- Faci, J.M., Playán, E., 1996. *Principios básicos del riego por superficie*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España.
- Faci, J.M., Bensaci, A., Slatni, A., Playán, E., 2000. A case study for irrigation modernisation I. characterisation of the district and analysis of water delivery records. *Agric. Water Manag.* 42: 313-334.
- García-Navarro, P., Sánchez, A., Clavero, N., Playán, E., 2004. A simulation model for level furrows: II. Description, validation and application. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 130: 113-121.
- Gonçalves, J.M., 1997. *Sistema de Apoio à Decisão para o Projecto em Rega de Gravidade*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., Sousa, P.L., 1998. Environmental criteria in a decision support system for surface irrigation design. In: L.S., Pereira and J.W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon, Portugal)*, E& FN Spon, London, UK, pp. 111-119.
- Gonçalves, J.M., Pereira, L.S., 1999. Design of sustainable on-farm surface irrigation systems with a decision support system. In: A., Musy, L.S., Pereira, and M., Fritsch (eds.). *Emerging Technologies for Sustainable Land Use and Water Management (2nd Inter-Regional Conf.*

- Environment-Water, Lausanne, Switzerland), Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, Switzerland: CD-ROM Paper N° 8.10.
- Gonçalves, J.M., Horst, M.G., Pereira, L.S., Rolim, J., Muga, A., 2005. SADREG, a DSS for improving surface irrigation systems. In: J., Boaventura Cunha and R., Morais (eds.). Proceedings of the EFITA/WCCA 2005 Joint Conference on Information Technologies in Agriculture, Food and Environment and Computers in Agriculture and Natural Resources (5th EFITA Conference and 3rd WCCA, Vila Real, Portugal), Univ. de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, Portugal, DVD, pp. 160-165.
- Gonçalves, J. M., Muga, A., Pereira, L. S., Rolim, J., Horst, M. G., 2006b. SADREG, a DSS for design and management of farm surface irrigation systems. In: Agricultural Engineering for a Better World (XVI CIGR World Congress, Bonn, Germany, Sept. 2006), VDI Verlag, Dusseldorf, Germany, CD-ROM Paper N° 0053.
- Hart, W.E., Collins, H.G., Woodward, G., Humpherys, A.S., 1980. Design and operation of gravity or surface systems. In: M. E., Jensen (ed.). Design and Operation of Farm Irrigation Systems, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 501-580.
- Horst, M.G., Shamutalov, Sh.S., Pereira, L.S., Gonçalves, J.M., 2005. Field assessment of the water saving potential with furrow irrigation in Fergana, Aral Sea Basin. *Agric. Water Manag.* 77: 210-231.
- Horst, M. G., Shamutalov, Sh. Sh., Gonçalves, J. M., Pereira, L. S., 2007. Assessing impacts of surge-flow irrigation on water saving and productivity of cotton. *Agric. Water Manag.* 87: 115-127.
- Humpherys, A.S., 1987. Automated Farm Surface Irrigation Systems World-Wide. ICID, New Delhi, India.
- Humpherys, A. S., 1989a. Surge irrigation: 1. An overview. *ICID Bulletin* 38: 35-48.
- Humpherys, A. S., 1989b. Surge irrigation: 2. Management. *ICID Bulletin* 38: 49-61.
- ISED, 1989. SIRMOD, Surface Irrigation Simulation Software. User's Guide. Irrigation Software Engineering Division, Dept. Agricultural and Irrigation Engineering, Utah St. University, Logan, UT, USA.
- Ismail, S.M., Depeweg, H. 2005. Simulation of continuous and surge flow irrigation und shortfield conditions. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 54: 217-230.
- Ito, H., Wallender, W.W., Raghuvanshi, N.S. 1999. Economics of furrow irrigation under partial infiltration information. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 125: 105-111.
- Katopodes, N.D., Tang, J.H., Clemmens, A.J., 1990. Estimation of surface irrigation parameters. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 116: 676-696.
- Kemper, W.D., Trout, T.J., Kincaid, D.C., 1987. Cablegation: Automated supply for surface irrigation. In: D., Hillel (ed.). *Advances in Irrigation*, vol. 4, Academic Press, Orlando, FL, USA, pp. 1-66.
- Khatri, K.L., Smith, R.J. 2006. Real-time prediction of soil infiltration characteristics for the management of furrow irrigation. *Irrig. Sci.* 25: 33-43.
- Kumar, Y., Chauhan, H.S., 1987. Gradient search technique for land levelling design. *Trans. ASAE* 30: 391-393.
- Li, Y.N., 1999. Basin Irrigation in North China: Evaluation, Modelling and Design for Improvement. Tese de Doutoramento. ISA, UTL, Lisboa, Portugal.
