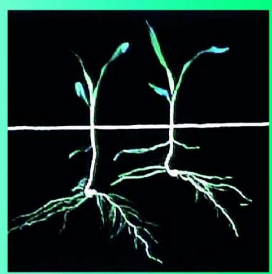
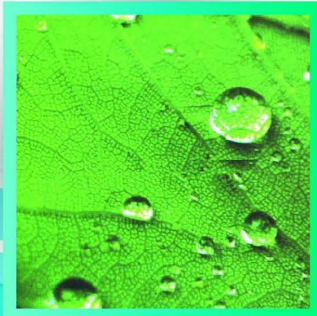


CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO: TEORÍA Y PRÁCTICA

Waldo Ojeda Bustamante
Jorge Flores Velázquez



AVANCES EN
RIEGO Y DRENAJE

SEMARNAT
SECRETARÍA DE
MEDIO AMBIENTE
Y RECURSOS NATURALES

 **IMTA**
INSTITUTO MEXICANO
DE TECNOLOGÍA
DEL AGUA

IMTA
Coordinación de Riego y Drenaje

Calendarización del riego: teoría y práctica

Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez
Editores

México 2015

631.587 Ojeda Bustamante, Waldo (ed.)
O73 *Calendarización del riego: teoría y práctica* / Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez, editores -- 2ª. Edición. Jiutepec, Mor.: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ©2015.
459 p.

ISBN 978-607-9368-40-1 (obra impresa)
978-607-9368-41-8 (obra digital)

1. Riego [Agricultura] 2. Programación del riego 3. Indicadores de riego 4. Evapotranspiración 5. México (Sinaloa)

Autores:

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez, Mauro Íñiguez Covarrubias, Helene K Unland Weiss., Mauricio Carrillo García, Abraham Rojano Aguilar, Hilario Flores Gallardo, Jaime Macías Cervantes, Héctor Flores Magdaleno, Rutilo López López, Ernesto Sifuentes Ibarra, Agustín Ruiz García.

Responsable de la edición:

Rebeca Tavira Gerardo

Coordinación Editorial:

Fátima Sánchez Bonilla

Primera edición. 2004

Segunda edición corregida y aumentada: 2015

D.R. © Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Paseo Cuauhnáhuac 8532

62550 Progreso, Jiutepec, Morelos

México

www.imta.gob.mx

ISBN 978-607-9368-40-1 (obra impresa)

978-607-9368-41-8 (obra digital)

Prohibida su reproducción parcial o total, por cualquier medio, mecánico, electrónico, de fotocopias, térmico u otros, sin permiso de los editores.

Impreso en México – Printed in Mexico

PRÓLOGO

Este libro es producto de varios años de trabajo relacionado con la transferencia del sistema de calendarización del riego en tiempo real en los distritos de riego 75 (Río Fuerte) y 76 (Valle del Carrizo), ambos localizados en el norte del estado de Sinaloa, México. Dicho sistema, llamado Spriter, cuenta con una base de datos, actualizada diariamente, que contiene la información de consumo de agua de los cultivos, padrón de cultivos, características hídricas de los suelos y las dimensiones geométricas de cada parcela, características hidráulicas de la red de distribución que incluyen los puntos de control o tomas granja, las restricciones de volúmenes de agua y superficie por cultivo y ciclo agrícola, las demandas evapotranspirativas de referencia y las precipitaciones. Estas dos últimas son estimadas por una serie de estaciones meteorológicas automatizadas que conforman una red agrometeorológica que monitorea las variables meteorológicas a intervalos de tiempo menores de una hora.

La idea de escribir estos apuntes surgió como una respuesta a la limitada bibliografía disponible sobre la calendarización del riego en español, y que es abordada someramente en libros sobre diseño de sistemas de riego y en general sobre ingeniería de riego. Los conceptos y metodologías de la calendarización de riego se encuentran dispersos en libros y revistas sobre diferentes disciplinas como agrometeorología, sensores y controles, física y química de suelos e ingeniería de riego, por mencionar algunas.

Una motivación para actualizar este libro ha sido la puesta en marcha por parte de la Comisión Nacional del Agua de un programa integral llamado Riego por Gravedad Tecnificado (RIGRAT). Dicho programa tiene varios componentes como trazo y diseño del riego, nivelación de tierras, pronóstico del riego, acompañamiento técnico, mejora de la infraestructura, planeación, seguimiento y evaluación, por mencionar algunos. Dado que el IMTA es uno de los responsables de la implantación y seguimiento del RIGRAT en varios distritos del país, consideramos que este documento puede ayudar a consolidar la calendarización científica del riego como herramienta de apoyo para realizar un uso eficiente del agua, energía y fertilizantes en el marco de dicho programa nacional.

Versiones anteriores de este libro han servido como notas de cursos impartidos a personal técnico de varios distritos de riego del país y en cursos impartidos a estudiantes universitarios de la Universidad Autónoma de Chapingo. Se espera que esta versión sea accesible al personal técnico y agricultores que toman las decisiones asociadas con la calendarización del riego, así como a los estudiantes y profesores de las escuelas de agronomía del país.

Se agradecen infinitamente las sugerencias y comentarios que durante los últimos años han aportado compañeros del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, de la Universidad Autónoma de Chapingo, de la Universidad Autónoma de Sinaloa, del

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, y del Colegio de Postgraduados. Un agradecimiento especial al personal técnico y a los agricultores de los distritos de riego 075 y 076, sobre todo a Juan Hernández, Tomás Espinosa, Jesús Zamorano, Alfredo Maudiel Gutiérrez y Pedro Vázquez. Por último, se agradece el apoyo de Mariana Marcial, Fernanda Vargas y Sergio Jiménez, y sobre todo a Mario Roure por la revisión final y detallada del manuscrito.

Waldo Ojeda Bustamante

Jorge Flores Velázquez

Calendarización del riego: teoría y práctica

CONTENIDO

CAPÍTULO 1 LA IMPORTANCIA DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauricio Carrillo García

CAPÍTULO 2 CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Waldo Ojeda Bustamante, Abraham Rojano Aguilar y Mauro Íñiguez Covarrubias

CAPÍTULO 3 EL AGUA EN EL SUELO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauro Íñiguez Covarrubias

CAPÍTULO 4 INDICADORES DE RIEGO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

CAPÍTULO 5 EVAPOTRANSPIRACIÓN

Waldo Ojeda Bustamante y Agustín Ruiz García

CAPÍTULO 6 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

CAPÍTULO 7 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN INVERNADERO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

CAPÍTULO 8 LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO DEL CULTIVO DE MAÍZ

Ernesto Sifuentes Ibarra, Waldo Ojeda Bustamante y Jaime Macías Cervantes

CAPÍTULO 9 LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Rutilo López López

CAPÍTULO 10 REFERENCIAS

ANEXOS

ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

Helene K. Unland Weiss, Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez

TIEMPO TÉRMICO Y FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS

Waldo Ojeda Bustamante y Ernesto Sifuentes Ibarra

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO USANDO EL CONCEPTO DE TIEMPO TÉRMICO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO USANDO CROPWAT

Helene K. Unland Weiss y Waldo Ojeda Bustamante

AQUACROP: UNA HERRAMIENTA PARA GENERAR CALENDARIOS DE RIEGO

Hilario Flores Gallardo, Waldo Ojeda Bustamante, Agustín Ruiz García y Héctor Flores Magdaleno

ÍNDICE DE CONTENIDO

Autores¹

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)

Flores Velázquez Jorge
Íñiguez Covarrubias Mauro
Ojeda Bustamante Waldo
Unland Weiss Helene K.



Universidad Autónoma Chapingo (UACH)

Carrillo García Mauricio
Rojano Aguilar Abraham
Ruiz García Agustín



Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP)

Flores Gallardo Hilario
López López Rutilo
Macías Cervantes Jaime
Sifuentes Ibarra Ernesto



Colegio de Postgraduados (COLPOS)

Flores Magdaleno Héctor



¹ Por orden alfabético

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	3
LA IMPORTANCIA DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	3
1.1 IMPORTANCIA DEL RIEGO	3
1.2 DEFINICIÓN DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO.....	6
CAPÍTULO 2	13
CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS	13
2.1 FUNCIÓN DEL SUELO	13
2.2 COMPOSICIÓN DEL SUELO.....	13
2.3 PROPIEDADES DEL SUELO.....	14
2.3.1 Textura	15
2.3.2 Materia orgánica (MO).....	17
2.3.3 Densidad aparente (ρ_a).....	18
2.3.4 Densidad real o densidad de partículas sólidas (ρ_s)	21
2.3.5 Porosidad del suelo (ε).....	21
2.3.6 Distribución del tamaño de partículas	23
2.3.7 Superficie específica (S_e).....	24
2.3.8 Capacidad de intercambio catiónico (CIC).....	26
2.3.9 Estructura	27
2.3.10 Perfil del suelo.....	28
2.4 EJEMPLOS	29
CAPÍTULO 3	34
EL AGUA EN EL SUELO	34
3.1 INTRODUCCIÓN.....	34
3.2 HUMEDAD DEL SUELO (θ).....	35
3.2.1 Contenido de humedad gravimétrico (θ_m)	36
3.2.2 Contenido de humedad volumétrico (θ_v)	36
3.2.3 Contenido de humedad a saturación(θ_s).....	37
3.2.4 Capacidad de campo (θ_{cc})	38
3.2.5 Punto de marchitamiento permanente (θ_{MP})	38
3.2.6 Humedad aprovechable (HA)	39
3.2.7 Humedad fácilmente aprovechable (HFA).....	39
3.2.8 Humedad crítica (θ_c).....	42
3.2.9 Métodos para estimar la humedad del suelo.....	45

ÍNDICE DE CONTENIDO

3.2.10 Lámina de riego (L_r).....	47
3.3 ESTADO ENERGÉTICO DEL AGUA EN EL SUELO.....	52
3.3.1 Curva característica de retención del agua en el suelo.....	54
3.3.2 Constantes de tensión del agua en el suelo.....	56
3.3.3 Movimiento del agua en el sistema SPA (suelo-planta-atmósfera).....	57
3.4 MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO.....	58
3.4.1 Conductividad hidráulica a saturación (K_s).....	58
3.4.2 Infiltración.....	59
3.5 EFICIENCIA Y UNIFORMIDAD DEL RIEGO.....	61
3.5.1. Uniformidad de distribución (U_d).....	63
3.5.2. Eficiencia de aplicación (E_a).....	65
3.5.3 Eficacia del riego (EF).....	68
3.5.4 Coeficiente de uso consuntivo (CUC).....	69
3.5.5 Sagacidad del riego (S_r).....	69
3.5.6 Eficiencia del riego (E_r).....	70
3.5.7 Eficiencia en el uso del agua (E_u).....	71
3.6 EJEMPLOS.....	71
CAPÍTULO 4.....	84
INDICADORES DE RIEGO.....	84
4.1 INTRODUCCIÓN.....	84
4.2 INDICADORES VEGETALES O DE LA PLANTA.....	87
4.3 INDICADORES EDÁFICOS.....	93
4.3.1 Contenido de humedad (θ).....	94
4.3.2 Estado energético del agua del suelo (h).....	102
4.4. INDICADORES EVAPORATIVOS.....	112
4.4.1 Tanque evaporímetro.....	112
4.4.2 Atmómetro.....	114
4.4.3 Relación de Bowen.....	115
4.4.4 Correlación turbulenta.....	115
4.5 INDICADORES EVAPOTRANSPIRATIVOS.....	116
4.5.1 Teoría del balance de energía en el tallo.....	123
4.6 BALANCE DE HUMEDAD.....	127
4.7 SITIOS DE MUESTREO.....	127

ÍNDICE DE CONTENIDO

4.8 EJEMPLOS	128
CAPÍTULO 5	133
EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	133
5.1 INTRODUCCIÓN.....	133
5.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL.....	139
5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA.....	139
5.3.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia.....	142
5.3.2 Correlación turbulenta (Eddy correlation)	143
5.3.3 Relación de Bowen.....	144
5.3.4 Ecuaciones semiempíricas.....	144
5.3.5 Método del tanque evaporímetro.....	147
5.3.6 Método de Blaney-Criddle.....	150
5.3.7 Ecuación de Priestley y Taylor.....	153
5.4 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL DE LOS CULTIVOS BAJO CONDICIONES ESTÁNDARES (ET_c)	154
5.4.1 Coeficiente de cultivo basal (K_{cb}).....	155
5.4.2 Cálculo del coeficiente de cultivo mediante el método FAO.....	159
5.4.3 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo basal (K_{cb})	161
5.4.4 Coeficiente de cultivo para frutales jóvenes.....	162
5.5 COEFICIENTES DE CULTIVO BAJO CONDICIONES NO ESTÁNDARES (K_c)	165
5.6 EJEMPLOS	170
CAPÍTULO 6	175
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	175
6.1 INTRODUCCIÓN.....	175
6.2 MÉTODO DEL BALANCE HÍDRICO.....	179
6.3 PROFUNDIDAD DE RAÍCES (P_R).....	184
6.4 PRECIPITACIÓN EFECTIVA (P_E).....	194
6.5 ASCENSO CAPILAR (A_C).....	199
6.5.1 Ejemplo	201
6.6 REQUERIMIENTOS DE LAVADO.....	203
6.6.1 Ejemplos	204
6.7 CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO.....	205
6.7.1 Ejemplo de cálculo.....	207
6.8 REQUERIMIENTOS DE RIEGO (RR)	209

ÍNDICE DE CONTENIDO

6.9 INTERVALO DE RIEGO (IR).....	209
6.10 NÚMERO DE RIEGOS (NR)	210
6.11 PRÓXIMO RIEGO	210
6.12 CAPACIDAD DEL SISTEMA (Q_s)	211
6.13 TIEMPO DE RIEGO (T_R).....	213
6.13.1 Estimación del tiempo de riego basado en el flujo de entrega	213
6.13.2 Estimación del tiempo de riego basado en la intensidad de aplicación	215
6.14 LÁMINA DE RIEGO APLICADA.....	216
6.15 LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y LOS MÉTODOS DE RIEGO	217
6.15.1 Riego por gravedad.....	218
6.15.2 Riego por aspersión.....	219
6.15.3 Riego por microirrigación.....	220
6.16 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO BAJO CONDICIONES DE ESCASEZ.....	223
6.17 EJEMPLOS.....	225
CAPÍTULO 7	232
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN INVERNADERO	232
7.1 INTRODUCCIÓN.....	232
7.2 EL RIEGO EN INVERNADEROS	233
7.3 REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS EN INVERNADERO	235
7.3.1 Evapotranspiración.....	237
7.4 MÉTODOS PARA CALCULAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET_0) CON BASE EN DATOS METEOROLÓGICOS.....	239
7.5 MÉTODOS DIRECTOS PARA ESTIMAR LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ET_R).....	240
7.5.1 Lisímetro.....	240
7.6 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO	242
7.6.1 Métodos basados en variables climáticas.....	244
7.6.2 Métodos basados en variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato.....	246
7.7 PROGRAMACIÓN DEL RIEGO	247
7.7.1 Algunas maneras de programar el riego en invernadero.....	248
7.8 SOPORTE DE LA PLANTA (MEDIO DE CULTIVO).....	254
7.8.1 Curva característica de retención de agua.....	258
7.8.2 Los tipos de agua en los sustratos.....	259
7.9 TEZONTLE COMO SUSTRATO	261

ÍNDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO 8	267
LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO DEL CULTIVO DE MAÍZ	267
8.1 INTRODUCCIÓN.....	267
8.2 LA IMPORTANCIA DEL RIEGO EN LA PRODUCCIÓN DE MAÍZ.....	269
8.2.1 Factores limitantes de la producción.....	269
8.2.2 Factores asociados a la calendarización del riego.....	270
8.3 MÉTODOS DE CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO.....	273
8.3.1 La planta como indicador.....	273
8.3.2 El suelo como indicador	273
8.4 CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO Y TIEMPO TÉRMICO	275
8.4.1 Programación integral bajo condiciones de escasez	278
8.4.2 Manejo del último riego.....	279
8.4.3 Tecnologías de información y comunicación (TIC'S)	281
CAPÍTULO 9	285
LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS	285
9.1 INTRODUCCIÓN.....	285
9.2 FACTORES ASOCIADOS CON LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN LAS HORTALIZAS	287
9.2.1 Clima.....	287
9.2.2 Calidad del agua de riego.....	287
9.2.3 Especie de cultivo.....	288
9.2.4 Suelo	288
9.2.5 Sistema de producción.....	289
9.3 EL RIEGO POR GOTEÓ	291
9.3.1 Evapotranspiración del cultivo.....	292
9.3.2 Coeficientes de cultivos (Kc).....	293
9.3.3 Monitoreo de la tensión de humedad del suelo.....	294
9.4 RENDIMIENTO DE FRUTOS Y USO EFICIENTE DEL AGUA DE RIEGO (UEAR) EN CHILE HABANERO Y TOMATE DE CÁSCARA	295
9.4.1 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de chile habanero	295
9.4.2 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de tomate de cáscara.....	299
9.5 CONCLUSIONES.....	302
CAPÍTULO 10	307

ÍNDICE DE CONTENIDO

REFERENCIAS.....	307
ANEXO A.....	3
ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS.....	3
A.1 INTRODUCCIÓN.....	3
A.2 REDES DE ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS	3
A.3 DESCRIPCIÓN DE UNA ESTACIÓN METEOROLÓGICA.....	4
A.4 ESTÁNDARES PARA ALTURAS Y EXPOSICIÓN DE LOS SENSORES METEOROLÓGICOS.....	7
A.4.1 Estándares internacionales.....	7
A.4.2 Estándares para alturas y exposición de sensores en las EAA de la Red Agroclimatológica Nacional	11
A.4.3 Criterios de precisión.....	17
A.4.4 Criterios de ubicación	18
A.4.5 Mantenimiento de las ECA	21
A.5 REFERENCIAS	25
ANEXO B.....	3
TIEMPO TÉRMICO Y FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS	3
B.1 INTRODUCCIÓN.....	3
B.2 GRADOS DÍA DESARROLLO (°D)	5
B.2.1 Método del promedio diario.....	10
B.2.2 Método de curvas de ajuste.....	11
B.2.3 Método de la integración numérica de la curva observada	12
B.3 FENOLOGÍA.....	13
B.4 REFERENCIAS.....	15
ANEXO C	3
CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO USANDO EL CONCEPTO DE TIEMPO TÉRMICO	3
C.1 INTRODUCCIÓN.....	3
C.2 ECUACIONES PARA LA CALENDARIZACION INTEGRAL DEL RIEGO	4
C.3 EJEMPLO DE APLICACION PARA MAÍZ	8
C.4 REFERENCIAS	11
ANEXO D	3
EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO USANDO CROPWAT	3
D.1 INTRODUCCIÓN	3
D.2 EJEMPLO DE REFERENCIA	3

ÍNDICE DE CONTENIDO

<i>D.2.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia.....</i>	<i>4</i>
<i>D.2.2 Parámetros para la programación de riego.....</i>	<i>6</i>
<i>D.2.3 Requerimientos y programa de riego de los cultivos.....</i>	<i>8</i>
D.3 CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO DE LOS CULTIVOS UTILIZANDO CROPWAT	11
<i>D.3.1 Pantalla principal de sistema</i>	<i>13</i>
<i>D.3.2 Datos climáticos.....</i>	<i>17</i>
<i>D.3.3 Cultivos</i>	<i>19</i>
<i>D.3.4 Suelos</i>	<i>21</i>
<i>D.3.5 Requerimientos y programación del riego</i>	<i>22</i>
D.4 REFERENCIAS	30
ANEXO E	3
AQUACROP: UNA HERRAMIENTA PARA GENERAR CALENDARIOS DE RIEGO	3
<i>E.1 INTRODUCCIÓN</i>	<i>3</i>
<i>E.2 DESCRIPCIÓN TEÓRICA.....</i>	<i>5</i>
<i>E.3 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA.....</i>	<i>9</i>
<i>E.4. EJEMPLO DE APLICACION PARA MAÍZ.....</i>	<i>14</i>
<i>E.5 REFERENCIAS.....</i>	<i>21</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Rendimiento normalizado en función de la lámina aplicada normalizada.....	5
Figura 1.2 Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento de dos cultivos bajo condiciones de estrés hídrico	6
Figura 1.3 Variación del contenido de humedad durante el ciclo fenológico de un cultivo	7
Figura 1.4 Riego por inundación sin control.....	8
Figura 2.1 Comparación del tamaño de partículas del suelo y raíces.....	15
Figura 2.2 Triángulo de texturas	15
Figura 2.3 Variación típica del contenido de materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola.....	18
Figura 2.4 Distribución acumulada del tamaño de partículas para cuatro tipos de suelos	23
Figura 2.5 Superficie específica para varias formas de partículas sólidas	25
Figura 2.6 Variación típica de la estructura de un suelo agrícola.....	27
Figura 2.7 Disposición de los estratos en un perfil de un suelo agrícola.....	28
Figura 3.1 Constantes de humedad (θ) del suelo.....	35
Figura 3.2 Constantes de humedad para varias texturas de suelo	39
Figura 3.3 Modelo de barril que representa las constantes de humedad.....	43
Figura 3.4 Relación entre volumen y lámina para un área unitaria	48
Figura 3.5 Profundidad efectiva radical máxima en centímetros sin restricciones de crecimiento	50
Figura 3.6 Una lámina de 10 cm moja una profundidad de 100 cm asumiendo que $\rho_a = 1.25 \text{ gr cm}^{-3}$, $\theta_{mcc} = 0.23 \text{ gr gr}^{-1}$ y $\theta_{mi} = 0.15 \text{ gr gr}^{-1}$	51
Figura 3.7 Curvas características de tres suelos agrícolas (adaptada de Cuenca, 1989)	55
Figura 3.8 Rango de tensiones del suelo para obtener máximo rendimiento (Lomas y Levin, 1979)	56
Figura 3.9 Curvas típicas para la velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada de un suelo.....	59
Figura 3.10 Infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración en campo.....	61
Figura 3.11 Distribución de la lámina aplicada en un riego en surcos	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.12 Diferentes escenarios de eficiencia y uniformidad que pueden presentarse al finalizar el riego	67
Figura 4.1 Componentes del balance hídrico en la zona radical	85
Figura 4.2 Variación de un indicador de riego de acuerdo con la calendarización del riego	86
Figura 4.3 Pistola de rayos infrarrojos operando en campo para medir la temperatura del follaje.....	89
Figura 4.4 Curvas base usadas para el cálculo del IEHC	91
Figura 4.5 Parámetros asociados con el indicador de humedad del suelo.....	94
Figura 4.6 Aspersor de neutrones en campo.....	96
Figura 4.7 Curva de calibración típica de una sonda de neutrones.....	97
Figura 4.8 Dos varillas tipo TDR para estimar la humedad del suelo. Como referencia se presenta una regla y un minitensiómetro equipado con transductor de presión ..	98
Figura 4.9 Relación típica entre constante dieléctrica y contenido de humedad volumétrico	100
Figura 4.10 Posición relativa de los tensiómetros en función del cultivo	102
Figura 4.11 Representación esquemática de las posiciones recomendadas para colocar tensiómetros.....	104
Figura 4.12 Componentes de un tensiómetro instalado en campo (a) y escala de valores del potencial mátrico en centibares (b)	105
Figura 4.13 Variación de la tensión del agua en el suelo a dos profundidades, 45 y 90 cm, con un buen manejo del riego	107
Figura 4.14 Bloque poroso con su medidor de resistencia eléctrica.....	111
Figura 4.15 Variación de la tasa evaporativa en función del tamaño del tanque de medición (Adaptado de Ward, 1967)	113
Figura 4.16 Tanque evaporímetro tipo A	113
Figura 4.17 Representación simplificada de un lisímetro de pesada	117
Figura 4.18 Esquema del lisímetro de balance.....	118
Figura 4.19 Valores promedio mensuales de la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de Penman-Montieth, así como los valores correspondientes a lisímetros instalados en once localidades alrededor del mundo (Allen <i>et al.</i> , 1998)	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.20 Lisímetro de pesada. a) Imagen de la superficie del suelo. Al fondo se ven dos estaciones meteorológicas; b) imagen interior con detalles del sistema de monitoreo	120
Figura 4.21 Toma aérea del lisímetro de pesada instalado en el CENID-RASPA del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de La Laguna, México	121
Figura 4.22 Medidores de savia instalados en dos ramas de un árbol	121
Figura 4.23 Sensor de flujo de savia para estimar la evapotranspiración del cultivo	122
Figura 4.24 Esquema que muestra las variables para el cálculo del flujo de savia	123
Figura 5.1 Componentes meteorológicos relacionados con la evapotranspiración..	135
Figura 5.2 Variación horaria de la evaporación del suelo y transpiración sin la presencia de un evento de riego (Thompson <i>et al.</i> 1996)	136
Figura 5.3 La variación de los componentes de la evapotranspiración durante el ciclo fenológico de un cultivo (Allen <i>et al.</i> , 1998)	136
Figura 5.4 Balance hídrico en el nivel de la fitósfera	137
Figura 5.5 Pasos requeridos para estimar la evapotranspiración real de un cultivo ..	139
Figura 5.6 Comparación de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia: pasto y alfalfa (Wright, 1996)	140
Figura 5.7 Variación de la evapotranspiración de referencia (ET _o) en el Valle del Carrizo (1995-1998)	142
Figura 5.8 Valores de la ET _o obtenidos a partir de un tanque evaporímetro y una estación meteorológica (ecuación de Penman-Montieth)	150
Figura 5.9 Variación del coeficiente de cultivo basal (K _{cb}) en función del ciclo fenológico con la curva real y la curva aproximada por interpolación lineal.....	156
Figura 5.10 Valores típicos de K _{cb} para diferentes cultivos en la etapa de máxima cobertura vegetal (Allen <i>et al.</i> , 1998).....	157
Figura 5.11 Variación cualitativa del coeficiente de cultivo basal para varios cultivos en la última fase fenológica (Allen <i>et al.</i> , 1998)	158
Figura 5.12 Variación del K _{cb} en función de las condiciones climáticas durante la etapa de máxima cobertura vegetal (Allen <i>et al.</i> , 1998).....	159
Figura 5.13 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo	161

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 5.14 Variación del factor evapotranspirativo (f_s) para árboles jóvenes, expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros, en función del porcentaje de sombreado (R).....	164
Figura 5.15 Variación del factor de estrés hídrico del suelo (K_e) de acuerdo con dos modelos: lineal y logarítmico.....	166
Figura 5.16 Comparación del coeficiente de cultivo bajo condiciones estándares (K_{cb}) y no estándares (K_c)	169
Figura 5.17 Variación de la evapotranspiración en sus tres versiones (referencia, cultivo y real) para el cultivo de maíz otoño-invierno en el Valle del Fuerte, Sinaloa	170
Figura 6.1 Componentes de la calendarización del riego	175
Figura 6.2 Componentes que intervienen en el balance de agua en la zona de raíces	180
Figura 6.3 Variación horaria de la humedad en el estrato superior de un suelo cultivado	181
Figura 6.4 Variación del déficit de humedad durante el ciclo fenológico del cultivo en días después de siembra (DDS).....	183
Figura 6.5 Componentes que intervienen en la extracción de agua realizada por las raíces.....	185
Figura 6.6 Patrón típico de extracción de humedad realizada por las raíces.....	186
Figura 6.7 Crecimiento radical lineal de la papa.....	187
Figura 6.8 Variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo para cuatro valores (0.1, 0.5, 1 y 2) del parámetro W de la ecuación (6.10)	188
Figura 6.9 Desarrollo radical en función de la frecuencia de riego (Lomas y Levin, 1978)	189
Figura 6.10 Desarrollo radical en función del porcentaje de desarrollo para el maíz	192
Figura 6.11 Estados en la emergencia de una planta dicotiledónea (Merva, 1995).	193
Figura 6.12 Variación del escurrimiento (E_s) en función de la precipitación y el número de curva.....	198
Figura 6.13 Porcentaje de aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos en función del coeficiente de cultivo para algodón a dos profundidades (1.2 y 2 m) del manto freático y una salinidad de 15.4 dS/m (adaptado de Ayars y Hutmacher, 1994)	200

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 6.14 Contribución del manto freático a la zona de raíces en mm/d (Doorenbos y Pruitt, 1977).....	202
Figura 6.15 Tiempo de riego para aplicar una lámina bruta de 10 cm en función del área dominada bajo cuatro gastos (40, 80, 120 y 160 $\ell \text{ s}^{-1}$).....	215
Figura 6.16 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego por gravedad.....	219
Figura 6.17 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego de baja intensidad y alta frecuencia.....	221
Figura 7.1 Características de un pimiento cultivado en invernadero.....	233
Figura 7.2 Invernadero tipo cenital de 5 naves	234
Figura 7.3 Circulación del agua del suelo a través de la planta hasta la atmósfera ..	236
Figura 7.4 El proceso de gutación.....	236
Figura 7.5 Formación de la ecuación de balance al nivel lisímetro.....	237
Figura 7.6 Cultivo de frijol en invernadero. Un alto índice de área foliar para transpirar	238
Figura 7.7 Evolución temporal de la ET_r en el ciclo de cultivo del tomate en invernadero	239
Figura 7.8 Procesos inherentes al balance de energía en un invernadero	240
Figura 7.9 Esquema de un lisímetro de balance en un invernadero	241
Figura 7.10 Sistema de riego por goteo en sustrato tezontle rojo	242
Figura 7.11 Variación de la transpiración en función de la radiación al interior del invernadero	244
Figura 7.12 Evolución del contenido de agua del suelo tras varios ciclos de riego (Fernández et al., 2001).....	247
Figura 7.13 Sistema de riego por goteo tipo “espagueti” en bolsas de tezontle	248
Figura 7.14 Calendarización del riego en función de la radiación.....	250
Figura 7.15 Sensibilidad del cultivo en la aplicación de los riegos	251
Figura 7.16 Cultivo de hortalizas en sistemas hidropónicos	252
Figura 7.17 Sensor de flujo de savia para determinar el momento del riego	253
Figura 7.18 Diversas técnicas usadas como medio de cultivo, aeroponía, hidroponía, acuaponía, etc.	254
Figura 7.19 Sistema hidropónico con movimiento circular.....	255

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 7.20 Turba usada como sustrato	257
Figura 7.21 Curva característica de retención de agua de un sustrato (De Boodt <i>et al.</i> , 1974; Handreck y Black, 1991)	260
Figura 7.22 Cultivo de tomate en sustrato de tezontle	261
Figura 7.23 Curva de retención de humedad para sustrato de tezontle (Ojeda-Bustamante, 2004)	262
Figura 8.1 Evolución de la superficie sembrada y rendimiento de maíz en Sinaloa de 1981 a 2014	268
Figura 8.2 Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (MCLF y MCPVC)	269
Figura 8.3 Factores limitantes de la producción	270
Figura 8.4 Fenología del cultivo de maíz y su relación con el tiempo térmico o grados día desarrollo (°D) (Ojeda y Sifuentes, 2006)	271
Figura 8.5 Plantas de maíz con efectos contrastantes de estrés hídrico visual	273
Figura 8.6 Constantes hídricas por textura del suelo (Sifuentes <i>et al.</i> , 2013), adaptado de Rawls y Brakensiek (1983)	274
Figura 8.7 Monitoreo de la humedad del suelo con TDR y uso de sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para seguimiento del riego en parcelas	275
Figura 8.8 Sistemas de riego para la producción de maíz	277
Figura 8.9 Aplicación innecesaria del último riego en etapa R5 (grano dentado)	280
Figura 8.10 Predicción del último riego mediante programación integral	280
Figura 8.11 Aplicaciones computacionales para la programación integral del riego.	281
Figura 9.1 Variación de los elementos del clima (temperaturas máxima y mínima y precipitación) y láminas de riego durante el ciclo del cultivo de chile habanero, O-I/2012-2013. Huimanguillo, Tabasco, México	287
Figura 9.2 Fuente de abastecimiento de agua superficial para riego y sistema de filtrado de grava y arena	288
Figura 9.3 Producción de plántulas de chile habanero en charolas de 50 y 200 cavidades en vivero	289
Figura 9.4 Cultivo de chile habanero con cubierta plástica de color plateado-negro en Huimanguillo, Tabasco, México	290

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 9.5 Cultivo de tomate de cáscara con cubierta plástica y espalderas en Huimanguillo, Tabasco, México	290
Figura 9.6 Sistema de riego por goteo para el cultivo de sandía en el municipio de Balancán, Tabasco	291
Figura 9.7 Instalación de sistema de riego por goteo con cintas y cubierta plástica	292
Figura 9.8 Tensiómetros instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el cultivo de chile habanero	294
Figura 9.9 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento de frutos en kg ha ⁻¹ por corte del cultivo de chile habanero con riego por goteo en el ciclo O-I/2012-2013...	297
Figura 9.10 Efecto de la lámina de riego y la precipitación en el potencial mátrico del suelo a la profundidad de 15 y 30 cm en el cultivo de chile habanero con cubierta plástica.....	298
Figura 9.11 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento por corte de frutos de tomate verde con riego por goteo en el ciclo OO-I/2011-2012	300
Figura 9.12 Rendimiento de frutos en t ha ⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un fluvisol de Huimanguillo, Tabasco.....	300
Figura 9.13 Rendimiento de frutos en t ha ⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un suelo Fluvisol del Campo Experimental Huimanguillo.....	301
Figura 9.14 Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a dos profundidades (15 y 30 cm) en el cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo y cubierta plástica en el ciclo 2012- 13	302
Figura A.1 Estación agrometeorológica automatizada	5
Figura A.2 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de pluviómetros en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992).....	10
Figura A.3 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de anemómetros y veletas en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992).	13
Figura A.4 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992).....	14

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura A.5 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación del sensor de radiación solar en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992).....	15
Figura A.6 Distribución discreta de la frecuencia de profundidades de instalación del sensor de temperatura del suelo en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)	16
Figura A.7 Estación meteorológica en una zona de riego.....	20
Figura A.8 Distribución discreta de la frecuencia de mantenimiento de redes de las ECA	22
Figura B.1 Tasa de desarrollo en un organismo en función de la temperatura	6
Figura B.2 Concepto de días grado desarrollo asumiendo una temperatura diurna constante	6
Figura B.3 Modelo triangular de la variación horaria de la temperatura.....	7
Figura B.4 Ajuste de un modelo triangular a la variación de la temperatura horaria de un día.....	8
Figura B.5 Caso de corte superior para el cálculo de los grados día	8
Figura B.6 Casos de localización de la curva de la temperatura con respecto a las temperaturas biológicas (T _b y T _x) para el cálculo de los °D	10
Figura B.7 Curvas de ajuste a la curva diaria observada para estimar °D.....	11
Figura B.8 Concepto de horas grado desarrollo (°H).....	12
Figura C.1 Variación del factor de abatimiento (f) en función del parámetro α_3 definido por el sistema de riego.....	6
Figura C.2 Curvas generadas por las ecuaciones de la Tabla C.1 para el cultivo de papa (Ojeda-Bustamante <i>et al.</i> , 2004).....	8
Figura D.1 Plan de cultivos de diseño en los meses de máxima demanda hídrica.....	4
Figura D.2 Variación de la humedad del suelo para el cultivo de papa	10
Figura D.3 Pantalla principal de CropWat para Windows v8.0 antes de cargar datos	13
Figura D.4 Guardar la nueva sesión “Mochis.ses”	14
Figura D.5 Configuración de opciones de CropWat	15
Figura D.6 Configuración de método de para calcular la precipitación efectiva	16
Figura D.7 Configuración de programación de riego para cultivos no inundados	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura D.8 Introducción de los datos climáticos	18
Figura D.9 Introducción de los datos de precipitación.....	19
Figura D.10 Captura de parámetros del cultivo (papa).....	20
Figura D.11 Captura del padrón de cultivos	21
Figura D.12 Captura de los parámetros del suelo en el sistema CropWat	22
Figura D.13 Resumen del requerimiento de riego para cultivo de papa, Los Mochis ..	23
Figura D.14 Resumen de programación del riego para el cultivo de papa, Los Mochis	24
Figura D.15 Resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis.....	25
Figura D.16 Gráfica de la temperatura mínima y máxima mensual para la estación de Los Mochis	26
Figura D.17 Gráfica de la velocidad del viento y insolación mensual para la estación de Los Mochis	26
Figura D.18 Gráfica de la evapotranspiración de referencia, precipitación total y efectiva mensual para la estación de Los Mochis.....	27
Figura D.19 Gráfica de la evapotranspiración real y requerimiento de riego para papa	28
Figura D.20 Gráfica del programa de riegos y el déficit de humedad de agua en el suelo para papa	28
Figura E.1 Pantalla de inicio del software AquaCrop.....	5
Figura E.2 Operación y lógica en la simulación con el modelo AquaCrop.....	7
Figura E.3 Catálogo de cultivos integrados en el software del modelo AquaCrop.....	10
Figura E.4 Interfaz para introducir la información de las diferentes variables requeridas para simular el rendimiento del cultivo en AquaCrop	11
Figura E.5 Selección de la modalidad agrícola: riego o temporal	12
Figura E.6 Selección del sistema de riego a utilizar en la simulación del cultivo	13
Figura E.7 Visualización del calendario de riego simulado con respecto al cultivo (duración del ciclo del cultivo, clima, suelo, sistema de riego, densidad de población) con el modelo AquaCrop.....	14
Figura E.8 Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (O-I y P-V)	17

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura E.9 Simulación del dosel vegetal (CC) en porcentaje para la fecha de siembra del 05 de noviembre (ciclo agrícola O-I) bajo las tres condiciones de disponibilidad hídrica.....	18
Figura E.10 Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a las tres condiciones de disponibilidad hídrica y fechas de siembra (ciclos O-I y P-V)	19

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Composición media de un suelo húmedo	14
Tabla 2.2 Dimensiones granulométricas de las partículas del suelo.....	15
Tabla 2.3 Variabilidad de los parámetros del suelo obtenidos a partir de muestras de suelo (Warrick, 2003)	20
Tabla 2.4 Variación de la superficie específica (S_e) de partículas esféricas en relación con su radio, con M_s y V_s constantes, empaquetadas en un volumen de 1 m^3	25
Tabla 3.1 Densidad del agua en función de la temperatura	37
Tabla 3.2 Sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico (FAO, 1990)	40
Tabla 3.3 Periodos críticos al déficit hídrico de los cultivos.....	41
Tabla 3.4 Variación estacional del factor abatimiento hídrico (f) de algunos cultivos (SCS-USDA, 1991).....	42
Tabla 3.5 Constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas (porcentajes volumétricos).....	44
Tabla 3.6 Parámetros del suelo obtenidos de muestras superficiales de suelos agrícolas (Marshall y Holmes, 1988).....	44
Tabla 3.7 Conversiones útiles en la medición del agua	48
Tabla 3.8 Profundidad de mojado al aplicar una lámina de 1 cm en diferentes suelos de la Tabla 3.5. Las unidades de la humedad son en porcentaje.....	51
Tabla 3.9 Valores de la humedad aprovechable (mm/m) en función de la tensión del suelo (Rijtema, 1969)	56
Tabla 3.10 Valores del potencial del agua para el sistema suelo-agua-atmósfera.....	57
Tabla 3.11 Potencial del agua (a $25 \text{ }^\circ\text{C}$) a diferentes humedades relativas	57
Tabla 3.12 Parámetros de la ecuación de infiltración acumulada de acuerdo con el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos	60
Tabla 3.13 Coeficientes de uniformidad potenciales (PU_d) en porcentaje, para sistemas de riego bien diseñados y un valor de $P = 0.25$	64
Tabla 3.14 Eficiencias de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm.....	67
Tabla 4.1 Coeficientes de la línea base (α_1 y α_2) para cultivos no estresados usando la Ecuación 4.2, reportados por Hanson <i>et al.</i> (1999) para California, EUA.....	92
Tabla 4.2 Valores mínimos de la tensión mátrica (h_c) del suelo sin problemas de salinidad para definir el momento del riego en varios cultivos.....	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.3 Equivalencias de unidades de presión y lámina (psi se refiere a libras por pulgada cuadrada)	106
Tabla 5.1 Evapotranspiración de referencia ET_0 en $mm\ d^{-1}$ para diferentes regiones agroclimáticas (adaptado de Allen <i>et al.</i> , 1998).....	141
Tabla 5.2 Datos meteorológicos requeridos por los métodos de evapotranspiración recomendados por la FAO de acuerdo con la disponibilidad climática (Doorenbos y Pruitt, 1977).....	145
Tabla 5.3 Comparación de varios métodos para estimar la evapotranspiración de referencia tomando como base datos de 11 lisímetros alrededor del mundo (Jensen <i>et al.</i> , 1990).....	146
Tabla 5.4 Equivalencias de unidades relacionadas con la evapotranspiración.....	153
Tabla 5.5 Rangos de variación de la evapotranspiración de los principales cultivos durante su ciclo fenológico (Doorenbos y Pruitt, 1977).....	154
Tabla 5.6 Coeficientes de cultivo (K_{cb}) para varios cultivos para la región norte de Sinaloa, México	160
Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo para algunas hortalizas sembradas en el estado de California (EUA) en función del ancho del follaje y ancho de cama (Hanson <i>et al.</i> , 1999)	162
Tabla 5.8 Requerimientos netos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el Valle del Carrizo. L_n es lámina neta parcelaria	167
Tabla 5.9 Factor de mojado (F_m) para diferentes sistemas de riego (Martin <i>et al.</i> , 1990)	168
Tabla 5.10 Valores típicos de tiempos de secado (t_d) y el factor de persistencia (P_f) para suelos agrícolas (Hill <i>et al.</i> , 1983).....	168
Tabla 6.1 Densidad radical de cebada y trigo para diferentes tipos de raíces (Wild, 1993)	186
Tabla 6.2 Profundidad efectiva aproximada de los principales cultivos agrícolas (FAO, 1990)	190
Tabla 6.3 Profundidad efectiva de exploración de las raíces (cm) de acuerdo con la textura del suelo (Palacios, 1998)	191
Tabla 6.4 Influencia de la profundidad máxima del suelo en la productividad (PPI, 1994)	193
Tabla 6.5 Número de curva (CN_{II}) de escurrimiento para diferentes complejos hidrológicos suelo-cobertura para un contenido de humedad antecedente tipo II y $I_a = 0.2S$	197

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 6.6 Grupos de suelos hidrológicos	198
Tabla 6.7 Tipos de contenidos de humedad antecedente previa (CHA)	199
Tabla 6.8 Parámetros del modelo de Gardner para la conductividad hidráulica para diferentes suelos reportados por Amoozegar-Fard <i>et al.</i> (1984).....	201
Tabla 6.9 Tolerancia a la salinidad de algunos cultivos agrícolas, en términos de conductividad eléctrica (CE), en función del rendimiento esperado (en porcentaje con respecto al rendimiento máximo potencial)	205
Tabla 6.10 Capacidad de descarga diaria requerida (Q_d) en $\ell\ s^{-1}$ por hectárea según la ecuación 6.49	212
Tabla 6.11 Valores del coeficiente K para diferentes unidades usadas en la Ecuación 6.56	217
Tabla 6.12 Lámina bruta en cm, aplicada en función del gasto y tiempo de riego ...	217
Tabla 6.13 Intensidad de aplicación en pulgadas por hora en función del espaciamiento entre aspersores y el gasto de aplicación del aspersor.....	222
Tabla 6.14 Valores del parámetro K_y para algunos cultivos agrícolas (Doorenbos y Kassan, 1986)	223
Tabla 6.15 Láminas netas (L_n) de riego en función de la fecha de siembra para el maíz en el DR 076	224
Tabla 6.16 Requerimientos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el DR 076	224
Tabla 7.1 Principales variables climáticas y sensores para determinar el momento del riego (Bringas, 2003)	243
Tabla 7.2 Humedad del aire en diferentes unidades (Nederhoff, 2001).....	246
Tabla 7.3 Principales características físicas y químicas del tezontle (Burés, 1997).	263
Tabla 8.1 Requerimientos hídricos totales (netos y brutos) de los principales cultivos en el norte de Sinaloa en función del tipo de sistema de riego.....	272
Tabla 8.2 Consumo de agua promedio (ET_c) por etapa fenológica para una variedad típica sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa con requerimientos a madurez de 1451 °D	275
Tabla 8.3 Calendario de riego en maíz con riego por gravedad.....	276
Tabla 8.4 Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal)	277

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 8.5 Requerimientos de riego de siembra a madurez fisiológica del maíz en diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte.....	277
Tabla 8.6 Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua	279
Tabla 9.1 Coeficientes de cultivos utilizados para la aplicación de láminas de riego en chile habanero y tomate de cáscara	293
Tabla 9.2 Requerimientos de riego (RR) mensual y diario para cultivos hortícolas sin cubierta plástica y datos climáticos de una estación climatológica en Cárdenas, Tabasco (a partir de datos basados en coeficientes de cultivos (Kc) propuestos por la FAO)	293
Tabla 9.3 Efecto de la fecha de trasplante, variedad y ciclo en el rendimiento de frutos y la productividad de agua de riego para chile habanero con riego por goteo y cubierta plástica en suelos fluvisoles de Huimanguillo, Tabasco.....	296
Tabla 9.4 Láminas de riego, precipitación y eficiencia del agua de riego en el cultivo de chile habanero y tomate verde con riego por goteo con y sin cubierta plástica .	299
Tabla A.1 Alturas estándares de instalación de sensores usados por cuatro organismos internacionales y nacionales, y en cinco de las “grandes” redes nacionales de estaciones automatizadas en los EUA.....	7
Tabla A.2 Alturas de instalación de sensores meteorológicos para grandes redes seleccionadas de estaciones climatológicas automatizadas (ECA) en los EUA.....	8
Tabla A.3 Alturas de instalación de sensores meteorológicos recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC).....	9
Tabla A.4 Alturas estándares de instalación de sensores usadas por la RAN.....	12
Tabla A.5 Resumen de precisiones requeridas para medidas superficiales con fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas	17
Tabla A.6 Distancia de influencia vientos arriba (m) que contribuye al 50 o el 80 % del flujo para diferentes alturas de medición (m) y factores de rugosidad z_0 (m) bajo condiciones de estabilidad neutral.....	19
Tabla A.7 Plan de mantenimiento técnico para las ECA de la RAN.....	23
Tabla C.1 Descripción de los modelos con parámetros para expresar las variables de calendarización del riego.....	7
Tabla C.2 Parámetros de calendarización del riego para papa (Ojeda-Bustamante <i>et al.</i> , 2004)	7

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla C.3 Parámetros de calendarización del riego obtenidos para el cultivo de maíz bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua	9
Tabla C.4 Calendario de riego en maíz bajo riego por gravedad	10
Tabla C.5 Calendario de riego en maíz bajo por aspersión móvil (avance frontal)	10
Tabla D.1 Distribución de las fechas de siembra (FS), cosecha (FC), duración del ciclo (DC), profundidad de raíces (Pr), factor de abatimiento (f) y superficie (A) para el plan de cultivos propuesto	4
Tabla D.2 Datos geográficos de la estación meteorológica Los Mochis	5
Tabla D.3 Datos promedios para un día típico del mes para la estación de los Mochis	5
Tabla D.4 Valores diarios típicos mensuales de ETo (mm/día) para Los Mochis, Sinaloa	6
Tabla D.5 Precipitación mensual acumulada promedio (mm) y diaria (mm/día) observada para Los Mochis, Sinaloa	6
Tabla D.6 Parámetros para la programación del riego en la zona de riego de Los Mochis, Sinaloa	7
Tabla D.7 Parámetros promedio de los suelos del Valle del Fuerte, Sinaloa	7
Tabla D.8 Requerimientos de riego para el periodo para el cultivo de papa	8
Tabla D.9 Programa de riego para el cultivo de papa con fecha e intervalo de riego, y requerimientos de riegos netos y brutos	9
Tabla D.10 Programa de riego para el plan de cultivos propuesto	11
Tabla D.11 Tabla exportada de CropWat con resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis	29
Tabla E.1 Mejoras y adición de nuevos cultivos del modelo AquaCrop a partir de su liberación	6
Tabla E.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop	15
Tabla E.3 Datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V (2007-2008 y 2008-2009)	16
Tabla E.4 Resultados medidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop	17
Tabla E.5 Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos O-I y P-V de acuerdo con las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y fecha de siembra	19

*“En muchos países el riego es un arte antiguo, tanto como la civilización,
pero para la humanidad es una ciencia, la de sobrevivir”*

O.W. Israelsen

La importancia de la calendarización del riego



1

Capítulo 1

LA IMPORTANCIA DE LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauricio Carrillo García

1.1 Importancia del riego

Los recursos hidráulicos son indispensables para el desarrollo de un país. De hecho, los problemas asociados con el agua son una creciente preocupación nacional y mundial. Estos problemas tienen repercusiones sociales, económicas y políticas que se han incrementado en las últimas décadas y se agravan durante los periodos de sequía que azotan a las zonas áridas y semiáridas, generando un desequilibrio entre los recursos disponibles y las demandas de agua para uso agrícola, urbano, ambiental e industrial.

La precaria disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas constituye la limitante principal para la producción de granos y para la apertura de nuevas áreas de cultivo. Al incrementarse la población, la competencia por el agua se intensifica, lo que hace necesarios la conservación y el uso eficiente de este recurso mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos, tanto para distribuir y aplicar el agua de riego, como para evaluar y controlar el estado hídrico en la zona de raíces del cultivo.

México cuenta con alrededor de 20 millones de hectáreas cultivables. En la tercera parte de ellas se practica el riego, y en estas se genera el 50 % de la producción agrícola nacional y el 70 % de las exportaciones agrícolas. Las zonas de riego tienen una productividad de aproximadamente 230 % con respecto a la obtenida en las áreas de temporal o secano (CNA, 1994).

En México existen varios distritos de riego por bombeo localizados en zonas áridas, donde las extracciones de los acuíferos son mayores que sus recargas. Por ejemplo, en el Distrito de Riego 037, localizado en Caborca, Sonora, se ha observado un abatimiento del manto freático de cerca de 22 m de 1970 a 1996, con un abatimiento promedio anual de 80 cm. Lo anterior ha propiciado la búsqueda de mejores metodologías y tecnologías para aplicar, conducir y medir el agua usada, pero sobre todo para estimar en forma oportuna y confiable la calendarización del riego de los cultivos.

Para optimizar los recursos hídricos de un área de riego es importante conocer la cantidad de agua que consumen los cultivos a lo largo de sus diferentes fases fenológicas, a fin de suministrarla a través del riego en forma calendarizada, lo que permite reponer el agua consumida por la transpiración de las plantas y la evaporación

del suelo. A la suma de estas cantidades se le conoce integralmente como evapotranspiración (ET).