- Losada Villasante, A. 2005. El riego. II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica. Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España.
- Mailhol, J.C., Priol, M., Benali, M., 1999. A furrow irrigation model to improve irrigation practices in the Gharb valley of Morocco. *Agr. Water Manag.* 42: 65-80.
- Monserrat, J., Casali, J., Tilló, J., Cots, L. Barragán, J. 1997. Aplicabilidad del riego a pulsos en tablares. *Ingeniería del Agua* 4: 29-36.

- Paulo, A.M., Pereira, L.A., Teixeira, J.L., Pereira, L.S., 1995. Modelling paddy rice irrigation. In: L. S., Pereira, B., van den Broek, P., Kabat and R. G., Allen (eds.). *Crop-Water-Simulation Models in Practice*, Wageningen Pers, Wageningen, The Netherlands, pp. 287-302.
- Pereira, L.S., 1996a. Surface irrigation systems. In: L. S., Pereira, R. A., Feddes, J. R., Gilley and B., Lesaffre (eds.). *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 269-289.
- Pereira, L.S., Sousa, P.L., Fernando, R.M., 1997. Issues in improving surface irrigation techniques and scheduling. In: N.E., Garcia, A., Ebáñez, C., Vallejo (eds.). *Uso de Aguas Residuales para Riego. Problemática del Valle del Mezquital (Proc. Int. Semin.)*, Univ. Nac. Autónoma de México, México DF, pp. 132-144.
- Pereira, L.S., Sousa, P.L., 1998. Irrigation de surface. In: J.R., Tiercelin (ed.). *Traité d'irrigation*. Lavoisier, Paris, France, pp. 450-471.
- Pereira, L.S., Zairi, A., Mailhol, J.C., 2006. Irrigation de Surface. In: J.R., Tiercelin, y A., Vidal (eds.) *Traité d'Irrigation*, 2ème edition, Lavoisier, Technique & Documentation, Paris, France, pp. 513-549 et 626-633.
- Pérez, C.J., Camacho, E., Roldán, J., Alcaide, M., Llanos, I., Casares, F. 1995. Manejo del riego por surcos en tiempo real. In: XII Jornadas Técnicas sobre Riegos, Puerto de la Cruz, Tenerife, España. pp. 386-398.
- Pilesjö, P., Persson, A., Harrie, L. 2006. Digital elevation data for estimation of potential wetness in ridget field – Comparison of two different methods. *Agric. Water Manag.* 79: 225-247.
- Playán, E. 1994. Simulación bidimensional del riego por inundación con microtopografía. *Ingeniería del Agua* 4: 101-111.
- Playán, E., Walker, W.R., Merkley, G.P. 1994a. Two-dimensional simulation of basin irrigation. I: Theory. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 120: 837-856.
- Playán, E., Walker, W.R., Merkley, G.P. 1994b. Two-dimensional simulation of basin irrigation. II: Applications. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 120: 857-870.
- Playán, E., 1996. Mejora del riego por inundación: efectos combinados del caudal y de la explanación del cantero. In: XII Jornadas Técnicas sobre Riegos, Puerto de la Cruz, Tenerife, España. pp. 342-349.
- Playán, E., Faci, J. M., Serreta, A., 1996a. Characterizing microtopographical effects on level-basin irrigation performance. *Agric. Water Manag.* 29: 129-145.
- Playán, E., Faci, J.M., Serreta, A., 1996b. Modeling microtopography in basin irrigation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 122: 339-347.
- Playán, E., Slatni, A., Castillo, R., Faci, J.M., 2000. A case study for irrigation modernisation: II Scenario analysis. *Agric. Water Manag.* 42: 335-354.
- Playán, E., Garrido, S., Faci, J.M., Galán, A., 2004. Characterizing pivot sprinklers using an experimental irrigation machine. *Agric. Water Manag.* 70: 177-193.
- Poças, I., Cunha, M., Pereira, L.S., 2007. Los lameiros, pastizales seminaturales de regadio de montaña: sistemas ancestrales en el paisaje rural portugués del Siglo XXI. In: T., Martínez Saldaña, L.S., Pereira, M., Castro, J., Palerm (eds.). *Riegos Ancestrales de Iberoamerica*. Colegio de Postgraduados, Montecillo, México D. F., México.
- Sabillón, G.N., Merkley, G.P. 2004. Fertigation guidelines for furrow irrigation. *Spanish J. Agr. Res.* 2: 576-587.
- Scalopi, E.J., Willardson, L. S., 1986. Practical land grading based on least squares. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 112: 98-109.
- SCS, 1986. *Surge Flow Irrigation Field Guide*. USDA, Soil Conservation Service, Washington D.C, WA, USA.

- Serralheiro, R.P., 1996. Modernização e Desenvolvimento da Rega de Superfície. Publicações Universidade de Évora, Évora, Portugal.
- Sousa, P.L., Pereira, L.S., 1989. Modelling a farm canal for automated basin irrigation. In: V.A., Dodd, and P.M., Grace (eds.). *Agricultural Engineering. 1 Land and water use (Proc. 11th CIGR Congress)*, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 691-697.
- Sousa, P.L., 1990. *Modelação e Gestão em Rega por Canteiros de Nível*. Tese de Doutoramento, ISA, Lisboa, Portugal.
- Sousa, P. L., Dedrick, A. R., Clemmens, A. J., Pereira, L. S., 1993. Benefits and costs of laser-controlled leveling, A case study. In: *Proc.15th. Int. Congress ICID*, The Hague, The Netherlands, Q44, R97, pp. 1237-1247.
- Sousa, P.L., Dedrick, A.R., Clemmens, A.J., Pereira, L.S., 1995. Effect of furrow elevation differences on level-basin performance. *Trans. ASAE* 38: 153-158.
- Strelkoff, T., 1993. *SRFR, a Computer Program for Simulating Flow in Surface Irrigation Furrows-Basins-Borders*. USDA-ARS Water Conservation Laboratory, Phoenix, AR, USA.
- Strelkoff, T.S., Clemmens, A.J., Schmidt, B.V., 2000. ARS software for simulation and design of surface irrigation. In: R.G., Evans, B.L., Benham, T.P., Trooien (eds.). *Proceedings of the 4th Decennial National Irrigation Symposium*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 290-297.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.C., Vachaud, G., Pereira, L.S., 1995. Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: Modelling, its validation and applications. *Agri. Water Manag.* 27: 105-123.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.C., Vachaud, G., Pereira, L.S., 1995. Modelling of furrow irrigation. Advance with two-dimensional infiltration. *Agri. Water Manag.* 28: 201-221.
- Trout, T.J., Kincaid, D.C., 1989. Border cablegation system design. *Trans. ASAE* 32: 1185-1192.
- Trout, T.J., 1991. Surface seal influence on surge flow furrow infiltration. *Trans. ASAE* 34: 66-72.
- Trout, T.J., 1996. Furrow irrigation erosion and sedimentation: on-field distribution. *Trans. ASAE* 39: 1717-1723.
- Valiantzas, J.D. 1999. Explicit time of advance formula for furrow design. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 125: 19-25.
- Valiantzas, J.D. 2001. Optimal furrow design. I: Time of advance equation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 127: 201-208.
- Valiantzas, J.D. 2001. Optimal furrow design. II: Explicit calculation of design variables. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 127: 209-215.
- Vázquez Fernández, E. 1996. Diseño y revisión de surcos con riegos continuo y de corte posterior. *Ingeniería del Agua* 3: 7-14.
- Vázquez Fernández, E., López Tellez, P., Chagoya Amador, B. 2005. Comparison of water distribution uniformities between increased-discharge and continuous-flow irrigation in Dlocked-end furrows. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 131: 379-382.
- Walker, W.R., Skogerboe, G.V., 1987. *Surface Irrigation. Theory and Practice*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Walker, W. R., Busman, J. D., 1990. Real time estimation of furrow infiltration. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 116: 299-318.
- Walker, W., 1998. *SIRMOD – Surface Irrigation Modeling Software*. Utah State University, Logan, UT, USA.
- Walker, W.R. 2002. *SIRMOD II. Surface irrigation simulation. Evaluation and design. User's guide and technical documentation*. BIE Dept. Utah State University, Logan, UT, USA.
- Warrick, A.W., Lazarovitch, N., Furman, A., Zehirun, D. 2007. Explicit infiltration function for furrows. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 133: 307-313.

- Wöhling, Th., Schmitz, G.H. 2007. Physically based coupled model for simulating 1D surface – 2 D subsurface flow and plant water uptake in irrigation furrows. I: Model development. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 133: 538-547.
- Wöhling, Th., Mailhol, J.C. 2007. Physically based coupled model for simulating 1D surface – 2 D subsurface flow and plant water uptake in irrigation furrows. II: Model test and evaluation. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 133: 548-558.
- Yonts, C.D., Smith, J.A., Bailie, J.E., 1991. Furrow irrigation performance in reduced-tillage systems. *Trans. ASAE* 34: 91-96.
- Zairi, A., Slatni, A., Mailhol, J.C., Achour, H., 1998. Surface irrigation efficiency in cracking soils as influenced by water restrictions. In: L.S., Pereira, J.W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage*, E& FN Spon, London, UK, pp. 120-130.
- Zerihun, D., Sánchez, C.A., Farrell, Poe, K.L., 2001. Analysis and design of furrow irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 127: 161-169.