Existen varios factores que afectan el rendimiento de los cultivos; entre los más importantes relacionados con el riego están el clima, la variabilidad espacial y temporal de la humedad del suelo, la especie y variedad cultivada y el método de aplicación del riego. A continuación se analizan algunos de estos factores, los demás son tratados en detalle en otros capítulos.

Existe una relación casi lineal entre el rendimiento de un cultivo y la evapotranspiración (R-ET) tal como se muestra en la **Figura 1.1**. En la relación rendimiento-riego (R-L) existen dos zonas. En la primera, a medida que se incrementa el volumen de riego aplicado (ya que toda el agua aplicada se almacena en la zona de raíces) también se incrementa linealmente el rendimiento. La relación R-L coincide con la relación R-ET, hasta que se alcanza un valor máximo, a partir del cual el rendimiento ya no se incrementa linealmente y la pendiente de la curva disminuye gradualmente hasta aproximarse a una pendiente cero (línea horizontal). En esta zona la pendiente depende de la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico, de manera que entre más sensible sea el cultivo al estrés, mayor será la pendiente de la relación R-L. En la segunda zona la pendiente de R-L depende principalmente de la eficiencia del método de aplicación del riego.

En riego por gravedad existe una mayor desviación de la relación R-L respecto a la relación lineal R-ET que, en riego por aspersión, debido a que el porcentaje del agua aplicada por riego superficial se mueve fuera de la zona de raíces. En consecuencia, se requiere mayor cantidad de agua al regar por gravedad que al regar por aspersión para compensar las pérdidas de agua por baja eficiencia. La **Figura 1.1** presenta gráficamente la variación del rendimiento en función de la lámina aplicada. Se requiere de un valor mínimo de lámina para obtener rendimientos significativos, por lo que la recta R - ET se mueve a la derecha en función de la parte cosechable del cultivo ($L > 0$, $R = 0$).

Para el caso de la alfalfa, por ejemplo, donde la mayor parte del cultivo es cosechado, la relación R-L inicia cercana a los valores $L = 0$, $R = 0$, tal como se muestra en la **Figura 1.1**. Un valor de uno de la relación R_r / R_m implica que el rendimiento real (R_r) es igual al rendimiento potencial máximo (R_m). Un valor de uno de la relación L_b / L_n implica que la lámina de riego bruta (L_b) es igual a la lámina neta requerida (L_n) para satisfacer los requerimientos evapotranspirativos del cultivo. La sección derecha de la **Figura 1.1** muestra diferentes curvas R-L; las curvas inferiores son para sistemas de riego con bajas eficiencias de aplicación.

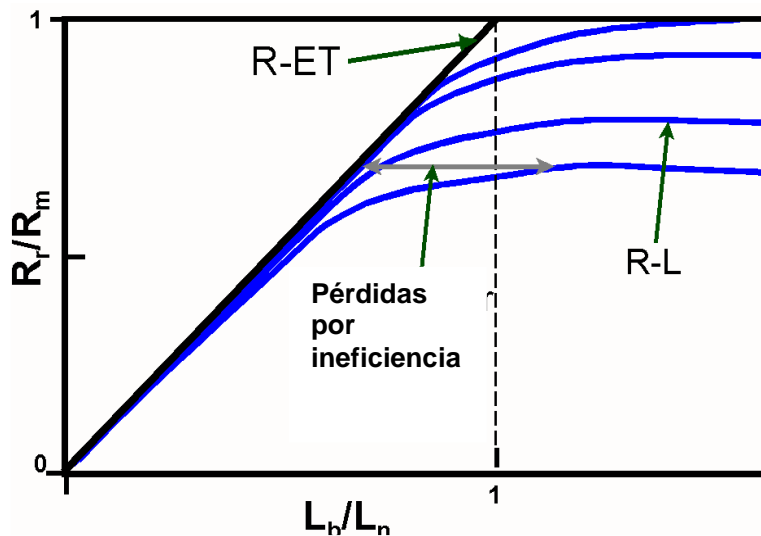


Figura 1.1 Rendimiento normalizado en función de la lámina aplicada normalizada

Nota: R_r es el rendimiento real, R_m es el rendimiento máximo potencial, L_b es la lámina bruta aplicada y L_n la lámina neta requerida

La disponibilidad de humedad es uno de los factores más importantes que afectan el rendimiento de los cultivos. El rendimiento depende en gran medida de cómo se programa el riego en las diferentes etapas fenológicas del cultivo. La **Figura 1.2** muestra una curva ideal del efecto del contenido de humedad sobre el rendimiento. En el caso de contenidos altos de humedad (casi saturación), el rendimiento se ve afectado por una reducción del oxígeno disponible en la zona de raíces. El otro extremo se presenta en un suelo seco, donde la planta utiliza gran cantidad de energía para extraer la poca humedad disponible, retenida fuertemente por las partículas del suelo.

El contenido de humedad en el suelo no suele ser el óptimo, sin embargo, debe estar por arriba de un valor crítico (θ_c), en el que la planta muestra síntomas de estrés que se traducen en la reducción de la calidad y cantidad de la cosecha, tal como se muestra en la **Figura 1.2**. Es difícil determinar el valor óptimo del contenido de humedad y más difícil aún mantenerlo durante un periodo largo. La **Figura 1.2** muestra curvas ideales para dos cultivos con diferentes contenidos críticos de humedad del suelo: un cultivo sensible (θ_{c1}) y otro resistente a la sequía (θ_{c2}). Los valores extremos del contenido de humedad: θ_{CC} y θ_{PMP} , son parámetros del suelo conocidos como humedad a capacidad de campo y a punto de marchitamiento permanente, que se analizarán a detalle en el Capítulo 3.

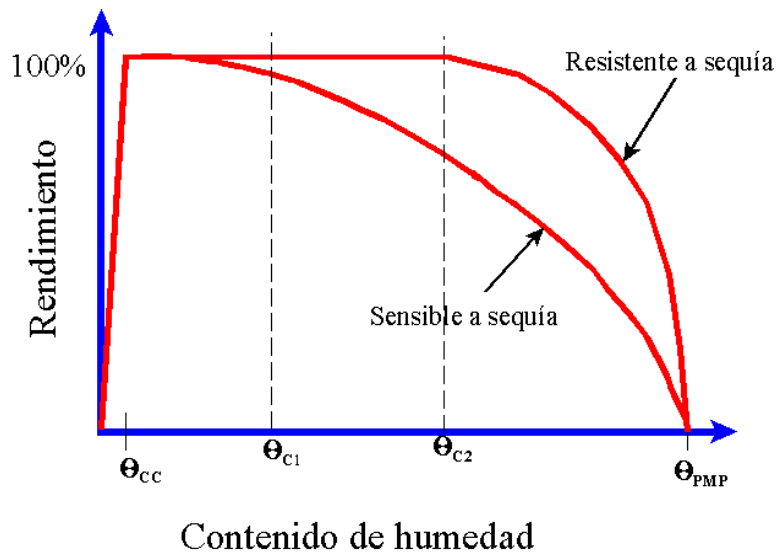


Figura 1.2 Efecto del contenido de humedad del suelo en el rendimiento de dos cultivos bajo condiciones de estrés hídrico

En general, es sumamente difícil proveer simultáneamente a las raíces de sus requerimientos de agua, nutrientes y oxígeno. Cuando el suelo se satura, los nutrientes solubles y el agua se encuentran disponibles en grandes cantidades, pero el oxígeno tiende a ser el factor limitante. A medida que el suelo se va drenando y secando, las cantidades de oxígeno y humedad pasan por una zona óptima, y al final el agua pasa a ser un factor limitante. Como la mayoría de los nutrientes que se necesitan se absorben en forma iónica, el agua condiciona también su absorción por las raíces.

1.2 Definición de la calendarización del riego

Para definir la calendarización del riego es primordial tomar en cuenta los objetivos del productor: maximizar ganancias y rendimiento, minimizar costos de riego, percolación profunda, energéticos, etc. Existen varios criterios para calendarizar el riego, algunos dependen de la disponibilidad de agua y de la superficie a cultivar.

Cuando la superficie regable es limitada y el agua es suficiente, el riego se calendariza basado en la máxima producción por unidad de área. Cuando ambos recursos son limitados, la optimización se realiza maximizando la producción por unidad de lámina aplicada por unidad de área. Si se presentan restricciones adicionales, como es el caso de suelos con problemas de sales, la calendarización se modifica para facilitar labores culturales de control del manto freático y aplicación de láminas de lavado.

La calendarización del riego se define como el procedimiento para determinar la cantidad y fecha de aplicación del riego a un cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico a fin de mantener al cultivo bajo condiciones hídricas óptimas. Lo anterior incluye cantidades adicionales de agua para el control de sales, heladas, plagas y enfermedades.

La calendarización o programación del riego es una técnica o metodología para definir cuándo iniciar y terminar el riego, es decir, cuándo y cuánto regar para mantener el cultivo bajo un estrés hídrico mínimo y así evitar una reducción en su rendimiento. Para lograrlo, el contenido de humedad del suelo debe mantenerse dentro de un rango óptimo, tal como se muestra en la **Figura 1.3**.

Cuando el contenido de humedad alcanza un valor crítico inferior (θ_c) se aplica el riego para reponer la humedad perdida hasta alcanzar un límite superior, dado usualmente por la capacidad máxima de almacenamiento de agua del suelo, que se manifiesta con posterioridad a la aplicación del riego, cuando el drenaje ha cesado. A este estado se le conoce como contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}).

Si los requerimientos de riego de un cultivo son sobrestimados, los costos no son solo económicos debido a que se necesita más agua y energía de bombeo, sino también ambientales porque existe mayor probabilidad de que los agroquímicos disueltos en el agua emigren a cuerpos de agua superficiales o subsuperficiales. Es conveniente mencionar que una parte importante de los agroquímicos disueltos en el agua se mueven a donde el agua se mueve. Es el caso de los fertilizantes nitrogenados que representan una amenaza ambiental cuando están fuera del alcance de las raíces.

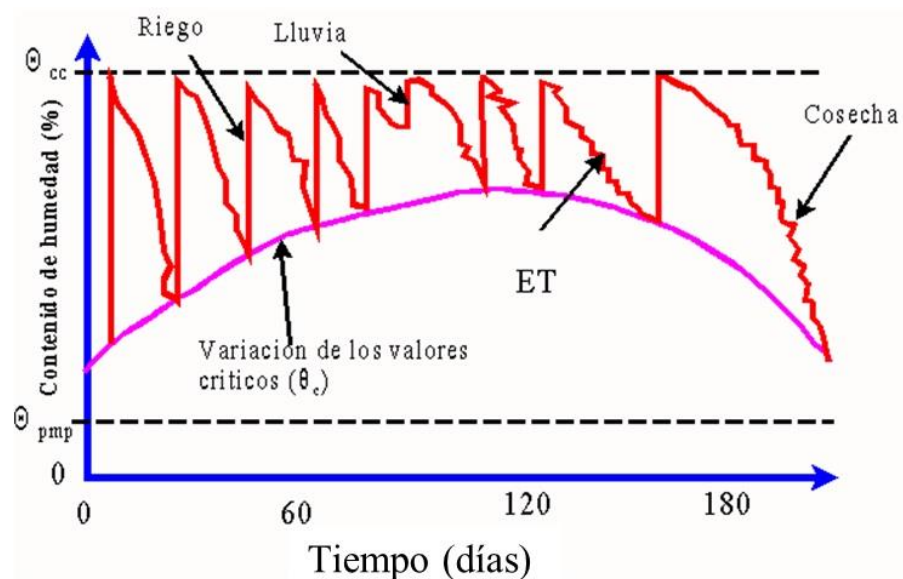


Figura 1.3 Variación del contenido de humedad durante el ciclo fenológico de un cultivo

La calendarización del riego es una tarea compleja que requiere información de las condiciones representativas de las parcelas, es decir, datos históricos, actuales y predecibles a corto plazo sobre el clima, suelo, calidad y cantidad de agua y sistemas de riego, todo con el propósito de ajustar la calendarización a las características particulares de la zona de riego. Una parte importante del proceso de calendarización del riego es estimar las pérdidas de agua que se mueven fuera del alcance de las raíces por una deficiente aplicación del agua. La **Figura 1.4** muestra el riego por inundación sin un control en su aplicación, bajo este método de aplicación del agua es muy difícil aplicar el riego en forma uniforme y en consecuencia la lámina aplicada es muy irregular. Bajo este método se tienen que aplicar grandes cantidades de agua por arriba de las requeridas por el cultivo.



Figura 1.4 Riego por inundación sin control

Los diferentes tipos de calendarización de riego que han sido propuestos en la literatura (Martin *et al.*, 1990) se clasifican en tres grandes grupos basados en:

- el balance de humedad del suelo usando un estimador de la evapotranspiración de los cultivos
- la verificación del estado hídrico del suelo (humedad y tensión del agua en el suelo)
- la verificación del estado hídrico de algún órgano de la planta

Cada una de las metodologías anteriores se discute a detalle en capítulos posteriores. El método del balance hídrico es el más usado en zonas de riego grandes y medianas. El método de balance de humedad del suelo se centra alrededor de la

ecuación de balance de humedad en la zona radical de las plantas. La ecuación involucra la estimación diaria de las entradas y salidas de agua en un volumen de control conformado por la zona de raíces, para realizar una estimación indirecta del contenido de humedad del suelo. El método de balance de humedad se asemeja al balance de una cuenta bancaria en la que se tienen entradas y salidas de dinero. Del mismo modo, es posible conocer el estado de la cuenta en cualquier momento sin necesidad de llamar al banco, siempre y cuando se conozcan los movimientos u operaciones de dinero realizadas.

En este libro se presentan los principios necesarios y los métodos más usados para calendarizar el riego a nivel parcela, invernadero o planta, con aplicaciones a cultivos de interés o sistemas de producción especializados como en el caso de los invernaderos.

“Solo el agua puede desahogar a la tierra”

Gastón Bachelard

**Caracterización de
los suelos**

2

Capítulo 2

CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

Waldo Ojeda Bustamante, Abraham Rojano Aguilar y Mauro Iñiguez Covarrubias

2.1 Función del suelo

El suelo es un sistema complejo y dinámico de la capa superficial terrestre, relativamente delgado, de material disperso que se encuentra sobre la litosfera. De este material depende el crecimiento de las plantas y la alimentación de los seres vivos. En el suelo se realiza un gran número de procesos físicos, químicos y biológicos que producen cambios continuos de la fertilidad del mismo, que pueden enriquecerlo o empobrecerlo, afectando las funciones que desempeña en beneficio de las plantas que soporta. Entre las funciones deseables de mayor importancia que el suelo debe tener (algunas relacionadas con la calendarización del riego) están las siguientes:

- Medio de anclaje de las raíces y soporte mecánico para el tallo y follaje
- Almacenamiento y suministro de agua para las plantas
- Almacenamiento y suministro de los nutrimentos esenciales para las plantas
- Suministro de oxígeno y remoción del bióxido de carbono producido
- Transporte de calor, que permite mantener una temperatura adecuada para el desarrollo de las raíces y la germinación de semillas
- Generación de un ambiente propicio para los cultivos, libre de patógenos y parásitos, con bajos niveles de iones tóxicos y sales

2.2 Composición del suelo

El suelo es un estrato de partículas de rocas con diferente escala granulométrica, mezcladas con sustancias de origen orgánico. Debido a su formación y origen, el suelo presenta una composición que no es desordenada, sobre todo en suelos maduros o desarrollados que tienen una estructura y composición bien definida. Entre los varios niveles estructurales que están asociados con los suelos destacan los siguientes:

- El suelo es un sistema polifásico compuesto por las fases sólida, acuosa y gaseosa. La **Tabla 2.1** muestra la composición media de un suelo húmedo.
- Las distintas fracciones texturales que componen los estratos u horizontes que definen el perfil del suelo.

- Las partículas del suelo están agregadas en una estructura definida, formando así horizontes identificables.

Tabla 2.1 Composición media de un suelo húmedo

Fracción	Porcentaje
Mineral	45
Orgánica	5
Acuosa	25
Gaseosa	25

Nota: Los porcentajes de saturación de la fracción porosa pueden variar dependiendo del contenido de humedad del suelo. Lo mismo aplica para la fracción gaseosa.

La fase sólida proviene principalmente de la intemperización de rocas y residuos vegetales. Esta fase es relativamente estable en su composición y organización, mientras que las otras dos fases, líquida y gaseosa, están en cambio constante debido a los diferentes procesos que ocurren en el suelo (la redistribución, evaporación y la absorción del agua por las plantas), la reposición periódica del agua por la lluvia o riego, la difusión de gases y el desplazamiento masivo del aire en el estrato superior del suelo, lo cual puede generar una renovación del aire presente en los poros varias veces durante el día.

2.3 Propiedades del suelo

Los suelos poseen varias propiedades estáticas y dinámicas, que los caracterizan y diferencian, con una variabilidad espacial y temporal. Las propiedades más importantes de los suelos relacionadas con el riego son:

- Textura
- Materia orgánica (MO)
- Densidad aparente (ρ_a)
- Densidad de partículas (ρ_s)
- Porosidad del suelo (ϵ)
- Superficie específica (S_e)
- Estructura
- Perfil del suelo

Tabla 2.2 Dimensiones granulométricas de las partículas del suelo

Partícula	Dimensiones (mm)
Arena	2 - 0.05
Limo	<0.05 - 0.002
Arcilla	<0.002

2.3.1 Textura

La textura de un suelo se define con respecto al tamaño de las partículas que lo conforman, y que se clasifican en tres clases, de acuerdo con su tamaño: arena, limo y arcilla. La **Tabla 2.2** resume las dimensiones para clasificar las partículas del suelo, de acuerdo con la clasificación más usada, propuesta por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.

Desde el punto de vista del tamaño, la arcilla prácticamente es insignificante con respecto a la arena, sin embargo, su presencia está asociada con una gran diversidad de procesos de interés agrícola que ocurren en el suelo. La **Figura 2.1** compara gráficamente, a escala, las dimensiones de los tamaños de las partículas texturales. Para clasificar los suelos se han propuesto diferentes clasificaciones. La **Figura 2.2** muestra el triángulo para definir las 12 clases texturales de los suelos en función de los porcentajes de las fracciones granulométricas del suelo (arcilla, limo y arena).

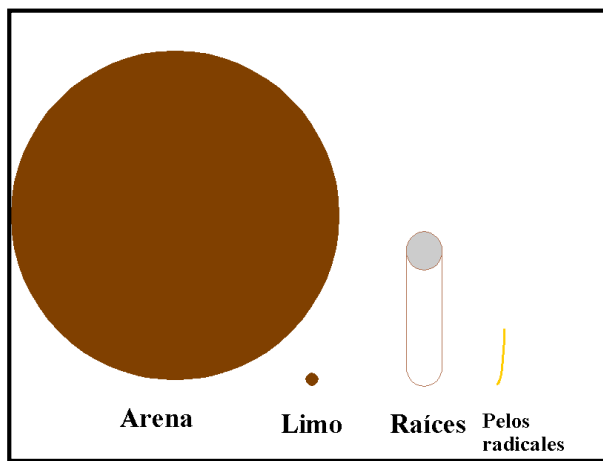


Figura 2.1 Comparación del tamaño de partículas del suelo y raíces

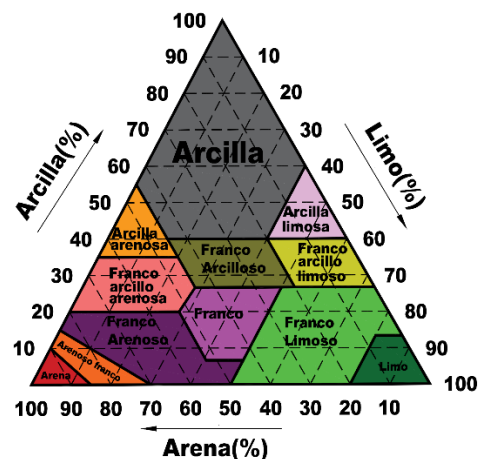


Figura 2.2 Triángulo de texturas

Si un suelo tiene mayor porcentaje de una fracción textural respecto de las otras, será la fracción dominante la que defina la textura del suelo. Por ejemplo, un suelo con más del 60 % de arcilla se define como de textura arcillosa. Cuando un suelo tiene proporciones similares de las tres fracciones texturales se dice que tiene una textura franca o migajonosa. Los mejores suelos agrícolas son los suelos francos, ya que presentan propiedades intermedias con relación a su capacidad de drenaje y aeración, retención de humedad y nutrimentos.

A las arcillas que no pueden observarse con un microscopio ordinario se les conoce como coloides y representan el máximo nivel de división que pueden alcanzar las partículas del suelo. Por sus características iónicas, los coloides son de vital importancia en la fertilidad de un suelo.

2.3.2.1 Métodos para estimar la textura

En los métodos más usuales para estimar las fracciones texturales del suelo se asume un tamaño de partícula equivalente, en lugar de usar una descripción precisa de las partículas del suelo. Existen dos procedimientos de separación de partículas del suelo, el cribado y la sedimentación.

El cribado consiste en separar las fracciones texturales empleando un tamiz o criba para separar las partículas gruesas (arena) de las finas (arcilla y limo) usando el tamaño de malla correspondiente (0.05 mm). La parte que queda sobre la malla se utiliza para calcular la fracción arenosa, y el resto pasa por un proceso de sedimentación.

La sedimentación es utilizada para estimar la cantidad de partículas de arcilla y limo. Se usan dos métodos para sedimentar, pipeta e hidrómetro. El principio de estimación se basa en la Ley de Newton (gravedad), el principio de Arquímedes (flotación) y la ley de Stokes (fricción). Asumiendo que las tres fuerzas que actúan sobre una partícula se encuentran en equilibrio durante el proceso de sedimentación, se obtiene la siguiente ecuación para determinar la velocidad de caída de las partículas:

$$v = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2 g}{18\mu} \quad (2.1)$$

donde v es la velocidad de caída de las partículas del suelo (LT^{-1}), d es el diámetro de las partículas (L), g es la aceleración gravitacional ($L T^{-2}$), ρ_s es la densidad de las partículas (ML^{-3}), ρ_f la densidad del fluido (ML^{-3}) y μ la viscosidad del fluido ($ML^{-1}T^{-1}$).

La ecuación anterior estima la velocidad de una partícula esférica de diámetro d y densidad ρ_s cayendo en un fluido de densidad ρ_f y viscosidad μ . Si se tiene una suspensión perfectamente mezclada con partículas de suelo de tamaños variables, las partículas

caen al fondo del recipiente en diferentes tiempos con velocidades proporcionales al cuadrado del diámetro de partícula.

Por ejemplo, después de 100 s de que la suspensión se ha agitado, todas las partículas de diámetro d mayor que 0.005 cm habrán caído una distancia mayor o igual a $h = v \cdot t = (0.281) (100) = 28.1$ cm, donde $v = 0.281$ cm s⁻¹ es el valor de la **Ecuación 2.1** cuando $d = 0.005$ cm y asumiendo que $\rho_f = 1$ g cm⁻³, $\rho_s = 2.65$ g cm³, $g = 981$ cm s⁻², y $\mu = 0.008$ g cm⁻¹s⁻¹. En consecuencia, al tiempo $t = 100$ s no habrá partículas de suelo con diámetro mayor de 50 μ m entre la superficie y a una profundidad $h=28.1$ cm de la suspensión. Si se obtiene una muestra de la suspensión en los 28.1 cm superiores, a los 100 s después de agitar la solución, la solución contendrá solamente partículas menores de 50 μ m, que corresponden a partículas de arcilla y limo.

En el método del hidrómetro se coloca un objeto flotante precalibrado (hidrómetro) que se sumerge poco a poco en la suspensión, ya que las partículas de suelo se sedimentan y, en consecuencia, la densidad cambia con la profundidad y el tiempo. La posición del hidrómetro, con respecto a la superficie de la suspensión, a un tiempo dado puede ser usada con una curva de calibración del dispositivo para calcular la densidad de la solución y, en consecuencia, la masa de las partículas para un rango de tamaños de partículas que se encuentran a la profundidad a la cual fue hecho el muestreo.

Por último, el método de la pipeta consiste en hacer muestreos de la suspensión del suelo a tiempos y profundidades predefinidos en función de los tamaños de partículas presentes en la suspensión.

2.3.2 Materia orgánica (MO)

La materia orgánica consta de residuos animales y vegetales en varios estados de descomposición, sujetos a una continua degradación debido a los microorganismos del suelo. La diversidad y cantidad de los microorganismos están ligadas a la productividad del suelo. La materia orgánica tiene los siguientes efectos sobre el suelo desde el punto de vista agrícola:

- Actúa como material cementante en la formación de nuevos agregados
- Incrementa la infiltración en el suelo
- Disminuye la erodabilidad de un suelo
- Incrementa la capacidad de retención de agua y nutrimentos, de gran importancia en la nutrición vegetal
- Facilita las labores de labranza
- Disminuye la resistencia del suelo a la penetración de las raíces

La forma más común de expresar el contenido de materia orgánica es utilizando el porcentaje que representa el peso de la materia orgánica con respecto al peso seco de la muestra de suelo. El contenido de materia orgánica en los suelos agrícolas varía de 0.5 a 5 %. La **Figura 2.3** muestra la variación típica de la materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola, concentrada en el estrato superior.