- Zerihun, D., Sánchez, C.A., Farrell, Poe, K.L., Yitayew, M. 2005. Analysis and design of border irrigation systems. *Trans. ASAE* 48: 1.751-1.764.

8.6. Riego por aspersión

- Abadía, R., Ruíz, A., Puerto, H., Andreu, J., Rocamora, M.C., Ferrández-Villena M., Martínez Moreno J.M. 2002. Calibración de un modelo de simulación hidráulico de una red de riego. XX Congreso Nacional de Riegos. Ciudad Real, España, 12-14 de junio. pp.10.
- Abreu, V.M., Pereira, L.S., 2002, Sprinkler irrigation systems design using ISADim. In: 2002 ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress (Chicago, Illinois, July 28-July 31, 2002) ASAE, CD-ROM Paper N° 022254.
- Addink, J.W., Keller, J., Pair, C.H., Sneed, R.E., Wolfe, J.W., 1980. Design and operation of sprinkler systems. In: M. E., Jensen (ed.). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, USA. pp. 621-660.
- Allen, R.G., 1990. Applicator selection along center-pivots using soil infiltration parameters. In: *Visions of the Future*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp 549-555.
- Allen, R.G., 1996. Relating the Hazen-Williams and the Darcy-Weisbach friction loss equations for pressurized irrigation. *App. Engin. Agric.* 12: 685-693.
- Allen, R.G., Keller, J., Martin, D., 2000. *Center Pivot System Design*. The Irrigation Association, Falls Church, VA, USA.
- Bralts, V.F., Pandey, S.R., Miller, A. 1994. Energy savings and irrigation performance of a modified center pivot irrigation system. *App. Engin. Agric.* 10: 27-36.
- Burguete, J., Playán, E., Montero, J., Zapata, N. 2007. Improving drop size and velocity estimates of an optical disdrometer: implications for sprinkler irrigation simulation. *Trans. ASAE* 50: 2.103-2.116.
- Cavero, J., Beltrán, A., Aragües, R., 2003. Nitrate exported in the drainage water of two sprinkler irrigated watersheds. *Journal of Environmental Quality* 32: 916-926.
- Christiansen, J.E., 1942. *Irrigation by sprinkling*. Calif. Ag. Exp. Sta. Bull. 670. University of California, Berkeley, CA, USA.
- Clark, G.A., Srinivas, K., Rogers, DH., Stratton, R., Martin, V.L., 2003. Measured and simulated uniformity of low drift nozzle sprinklers. *Trans. ASAE* 46: 321-330.
- de Juan, J.A., Tarjuelo, J.M^a. Jiménez, M., Picornell, M^a. R. 2008. La distribución del agua bajo riego por aspersión estacionario y su influencia sobre el rendimiento del cultivo del maíz (*Zea mays* L.). *Tierras de Castilla y León* 146:92-104.

- DeBoer, D.W., Monnens, M.J. 2001. Estimation of drop size and kinetic energy from a rotating spray-plate sprinkler. *Trans. ASAE* 44:1.571-1.580.
- DeBoer, D.W. 2002. Drop and energy characteristics of a rotating spray-plate sprinkler. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 128: 137-146.
- Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Faci, J.M., Martínez-Cob, A., 2003. Wind effects on solid set sprinkler irrigation depth and yield of maize (*Zea mays* L.). *Irrig. Sci.* 22: 67-77.
- Dechmi, F., Playán, E., Faci, J.M., Tejero, M., Bercero, A. 2003. analysis of an irrigation district in northeastern Spain. II: Irrigation evaluation, simulation and scheduling. *Agric. Water Manag.* 61: 93-109.
- Dechmi, F., Playán, E., Cavero, J., Martínez-Cob, A., Faci, J.M., 2004. A coupled crop and solid set sprinkler simulation model: I. Model development. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 130: 499-510.
- Deumier, J.M., Lacroix, B., Mangin, M., Vallade, S., Molle, B., Granier, J., 2003. IRRIPARC-Part 2: Gun settings to control water distribution in windy conditions. In: *Int. Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods (ICID, Sep. 2003)*, Association Française des Irrigations et du Drainage, AFEID et CEMAGREF, Montpellier, France, Paper N° 7 in CD-ROM.
- Dubalen, J., 1993. Utilisation des matériels d'irrigation par aspersion. *Diagnostic de fonctionnement au champ. La Houille Blanche* 2/3: 183-188.
- Evans, R.G., Han, S., Kroeger, W.M., 1995. Spatial distribution and uniformity evaluations for chemigation with center pivots. *Trans. ASAE* 38: 85-92.
- Faci, J.M., Salvador, R., Playán, E., 2001. Comparison of fixed and rotating spray plate sprinklers. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 127: 224-239.