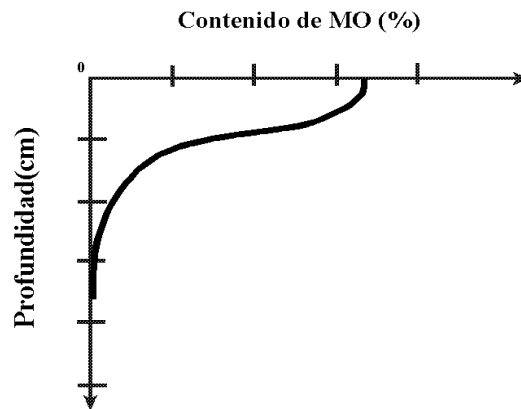


Figura 2.3 Variación típica del contenido de materia orgánica en el perfil de un suelo agrícola

La capa de suelo de 15 cm de espesor de una parcela con una superficie de una hectárea pesa aproximadamente 2 000 toneladas. Para un contenido de materia orgánica del 1 %, dicha capa de suelo tiene 20 toneladas de materia orgánica. Considerando que, en el mejor de los casos, por cada 5 kg de residuo vegetal que se adicionan al suelo solamente se produce un kilogramo de materia orgánica (el 20 %), el resto forma parte de la microfauna o se libera en forma gaseosa durante el proceso de descomposición realizado por los microorganismos. Si se requiere aumentar en 1 % el contenido de materia orgánica al suelo, se requieren alrededor de 100 toneladas de residuos vegetales. Si al finalizar un ciclo agrícola se dejan alrededor de 5 toneladas de residuos vegetales por hectárea, se requerirán 20 ciclos para incrementar en un 1 % el contenido de materia orgánica.

2.3.3 Densidad aparente (ρ_a)

La densidad aparente de los suelos es la relación entre la masa de sólidos (M_s) y el volumen total (V_t) del suelo. Se estima por la siguiente relación:

$$\rho_a = \frac{\text{masa de la muestra seca}}{\text{volumen total de la muestra}} = \frac{M_s}{V_t} \quad (2.2)$$

Como la densidad aparente considera el espacio poroso del suelo existente entre las partículas sólidas, entonces los valores altos indican suelos compactados con problemas para la penetración del agua, aire y raíces. El valor de esta propiedad del suelo oscila entre 1 g cm^{-3} para suelos orgánicos y hasta 1.9 g cm^{-3} en suelos arenosos compactados. El rango típico de ρ_a para suelos agrícolas es de $1.2\text{-}1.8 \text{ g cm}^{-3}$, con un promedio general de 1.4 g cm^{-3} . Los suelos arenosos tienen una densidad aparente entre 1.2 y 1.8 g cm^{-3} , mientras que los suelos finos, como los arcillosos, limo-arcillosos y franco-arcillosos, tienen valores de ρ_a entre 1 y 1.6 g cm^{-3} . En el distrito de riego 076 "Valle del Carrizo", Sinaloa, se encontró un valor de ρ_a promedio de 1.2 g cm^{-3} .

Es común referirse a los suelos arcillosos como pesados y a los arenosos como ligeros. Sin embargo, esta denominación no se refiere al sentido de peso (los suelos arenosos, por tener menor porosidad, son más pesados que los arcillosos), sino que se refiere a otras propiedades del suelo (plasticidad, consistencia, cohesión y adhesión) relacionadas con la operabilidad del suelo para su labranza.

Un valor aproximado de ρ_a puede ser obtenido indirectamente conociendo la clase textural del suelo, con el fin de detectar problemas de compactación y tener una idea general de la condición agrícola del suelo. Los valores varían debido al grado de desarrollo del suelo y a las labores culturales. Los suelos arenosos presentan mayor densidad aparente que los suelos arcillosos debido a su menor porosidad. El valor de la ρ_a no es constante y puede variar temporal y espacialmente. La capa arable es la zona más dinámica. Por ejemplo, en una muestra cúbica de suelo con dimensiones $20 \times 20 \times 15 \text{ cm}$, con un peso seco final de 8100 g , la densidad aparente de la muestra de suelo es:

$$\rho_a = \frac{M_s}{V_t} = \frac{8100\text{gr}}{(20)(20)(15)\text{cm}^3} = 1.35\text{gr cm}^{-3}$$

donde M_s es el peso seco final y V_t es el volumen total.

El incremento de la densidad del suelo se asocia con varios problemas del sistema radical del cultivo, tales como:

- Incremento de la resistencia del suelo a la penetración de las raíces.
- Reducción en el suministro de aire, lo que puede facilitar la generación de gases tóxicos, como etileno.
- Anegamiento potencial del suelo por reducción de su permeabilidad al variar las propiedades hidrodinámicas del suelo para liberar agua a presiones bajas.
- Decremento de la proporción de poros grandes con relación a los poros pequeños.

2.3.3.1 Métodos para estimar la densidad aparente

Existen principalmente tres métodos para estimar la densidad aparente. Uno es el método del terrón, que consiste en coleccionar y pesar algunos terrones para posteriormente estimar indirectamente su volumen por medio del volumen del agua desplazada al sumergir el terrón (cubierto con parafina) en agua. Otro método consiste en excavar un pozo; el material extraído se pesa y su volumen se estima al agregar agua en la cavidad previamente cubierta con un material impermeable (plástico). El último es el método del cilindro, que consiste en introducir un cilindro de dimensiones conocidas (volumen conocido) para obtener una muestra de suelo que es secada y pesada posteriormente. Los tres métodos requieren de una estimación del contenido de humedad presente en la muestra para conocer el peso seco de la muestra.

Tabla 2.3 Variabilidad de los parámetros del suelo obtenidos a partir de muestras de suelo (Warrick, 2003)

Parámetro	Rango del CV (%)
Variación pequeña	
Porosidad (ϵ)	7-11
Densidad aparente (ρ_a)	3-26
pH	2-15
Variación media	
Porcentaje de arena o arcilla	2-55
Contenido de humedad a 0.1 bares (θ)	4-20
Contenido de humedad a 15 bares (θ)	14-45
Variación grande	
Conductividad hidráulica a saturación (K_s)	48-320
Velocidad de infiltración (i)	23-97
Concentración de solutos natural	13-260

La porosidad y la densidad aparente son los parámetros del suelo que presentan menor variabilidad temporal y espacial. La **Tabla 2.3** muestra los valores del coeficiente de variación (CV) y la desviación estándar entre la media aritmética, calculada a partir de valores de los parámetros del suelo estimados de muestras de suelo colectadas en campo. Valores del CV mayores al 50 % indican una alta variabilidad del parámetro del suelo.

2.3.4 Densidad real o densidad de partículas sólidas (ρ_s)

La densidad de partículas es la relación de la masa de las partículas sólidas (M_s) del suelo entre el volumen que ocupan (V_s):

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} \quad (2.3)$$

Esta expresión no considera el espacio poroso; es como si el suelo se comprimiera lo suficiente liberando el aire que ocupa el espacio poroso para formar un sólido. Los valores de la densidad de los minerales comunes y de partículas orgánicas son reportados con cierto rango de variación por diferentes autores. La densidad de partículas minerales del suelo varía de 2.6 a 2.85 g cm⁻³, mientras que para las partículas orgánicas el valor de la densidad varía de 1.2 a 1.5 g cm⁻³.

Muchos de los minerales más abundantes de los suelos, como cuarzo y feldespato, tienen densidades alrededor de 2.65 g cm⁻³ por lo que es común usar este valor como promedio para esta propiedad. Suelos con alto contenido de materia orgánica tienen una densidad de partículas menor de 2.4 g cm⁻³. Por ejemplo, si se tiene una muestra de suelo seco con peso de 100 g y un volumen de 38 cm³ (sin considerar el espacio poroso), el valor de ρ_s será de 2.63 g cm⁻³.

El valor de ρ_s sirve para tener una idea de los minerales presentes en el suelo, especialmente si se combina el conocimiento de esta propiedad con algunas otras como el color. Es el caso, por ejemplo, de los suelos ferralíticos en contraste con los suelos orgánicos. Este valor sirve también para interpretar mejor el valor de la densidad aparente del suelo y para estimar la porosidad (ϵ), es decir, el porcentaje de espacio ocupado por poros en un suelo.

El método más usado para determinar la densidad de sólidos (ρ_s) utiliza un picnómetro, que es un pequeño recipiente de vidrio que puede ser llenado con un volumen exacto de un líquido. La muestra de suelo es colocada en el picnómetro para después llenarlo con agua. El agua adicionada ocupa el espacio poroso del suelo. Con los pesos del agua adicionada, del suelo y del picnómetro es posible determinar el volumen del agua desplazado por la muestra del suelo y determinar la densidad de sólidos.

2.3.5 Porosidad del suelo (ϵ)

La porosidad del suelo es el espacio ocupado por aire y agua, comúnmente expresada como la fracción de poros por unidad de volumen de suelo. Los suelos arenosos tienen

menor espacio poroso que los suelos arcillosos y en consecuencia presentan mayor densidad aparente y menor porosidad. El contenido volumétrico de sólidos o espacio sólido es el volumen de sólidos contenido por unidad de volumen de suelo. La suma de la porosidad y el espacio ocupado por los sólidos es igual a la unidad, por lo que se puede utilizar la siguiente relación para estimar la porosidad:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s} \quad (2.4)$$

donde ε es la porosidad del suelo expresada en fracción, ρ_a es la densidad aparente (g cm^{-3}), ρ_s es la densidad de sólidos (g cm^{-3}), V_v es el volumen de vacíos (cm^3) y V_t es el volumen total del suelo (cm^3).

Un suelo agrícola cuya densidad aparente es de 1.33 g cm^{-3} tiene una porosidad aproximada de $0.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ (50 %) con una densidad de partícula de 2.65 g cm^{-3} , e igual distribución de poros y sólidos. Lo anterior significa que la mitad del volumen está potencialmente disponible para almacenar agua. Los valores de la porosidad del suelo varían entre 35 % para suelos compactados y 65 % en suelos bien agregados, con alto contenido de materia orgánica y coloides. Existen otros métodos empíricos para estimar la porosidad del suelo a partir de ecuaciones algebraicas empíricas o por interpolación usando isólinas de porosidad dentro del triángulo de texturas. Este método empírico se suele utilizar en proyectos de diseño de riego cuando se carecen de datos confiables de campo.

La porosidad del suelo está determinada principalmente por el acomodo que presentan las partículas del suelo. Los suelos arcillosos y orgánicos, ricos en coloides, generalmente presentan altos valores de porosidad (alrededor de $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$) debido a que las cargas eléctricas de estos coloides hacen que las partículas se acomoden dejando mucho espacio libre (poros). Los suelos arenosos presentan valores bajos de porosidad (alrededor de $0.4 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) debido a la baja capacidad reactiva de sus partículas. En suelos compactados se reportan valores de porosidad de $0.3 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$. Por último, la porosidad de los suelos agrícolas varía normalmente entre 0.4 y $0.5 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$.

El diámetro promedio de los poros en suelos arenosos es mayor que en suelos arcillosos. En los suelos arenosos la velocidad de infiltración del agua es alta, mientras que la capacidad de retención del agua es baja. En los suelos arcillosos sucede lo contrario, la velocidad de infiltración es baja y la capacidad de retención es alta. El tamaño de los poros es muy importante para el crecimiento de las raíces. En plantas anuales, el diámetro promedio de raíces es de alrededor de 0.03 cm con pelos radicales de 0.0001 cm . En consecuencia, el volumen de suelo ocupado por las raíces es grande. La porosidad del suelo, al igual que la densidad aparente, depende de la textura, estructura, contenido de materia orgánica, tipo e intensidad de labranza, cultivo y otras

características del suelo. Como regla general, los suelos sometidos a un sistema de labranza agrícola intensiva tienden a compactarse, y al reducirse su porosidad, su productividad disminuye.

Las propiedades más importantes de la fase sólida son el tamaño, distribución, forma y acomodo de las partículas individuales del suelo, así como su composición y propiedades físicas, químicas y mineralógicas. La porosidad es de uso limitado si no se cuenta con un indicador del tamaño de los poros. Los microporos (< 0.01 mm) permiten almacenar el agua, los poros medianos ($0.06 - 0.01$ mm) facilitan la conductividad capilar, y los macroporos (> 0.06 mm) facilitan la infiltración y el drenaje, y promueven la aeración.

2.3.6 Distribución del tamaño de partículas

Además de la porosidad, en el estado de los procesos de transporte del suelo es necesario determinar el tamaño de los poros o partículas, propiedad conocida como distribución del tamaño de partículas o distribución del tamaño de poros. Un suelo con poros del mismo tamaño se drena uniformemente, mientras que en uno con poros de diferentes tamaños el drenaje ocurre lentamente, empezando por los poros grandes y finalizando con los poros pequeños.

Los resultados de un análisis de tamaños de partículas pueden representarse en curvas acumuladas, tal como se presenta en la **Figura 2.4** que indica la distribución del tamaño de partículas de cuatro muestras de suelos. Los tamaños son expresados como diámetros equivalentes en lugar de las diferentes formas que pueden tener las partículas del suelo. El suelo arenoso concentra sus partículas en el rango mayor a $100 \mu\text{m}$. Un suelo bien graduado tendría una curva gradualmente ascendente, mientras que un suelo mal graduado tendría cambios solamente en una parte estrecha del rango para tamaños de partículas, como lo muestra la curva del suelo arenoso de la **Figura 2.4**.

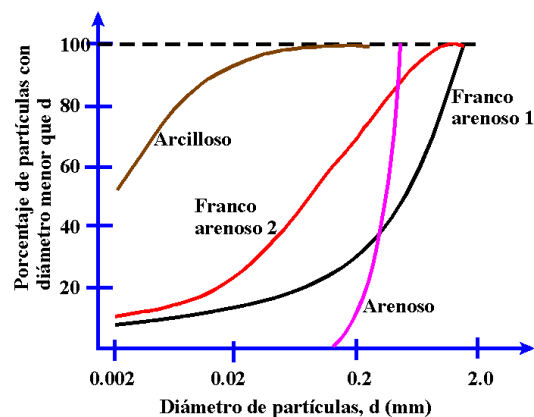


Figura 2.4 Distribución acumulada del tamaño de partículas para cuatro tipos de suelos

2.3.7 Superficie específica (S_e)

Las partículas pequeñas tienen una influencia significativa en muchos procesos físico-químicos que se presentan en el suelo debido a que tienen una gran superficie de contacto o reactiva con relación a su masa. La superficie por unidad de masa o volumen es llamada la superficie específica (S_e):

$$S_e = \frac{A_s}{M_s} \quad (2.5)$$

donde A_s es la superficie total (L^2) de las partículas en la muestra del suelo y M_s es la masa de la muestra de suelo (M).

Para calcular la superficie específica de una partícula se debe establecer el área, el volumen y la masa de la partícula. El área de una partícula esférica está dada por:

$$A_{sp} = 4\pi r^2 \quad (2.6)$$

El volumen de una partícula está dado por:

$$V_{sp} = \frac{4}{3}\pi r^3 \quad (2.7)$$

Por lo que la masa de la partícula puede ser estimada como:

$$M_{sp} = \rho_s V_{sp} = \frac{4}{3}\rho_s \pi r^3 \quad (2.8)$$

El valor de la superficie específica de una partícula esférica es:

$$S_{ep} = \frac{A_{sp}}{M_{sp}} = \frac{3}{\rho_s r} \quad (2.9)$$

La superficie específica de las partículas del suelo está en función inversa con su radio, es decir, a menor radio de partícula, mayor superficie específica (S_e). La **Tabla 2.4** muestra la variación en S_e al cambiar el diámetro de partículas esféricas empaquetadas en un volumen de 1 m³. Resalta el gran incremento en la superficie total de las partículas a medida que el radio de partícula disminuye.

Tabla 2.4 Variación de la superficie específica (S_e) de partículas esféricas en relación con su radio, con M_s y V_s constantes, empaquetadas en un volumen de 1 m^3

Valores para una partícula				Esferas en un cubo de 1 m^3					
Radio (m)	Asp(m ²)	Vsp(m ³)	Msp (kg)	Total de partículas esféricas	A _s (m ²)	V _s (m ³)	M _s (kg)	Vol. Vacíos (m ³)	S _e (m ² /kg)
0.5	3.14E+00	5.24E-01	1.39E+03	1	3.1	0.524	1387.5	0.476	2.26E-03
0.25	7.85E-01	6.54E-02	1.73E+02	8	6.3	0.524	1387.5	0.476	4.53E-03
0.125	1.96E-01	8.18E-03	2.17E+01	64	12.6	0.524	1387.5	0.476	9.06E-03
0.0625	4.91E-02	1.02E-03	2.71E+00	512	25.1	0.524	1387.5	0.476	1.81E-02
0.015625	3.07E-03	1.60E-05	4.23E-02	32768	100.5	0.524	1387.5	0.476	7.25E-02
0.0019531	4.79E-05	3.12E-08	8.27E-05	16777216	804.2	0.524	1387.5	0.476	5.80E-01
0.0009766	1.20E-05	3.90E-09	1.03E-05	134217728	1608.5	0.524	1387.5	0.476	1.16E+00
0.0001221	1.87E-07	7.62E-12	2.02E-08	68719476736	12868.0	0.524	1387.5	0.476	9.27E+00
6.104E-05	4.68E-08	9.52E-13	2.52E-09	5.49756E+11	25735.9	0.524	1387.5	0.476	1.85E+01
7.629E-06	7.31E-10	1.86E-15	4.93E-12	2.81475E+14	205887.4	0.524	1387.5	0.476	1.48E+02

La **Figura 2.5** presenta el área, volumen y superficie específica para tres formas de partículas sólidas. Se observa que, para una forma plana, en la que el espesor es muy pequeño, la superficie específica depende en forma inversa del espesor de la partícula, de manera que, a menor espesor, mayor es la superficie específica.


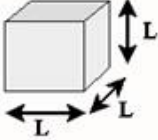
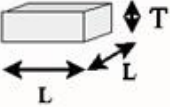
	Esfera	Cubo	Plato
			
Área	$4\pi r^2$	$6L^2$	$2L^2 + 4L(T)$ $= 2L^2$ si $(L \gg T)$
Volumen	$\frac{4\pi r^3}{3}$	L^3	$L^2(T)$
S_e	$\frac{3}{(r \rho_s)}$	$\frac{6}{(L \rho_s)}$	$\frac{2}{(T \rho_s)}$

Figura 2.5 Superficie específica para varias formas de partículas sólidas

La superficie de una muestra de suelo (A_s) puede ser determinada al saturar la muestra con un solvente polar (glicerol o glicol), para luego remover el exceso del

solvente en un desecador sellado al vacío. La muestra se pesa continuamente hasta alcanzar un estado de equilibrio en el que se asume que se ha formado una capa unimolecular del solvente en la superficie de las partículas del suelo. Mediante la determinación de la masa del solvente presente en la muestra es posible estimar la superficie de la muestra del suelo. Por ejemplo, para el solvente Etileno Glicol Monoetil Éter (EGME) se ha determinado experimentalmente que 0.000286 gr de EGME forman una superficie unimolecular de 1 m². Si se usa 0.0098 gr de EGME para saturar una muestra de suelo de 0.7962 gr, entonces la muestra tiene una superficie de $A_s = 34.26$ m² y una superficie específica de 43.03 m² gr⁻¹ de suelo.

Mientras mayor sea la superficie específica de un suelo, mayor es su capacidad de retención y su resistencia al flujo del agua. Un suelo arcilloso presenta mayor superficie de resistencia al paso del agua que un suelo arenoso porque el primero tiene una mayor superficie específica que el segundo.

2.3.8 Capacidad de intercambio catiónico (CIC)

La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un suelo es una medida de las cargas negativas que este contiene. La CIC es también una medida de la capacidad del suelo para retener nutrimentos en forma catiónica. Las partículas de arena y limo tienen baja CIC por lo que su capacidad para retener cationes es baja, y esta es la razón por la que se recomienda aplicar dosis frecuentes, pero bajas, de fertilizantes nitrogenados en suelos ligeros.

Los suelos se forman durante un proceso de intemperización de rocas que produce las partículas que los forman. El diámetro de las partículas depende del grado de intemperización al que hayan sido sometidas. Las partículas de diámetro más pequeño (arcillas) se comportan como coloides, igual que la materia orgánica procedente de otro proceso formativo, la descomposición de residuos animales y vegetales.

La reactividad de un suelo está asociada con la cantidad y el tipo de coloides ya que, por su carga negativa, desarrollada durante los procesos formativos del suelo, puede atraer partículas cargadas positivamente (cationes). Los cationes retenidos en la superficie de las partículas del suelo pueden ser intercambiables por otros cationes en solución. Los cationes adsorbidos al suelo forman parte de la reserva de varios nutrientes catiónicos que continuamente están resuministrando a la solución del suelo los nutrientes requeridos por las plantas.

La cantidad de cationes intercambiables que un suelo puede tener es llamada la capacidad de intercambio catiónico y se expresa en centimoles de carga (+) por kilogramo de suelo. A mayor valor de CIC, mayor es la cantidad de cationes que un suelo puede retener. La CIC es expresada en mmol por kg de suelo, aunque anteriormente las unidades comunes eran los miliequivalentes (meq) por gramo de suelo. El rango de

valores de CIC puede variar de 10 mmol kg^{-1} en suelos ligeros hasta 600 mmol kg^{-1} en suelos pesados con alto porcentaje de materia orgánica.

2.3.9 Estructura

La estructura de un suelo se refiere a la forma en que las partículas del suelo están arregladas para formar agregados o partículas secundarias. Las partículas de arcilla, por ejemplo, forman agregados que son difíciles de romper. La arcilla y la materia orgánica constituyen el material cementante para la formación de agregados. Existen varias formas naturales de agregación de los suelos: migajosa, granular, laminar, poliédrica, prismática, y columnar.

La densidad aparente disminuye a medida que la agregación y el contenido de arcilla aumentan. Las operaciones de labranza no afectan la textura, pero alteran la estructura del suelo. Las operaciones de labranza primaria (barbecho) de un terreno disminuyen la densidad aparente de un suelo porque incrementan el espacio poroso. En cambio, las operaciones de labranza secundaria (cultivo y rastreo) incrementan la densidad aparente pues disminuyen el espacio poroso. Los suelos cultivados presentan mayor densidad aparente que los suelos no cultivados dado que el paso de maquinaria sobre el suelo incrementa su densidad aparente al compactarlo.

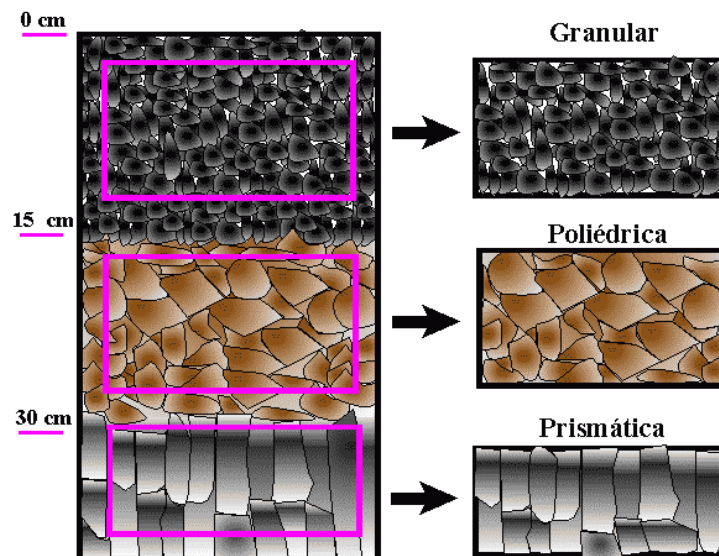


Figura 2.6 Variación típica de la estructura de un suelo agrícola

La estructura de un suelo puede considerarse en relación con la forma, estabilidad y consistencia de los agregados. La forma estructural se refiere al tamaño y forma de los agregados, a la red de poros presentes, y cambia dependiendo de la profundidad. La **Figura 2.6** muestra la variación estructural de un suelo agrícola franco arcilloso que tiene un efecto especial sobre las propiedades del suelo. Una buena estructura incrementa la porosidad del suelo, aumenta la aireación, drena excesos de agua y permite que las raíces penetren.

2.3.10 Perfil del suelo

El perfil del suelo es básicamente una sección vertical del suelo en el cual pueden distinguirse capas u horizontes. La naturaleza de estos horizontes depende del material parental, vegetación nativa, condiciones de drenaje y factores climáticos, como temperatura y precipitación. La interacción de estos factores produce una variación en profundidad, textura, color y otras propiedades físico-químicas del suelo.

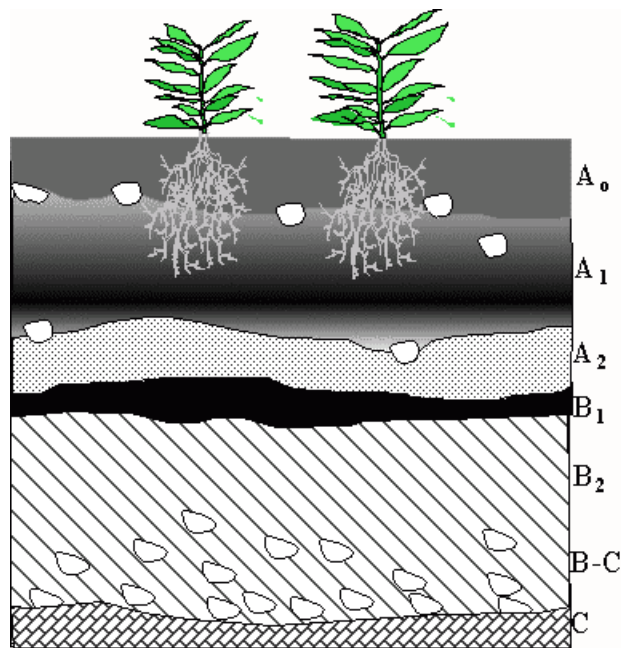


Figura 2.7 Disposición de los estratos en un perfil de un suelo agrícola

Comúnmente, un perfil de suelo agrícola tiene un número definido de horizontes. Por su posición, el horizonte A se encuentra bajo los efectos cambiantes del clima, vegetación y actividades biológicas. Se forma cerca de la superficie, donde el

movimiento de sólidos o material soluble es alto, o donde se presenta la acumulación de material orgánico, por ejemplo, en suelos forestales o pastizales. No todos los suelos tienen horizonte A.