- Farmani, R., Abadia, R., Savic, D. 2007. Optimum design and management of pressurized branched irrigation networks. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 133: 528-537.
- Gilley, J.R., 1996. Sprinkler irrigation systems. In: L. S., Pereira, R. A., Feddes, J. R., Gilley, and B., Lesaffre (eds.). *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 291-307.
- Granier, J., Molle, B., Deumier, J.M., 2003. IRRIPARC-Part 1: Modeling spatial water distribution under a sprinkler in windy conditions. In: *Int. Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods (ICID, Sep. 2003)*, Association Française des Irrigations et du Drainage, AFEID et CEMAGREF, Montpellier, France, Paper N° 37 in CD-ROM.
- Han, S., Evans, R.G., Kroeger, M.W., 1994. Sprinkler distribution patterns in windy conditions. *Trans. ASAE* 37: 1481-1489.
- Hart, W.E., Reynolds, W.N., 1965. Analytical design of sprinkler systems. *Trans. ASAE* 8: 83-85, 89.
- Heermann, D.F., Kohl, R.A., 1980. Fluid dynamics of sprinkler systems. In: M. E., Jensen (ed.). *Design and Operation of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 583-618.
- Heermann, D.F., Duke, H.R., Serafim, A.M., Dawson, L.J. 1992. Distribution functions to represent Center-pivot water distribution. *Trans. ASAE* 35- 1.465-1.472.
- Helweg, O.J. 1989. Evaluating the traveling trickler center pivot. *ICID Bulletin* 38: 13-20.
- Jorge, J., Pereira, L.S., 2003. Simulation and Evaluation of Set Sprinkler Systems with AVASPER. In: *Int. Workshop on Improved Irrigation Technologies and Methods (ICID, Sep. 2003)*, Association Française des Irrigations et du Drainage, AFEID et CEMAGREF, Montpellier, France, CD-ROM Paper N° 21.
- Kay, M., 1983. *Sprinkler Irrigation. Equipment and Practice*. Batsford Academic and Educational, London, UK.

- Kincaid, D.C., McCann, I., Busch, J.R., Hasherninia, M., 1990. Low pressure center pivot irrigation and reservoir tillage. In: *Visions of the Future*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 54-60.
- Kincaid, D.C., Solomon, K.H., Oliphant, J.C., 1996. Drop size distributions for irrigation sprinklers. *Trans. ASAE* 39: 839-845.
- Li, J., Kawano, H., Yu, K., 1994. Droplet size distributions from different shaped sprinkler nozzles. *Trans. ASAE* 37: 1871-1878.
- Losada Villasante, A. 2005. *El riego. II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica*. Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España.
- Lyle, W.M., Bordowsky, J.P., 1981. Low Energy Precision Application (LEPA) irrigation system. *Trans. ASAE* 26: 1241-1245.
- Mantovani, E.C., Villalobos, F.J., Orgaz, F., Fereres, E., 1995. Modelling the effects of sprinkler irrigation uniformity on crop yield. *Agri. Water Manag.* 27: 243-257.
- Martin, D., 1991. Effect of frequency on center-pivot irrigation. In: W. F., Ritter (ed.). *Irrigation and Drainage (Proc. ASCE Nat. Conf., Honolulu)*, ASCE, New York, NY, USA, pp. 38-44.
- Maw, B.W., Young, J.R. Marti, L.R. 1999. Evaluating a contaminant using center pivot irrigation systems. *Trans. ASAE* 42: 799-802.
- Montero, J., Tarjuelo, J.M^a., Honrubia, F.T., Ortiz, J., Carrión, P.A, de Juan, J.A, Calvo, M., 1998. Performance of center pivot systems in field practice. In: L.S., Pereira, and J.W., Gowing (eds.). *Water and the Environment: Innovation Issues in Irrigation and Drainage (1st Inter-Regional Conf. Environment-Water, Lisbon, Portugal)*, E& FN Spon, London, UK, pp. 165-172.
- Montero, J., de Juan, J.A., Sajardo, R., Tarjuelo, J.M^a., 2002. Water application with high technology emitters in center-pivot equipments. In: A.H., Maiga, L.S., Pereira, A., Musy (eds.). *Sustainable Water Resources Management: Health and Productivity in Hot Climates (Proc. Inter-Regional Conference Envirowater 2002, Ouagadougou, Burkina Faso, Nov. 2002)*, EIER, Ouagadougou, Burkina Faso, pp. 562-569.
- Montero, J., Tarjuelo, J.M^a., Carrión, P., 2003. Sprinkler droplet size distribution measured with an optical spectropuviometer. *Irrig. Sci.* 22: 47-56.
- Moreno, M.A., Planells, P., Ortega, J.F., Tarjuelo, J.M^a. 2008. Calibration of on-demand irrigation network models. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 134: 36-42.
- Morlet, A. 1988. Aportaciones al ensayo de un equipo enrollador para riego. *Riegos y Drenajes XXI*, 23: 58-62.
- Ortiz, J.N., Tarjuelo, J.M^a., de Juan, J.A. 2009. Characterisation of evaporation and drift losses with centre pivots. *Agri. Water Manag.* 96: 1.541-1.546.
- Pedras, C. M. G., Pereira, L. S., 2006. A DSS for design and performance analysis of microirrigation systems. In: F., Zazueta, J., Xin, S., Ninomiya, G., Schiefer (eds.). *Computers in Agriculture and Natural Resources (Proc. 4th World Congress, Orlando, FL, USA)*, pp. 666-671.
- Pereira, L. S., Calejo, M. J., Lamaddalena, N., Douieb, A., Bounoua, R. 2003. Design and performance analysis of low pressure irrigation distribution systems. *Irrig. Drain. Syst.* 17 (4).
- Playán, E., Rodríguez, J.A., García-Navarro, P., 2004. A simulation model for level furrows: I. field experiments. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 130: 106-112.
- Playán, E., Salvador, R., Faci, J.M., Zapata, N., Martínez-Cob, A., Sánchez I. 2005. Day and night wind drift and evaporation losses in sprinkler solid-sets and moving laterals. *Agri. Water Manag.* 76: 139-159.
- Rieul, L. (coord.). 1990. *Irrigation. Collection Guide Pratique du CMAGREF*. CEMAGREF, CEP-France Agricole, RNED-HA, Montpellier, France.

- Rochester, E.W., Hackwell, S.G., 1991. Power and energy requirements of small hard-hose travellers. *App. Engin. Agric.* 7: 551-556.
- Rolland, M., 1982. Mechanized Sprinkler Irrigation. FAO Irrig. and Drain., Paper N° 35, Rome, Italy.
- Ruelle, P., Mailhol, J.C., Quiñones, H., Granier, J. 2003. Using NIWASAVE to simulate impacts of irrigation heterogeneity on yield and nitrate leaching when using a travelling rain gun system in a shallow soil context in Charente (France). *Agric. Water Manag.* 63: 15-35.
- Scalopi, E.J., Allen, R.G., 1993. Hydraulics of center-pivot laterals. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 119: 554-567.
- Scalopi, E.J., Allen, R.G., 1993. Hydraulics of irrigation laterals: Comparative analysis. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 119: 91-115.
- Schneider, A.D. 2000. Efficiency and uniformity of the CEPA and spray sprinkler methods: A review. *Trans. ASAE* 43: 937-944.
- Seginer, I., 1987. Spatial water distribution in sprinkler irrigation. In: D., Hillel (ed.). *Advances in Irrigation* (vol. 4), Academic Press, Orlando, FL, USA, pp. 119-168.
- Servadio, P., Carnevali, C., Marsili, A. 1996. Le grandi macchine semoventi per l'irrigazione a pioggia. *L'Informatore Agrario* 10: 47-53.
- Sourell, H., Faci, J.M., Playán, E., 2003. Performance of rotating spray plate sprinklers in indoor experiments. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 129:376-380.
- Tarjuelo, J.M^a., Valiente, M., Lozoya, J., 1992. Working conditions of sprinkler to optimize application of water. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE.* 118: 895-913.
- Tarjuelo, J. M^a., de Juan, J. A., Valiente, M., Garcia, P., 1996. Model for optimal crop patterns within the farm based on crop water production functions and irrigation uniformity. II. A case study of irrigation scheduling in Albacete, Spain. *Agric. Water Manag.* 31: 145-163.
- Tarjuelo, J.M^a., Montero, J., Honrubia, F.T., Ortiz, J.J., Ortega, J.F., 1999a. Analysis of uniformity of sprinkler irrigation in a semi-arid area. *Agric. Water Manag.* 40: 315-331.
- Tarjuelo, J.M^a., Montero, J., Carrión, P.A., Honrubia, F.T., Calvo, M.A., 1999b. Irrigation uniformity with medium size sprinklers. Part II. Influence of wind and other factors on water distribution. *Trans. ASAE* 42: 677-689.
- Threadgill, E.D., 1985. Chemigation via sprinkler irrigation: Current status and future development. *App. Engin. Agric.* 1: 16-23.
- Valín, M. I., Calejo, M.J., Jorge, J., Pereira, L.S., 2003. Field evaluation of sprinkler irrigation systems in Alentejo. Causes of problems and issues for improving performances. In: J.M., Tarjuelo, J.M^a., de Santa Olalla, F.M., Pereira, L.S. (eds.). *Envirowater 2003. Land and Water Use Planning and Management* (Proceedings 6th Inter-Regional Conference on Environment-Water, Albacete, Sep. 2003), CREA – Univ. Castilla-La Mancha, Albacete, Spain. Paper N° E-092 in CD-ROM, pp. 253-254.