El horizonte B se caracteriza por la acumulación de productos como arcilla y materia orgánica que han sido lixiviados desde el horizonte A. Difiere del horizonte A en color, textura y estructura. Los horizontes A y B conforman la zona radical de la mayoría de los cultivos anuales. El horizonte C es el más profundo y prácticamente no es afectado por la actividad biológica y climática. La **Figura 2.7** muestra la disposición de los horizontes en un suelo agrícola.

2.4 Ejemplos

Ejemplo 1. ¿Cuánto tiempo se requiere para coleccionar solamente la fracción menor a $0.002 \mu\text{m}$ a una profundidad de 1 cm usando el método de la pipeta para determinar las clases texturales de la muestra de suelo? Se tiene que: $v = \frac{h}{t} \therefore t = \frac{h}{v}$ Pero de la

$$\text{Ecuación 2.1: } v = \frac{(\rho_s - \rho_f)d^2 g}{18\mu}$$

Entonces:

$$t = \frac{18h\mu}{d^2 g(\rho_s - \rho_f)} = \frac{(18)(1 \text{ cm})(0.008 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1})}{(2 \times 10^{-7} \text{ cm})^2 (981 \text{ cm s}^{-2})(2.65 - 1) \text{ g cm}^{-3}}$$

$$t = \frac{0.144}{6.4746 \times 10^{-11}} = 222.9 \times 10^7 \text{ s} \approx 70 \text{ años}$$

Ejemplo 2. Calcular la densidad de sólidos considerando que la masa de una muestra de suelo seco agregada a un picnómetro es de $M_s = 5.16 \text{ g}$, la masa del picnómetro con el suelo y el agua es de $M_{psw} = 66.51 \text{ g}$ y la masa del picnómetro es de $M_{pw} = 63.17 \text{ g}$. De la **Ecuación 2.3**:

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_s} = \frac{M_s}{\left(\frac{M_s - (M_{psw} - M_{pw})}{\rho_w} \right)} = \frac{5.16 \text{ g}}{\left(\frac{5.16 - (66.51 - 63.17)}{1} \right) \frac{\text{g}}{\text{g cm}^{-3}}} = 2.83 \text{ g cm}^{-3}$$

Ejemplo 3. Estimar las superficies específicas para limo y arena si se considera una arena esférica con diámetro de 0.05 mm y un limo esférico de 0.002 mm de diámetro, con una densidad de partícula de 2.7 g cm^{-3} . De la **Figura 2.5**, para la arena:

$$S_{sp} = \frac{A_{sp}}{M_{sp}} = \frac{4 \pi r^2}{\rho_p \left(\frac{4}{3} \pi r^3\right)} = \frac{3}{\rho_p r} = \frac{3}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(2.5 \times 10^{-3} \text{ cm})} = 444.44 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Para el limo:

$$S_{sp} = \frac{3}{\rho_p r} = \frac{3}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(1.0 \times 10^{-4} \text{ cm})} = 11111.11 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

Estos resultados indican que la superficie específica del limo es 25 veces mayor que la correspondiente para la arena.

Ejemplo 4. Estimar la superficie específica de una partícula en forma de disco con un diámetro de 0.002 mm, un espesor de 10^{-6} mm, y $\rho_p = 2.7 \text{ g cm}^{-3}$. De la **Figura 2.5**:

$$S_s = \frac{A_s}{M_s} = \frac{2\pi r^2 + 2\pi rT}{\rho_p \pi r^2 T} = \frac{2(r+T)}{\rho_p r T} \approx \frac{2}{\rho_p T} = \frac{2}{(2.7 \text{ g cm}^{-3})(10^{-7} \text{ cm})} = 7.4 \times 10^5 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$$

$$S_s = 7.4 \times 10^4 \text{ m}^2 \text{ kg}^{-1}$$

En la ecuación anterior se asumió que $r > T$ en consecuencia $r+T \approx r$; el radio es mucho mayor que el espesor. Los resultados indican que la superficie específica de la arcilla es 170 000 veces mayor que la correspondiente a la arena. Un caso extremo es el de la materia orgánica, que puede llegar a tener valores de $10^7 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. Los valores altos de S_e afectan en gran medida las propiedades reactivas de los suelos.

Ejemplo 5. Estimar la densidad aparente (ρ_a) de acuerdo con los siguientes datos obtenidos por el método del cilindro. Peso del suelo seco = 96.19 g. Dimensiones del cilindro = 5.4 cm altura x 3 cm diámetro.

$$V_t = A h = \left[\pi \frac{D^2}{4} \right] h = 3.1415 \frac{3^2}{4} 5.4 = 38.170 \text{ cm}^3$$

De la **Ecuación 2.2**:

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} = \frac{96.19 \text{ g}}{38.170 \text{ cm}^3} = 2.52 \text{ g cm}^{-3}$$

Ejemplo 6. Estimar la porosidad total (ϵ) de una muestra de suelo con una densidad aparente de 1.35 g cm^{-3} y tres valores de densidad de partículas 2.4, 2.6 y 2.85 g cm^{-3} . Con el uso de la **Ecuación 2.4**:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_t} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_s}$$

Resulta:

ρ_a (g cm ⁻³)	2.4	2.6	2.85
ε	0.438	0.481	0.526

A mayor densidad aparente, mayor es la porosidad.

“El agua habla sin cesar y nunca se repite”

Octavio Paz

**El agua en
el suelo**



3

Capítulo 3

EL AGUA EN EL SUELO

Waldo Ojeda Bustamante y Mauro Íñiguez Covarrubias

3.1 Introducción

El agua disponible para las raíces depende de condiciones tales como que el agua se encuentre almacenada en el suelo, que el suelo pueda transmitirla de las zonas de disponibilidad a las zonas de consumo, y que se encuentre retenida con un nivel energético mínimo para que las raíces la absorban con el mínimo esfuerzo.

Para entender el movimiento del agua en el suelo es necesario conocer las variables de su estado en el suelo y su movimiento dentro y fuera de la zona de raíces. El ciclo del agua a escala parcelaria consiste en una serie de eventos secuenciales o dinámicos concurrentes. Inicia con la entrada del agua a través de la superficie del suelo (infiltración) durante el riego o lluvia, continúa con la redistribución, drenaje y absorción por las plantas, y culmina con los procesos de evaporación y transpiración vegetal.

El agua es un compuesto covalente cargado eléctricamente de manera no uniforme. Aunque una molécula de agua es eléctricamente neutra porque tiene el mismo número de protones y electrones, forma un dipolo, esto es, el centro de la carga positiva no está en el mismo punto espacial que el centro de las cargas negativas. El resultado es la presencia de un campo eléctrico en la vecindad de cada molécula, la parte del oxígeno de la molécula de agua tiene densidad de carga negativa mientras que la parte del hidrógeno tiene densidad de carga positiva. Como las moléculas del agua son polares, pueden interactuar tanto entre ellas como con otros iones en solución, con el campo eléctrico de los minerales o con la materia orgánica del suelo.

Las propiedades eléctricas del agua están íntimamente relacionadas con las propiedades de los elementos que contiene en solución. Debido a que los átomos de hidrógeno y oxígeno en las moléculas del agua tienen una carga eléctrica desbalanceada, las moléculas están unidas por enlaces llamados puentes de hidrógeno que inmovilizan a las moléculas, sin que puedan ser separadas como iones. Por esta razón el agua pura no puede conducir corriente eléctrica. De hecho, el agua pura es un buen aislante y tiene una constante dieléctrica alta que indica que tiene una gran capacidad de neutralizar la atracción entre iones de diferente carga, como es el caso de los iones presentes en los fertilizantes solubles en agua. 1 litro de agua puede disolver hasta 8.4 kg de nitrato de amonio (NH_4NO_3) que se disocia en cationes amonio (NH_4^+) y aniones nitrato (NO_3^-).

El agua almacenada en el espacio poroso del suelo, conocida como la solución del suelo, desempeña un gran número de funciones en beneficio de las plantas entre las que destaca el efecto directo sobre su crecimiento y producción de cosecha. La solución del suelo es el medio de donde las plantas absorben los nutrientes y es una fuente de reserva de algunos de ellos como el cloro y los sulfatos. Además, es un agente que amortigua los cambios de temperatura por lo que ayuda a crear un medio ambiente más estable para el desarrollo de las plantas,

La humedad aumenta la plasticidad del suelo y reduce su resistencia a la penetración de raíces, facilita la descomposición de los residuos orgánicos con su consiguiente liberación de nutrientes. Cada tipo de suelo tiene características únicas que determinan cuánta agua se retiene y de cuánta se dispone para las plantas. Con esta información es posible determinar el volumen y la frecuencia del riego. A continuación se presentan los principios básicos relacionados con el agua en el suelo.

3.2 Humedad del suelo (θ)

El suelo es un material poroso similar a una esponja capaz de retener agua. La máxima cantidad de agua que un suelo puede retener y drenar es casi constante. Cada suelo tiene constantes de humedad específicas que resultan de importancia vital en la calendarización del riego. Una descripción esquemática de las diferentes constantes de humedad del suelo se presenta en la **Figura 3.1**.

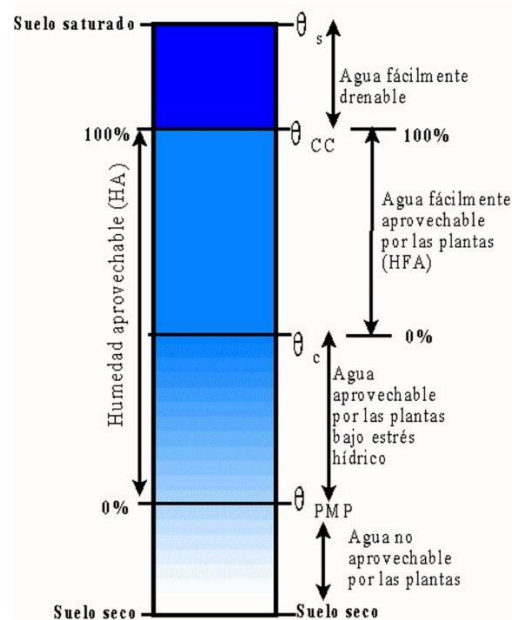


Figura 3.1 Constantes de humedad (θ) del suelo

La estimación del contenido de humedad de un suelo permite calcular la lámina de riego o la profundidad de mojado, así como definir el grado de estrés por déficit hídrico de los cultivos. Los valores consecutivos del contenido de humedad permiten cuantificar otros procesos como la evapotranspiración, la precipitación efectiva y la lámina infiltrada o percolada. El contenido de humedad del suelo se puede expresar de varias maneras. A la cantidad de agua por unidad de masa o volumen de suelo se le conoce como contenido de humedad gravimétrico o volumétrico, respectivamente.

3.2.1 Contenido de humedad gravimétrico (θ_m)

El contenido de humedad (θ) es una propiedad que define la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo. Generalmente la humedad se estima a partir de un cociente gravimétrico expresado en porcentaje a partir de la masa de agua presente en una muestra de suelo (M_{ag}) y la masa de la muestra del suelo después de haber sido secada y haber alcanzado un valor constante (M_{ss}).

$$\theta_m = \frac{\text{masa del agua en la muestra}}{\text{masa de la muestra seca}} 100 = \frac{M_{ag}}{M_{ss}} 100 \quad (3.1)$$

3.2.2 Contenido de humedad volumétrico (θ_v)

El contenido de humedad puede expresarse como un cociente volumétrico expresado en porcentaje del volumen de humedad en una muestra de suelo y el volumen del suelo seco:

$$\theta_v = \frac{\text{volumen del agua en la muestra}}{\text{volumen total de la muestra}} 100 = \frac{V_{ag}}{V_t} 100 \quad (3.2)$$

La densidad aparente (ρ_a), definida en el capítulo anterior, permite relacionar el contenido de humedad gravimétrico (θ_m) con el volumétrico (θ_v) mediante la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{\rho_a}{\rho_{ag}} \theta_m \quad (3.3)$$

donde ρ_{ag} es la densidad del agua.

La **Tabla 3.1** presenta los valores de la densidad de agua a diferentes temperaturas. Para fines prácticos se puede asumir una densidad del agua de 1 g cm^{-3} .

Tabla 3.1 Densidad del agua en función de la temperatura

Temperatura (°C)	Densidad g cm ⁻³	Densidad relativa (%)
0 (líquido)	0.9998	99.98
0 (sólido)	0.9170	91.70
4	1.0000	100.00
10	0.9997	99.97
15	0.9991	99.91
20	0.9982	99.82
30	0.9956	99.56

Como el rango de valores de la densidad aparente para la mayoría de los suelos agrícolas se encuentra entre 1 y 2 g cm⁻³, el contenido de humedad volumétrico es mayor que el gravimétrico. Si se asume la densidad del agua = 1 g cm⁻³ entonces:

$$\theta_v = \rho_a \theta_m = \frac{M_{ag}}{V_t} \quad (3.4)$$

donde ρ_a es la densidad aparente relativa y es adimensional.

Cuando no se especifican las unidades (masa o volumen), se asume que el contenido de humedad está expresado en unidades volumétricas. Es conveniente clasificar las diferentes regiones de humedad del suelo en función de su disponibilidad para las plantas, es decir, región gravitacional, capilar e higroscópica. Para acotarlas se han definido varias constantes de humedad tales como el contenido de humedad a saturación, la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente.

El contenido de humedad de un suelo en condiciones agrícolas debe estar entre la capacidad de campo y un valor conocido como humedad crítica (θ_c), que define el umbral a partir del cual se afecta el rendimiento del cultivo. A continuación se describen los parámetros de humedades del suelo.

3.2.3 Contenido de humedad a saturación(θ_s)

El contenido de humedad a saturación (θ_s) es la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener, y se presenta cuando el espacio poroso total del suelo se encuentra ocupado por agua. Al agua que se drena por la acción de la gravedad en un suelo saturado se le llama agua libre o gravitacional. Un suelo saturado es dañino para las plantas no acuáticas puesto que en estas condiciones se ve impedida la respiración de las raíces.

3.2.4 Capacidad de campo (θ_{cc})

Cuando un suelo se satura y se deja que el agua drene libremente hasta alcanzar su capacidad máxima de retención, se dice que el suelo se encuentra a capacidad de campo (θ_{cc}). Cualquier cantidad de agua adicional a la capacidad de campo es fácilmente drenable por efecto de la fuerza gravitacional.

El concepto de capacidad de campo (CC) fue introducido por Veihmeyer y Hendrickson en 1931, y fue definido como la máxima cantidad de agua que un suelo puede retener en contra de la fuerza de gravedad y en ausencia de evaporación, es decir, es el contenido de humedad que permanece en el suelo después de una lluvia o riego pesado, cuando el movimiento descendente del agua prácticamente cesa. La definición implica un movimiento libre del agua en el suelo bajo la acción única de la gravedad.

La definición de capacidad de campo es un término controversial, ya que puede carecer de sentido físico para algunos suelos que continúan drenando por tiempos largos, por ejemplo, los suelos arcillosos. Dicho término es de valor limitado cuando el riego es muy frecuente, como en el caso del riego por goteo en el que el riego puede ser aplicado diariamente. Aunque el término tiene varias limitaciones, es muy utilizado en el riego por gravedad y aspersión debido a su valor práctico.

Por muchos años una gran cantidad de recursos se destinó a estimar indirectamente la capacidad de campo en el laboratorio. Sin embargo, su aplicabilidad ha sido limitada ya que hay que considerar varias propiedades estáticas y dinámicas del suelo y sus interrelaciones, que dependen de la composición global del perfil del suelo, para determinarla. La estimación de θ_{cc} a partir de una o más muestras alteradas de suelo expresa, en la mayor parte de los casos, una información parcial cuya magnitud es susceptible de ser sobre o subestimada. Originalmente, la capacidad de campo (θ_{cc}) ha sido expresada gravimétricamente, sin embargo, es más conveniente expresarla volumétricamente, sobre todo cuando se calculan láminas de riego.

3.2.5 Punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP})

El concepto de punto de marchitamiento permanente (θ_{PMP}) fue propuesto en 1911 por Briggs y Shantz, y se define como el valor mínimo permisible de humedad que el suelo puede alcanzar sin que haya un efecto de detrimento vital irreversible para la planta. Este punto puede ser estimado en laboratorio por medio de plantas indicadoras mantenidas en macetas bajo condiciones similares al cultivo de interés. El contenido de humedad se verifica de manera frecuente hasta que las plantas se marchitan “permanentemente”. Esto es, las plantas no son capaces de recuperarse cuando se colocan en una atmósfera saturada por 12 h.

A falta de un valor experimental, se puede utilizar una regla empírica que consiste en dividir el valor de θ_{CC} entre 1.8 para estimar el punto de marchitamiento permanente. Una mejor estimación se logra al dividir θ_{CC} entre 1.7 para el caso de las arcillas, y entre 2 para el caso de las arenas (Hargreaves y Samani, 1992).

3.2.6 Humedad aprovechable (HA)

La diferencia entre θ_{CC} y θ_{PMP} se conoce como humedad aprovechable (HA) y se suele expresar en porcentaje volumétrico:

$$HA = \theta_{CC} - \theta_{PMP} \quad (3.5)$$

La **Figura 3.2** describe la variación general de la humedad aprovechable (HA) en función de la textura del suelo. Existe mayor contenido de humedad aprovechable entre las texturas de suelo franco limoso y arcilloso en un rango de 0.2 a 0.4 cm del suelo. La humedad disponible actual del suelo está dada por la ecuación $HD = \theta_{CC} - \theta_a$ donde θ_a es la humedad actual del suelo.

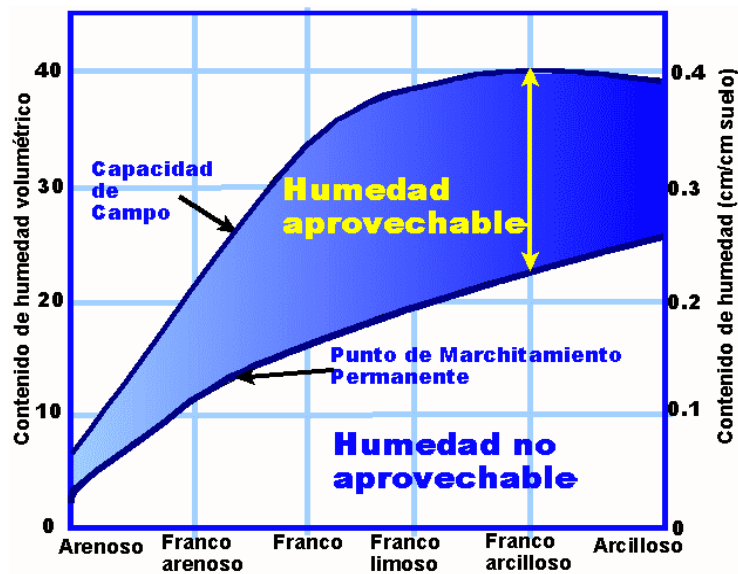


Figura 3.2 Constantes de humedad para varias texturas de suelo

3.2.7 Humedad fácilmente aprovechable (HFA)

La humedad fácilmente aprovechable (HFA) es la fracción de la HA que puede ser absorbida por las plantas sin causar problemas de estrés hídrico. Los rendimientos se

reducen cuando el contenido de humedad se acerca al punto de marchitamiento permanente, tal como se representa en la **Figura 3.2**. Dicha reducción es más drástica durante las etapas fenológicas críticas. No se considera la humedad aprovechable (HA) como el rango utilizable por las plantas, sino que se utiliza solamente una fracción conocida como fracción o factor de abatimiento o déficit máximo de humedad permisible (f).

Tradicionalmente se ha tomado un valor de f igual a 0.5. Sin embargo, el valor depende tanto del cultivo como del suelo, el manejo del riego y las condiciones ambientales. Al inicio del ciclo un cultivo puede estresarse, por lo que el valor de f es grande; a medida que alcanza sus periodos críticos como la floración o formación de frutos, f alcanza su valor mínimo. En el caso de cultivos sensibles al estrés hídrico como las hortalizas, con raíces poco profundas en ambientes cálido-secos, el valor de f puede ser tan bajo como 0.2, mientras que para cultivos resistentes a la sequía, con raíces profundas en ambientes húmedos, el valor de f puede ser de hasta 0.8.

3.2.7.1 Ejemplo

Si $\theta_{CC} = 32 \%$, $\theta_{PMP} = 15 \%$, y $f = 0.5$, entonces HFA = 8.5 % y la humedad aprovechable (HA) es de 17 %, significa que un metro de suelo a capacidad de campo tendrá aproximadamente una lámina de 17 cm de agua aprovechable para los cultivos, de los que solamente 8.5 cm son fácilmente aprovechables, y 17 cm de lámina equivale a 1 700 m³ por hectárea. El riego debe aplicarse cuando el contenido de humedad alcance su valor crítico de $\theta_c = 23.5 \%$, que es equivalente a una lámina almacenada de 23.5 cm por metro de suelo. Si HA = 17 % y $f = 0.4$, entonces la humedad fácilmente aprovechable es de 6.8 %, es decir, las plantas solo disponen de 6.8 cm por cada 100 cm de suelo en capacidad de campo. Las **Tablas 3.2 y 3.3** muestran la sensibilidad de los cultivos a la sequía y los periodos críticos donde el valor de f debe ser mínimo.

Tabla 3.2 Sensibilidad de los cultivos al déficit hídrico (FAO, 1990)

Sensibilidad	Baja	Baja-Media	Media-Alta	Alta
Cultivos	Algodón Mandioca Mijo Sorgo	Alfalfa Cacahuete Cítrico Girasol Remolacha azucarera Soya Trigo Vid	Tomate Cebolla Sandía Maíz Repollo Chile morrón	Arroz Plátano Caña de azúcar Hortalizas verdes Papa

Tabla 3.3 Periodos críticos al déficit hídrico de los cultivos

Cultivo	Etapas más sensibles y observaciones
Alfalfa (forraje)	Inmediatamente después del corte El estrés restringe el crecimiento de hojas y la elongación de los tallos
Alfalfa (semilla)	Floración
Algodón	Floración y formación de capullo
Piña	Vegetación
Arroz	Panojamiento y floración
Plátano	Todo el periodo
Cacahuete	Floración y formación de frutos
Caña de azúcar	Vegetación (rebrote y elongación de tallos)
Cebolla	Agrandamiento de bulbo
Cebolla (Semilla)	Floración
Cítrico	Floración y formación de fruto más que crecimiento del fruto
Girasol	Floración más que formación de frutos Resistente al estrés en las primeras etapas
Maíz	Alta sensibilidad durante polinización, floración y formación de grano El estrés hídrico afecta la expansión de la hoja
Olivo	Inmediatamente después de la floración y el llenado de frutos
Papa	Formación de estolones y comienzo de tubérculos Muy sensible al estrés hídrico
Chile morrón	Todo el ciclo
Remolacha azucarera	Primer mes después de emergencia Resistente al estrés
Repollo	Crecimiento de cabeza y maduración
Sandía	Floración y llenado de fruto
Soya y sorgo	Floración y formación del grano
Tabaco	Periodo de rápido crecimiento
Tomate	Trasplante, floración y crecimiento de fruto
Trigo	Floración y formación de grano Relativamente tolerante al estrés
Vid	Vegetación y floración más que llenado de fruto

El valor de la fracción de abatimiento (f) para riegos con alta frecuencia (riego por goteo) varía generalmente entre 0.2 y 0.6, mientras que en los riegos con baja frecuencia (riego por gravedad) varía entre 0.4 y 0.8. A medida que la profundidad de

raíces se incrementa, el valor de f se incrementa. Un caso excepcional se presenta en cultivos con poca profundidad radical, como el cultivo de la papa, en donde el valor de f puede ser de 0.4, principalmente durante la época de formación del tubérculo. La **Tabla 3.4** muestra la variación de f a lo largo de las etapas fenológicas de algunos cultivos.

Tabla 3.4 Variación estacional del factor abatimiento hídrico (f) de algunos cultivos (SCS-USDA, 1991)

Cultivo	Fase fenológica	Factor de abatimiento (f)
Cebolla	Siembra - formación de bulbo	0.8
	Formación de bulbo - tamaño medio	0.5
	Tamaño medio - máximo desarrollo	0.4
	Máximo desarrollo -maduración	0.7
Frijol	Siembra – inicio de floración	0.7
	Floración- inicio de envaine	0.4
	Envaine - maduración	0.5
	Maduración - cosecha	0.8
Granos	Siembra - embote	0.7
	Embote - espigamiento	0.5
	Espigamiento - grano lechoso	0.5
	Grano lechoso - maduración	0.6
Maíz	Siembra - encañe	0.8
	Encañe - espigue	0.5
	Espigue - grano lechoso	0.4
	Grano lechoso - maduración	0.5
Papa	Maduración - cosecha	0.8
	Siembra - formación de estolones	0.8
	Estolones - formación de tubérculo	0.5
	Tubérculo - 2/3 máximo	0.4
	2/3 máximo - maduración	0.7

El valor crítico de humedad (θ_c) está en función de f y se define como el contenido de humedad mínimo permisible que no causa estrés a la planta, lo que se traduce en una reducción apreciable en la evapotranspiración y su consecuente disminución del rendimiento.