- Valín, M^a.I., Calejo, M^a.J., Jorge, J., Pereira, L.S. 2003. Field evaluation of sprinkler irrigation systems in Alentejo. Causes of problems and issues for improving performances (Proceedings 6th Inter-Regional Conference on Environment-Water, Albacete, Sep. 2003), CREA – Univ. Castilla-La Mancha, Albacete, Spain. 3-5. pp.120.
- von Bernuth, R.D., Gilley, J.R., 1985. Evaluation of center-pivot application packages considering droplet induced infiltration reduction. *Trans. ASAE* 28: 1940-1946.
- Wilmes, G.J., Martin, D.L., Supalla, R.J. 1993. Decision support system for desing of center pivots. *Trans. ASAE* 37: 165-175.
- Yazar, A., 1984. Evaporation and drift losses from sprinkler systems under various operating conditions. *Agri. Water Manag.* 8: 439-449.

8.7. Riego localizado

- Angelakis, A.N., Rolston, D.E., Kadir T.N., Scott, V.H., 1991. Soil-water distribution under trickle source. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 119: 484-500.
- Boman, B.J., 1995. Effects of orifice size on microsprinkler clogging rates. *App. Engin. Agric.*, 11: 839-843.
- Bralts, V.F., Edwards, D.M., Wu, I-Pai., 1987. Drip irrigation design and evaluation based on the statistical uniformity concept. In: D., Hillel (ed.). *Advances in Irrigation*, vol. 4, Academic Press, Orlando, FL, USA, pp. 67-117.
- Bracy, R.P., Parish, R.L., Rosendale, R.M. 2003. Fertigation uniformity affected by injector type. *Horttechnology* 13: 103-105.
- Bralts, V.F., Shayya, W.H., Driscoll, M.A., 1990. An expert system for the hydraulic design of microirrigation systems. In: *Visions of the Future*, ASAE Publ. 04-90, St. Joseph, MI, USA, pp. 340-347.
- Burt, C.M., Styles, S.W., 1994. Drip and microirrigation for trees, vines, and rows crops. Irrigation Training and Research Center, Cal Poly, San Luis Obispo, CA, USA.
- Cadahia, C. 2008. La savia como índice de fertilización. *Cultivos agroenergéticos, hortícolas, ornamanetales y frutales*. Mundi – Prensa, S. A., Madrid, España.
- Capra, A., Scicolone, B. 2004. Emitter and filter test for wastewater reuse by drip irrigation. *Agri. Water Manag.* 68: 135-149.
- Capra, A., Scicolone, B. 2005. Assessing dripper clogging and filtered performance using municipal Wastewater. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 54: 571-579.
- Chica, R.M^a., Roldán, J., Alcaide, M. 2001. Grados de obturación alcanzado por emisores a lo largo de un tiempo trabajando con aguas residuales depuradas. *Ingeniería del Agua*. 8: 351-362.
- Estrada, C., Aliod, R. 2001. Modelización de los elementos de emisión de caudal en ruta implementados en GESTAR. XIX Congreso Nacional de Riegos, Zaragoza, España, 12-14 de junio. pp. 10.
- Fernández Rodríguez, E.J., Camacho, F. 2008. Manual práctico de fertirrigación en riego por goteo. Ediciones Agrotécnicas, Madrid, España.
- Hanson, B., 1994. *Micro-Irrigation of Trees and Vines*. Univ. of Calif., Dept. of Land, Air and Water Resources, Davis, CA, USA.
- Hanson, B., Schwankl, L., Grattan, S.R., Prichard, T., 1994. *Drip Irrigation for Row Crops*. Univ. of Calif., Dept of Land, Air and Water Resources, Davis, CA, USA.
- Hanson, B., Bowers, W., Davidoff, B., Kasapligil, D., Carvajal, A., Bendixen, W., 1995. Field performance of microirrigation systems. In: *Microirrigation for a Changing World*. Proc. of the 5th Drip Irrig. Congress, Orlando, FL, USA.
- Kang, Y., Nishiyama, S., 1995. Hydraulic analysis of microirrigation submain units. *Trans. ASAE* 38: 1377-1384.
- Kang, Y., Nishiyama, S., 1996. Analysis and design of microirrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 122: 75-81.
- Kang, Y., Nishiyama, S., 1996. Design of microirrigation submains. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE*. 122: 83-89.
- Li, J., Meng, Y., Li, B. 2007. Field evaluation of fertigation uniformity as affected by injector type and manufacturing variability of emitters. *Irrig. Sci.* 25: 117-125.