3.2.8 Humedad crítica (θ_c)

En la práctica, los cultivos presentan un valor mínimo permitido o valor crítico de la humedad del suelo (θ_c), hasta donde la humedad puede agotarse sin causar un

detrimento en su productividad potencial. Este valor no es el punto de marchitamiento sino un valor intermedio entre θ_{CC} y θ_{PMP} . El valor crítico de humedad puede estimarse como:

$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \theta_{CC} - f(HA) \quad (3.6)$$

donde f es el déficit máximo de humedad permisible, factor máximo de abatimiento hídrico o fracción de abatimiento.

La Figura 3.3 ilustra los conceptos presentados en esta sección. El suelo se modela por medio de un barril con tres compartimentos que representan los tres volúmenes de almacenamiento del agua en el suelo. El primero, situado en la parte inferior del dibujo, representa el agua que se encuentra fuertemente retenida en el suelo y no disponible para las plantas. El segundo simboliza el agua aprovechable (HA) que está disponible para las plantas a través de un medio de acceso (raíces) entre el agua del suelo y la planta. El tercero representa el agua gravitacional o libre que se mueve fuera de la zona de raíces para constituir lo que se conoce como percolación profunda. El agua libre constituye la diferencia entre los contenidos de humedad a saturación y a capacidad de campo ($\theta_s - \theta_{cc}$).

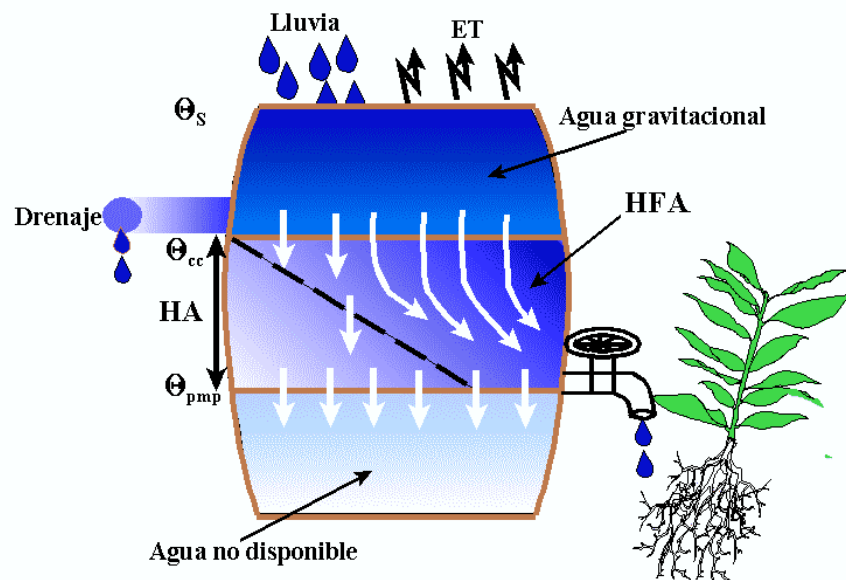


Figura 3.3 Modelo de barril que representa las constantes de humedad

La **Tabla 3.5** muestra las constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas. Se observa una equivalencia al expresar el contenido de humedad volumétrica

en porcentaje en centímetros por metro de suelo. La **Tabla 3.6** muestra el rango de valores para las constantes de humedad de algunos suelos en unidades gravimétricas. Estas tablas no pretenden sustituir las estimaciones directas de las propiedades, solamente constituyen una referencia cuando se carece de datos más exactos.

Tabla 3.5 Constantes de humedad representativas de los suelos agrícolas (porcentajes volumétricos)

Textura	Humedad aprovechable (% o cm agua / m suelo)	Humedad fácilmente aprovechable (% o cm/m)	Capacidad de campo (% o cm/m)
Arena gruesa	2-6	1-3	6-12
Arena fina	6-8	3-4	10-18
Arena franca	9-10	4-5	15-25
Franco arenosa	10-12	5-6	15-30
Franco limosa	17-21	9-11	25-35
Franco arcillo-limosa	15-17	8-9	30-40
Arcillo-limosa	13-14	6-7	30-40
Arcilla	11-13	6-7	30-45

Tabla 3.6 Parámetros del suelo obtenidos de muestras superficiales de suelos agrícolas (Marshall y Holmes, 1988)

Textura	Densidad aparente (g cm ⁻³)	Saturación θ_s (%)	Capacidad de campo θ_{CC} (%)	Punto de marchitamiento permanente θ_{PMP} (%)	Humedad aprovechable HA (%)
Arenosa	1.65 (1.55-1.80)	38 (32-42)	9 (6-12)	4 (4-6)	5 (4-6)
Franco arenosa	1.5 (1-4-1.6)	43 (40-47)	14 (10-18)	6 (4-8)	8 (6-10)
Franca	1.4 (1.35-1.5)	47 (43-49)	22 (18-26)	10 (8-12)	12 (10-14)
Franco arcillosa	1.35 (1.3-1.4)	49 (47-51)	27 (23-31)	13 (11-15)	14 (12-16)
Franco limosa	1.3 (1.25-1.35)	51 (49-53)	31 (27-35)	15 (13-17)	16 (14-18)
Arcillosa	1.25 (1.2-1.3)	53 (51-55)	35 (31-39)	17 (15-19)	18 (16-20)

Nota: Los contenidos de humedad están expresados en unidades gravimétricas. El rango de valores se expresa entre paréntesis.

3.2.9 Métodos para estimar la humedad del suelo

Los métodos para medir el contenido de humedad pueden ser directos o indirectos. Los métodos directos se basan en la extracción y cuantificación del agua del suelo mediante un proceso de secado en una estufa, por destilación o absorción en un desecante, o bien a través de la extracción de agua por medio de un material extractante que es afectado por el contenido de humedad.

Por otro lado, los métodos indirectos se basan en la determinación de cierta propiedad físico-química que varía en forma definida con el contenido de humedad. Estos métodos usualmente involucran la determinación del estado energético del agua presente en los poros del suelo, las propiedades termales o eléctricas del suelo, la atenuación de rayos gama o la termalización de neutrones. A continuación se presentan con detalles los principales métodos para estimar la humedad del suelo.

3.2.9.1 Método gravimétrico

La determinación gravimétrica del contenido de humedad del suelo es el método directo más usado. Consiste en tomar una muestra del suelo cuya humedad se desea conocer, almacenarla en un recipiente que no permita alteraciones en su contenido de humedad, extraer el agua presente en la muestra por medio de una estufa eléctrica durante un tiempo estándar (24 h) a una temperatura estándar (105 °C). Por último, se repesa la muestra seca para determinar el agua extraída. El procedimiento es el siguiente:

1. Colectar una muestra de suelo a la profundidad deseada con ayuda de una barrena.
2. Remover la muestra de suelo de la barrena y colocarla en un recipiente (bote) de peso conocido (M_b). Si no se pesa la muestra en campo, es necesario sellar el bote con cinta plástica para su transporte.
3. Pesar con una balanza la muestra con el bote (M_{shb}).
4. Evaporar el agua presente en la muestra, colocándola en una estufa por 24 h a 105 °C.
5. Retirar la muestra de la estufa y esperar a que se enfríe para pesarla con el bote (M_{ssb}).

La siguiente ecuación (alterna a la **Ecuación 3.1**) permite estimar el contenido gravimétrico de la muestra de suelo:

$$\theta_m = \frac{\text{masa del agua en la muestra}}{\text{masa de la muestra seca}} 100 = \frac{M_{shb} - M_{ssb}}{M_{ssb} - M_b} 100 \quad (3.7)$$

El método gravimétrico no requiere calibración porque es directo; además, es barato y válido para la mayoría de los suelos y rangos de contenido de humedad. Algunas desventajas de este método son el tiempo y las actividades requeridas para estimar el contenido de humedad de una muestra de suelo (muestreo, transporte, secado y pesado). También se pueden presentar alteraciones del sitio de muestreo, pérdidas de peso debido a la oxidación de materia orgánica o evaporación del agua estructural; el manejo y transporte de la muestra está sujeto a evaporación potencial.

A menudo es necesario contar con una estimación de la densidad aparente para expresar el contenido de humedad gravimétrico resultante (θ_m) en unidades volumétricas (θ_v). Aunque la estimación del contenido de humedad se puede obtener fácilmente, ya que no es necesario calcular el volumen de la muestra, hay datos que se expresan en unidades de lámina de agua, como los requerimientos de riego de los cultivos, por lo que se requiere estimar el contenido en términos de humedad volumétrica.

Para calcular el contenido de humedad del suelo en forma volumétrica se utiliza el procedimiento para obtener el contenido de humedad gravimétrico, que requiere obtener el volumen de la muestra de suelo (V_t) extraída en campo. El contenido de humedad volumétrico se obtiene con la siguiente relación:

$$\theta_v = \frac{M_{ag}}{V_t} = \frac{M_{shb} - M_{ssb}}{V_t} \quad (3.8)$$

3.2.9.2 Determinación empírica de las constantes de humedad

Las fracciones texturales de un suelo son propiedades físicas presentes en la mayoría de los suelos agrícolas. En un proyecto de calendarización del riego en tiempo real realizado en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sinaloa, se calibraron y validaron las siguientes ecuaciones empíricas para estimar dos de las constantes de humedad necesarias para estimar la humedad aprovechable en el suelo:

$$\theta_{CC} = 0.3486 - 0.0018(\text{arena}) + 0.0039(\text{arcilla}) + 0.0228(MO) - 0.0738(\rho_a) \quad (3.9)$$

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004(\text{arena}) + 0.0044(\text{arcilla}) + 0.0122(MO) - 0.0182(\rho_a) \quad (3.10)$$

donde los porcentajes de las fracciones texturales (arena, limo y arcilla) están dados en %, MO es el contenido de materia orgánica en porcentaje de masa con respecto al suelo seco (%) y ρ_a es la densidad aparente (g/cm^3). Las constantes de humedad (θ_{CC} y θ_{PMP}) se expresan en unidades volumétricas (cm^3/cm^3).

Saxton *et al.* (1986) propusieron las siguientes ecuaciones para evaluar las constantes de humedad en forma volumétrica:

$$\theta_{cc} = \left(\frac{0.3333}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3.11)$$

$$\theta_{pmp} = \left(\frac{15}{a} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (3.12)$$

donde las constantes a y b son evaluadas de acuerdo con las siguientes expresiones:

$$a = \exp(-4.396 - 0.0715 \text{ arcilla} - 4.88 \times 10^{-4} \text{ arena}^2 - 4.285 \times 10^{-5} * \text{arena}^2 * \text{arcilla}) \quad (3.13)$$

$$b = -3.14 - 0.00222 * \text{arcilla}^2 - 3.484 \times 10^{-5} * \text{arena}^2 * \text{arcilla} \quad (3.14)$$

El contenido de humedad de saturación puede estimarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\theta_s = 0.332 - 7.251 \times 10^{-4} * \text{arena} + 0.1276 * \log(\text{arcilla}) \quad (3.15)^2$$

Las ecuaciones empíricas son solo una aproximación y no sustituyen a la estimación en campo o laboratorio, por lo que deben usarse como una primera aproximación ante la falta de valores experimentales. Por ejemplo, si el porcentaje de arena es el 10 % y el de arcilla el 30 %, los valores correspondientes calculados son: $\theta_{pmp} = 0.1656$, $\theta_{cc} = 0.3423$, y $\theta_s = 0.513$, todos expresados en cm^3/cm^3 .

3.2.10 Lámina de riego (L_r)

La lámina de riego (L_r) se define como la cantidad de agua en unidades lineales (usualmente centímetros) o carga de agua que se aplica sobre la superficie del suelo para cumplir con los requerimientos de riego de un cultivo. La siguiente relación permite estimar la lámina de riego en función del volumen (V) aplicado sobre un área (A):

$$L_r = \frac{V}{A} \quad (3.16)$$

² Los cálculos de esta ecuación se realizan con el logaritmo base 10.

La **Figura 3.4** muestra la relación entre volumen y lámina en un cubo de área unitaria ($a = b = 1$), con el porcentaje de agua en el volumen de suelo que corresponde a la lámina de agua si se asume un área unitaria.

Para expresar el volumen se utilizan diferentes unidades. En los países que usan el sistema inglés es común usar el acre-pie o acre-pulgada para expresar un volumen o una lámina aplicada en un acre. Por ejemplo, un acre-pie indicaría una lámina de riego de un pie en una superficie de un acre. En el sistema métrico es común expresar el volumen en millares de m^3 o litros. La **Tabla 3.7** presenta algunas conversiones útiles en la estimación de volumen y lámina.

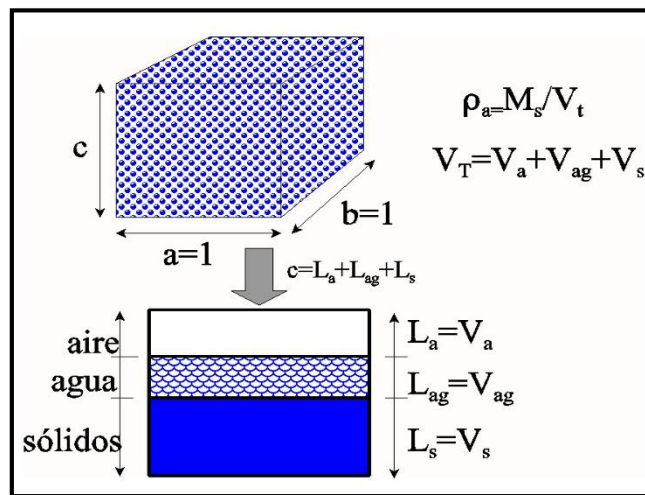


Figura 3.4 Relación entre volumen y lámina para un área unitaria

Tabla 3.7 Conversiones útiles en la medición del agua

Unidad	Equivalencias
1 lps = 1 l/s	3.6 m^3/h
1 000 m^3	1 000 000 l
1 ac- ft	325 900 gal
1 cm	100 m^3/ha
1 m	10 000 $m^3/ha = 10$ millares m^3/ha
1 in	27 158 gal /ac
1 ft^3	7.48 gal
1 ac	0.41 ha
1 m	100 cm = 3.28 ft

El contenido de humedad volumétrico (θ_v) está relacionado directamente con el concepto de lámina de riego. Por ejemplo, si se tiene un cubo de 1 m³ de suelo con un contenido de humedad volumétrico de $\theta_v = 0.3$ y se extrae toda el agua del suelo, se puede formar una capa o lámina de agua de 30 cm de espesor (100 cm * 0.3), en un área de 1m². La siguiente ecuación permite calcular la lámina de riego (L_r) para incrementar el contenido de humedad volumétrico, expresado en forma decimal, de un valor inicial θ_{v1} a un valor final θ_{v2} con una profundidad P_r .

$$L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1}) P_r = \Delta\theta_v P_r \quad (3.17)$$

donde P_r es la profundidad de mojado y $\Delta\theta$ es el incremento en contenido de humedad.

El contenido de humedad puede expresarse tanto a través de las unidades volumétricas (L³/L³) y gravimétricas (m/m), como en términos de lámina de agua por unidad lineal de profundidad de suelo (L/L). Por ejemplo, 30 cm de lámina por metro de suelo es equivalente a un contenido de humedad volumétrico de 0.30 cm³ cm⁻³. Es decir:

$$L_r = (\theta_{v2} - \theta_{v1}) P_r \therefore (\theta_{v2} - \theta_{v1}) = \Delta\theta_v = \frac{L_r}{P_r}$$

Si $L_r = 30$ cm, $P_r = 100$ cm, $\theta_{v1} = 0$, y se requiere calcular θ_{v2} , entonces:

$$\theta_{v2} = \theta_{v1} + \frac{L_r}{P_r} = 0 + \frac{30}{100} = 0.30 \text{ cm/cm de suelo}$$

La humedad aprovechable puede expresarse en términos de lámina, tal como se muestra en la **Tabla 3.5**. Por ejemplo, un valor de 10 cm/m de suelo es equivalente a 10 % en porcentaje volumétrico de humedad.

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) = \Delta\theta_v = \frac{L_r}{P_r} = \frac{10}{100} = 0.1 \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$$

Si el contenido de humedad está dado en unidades gravimétricas, la ecuación anterior incluye la densidad aparente relativa:

$$L_r = (\theta_{m2} - \theta_{m1}) \rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (3.18)$$

Si la humedad final (θ_{m2}) e inicial (θ_{m1}) en unidades gravimétricas es el contenido de humedad en capacidad de campo y en punto de marchitamiento permanente, respectivamente, entonces la lámina para llevar el suelo a capacidad de campo, asumiendo un contenido de humedad inicial a punto de marchitamiento permanente, está dada por la siguiente ecuación:

$$L_r = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \rho_a P_r = \Delta\theta_m \rho_a P_r \quad (3.19)$$

La profundidad efectiva de la zona radical depende de la etapa y tipo de cultivo. Cada cultivo tiene asociada una profundidad efectiva de exploración máxima, tal como lo muestra la **Figura 3.5**.

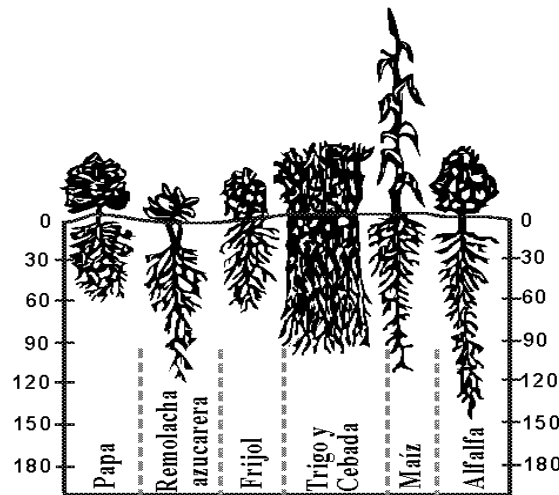


Figura 3.5 Profundidad efectiva radical máxima en centímetros sin restricciones de crecimiento

3.2.10.1 Ejemplo de cálculo de una lámina de riego

Se desea regar un cultivo de maíz con una profundidad radical de 120 cm en un suelo franco con un contenido de humedad volumétrico de 20 % y se desea aumentar su contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo obtenida *in situ* con un valor de 30 %. La lámina de riego que se debe aplicar es de $(0.30 - 0.20) \times 120 = 12\text{cm}$.

Según los datos anteriores, si se tiene un terreno de 100 m por 50 m (0.5 ha), el volumen de suelo de la zona radical es de $100\text{ m} \times 50\text{ m} \times 1.2\text{ m} = 6\,000\text{ m}^3$. El volumen del agua presente en el suelo antes del riego es de $6\,000\text{ m}^3 \times 20\% / 100 = 1\,200\text{ m}^3$. El volumen de agua que se debe aplicar al terreno es de $0.12\text{ m} \times 100\text{ m} \times 50\text{ m} = 600\text{ m}^3$. **La Figura 3.6** muestra gráficamente que si se aplica una lámina de 10 cm en un suelo cuyo contenido de humedad gravimétrico inicial es $\theta_{mi} = 0.15\text{ g g}^{-1}$ y una densidad aparente de $\rho_a = 1.25\text{ g cm}^{-3}$, la profundidad de mojado sería de 100 cm si se considera un contenido a capacidad de campo de $\theta_{mcc} = 0.23\text{ g g}^{-1}$.

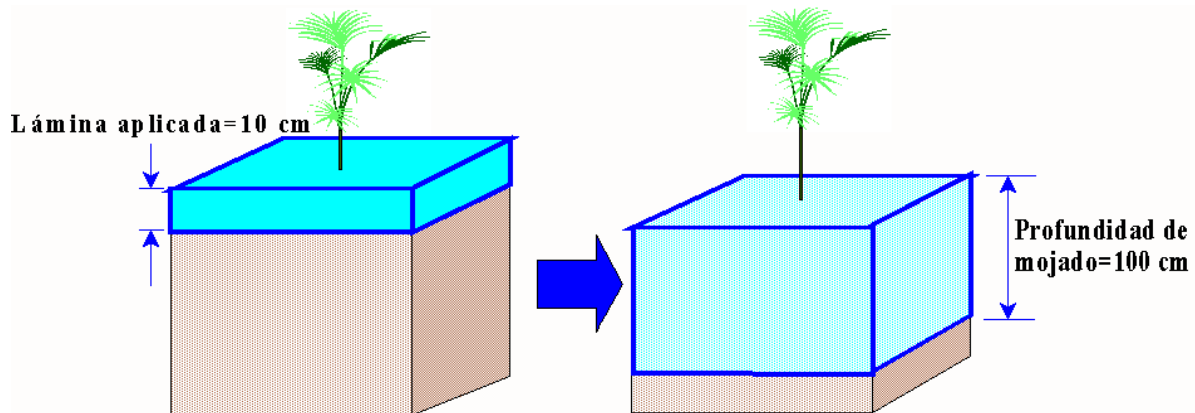


Figura 3.6 Una lámina de 10 cm moja una profundidad de 100 cm asumiendo que $\rho_a = 1.25 \text{ gr cm}^{-3}$, $\theta_{mcc} = 0.23 \text{ gr gr}^{-1}$ y $\theta_{mi} = 0.15 \text{ gr gr}^{-1}$

La **Tabla 3.8** muestra la profundidad de mojado alcanzada al aplicar un centímetro de lámina para valores promedio de los suelos de la **Tabla 3.5** bajo diferentes contenidos de humedad. Se observa una gran profundidad de mojado en suelos arenosos con altos contenidos de humedad. Por ejemplo, un centímetro de lámina aplicado a un suelo arenoso con un contenido de humedad volumétrico de 14 % (90 % de la HA) llevaría a capacidad de campo a una profundidad de 121.2 cm.

Tabla 3.8 Profundidad de mojado al aplicar una lámina de 1 cm en diferentes suelos de la Tabla 3.5. Las unidades de la humedad son en porcentaje

Suelo	Arenoso	Fr. Arenoso	Franco	Fr. Arcilloso	Fr. Limoso	Arcilloso
CC (g g ⁻¹)	9	14	22	27	31	35
PMP (g g ⁻¹)	4	6	10	13	15	17
ρ_a (g cm ⁻³)	1.65	1.5	1.4	1.35	1.3	1.25
CC (cm ³ cm ⁻³)	5	8	12	14	16	18
PMP (cm ³ cm ⁻³)	5	8	12	14	16	18
HA (cm ³ cm ⁻³)	8.25	12	16.8	18.9	20.8	22.5
HA(cm/m)	8.25	12	16.8	18.9	20.8	22.5
Humedad disponible (% de HA)	Contenido volumétrico de humedad (θ_v) en %					
30	9.075	12.6	19.04	23.22	25.74	28
50	10.725	15	22.4	27	29.9	32.5
60	11.55	16.2	24.08	28.89	31.98	34.75
80	13.2	18.6	27.44	32.67	36.14	39.25
90	14.025	19.8	29.12	34.56	38.22	41.5

Suelo	Arenoso	Fr. Arenoso	Franco	Fr. Arcilloso	Fr. Limoso	Arcilloso
	Profundidad de mojado (cm)					
30	17.3	11.9	8.5	7.6	6.9	6.3
50	24.2	16.7	11.9	10.6	9.6	8.9
60	30.3	20.8	14.9	13.2	12.0	11.1
80	60.6	41.7	29.8	26.5	24.0	22.2
90	121.2	83.3	59.5	52.9	48.1	44.4

Aunque el contenido de humedad de un suelo proporciona información importante, no es suficiente para explicar completamente el estatus del agua en el suelo. Los agricultores saben que se requieren otros conceptos para explicar por qué las plantas muestran un comportamiento hídrico disimilar cuando son cultivadas en suelos diferentes, pero con el mismo contenido de humedad, y por qué existe movimiento de agua en dos suelos con diferente textura, pero con el mismo contenido de humedad al ponerlos en contacto. Aún más, suelos diferentes, pero con el mismo manejo tienen contenidos de humedad diferentes. Para poder explicar estas preguntas se requiere introducir el concepto de potencial del agua en el suelo relacionado con el estado energético del agua en el suelo, lo que se hará a continuación.

3.3 Estado energético del agua en el suelo

El agua en el suelo contiene energía, principalmente de tipo potencial o de posición. El agua en el suelo se mueve a velocidades tan pequeñas que su energía cinética se puede despreciar. La alta variabilidad espacial y temporal en la energía potencial del agua en el suelo es la fuerza motora que define el sentido y cantidad de flujo que obedece el principio universal de movimiento de las zonas de alta energía a las de baja energía (gradiente del potencial negativo) para mantener un equilibrio dinámico.

Para que el agua se mueva en el suelo se requiere de la acción de fuerzas que realicen una cantidad de trabajo en virtud de su energía potencial almacenada. Este trabajo, conocido como potencial, expresa la energía potencial específica del agua del suelo con respecto a un estado de referencia estándar. Entre las fuerzas que actúan sobre el agua del suelo se incluyen la fuerza de atracción ejercida por las superficies de las partículas del suelo (potencial mátrico), la atracción de iones disueltos por las moléculas de agua (potencial osmótico), la fuerza debida a la atracción de la gravedad (potencial gravitacional) y la fuerza debida a la presión del agua acumulada en un punto de interés (potencial hidrostático).