- Llanos, I. 1999. Programación automatizada en tiempo real del riego localizado. *Ingeniería del Agua* 6: 179-184.
- Losada Villasante, A. 2005. *El riego. II. Fundamentos de su hidrología y de su práctica*. Mundi-Prensa, S.A., Madrid, España.

- Marín, J. 1991. Automatización del riego localizado. 1ª parte. Automatización hidráulica. *Fruticultura Profesional* 37: 60-73.
- Marín, J. 1991. Automatización del riego localizado. 2ª parte. Automatización eléctrica y/o electrónica. *Fruticultura Profesional* 39: 49-58.
- Meshkat, M., Warner, R. C., Workman, S. R. 1999. Modeling of evaporation reduction in drip irrigation systems. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE* 125: 315-323.
- Moya, J.A. 1986. Riego localizado a goteo y de pie. 2ª edición. J.A. Moya (ed.), Benissa, Alicante, España.
- Or, D. 1995. Stochastic analysis of soil water monitoring for drip irrigation management in heterogeneous soils. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 59: 1.222-1.233.
- Or, D., Coelho, F.E. 1996. Soil water dynamics under drip irrigation: Transient flow and uptake models. *Trans. ASAE* 39: 2.017-2.025.
- Ould Mohamed El-Hafed, A. V., Daghari, H., Maalej, M. 2001. Analysis of several discharge rate-spacing-duration combinations in drip irrigation system. *Agric. Water Manag.* 52: 33-52.
- Ozekici, B., Sneed, R.E., 1995. Manufacturing variation for various trickle irrigation on-line emitters. *App. Engin. Agric.* 11: 235-240.
- Papadopoulos, I., 1996. Micro-irrigation and fertigation. In: L. S., Pereira, R. A., Feddes, J. R., Gilley, B., Lesaffre (eds.). *Sustainability of Irrigated Agriculture*, Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, The Netherlands, pp. 309-322.
- Pedras, C.M.G., Pereira, L.S., 2002. Modelo de simulação para projecto e avaliação de sistemas de rega localizada. *Ingenieria del Agua* 9: 453-465.
- Pedras, C.M.G., 2003. Sistema de Apoio à Decisão para Projecto e Análise de Funcionamento de Sistemas de Rega sob Pressão (Rega Localizada). Tese de Doutoramento, Universidade do Algarve, Faro, Portugal.
- Pizarro, F. 1987. Riego localizado de alta frecuencia, goteo, microaspersión, exudación. *Mundi – Prensa, S. A., Madrid, España.*
- Ramírez de Cartagena, F., Sáinz, M.A. 1996. Modelo de distribución de agua en suelo regado por goteo. *Ingeniería del Agua* 4: 57-70.
- Rawlins, S.L., 1977. Uniform irrigation with a low head bubbler system. *Agric. Water Manag.* 1: 166-178.
- Reynolds, C., Yitayew, M., Petersen, M., 1995. Low-head bubbler irrigation systems. Part I: Design. *Agric. Water Manag.* 29: 1-24.
- Rincón, L., Sáez, J., Domingo, R. 1989. Obstrucciones en sistemas de riego localizado. *Riegos y Drenajes XXI*, 35: 17-32.
- Rodrigo, J, Hernández, J.M., Pérez Regalado, A., González Hernández, J.F., 1992. Riego Localizado. IRYDA y Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Rodrigo, J. 1994. Riego localizado. II. Programas informáticos. *Mundi – Prensa, S. A., IRYDA, Centro Nacional de Tecnología de Regadíos, Madrid, España.*
- Rodríguez-Sinobas, L., Juana, L., Losada, A. 1999. Effects of temperature changes on emitter discharge. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE* 125: 64-73.
- Skaggs, T.H., Trout, T.J., Šimůnek, J., Shouse, P.J. 2004. Comparison of HYDRUS-2D simulations of drip irrigation with experimental observations. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE* 130: 304-310.
- Threadgill, E.D., Eisenhauer, D.E., Young, J.R., Bar-Yosef, B., 1990. Chemigation. In: G. J., Hoffman, T. A., Howell and K. H., Solomon (eds.). *Management of Farm Irrigation Systems*, ASAE, St. Joseph, MI, USA, pp. 749-780.
- Vallesquino, P., Luque-Escamilla, P.L. 2002. Equivalent friction factor method for hydraulic calculation in irrigation laterals. *J. Irrig. Drain. Engng. ASCE* 128: 278-286.
- Vermeiren, L. Jobling, G.A., 1980. Localized Irrigation. *FAO Irrig. and Drain. Paper N° 36*, Rome, Italy.

Wu I-P., 1995. Optimal scheduling and minimizing deep seepage in microirrigation. Trans. ASAE 38: 1385-1392.