La suma de todos los potenciales genera el potencial total y define el estado energético del agua en el suelo. El flujo de agua va hacia donde el potencial total disminuye. De todos estos potenciales parciales, el más importante desde el punto de

vista agrícola es el potencial mátrico, ya que está relacionado con la fuerza que las raíces deben desarrollar para absorber el agua retenida en el suelo. Aunque el potencial osmótico tiene poco efecto en el movimiento del agua líquida en el suelo, es de suma importancia para otros procesos como la absorción del agua por las plantas.

El potencial se puede expresar en unidades de energía por unidad de volumen, lo que resulta en unidades de presión (bar, Pa). Este potencial puede concebirse como la presión necesaria para remover el agua presente en el suelo. Si el suelo se encuentra saturado, prácticamente no se requiere presión para desalojar el agua ya que esta se drena por gravedad. El método más simple y conveniente para expresar el potencial es como energía por unidad de peso, que es lo mismo que expresarlo como presión hidrostática o columna de agua equivalente, y que es la altura de una columna de agua que alcanza una presión dada.

Como el agua del suelo usualmente se encuentra retenida en contra de la fuerza de gravedad, su presión o potencial mátrico es negativo. Para evitar manejar valores negativos, se introdujo el término tensión o succión, que representa la misma magnitud del potencial del suelo, pero con signo positivo.

El potencial mátrico es la afinidad de las partículas del suelo en su conjunto para retener el agua y está relacionado con la altura a que asciende el agua en tubos de diámetro pequeño (tubos capilares); a menor diámetro, mayor es el ascenso del agua en el tubo. Este fenómeno es conocido como capilaridad, y resulta de la combinación de la tensión superficial (fuerza de cohesión) del agua y su tendencia a mojar superficies sólidas (adhesión). A medida que se forman uniones entre el agua y la superficie sólida, el agua en el capilar empieza a ascender, generándose un menisco (superficie curvada) dentro de la interfase líquido-aire en el tubo capilar. La curvatura del menisco en la interfase aire-agua está en equilibrio con las diferencias de presión de las dos fases. Si el agua es pura y la interfase es plana, la presión es la misma en ambos lados de la interfase. Si la interfase es curvada, la presión es mayor en el lado cóncavo de la interfase por una cantidad que depende del radio de la curvatura y la tensión superficial del fluido.

Si un tubo fuera colocado en mercurio líquido, que no moja al vidrio, la tensión superficial disminuiría el nivel del líquido, en lugar de incrementarlo, y el menisco sería convexo y no cóncavo como en el caso del agua. Por ejemplo, bajo temperaturas ambientales, el agua ascenderá cerca de 3 cm en un tubo capilar de 1 mm. En un tubo de 0.125 mm el agua ascenderá más de 25 cm. Lo anterior es de suma importancia para los procesos de transporte de fluidos que se presentan en la planta y en el suelo.

Si se tiene una muestra de suelo con un suministro de agua en la parte inferior, el agua asciende debido a las fuerzas capilares presentes en el suelo. La altura de ascenso será mayor en el suelo que tenga mayor porcentaje de partículas pequeñas debido a que los poros del suelo actúan como tubos capilares. Dentro del suelo se forman una

gran cantidad de meniscos que mantienen el agua unida a las partículas del suelo en contra de la fuerza de gravedad. A menor diámetro del poro, mayor es su capacidad para retener agua y mayor es la energía que debe ejercer la raíz para extraerla. Si el valor de la tensión superficial del agua fuera menor, el suelo no podría retener grandes cantidades de agua, y esta se drenaría rápidamente resultando en mayores y más frecuentes aplicaciones de riego. La tensión superficial del agua para una interfase agua-aire a una temperatura de 20 °C es de 72 ergs/cm².

Aunque la capacidad de almacenamiento del agua en el suelo es importante, existe una gran cantidad de procesos que se presentan en el suelo, como el movimiento del agua, la absorción del agua por las raíces, que no son determinados únicamente por la cantidad de agua presente, sino en mayor parte por el estado energético presente. Como el agua en el suelo está sujeta a la fuerza de gravedad, tendería a moverse hacia abajo indefinidamente si no existieran fuerzas contrarias a la gravedad, como la succión. El suelo ejerce una succión sobre el agua que evita que se mueva hacia abajo. Como el agua en el suelo está bajo la influencia de la succión, su capacidad para realizar trabajo (estado energético) es menor a la del agua libre con la misma temperatura, elevación y presión. Por esta razón se dice que el agua del suelo se encuentra a menor potencial que el agua libre en condiciones similares.

Hasta ahora se ha asumido que se tiene agua pura (sin sales). Sin embargo, las sales disueltas en el agua aumentan la fuerza que debe ejercer la planta para extraerla, ya que al disolverse se forman iones que son cubiertos por “esferas” de solvatación de moléculas de agua que hacen más difícil su extracción, es decir, el agua tiene menos libertad de movimiento. Esto genera una disminución (más negativo) en el potencial osmótico, por lo que el agua se mueve de la zona de menor concentración (mayor potencial) a las de mayor concentración de sales disueltas (menor potencial). Si a un suelo sin problemas de sales que se encuentra a un potencial mátrico de -1 bar se le agrega agua salada con un potencial osmótico de -4 bares, se genera un potencial total de -5 bares, lo que dificulta que las plantas puedan extraer el agua. Si las plantas absorben el agua del suelo, rápidamente se alcanzaría el valor crítico que indica la necesidad de riego, aun cuando el contenido de humedad sea alto.

3.3.1 Curva característica de retención del agua en el suelo

Una vez que la zona de raíces ha sido delimitada, se requiere determinar el potencial y el contenido de humedad de interés en la zona radical para definir el déficit de humedad en cualquier tiempo. El potencial mátrico del agua en el suelo (h) describe el nivel de energía con que el agua está retenida en las partículas del suelo. La relación entre el contenido de humedad y la energía con que se encuentra retenida en el suelo (potencial) se conoce como curva de retención de humedad.

La retención de humedad varía según el tipo de suelo. Es prácticamente imposible establecer una relación directa entre el contenido de humedad y la respuesta de la planta, ya que dos suelos pueden tener el mismo contenido de humedad con respuestas completamente diferentes. En cambio, si el contenido de humedad se expresa en términos de energía, es posible comparar el estado energético del agua en suelos con propiedades contrastantes y su posible efecto en el rendimiento. A medida que el contenido de humedad disminuye, se requiere mayor esfuerzo para separarla de las partículas del suelo porque el potencial mátrico es menor.

La **Figura 3.7** muestra varias curvas típicas de retención de humedad para varios suelos con características contrastantes. La forma de la curva define las tensiones de retención del agua en el suelo y la cantidad de energía que las raíces deben superar para extraerla del suelo. Se muestra que el factor de abatimiento hídrico (f) debe ser mucho menor en un suelo arcilloso que en un suelo franco arenoso porque los suelos arcillosos tienen mayor capacidad de retención de agua, pero esta se encuentra retenida con mayor fuerza y, para el mismo contenido de humedad, la planta necesita mayor energía para extraerla en un suelo arcilloso que en un suelo arenoso.

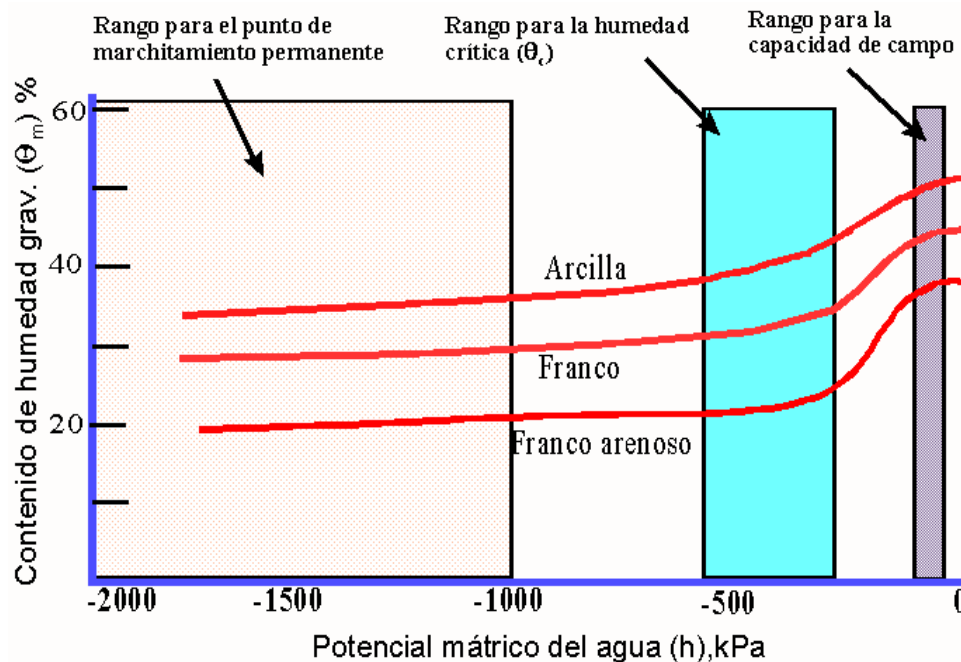


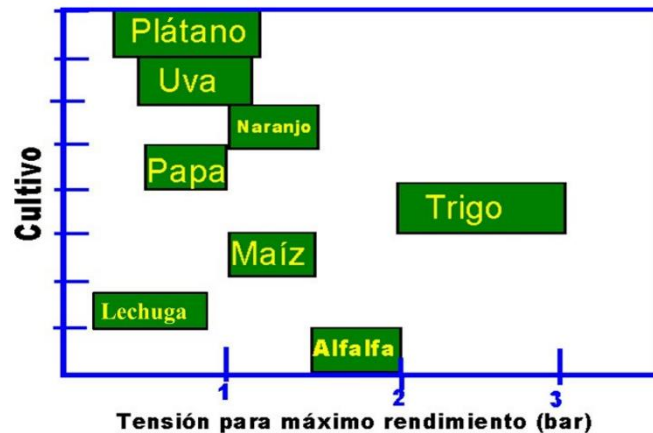
Figura 3.7 Curvas características de tres suelos agrícolas (adaptada de Cuenca, 1989)

La **Tabla 3.9** muestra la variación de la humedad aprovechable (HA) en función de la tensión para varias texturas de suelo.

Tabla 3.9 Valores de la humedad aprovechable (mm/m) en función de la tensión del suelo (Rijtema, 1969)

Textura	Tensión (atm)			
	0.2	0.5	2.5	15
Arcilla pesada	180	150	80	0
Arcillo limosa	190	170	100	0
Franca	200	150	70	0
Franco limosa	250	190	50	0
Franco arcillo limosa	160	120	70	0
Franco arcillo arenosa	140	110	60	0
Franco arenosa	130	80	30	0
Arena fina-limosa	140	110	50	0
Arena fina-media	60	30	20	0

El estado energético del agua en el suelo es de suma importancia para obtener máximos rendimientos. La **Figura 3.8** muestra el rango de tensiones permitidas para obtener máximos rendimientos.

**Figura 3.8** Rango de tensiones del suelo para obtener máximo rendimiento (Lomas y Levin, 1979)

3.3.2 Constantes de tensión del agua en el suelo

Las constantes de tensión del agua en el suelo están relacionadas con las constantes de humedad del suelo. Se ha estimado que el valor de capacidad de campo se presenta en tensiones en un rango de entre 0.1 y 0.33 bares. El contenido de humedad en marchitamiento permanente se presenta entre los 7 y 20 bares, dependiendo del cultivo y de las condiciones atmosféricas. Se ha tomado un valor de 15 bares como la tensión

en el punto de marchitamiento permanente. El cambio en el contenido de humedad entre 7 y 20 bares es pequeño en comparación con los cambios que se presentan para tensiones menores a 7 bares.

3.3.3 Movimiento del agua en el sistema SPA (suelo-planta-atmósfera)

El sistema suelo-planta-atmósfera es continuo. El movimiento del agua en la planta se debe al funcionamiento de un sistema hidráulico que inicia con la absorción del agua por las plantas, continúa con el transporte en los conductos de la planta (xilema) hasta los estomas donde el agua es transpirada a la atmósfera. Este movimiento se debe al cambio en el gradiente del potencial del agua. El agua se mueve de mayor a menor potencial. La **Tabla 3.10** muestra los valores del potencial del agua para un cultivo que transpira en condiciones normales y la **Tabla 3.11** presenta la variación del potencial del agua en función de la humedad relativa del aire atmosférico o edáfico.

Tabla 3.10 Valores del potencial del agua para el sistema suelo-agua-atmósfera

Componente	Potencial del agua (MPa)
Suelo	>-0.1
Superficie radical	≈-0.3
Xilema	≈-0.7
Capa límite	<-10
Aire	< -30

Tabla 3.11 Potencial del agua (a 25 °C) a diferentes humedades relativas

Humedad relativa (%)	Potencial del agua (MPa)
100	0
99.8	-0.03 (≈ capacidad de campo)
99.6	-0.6
99.0	-1.4 (≈ punto de marchitamiento permanente)
98.0	-2.8
92.0	-11.5
80.0	-30.7
50.0	-95.5
20.0	-222

3.4 Movimiento del agua en el suelo

El objetivo del riego no es solo aplicar la cantidad correcta y oportuna del agua, sino también conseguir que se concentre en las zonas de raíces. Para lograrlo, hace falta conocer las leyes físicas que gobiernan el flujo del agua en el suelo en función de los parámetros que definen sus características. La predicción del movimiento del agua líquida en el suelo es compleja porque depende de los cambios de potenciales del agua en el suelo.

El agua está sujeta a varias fuerzas o potenciales que actúan en el suelo. Por un lado, está la fuerza gravitacional que atrae el agua hacia el subsuelo, y por otro, la fuerza capilar que atrae el agua hacia los poros pequeños y que actúa en todas direcciones. En estado gaseoso, el vapor de agua se difunde en la fase gaseosa del suelo como producto de la diferencia de temperatura entre dos regiones del suelo. Para diseñar y manejar el agua a escala parcelaria se requiere conocer el movimiento potencial que el agua puede seguir al aplicarla al suelo.

En este caso, el agua puede moverse de manera horizontal o vertical en el perfil del suelo debido a la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares. Un porcentaje del agua aplicada es retenida y almacenada en el suelo, ya que el suelo es un medio poroso que consiste en alrededor de 50 % de partículas sólidas y 50 % de espacio poroso. Posteriormente, el agua puede ser extraída por las raíces de las plantas para ser incorporada en el desarrollo de nuevos tejidos vegetales. Sin embargo, la mayoría de esta agua es liberada a la atmósfera en forma de vapor a través de pequeños poros localizados en las hojas de las plantas, conocidos como estomas. Este proceso es llamado transpiración y está activo durante las horas diurnas.

La transpiración del agua de las plantas se considera un “uso benéfico” y no como una pérdida. Por último, si el agua permanece cerca de la superficie o encharcada, puede perderse por evaporación antes de moverse en el perfil del suelo. La evapotranspiración de los cultivos y evaporación del suelo son ampliamente discutidos en el Capítulo 5. El movimiento del agua en el suelo obedece a diferencias en el estado energético; el agua fluye de los puntos de mayor energía o potencial (mayor humedad) a los de menor energía hasta alcanzar un estado de semiequilibrio.

3.4.1 Conductividad hidráulica a saturación (K_s)

Todos los poros conducen agua cuando el suelo se encuentra saturado. La conductividad hidráulica a saturación es un parámetro del suelo asociado con la velocidad del agua en un suelo saturado bajo un gradiente de potencial unitario. Comúnmente, la conductividad hidráulica a saturación se define como una constante de proporcionalidad

entre el gradiente del potencial (i) y la velocidad de flujo del agua (v_s) en un suelo saturado, expresado en la forma de la ecuación de Darcy:

$$v_s = -K_s i \quad (3.20)$$

donde el signo negativo está relacionado con la dirección del flujo con respecto a los ejes de referencia, y a la consideración de que el flujo va de mayor a menor potencial.

Una estimación empírica de K_s , expresada en cm/h, fue propuesta por Saxton et al. (1986) con la siguiente estructura:

$$K_s = e^{\left(\frac{12.012 - 0.0755 \text{arena} + \frac{-3.895 + 0.03671 \text{arena} - 0.1103 \text{arcilla} + 8.7546 \times 10^{-4} \text{arcilla}^2}{0.332 - 7.251 \times 10^{-4} \text{arena} + 0.1276 \log(\text{arcilla})} \right)} \quad (3.21)$$

donde los valores de arena y arcilla están dados en porcentaje y el logaritmo (log) es de base 10. Por ejemplo, si el porcentaje de arena es del 10 % y el de arcilla del 30 %, el valor correspondiente de K_s es de 0.5891 cm/h.

3.4.2 Infiltración

La infiltración se define como el proceso por medio del cual el agua pasa a través de la superficie y se distribuye en los estratos del suelo. La velocidad con que se infiltra el agua, llamada velocidad o tasa de infiltración instantánea (i), es de suma importancia en el diseño y operación de un sistema de riego. La lámina de agua que se ha infiltrado en un tiempo dado se conoce como infiltración acumulada (I).

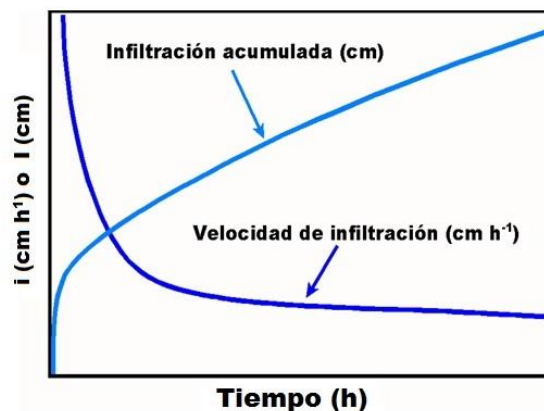


Figura 3.9 Curvas típicas para la velocidad de infiltración instantánea e infiltración acumulada de un suelo

La **Figura 3.9** muestra la tendencia típica de la velocidad de infiltración (i) de un suelo; al inicio la velocidad es alta y, a medida que el tiempo transcurre, la tasa disminuye y eventualmente alcanza un valor constante. La infiltración acumulada se incrementa rápidamente en tiempos cortos hasta alcanzar una pendiente constante cuando la velocidad de infiltración alcanza un valor constante.

La mayoría de las ecuaciones que representa el proceso de infiltración son de naturaleza empírica porque sus coeficientes carecen de sentido físico. Por lo general, estos parámetros son obtenidos usando la técnica de regresión para ajustar los datos observados al modelo propuesto. La estructura de la ecuación usada por el Departamento de Conservación de Suelos (SCS, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos para estimar la infiltración acumulada I es:

$$I = at^b + c \quad (3.22)$$

donde I es la infiltración acumulada en cm, t es el tiempo en minutos, y a , b y c son parámetros de regresión.

El SCS definió varias familias de curvas de infiltración en las que el número de familia depende de la velocidad de infiltración para tiempos largos en pulgadas/h. Así, la familia de curvas 0.1 significa que el suelo alcanza un valor de 0.1 pulgadas/h para tiempos largos. La **Tabla 3.12** presenta los valores a y b para diferentes familias de curvas definidas por la ecuación 3.22. El valor de c es 0.6985.

Tabla 3.12 Parámetros de la ecuación de infiltración acumulada de acuerdo con el Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos

Familia	a	b
0.1	0.0620	0.6610
0.2	0.0771	0.6988
0.3	0.0925	0.7204
0.4	0.1064	0.7356
0.5	0.1196	0.7475
0.6	0.1321	0.7572
0.8	0.1560	0.7728
1.0	0.1786	0.7850
2.0	0.2753	0.8080
4.0	0.4445	0.8230

La velocidad de infiltración (i) puede estimarse al derivar la expresión de I con respecto a t como:

$$i = \frac{dI}{dT} = \frac{d(at^b + c)}{dt} = abt^{b-1}$$

El proceso de infiltración y distribución del agua en el suelo se puede simular usando las soluciones numéricas de las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo del agua. Los parámetros de las propiedades hidrodinámicas que requieren estas soluciones son difíciles y laboriosas de obtener en campo por la naturaleza heterogénea del suelo en espacio y tiempo. Debido a estas restricciones, su uso se restringe a trabajos de investigación y están fuera del alcance práctico que requiere la calendarización del riego de grandes zonas de riego.

Los datos de la infiltración de un suelo son obtenidos en campo con la ayuda de un infiltrómetro de doble cilindro. La **Figura 3.10** muestra este dispositivo operando en campo para medir la infiltración a través del cambio de niveles del agua en el cilindro interno.

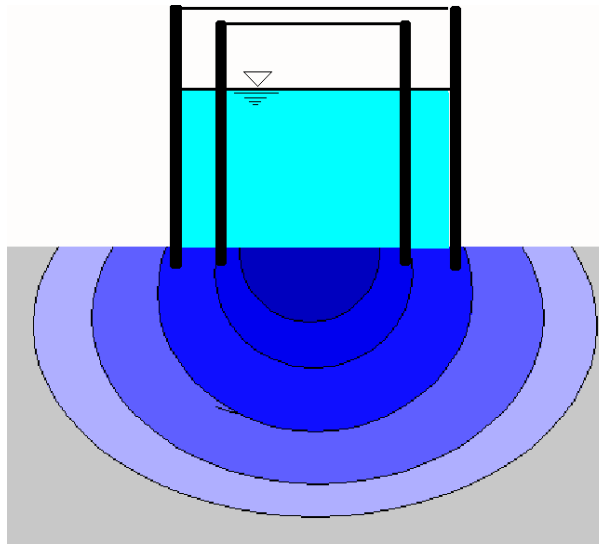


Figura 3.10 Infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración en campo

3.5 Eficiencia y uniformidad del riego

Ante la competencia que se ejerce sobre los recursos hidráulicos no solo entre agricultores sino también con los usuarios no agrícolas, se requiere un uso más eficiente

de estos recursos limitados. Este panorama hace imprescindible estimar indicadores que permitan evaluar el riego, ya sea durante un evento de riego o durante un ciclo agrícola que incluya varios riegos. También puede ser un criterio de manejo y diseño de un sistema de riego o un criterio de operación y aplicación del riego en campo.

Históricamente la evaluación del riego se ha asociado intuitivamente con el término de eficiencia. El problema, tal como fue mencionado por Burt *et al* (1997), es que los autores han usado los conceptos de eficiencia y uniformidad de distintas maneras y a veces como sinónimos. Ningún indicador de la eficiencia del riego proporciona la información total del grado de uniformidad y eficiencia del riego. Algunos solo toman en cuenta lo que sucede dentro del suelo, ignorando los volúmenes perdidos sobre su superficie, mientras que otros únicamente consideran un evento del riego, y otros toman intervalos de tiempo más amplios como un ciclo agrícola.

Al terminar un riego es común preguntar qué tan bien se aplicó, pero la mayoría de las veces se responde con base en la problemática presentada para aplicar el riego, sin considerar si cumplieron las necesidades hídricas de las plantas ni la uniformidad con la que se distribuyó el agua de riego en la parcela, principalmente debido a lo difícil y costoso que resulta estimar estos parámetros.

El término eficiencia es comúnmente definido por medio de una ecuación que relaciona las entradas con las salidas de un sistema. Desde el punto de vista económico, la eficiencia de riego puede ser definida como la ganancia obtenida con relación a la inversión en el costo del agua. Los problemas de este enfoque son varios: muchos de los insumos o beneficios del sistema no son fácilmente cuantificables en términos monetarios, los costos y precios varían en tiempo y espacio, y muchas veces son difíciles de predecir a largo plazo.

Existen términos cuantitativos como la eficiencia o uniformidad del riego que tienen sentido físico y se pueden expresar matemáticamente para su evaluación. Los principales indicadores que definen el nivel de eficiencia del riego tanto a escala parcelaria como de una zona o sistema de riego son los siguientes:

- Uniformidad de distribución (U_d)
- Eficiencia de aplicación (E_a)
- Eficacia del riego (EF)
- Coeficiente de uso consuntivo³ (CUC)
- Sagacidad del riego (S_r)
- Eficiencia del riego (E_r)
- Eficiencia en el uso del agua (E_u)

³ El uso consuntivo de un cultivo considera el agua evapotranspirada hacia la atmósfera y aquella que permanece almacenada en las plantas de dicho cultivo.

3.5.1. Uniformidad de distribución (U_d)

La uniformidad del riego es una medida de la homogeneidad con que el riego se aplica espacialmente en el terreno. Una uniformidad del 100 % indica que todas las porciones del terreno recibieron la misma cantidad de agua. Si bien ningún sistema de riego logra esta uniformidad, algunos métodos pueden conseguir una uniformidad más alta de aplicación. Aunque la uniformidad depende en gran medida de la variabilidad del suelo, otro factor importante es la variabilidad en la aplicación del agua del sistema de riego que depende de los procesos de diseño, instalación, manejo y mantenimiento del sistema.

Para generalizar la aplicabilidad del concepto de uniformidad sin importar el sistema de riego y tipo de cultivo, Burt *et al.* (1997) introdujeron el concepto de elemento, que se define como la unidad más pequeña del terreno en cuya superficie la variabilidad de aplicación no es significativa. En el caso de los frutales, el área elemental es la superficie bajo la cual se concentran sus raíces; en los cultivos densos, el área elemental son los puntos donde existen plantas en el terreno. De esta manera, un valor de $U_d = 1$ indicaría que cada área elemental del terreno recibe la misma cantidad de agua. En las gramíneas, por ejemplo, un valor de $U_d = 1$ indica que cada planta recibe la misma cantidad de agua.

Un estimador de la uniformidad de distribución (U_{d-P}) se define como la relación de las láminas elementales aplicadas menores con respecto a su promedio. La ecuación tiene la siguiente estructura:

$$U_{d-P} = \frac{\text{lámina infiltrada parte inferior}}{\text{lámina infiltrada}} = \frac{L_P}{L} \quad (3.23)$$

donde:

L_P es el promedio de la fracción inferior P de las láminas infiltradas en cada unidad elemental, ordenadas de menor a mayor

L es la lámina promedio infiltrada en todas las áreas elementales

P es la fracción decimal de las áreas elementales que son consideradas para estimar la lámina promedio inferior. Un valor de $P = 0$ indica que L_P es estimada con el valor mínimo de todas las láminas elementales

Un estimador de L_P para elementos de tamaño variable puede realizarse usando un promedio ponderado con base en su área de aplicación. Un estimador común de U_d es conocido como coeficiente de uniformidad del cuarto bajo (para $P = 0.25$) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$U_{d-CB} = \frac{L_{0.25}}{L} \quad (3.24)$$

donde $L_{0.25}$ es el promedio del 25 % de la fracción inferior de las láminas infiltradas elementales ordenadas de menor a mayor.

Es importante hacer una distinción entre los valores calculados a partir de datos de campo (U_d) y de valores potenciales (PU_d). La **Tabla 3.13** muestra los valores potenciales del coeficiente de uniformidad para sistemas de riego con un buen diseño:

Tabla 3.13 Coeficientes de uniformidad potenciales (PU_d) en porcentaje, para sistemas de riego bien diseñados y un valor de $P = 0.25$

Sistema de riego	PU_d (%)
Aspersión permanente bajo follaje en frutales	94
Movimiento lineal	92
Goteo en frutales	90
Surcos con pendiente	89
Surcos a nivel	87
Bordos en franjas	85
Goteo en cultivos en hilera	85
Aspersión portátil	75-85

La estadística universal de la uniformidad es la varianza (σ^2) de la población o el coeficiente equivalente llamado coeficiente de variación (CV). Este último se evalúa con la siguiente expresión:

$$CV = \frac{\sigma}{L} \quad (3.25)$$

donde CV es el coeficiente de variación, σ es la desviación estándar de las láminas de riego acumuladas, ponderadas con respecto al área elemental y L es la lámina de riego promedio aplicada.

Existe una relación entre el coeficiente de variación y la uniformidad del riego (U_d). Se han propuesto diferentes expresiones estadísticas para estimar la uniformidad del riego asumiendo diferentes funciones de distribución de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$SU_d = 1 - K_p CV \quad (3.26)$$

donde SU_d es el coeficiente de la uniformidad de distribución estadística y K_p es un coeficiente que depende del tipo de función de distribución y fracción de las láminas infiltradas usadas para estimar el valor de U_d .

Hart y Reynolds (1965) derivaron la relación en (3.26a), asumiendo una función de distribución normal para las láminas infiltradas y un valor de $P = 0.25$ (cuarto bajo); para $P = 0.5$, estos mismos autores derivaron la relación en (3.26b):

$$SU_{d-0.25} = 1 - 1.27 CV \quad (3.26a)$$

$$SU_{d-0.5} = 1 - 0.798 CV \quad (3.26b)$$

3.5.2. Eficiencia de aplicación (E_a)

No toda el agua aplicada se infiltra uniformemente en el suelo debido a limitaciones físicas durante el movimiento del agua sobre y bajo la superficie del suelo, así como a la variabilidad en los niveles de humedad en el suelo y a las inevitables pérdidas evaporativas por la acumulación del agua en el suelo y hojas. La **Figura 3.11** muestra el comportamiento del agua aplicada al finalizar un riego en surcos abiertos.

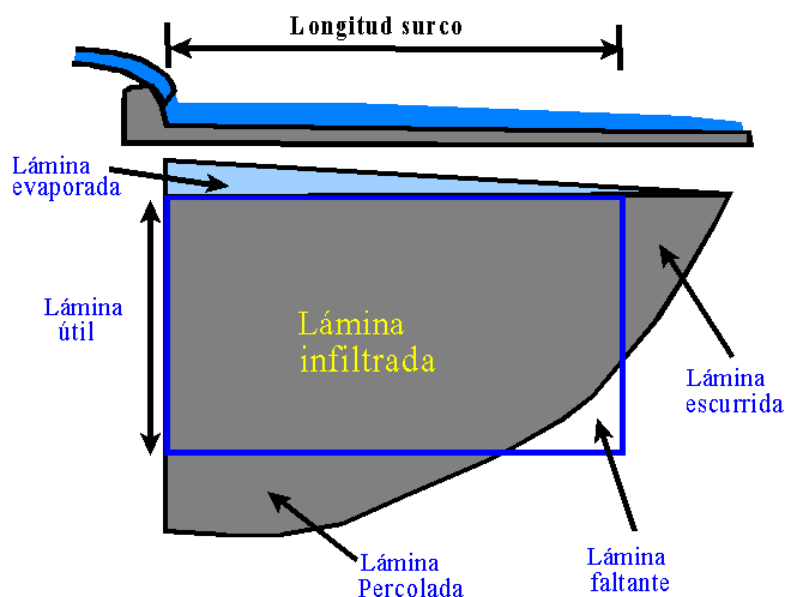


Figura 3.11 Distribución de la lámina aplicada en un riego en surcos

La eficiencia de aplicación (E_a) es un indicador que permite evaluar si un evento de riego cumplió con las expectativas de aplicar la lámina requerida en cada unidad elemental de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$E_a = \frac{L_r}{L} \quad (3.27)$$

donde:

L_r es la lámina promedio de riego que contribuye a la lámina objetivo (requerida) para ese evento de riego. La lámina objetivo o requerida se conoce como lámina neta (L_n)

L es la lámina promedio aplicada que también se conoce como lámina bruta (L_b)

Usualmente, la lámina promedio requerida (L_r) se considera como la fracción de la lámina aplicada que contribuye a reducir el déficit hídrico en la zona radical, sin embargo, se puede considerar la lámina para lavado de sales o para otros usos benéficos desde el punto de vista agronómico.

La eficiencia de aplicación potencial (PE_a) es la máxima eficiencia de aplicación que se puede obtener durante un evento de riego minimizando la percolación profunda sin subirrigar de acuerdo con las limitaciones distributivas del sistema de riego usado. El máximo valor de E_a se alcanza durante un riego en el momento en que la lámina promedio en la fracción inferior de las láminas aplicadas (L_p) es igual a la lámina requerida (L_r). Un estimador de PE_a esta dado por la siguiente ecuación:

$$PE_a = \frac{L_r}{L_{CB}} \quad (3.28)$$

donde L_{CB} es la lámina promedio aplicada en el cuarto bajo tal que $L_{CB} = L_r$.

En la **Figura 3.12** se presentan diferentes escenarios de la uniformidad y eficiencia de aplicación de un riego. El caso A de la figura muestra un riego ideal con una eficiencia de aplicación del 100 % y un coeficiente de uniformidad de 1. La lámina de riego requerida es aquella que contribuye a mantener una profundidad de raíces bajo condiciones óptimas, dada usualmente por la lámina para satisfacer el déficit hídrico del suelo y para el control y lavado de sales.

La lámina para el control de sales se considera como una percolación benéfica. El caso A se aproxima a un riego (posiblemente por aspersión) que termina con alta eficiencia de aplicación y uniformidad. En riego por surcos se presentan dos escenarios, el caso B donde el riego termina tempranamente y se deja una zona sin aplicar con la lámina requerida, y el caso D donde se cumple plenamente con la lámina aplicada, pero por tiempos largos del riego se aplica más lámina que la requerida y se pierde una parte

por percolación innecesaria. En el caso C la eficiencia de aplicación disminuye debido a las características particulares del método de aplicación del riego, que consiste en aplicar mayor cantidad de agua en un extremo de la parcela, como en el caso de las variantes del riego por gravedad.

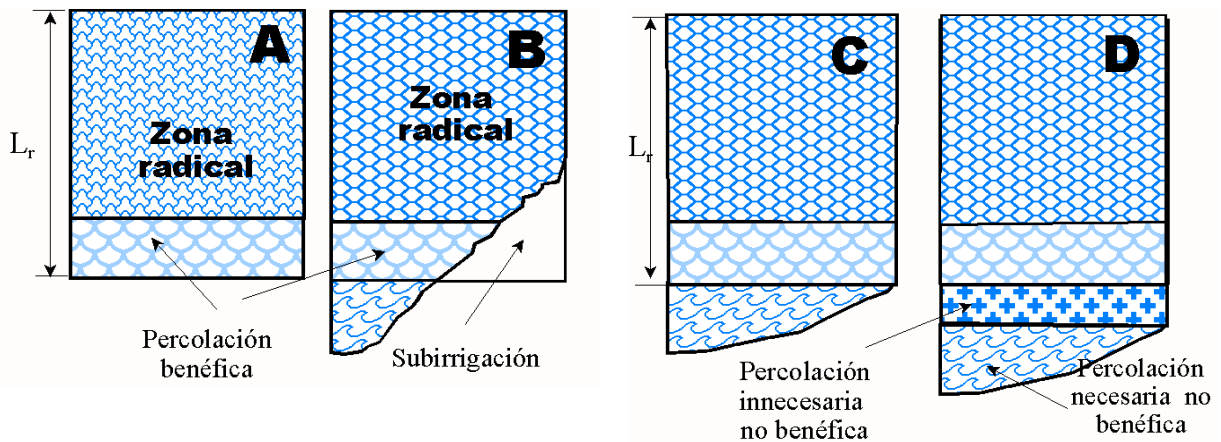


Figura 3.12 Diferentes escenarios de eficiencia y uniformidad que pueden presentarse al finalizar el riego

La **Tabla 3.14** presenta las eficiencias de aplicación típicas en los principales sistemas de riego. Por ejemplo, para aplicar una lámina neta de 1 cm se requiere aplicar una lámina de 1.1 cm bajo un sistema de riego con una eficiencia del 95 %.

Tabla 3.14 Eficiencias de aplicación típicas para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm

Sistema de riego	Ef. Aplicación (%)	Cantidad de agua requerida (cm) para poner 1 cm en la zona de raíces
Gravedad		
Surcos	35-85	1.2-2.8
Surcos corrugados	30-55	1.8-3.8
Melgas a nivel	60-85	1.2-1.7
Melgas en pendiente	55-75	1.3-1.8
Inundación sin control	15-35	2.8-6.7
Impulsos	50-85	1.2-2.0
Aspersión		
Lateral estacionario o portátil (side roll)	60-85	1.2-1.7

Calendarización del riego: teoría y práctica	3. El agua en el suelo
--	------------------------

Sistema de riego	Ef. Aplicación (%)	Cantidad de agua requerida (cm) para poner 1 cm en la zona de raíces
Lateral fijo	60-85	1.2-1.7
Cañón viajero	55-80	1.2-1.8
Cañón estacionario	50-75	1.3-2.0
Pivote central de alta presión	65-85	1.3-1.5
Pivote central de baja presión	75-90	1.1-1.3
Lateral de avance frontal		
Movimiento lineal	80-90	1.1-1.2
Microirrigación		
Goteo	80-95	1.05-1.2
Asperjador o nebulizador	75-90	1.1-1.3

Nota: Bajo condiciones de viento y amplio espaciamiento entre aspersores, los sistemas por aspersión presentan menores eficiencias que las mostradas en la tabla.

3.5.3 Eficacia del riego (EF)

Es posible obtener altas eficiencias de aplicación subirrigando la parcela. Toda la lámina de agua aplicada contribuye a satisfacer los requerimientos de riego de la zona objetivo, por lo que es necesario un nuevo parámetro que indique el grado de eficacia de riego expresada, esta vez, en términos de comparar la lámina de riego que se aplica al cultivo respecto de la lámina de agua que en verdad requiere. De esta forma se está evaluando qué tan adecuado o conveniente es el riego que se aplica al cultivo.

$$EF = \frac{L_p}{L_r} \quad (3.29)$$

donde L_p es la lámina aplicada de riego y L_r es la lámina requerida de riego. Un estimador usual de EF es dado para $P = 0.25$ con la siguiente relación:

$$EF = \frac{L_{0.25}}{L_r} \quad (3.30)$$

Un valor de $EF < 1$ indica que el tiempo de riego fue corto (subirrigación); un valor de 1 indica que el riego fue oportuno (deseable), mientras que un valor de $EF > 1$ indicaría que el tiempo de riego fue largo (sobrerriregación).

Hasta ahora se han presentado indicadores que estiman la eficiencia y uniformidad de un evento de riego, sin embargo, existen otros indicadores donde el intervalo es más amplio, por ejemplo, entre dos riegos durante un ciclo agrícola completo. De manera similar, hasta ahora se ha asumido la zona de riego objetivo ocupado por el volumen de suelo bajo una parcela o parte de una parcela a una profundidad que puede ser la

profundidad de raíces, sin embargo, algunas veces la zona objetivo puede ser una o más parcelas que constituyen una o más zonas de riego de un distrito de riego, dependiendo del objetivo del indicador de eficiencia del riego.

3.5.4 Coeficiente de uso consuntivo (CUC)

El coeficiente de uso consuntivo (CUC) define la fracción del volumen de riego aplicado y movable que es usado para satisfacer el uso consuntivo del cultivo en un periodo.

$$CUC = \frac{V_{UC}}{V_m} \quad (3.31)$$

donde V_{UC} es el volumen del riego usado para satisfacer el uso consuntivo de los cultivos y V_m es el volumen de riego aplicado que se mueve fuera de la zona objetivo del riego de acuerdo con la siguiente relación:

$$V_m = Va - \Delta V \quad (3.32)$$

donde Va es el volumen del riego aplicado a la zona objetivo y ΔV es el cambio de volumen de la humedad almacenada en suelo con respecto al periodo de análisis.

Los volúmenes de agua del escurrimiento superficial y subsuperficial, la percolación profunda y el lavado de sales no se consideran para satisfacer el uso consuntivo del cultivo. Sin embargo, la evapotranspiración de malezas y la pérdida de agua por evaporación durante el riego se consideran para fines de uso consuntivo de los cultivos.

3.5.5 Sagacidad del riego (S_r)

No siempre el agua de riego que deja una zona de riego es agua pérdida, por razones sociales o ambientales, ese volumen puede considerarse benéfico. Para considerar este tipo de agua se ha incorporado el indicador denominado sagacidad del riego que puede evaluarse con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{V_{ru}}{V_m} \quad (3.33)$$

donde V_{ru} es el volumen de riego razonablemente usado o benéfico con fines de uso consuntivo, ambiental o social.

3.5.6 Eficiencia del riego (E_r)

Para el administrador de una zona de riego es indispensable tener un indicador de la eficiencia del riego a escala global, esto es, la zona objetivo del riego es toda la zona del riego, las pérdidas por escurrimiento superficial o subsuperficial de una parcela pueden ser recuperadas aguas abajo y usarse para regar otras parcelas, por lo que esos volúmenes no salen de la zona objetivo del riego. Idealmente se quiere que toda el agua que se aplica al suelo sea para cumplir con los requerimientos hídricos de un cultivo desde el punto de vista agronómico. Un estimador de la eficiencia de riego surge de la relación entre los volúmenes que salen de la zona objetivo del riego y los benéficamente utilizados por la planta:

$$E_r = \frac{V_e}{V_m} = \frac{V_e}{V_a - \Delta V} \quad (3.34)$$

donde V_e es el volumen de riego aplicado benéficamente usado por los cultivos desde el punto de vista agronómico, V_a es el volumen de riego aplicado y ΔV es el cambio en volumen almacenado en la zona objetivo del riego.

La definición anterior solamente considera el agua proveniente del riego y no toma en cuenta el agua proveniente de otros procesos como la lluvia y el ascenso capilar. Es posible expresar la eficiencia del riego en términos de láminas, en el entendido de que se calcula a partir de volúmenes aplicados sobre las parcelas, y no como láminas infiltradas.

$$E_r = \frac{L_e}{L_m} = \frac{L_e}{L_a - \Delta L} \quad (3.35)$$

donde L_e es la lámina de riego aplicada benéficamente usada por los cultivos desde el punto de vista agronómico, L_a es la lámina de riego aplicada y ΔL es el cambio en la lámina almacenada en la zona objetivo del riego.

Uno de los problemas asociados con la estimación de la eficiencia del riego es la definición de agua benéfica, considerada como el agua que sirve para mantener la producción de un cultivo desde el punto de vista agronómico. El agua usada en los siguientes procesos se considera como benéfica:

- Evaporación del suelo
- Transpiración del cultivo
- Lavado y control de sales
- Evaporación durante el riego
- Agua estructural

- Control de heladas, enfermedades o plagas
- Mantener las propiedades óptimas del suelo para la labranza del suelo y labores culturales del cultivo.

Entre los procesos no benéficos del agua destacan:

- Lavado de tuberías y emisores
- Transpiración de malezas
- Evaporación del follaje
- Evaporación por almacenamiento del agua sobre la superficie del suelo
- Escurrimiento y percolación fuera de la zona objetivo, ocasionados principalmente por riegos tardíos, baja uniformidad del riego o flujo preferencial en grietas o fracturas.

3.5.7 Eficiencia en el uso del agua (E_u)

La eficiencia en el uso del agua es otro parámetro que indica cuantitativamente cómo el agua de riego se traduce en rendimiento, y se define de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_u = \frac{\text{rendimiento}}{\text{agua aplicada}} \quad (3.36)$$

El parámetro de eficiencia anterior integra una gran cantidad de factores asociados con la frecuencia y cantidad del riego, la fecha de siembra, la variedad, las labores de cultivo y el control de plagas y enfermedades. En el norte del estado de Sinaloa se tienen valores de E_u del orden de 1.2 y 0.65 kg/m³ de agua para maíz y frijón, respectivamente (Sifuentes, 1998).

3.6 Ejemplos

Ejemplo 1. Estimar la densidad aparente (ρ_a) y el contenido de humedad volumétrica (θ_v) de una muestra de suelo cilíndrica de acuerdo con los siguientes datos: peso del suelo húmedo = $M_{sh} = 111.02$ gr; contenido de humedad = $\theta_m = 0.154$ g³ g⁻³; volumen muestra = $V_t = 68.7$ cm³. Resultados:

$$M_s = \frac{M_{sh}}{1 + \theta_m} = \frac{111.02 \text{ g}}{1 + 0.154} = 96.19 \text{ g}$$

$$\rho = \frac{M_s}{V_t} = \frac{96.19 \text{ g}}{68.7 \text{ cm}^3} = 1.4 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\theta_v = \theta_m \rho_a = 0.154 (1.4) = 0.216 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

Ejemplo 2. ¿Cuál es el nuevo contenido de humedad volumétrica (θ_v) de la muestra del ejemplo anterior si se le agrega y distribuye uniformemente 1.4 ml de agua, con una densidad del agua (ρ_{ag}) de 1 g cm⁻³? Resultados:

$$\text{Volumen agregado} = \Delta V = \rho_{ag} V_{ag} = 1 \text{ g cm}^{-3} 1.4 \text{ cm}^3 = 1.4 \text{ g.}$$

$$\theta_v = \frac{(M_{sh} + \Delta V) - M_s}{M_s} = \frac{(111.02 + 1.4) - 96.19}{96.19} = 0.2362 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$$

Ejemplo 3. Estimar la densidad aparente, contenidos de humedad gravimétrico y volumétrico, y porosidad, asumiendo una densidad de sólidos (ρ_s) de 2.65 g cm⁻³, de acuerdo con los siguientes datos obtenidos de muestras de cuatro estratos de suelo:

Muestra	Estrato (cm)	Volumen (cm ³)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)
1	0-30	67.56	110.1	84.45
2	30-40	67.56	105.1	77.69
3	40-55	67.56	102.0	75.12
4	55-100	67.56	93.0	74.11

Resultados:

Núm.	Estrato (cm)	Volumen (cm ³)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	ρ_a	θ_M	θ_v	ϵ
1.0	0-30	67.6	110.1	84.5	1.3	0.303	0.380	0.528
2.0	30-40	67.6	105.1	77.7	1.1	0.353	0.406	0.566
3.0	40-55	67.6	102.0	76.8	1.1	0.328	0.373	0.571
4.0	55-100	67.6	93.0	74.1	1.1	0.255	0.280	0.586

Ejemplo 4. Después de seis días, el suelo del ejemplo anterior ha sufrido cambios debido a la evapotranspiración. Estimar el contenido de humedad volumétrica y la lámina de

riego que hay que aplicar para obtener el contenido de humedad del suelo del Ejemplo 1.

Muestra	Estrato (cm)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)
1	0-30	105.2	83.2
2	30-40	102.1	79.2
3	40-75	98.8	75.4
4	75-100	95.3	76.2

Resultados:

Núm.	Estrato (cm)	Peso suelo húmedo (g)	Peso suelo seco (g)	ρ_a G cm ⁻³	θ_m (M ³ M ⁻³)	θ_v (L ³ L ⁻³)	$\Delta\theta_v$ (L ³ L ⁻³)	ΔL_r (cm)
1.0	0-30	105.2	83.2	1.3	0.264	0.326	-0.054	-1.62
2.0	30-40	102.1	79.2	1.1	0.289	0.339	-0.067	-0.67
3.0	40-75	98.8	75.4	1.1	0.310	0.346	-0.027	-0.93
4.0	75-100	95.3	76.2	1.1	0.251	0.283	0.003	0.08
Total							-0.145	-3.15

Los resultados indican que el perfil de suelo perdió 3.15 cm de agua por evapotranspiración, por lo que hay que aplicar 3.15 cm para obtener la humedad del ejemplo anterior. Las pérdidas por percolación son mínimas ya que la humedad del último estrato permaneció prácticamente constante ($\theta_v = 0.28$)

Ejemplo 5. Por error se realizaron los cálculos del contenido de humedad gravimétrico (θ_m) con respecto a la masa del suelo húmedo (M_{sh}) y se obtuvo una humedad del 22 %. Corregir este valor y expresarlo en términos de la masa de suelo seco. Resultados:

$$\theta_m^* = \frac{M_{ag}}{M_s + M_{ag}} = \frac{1}{\frac{M_s}{M_{ag}} + 1} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\theta_m}}$$

Resolviendo para θ_m se obtiene la humedad gravimétrica:

$$\theta_m = \frac{1}{\frac{1}{\theta_m^*} - 1} = \frac{1}{\frac{1}{0.22} - 1} = 0.282 \text{ g g}^{-3}$$

Ejemplo 6. Si se aplica una lámina de riego de 10 cm a un suelo con un contenido de humedad volumétrico inicial promedio de 17 %, estimar la profundidad del frente de mojado si el contenido de humedad volumétrico a capacidad de campo es de 28 %.

Resultados: la profundidad de mojado será de 90.9 cm para una lluvia de 10 cm en condiciones de humedad del suelo dado.

$$P_m = \frac{L_r}{\Delta\theta} = \frac{10 \text{ cm}}{(0.28 - 0.17)} = 90.9 \text{ cm}$$

Ejemplo 7. Un distrito de riego estima una lámina de riego bruta de 70 cm por hectárea regada con papa. Calcular el volumen neto aplicado a una hectárea, el volumen perdido por conducción y el volumen perdido por percolación si la eficiencia de aplicación es del 60 % y la de conducción del 85 %.

Resultados: la lámina que se recibe en el nivel de toma granja de la red de canales es de 70 cm por hectárea. Considerando una eficiencia de conducción de toma a parcela del 85 %, la lámina efectiva en la cabecera de la parcela es de 59.5 cm. Sin embargo, solamente están disponibles 35.7 cm en el nivel de la zona de raíces al considerar una eficiencia del 60 %. El volumen que llega a la toma es de 7 000 m³, de los cuales 5 950 m³ llegan a la cabecera de la parcela y solamente 3 570 m³ se quedan en la zona de raíces. Se pierde un volumen de 1 500 m³ en la regadera de la toma a la parcela, así como 2 380 m³ por percolación profunda fuera de la zona de raíces.

Ejemplo 8. Se midieron los niveles del agua de un infiltrómetro de doble cilindro para estimar la infiltración del suelo:

T (min)	0	2	5	10	20	30	45	60	75	90
Nivel (cm)	1.8	4.85	5.35	6	7.3	8.3	10	11.45	11.75	12.05

Resultados:

T (min)	0	2	5	10	20	30	45	60	75	90
Nivel h(cm)	1.8	4.85	5.35	6	7.3	8.3	10	11.45	11.75	12.05
Δh	-	3.05	0.5	0.65	1.3	1	1.7	1.45	0.3	0.3
t (h)	0	0.033	0.083	0.166	0.333	0.5	0.75	1	1.25	1.5
i (cm/h)	-	3.05	3.55	4.2	5.5	6.5	8.2	9.65	9.95	10.25
l (cm)	0	91.50	10.00	7.80	7.80	6.00	6.80	5.80	1.20	1.20

Ejemplo 9. Si el suelo del ejemplo anterior es homogéneo y tiene un contenido de humedad inicial de 0.2 cm³ cm⁻³, estimar la profundidad de mojado a 75 y 90 min con un valor de θ_{cc} de 0.35 cm³ cm⁻³.

Resultados: las profundidades de mojado a 75 y 90 min son de 66.3 cm y 68.3 cm, respectivamente.

$$P_m = \frac{I}{\Delta\theta} = \frac{I}{(\theta_{CC} - \theta_i)} = \frac{9.95 \text{ cm}}{(0.35 - 0.2)} = 66.3 \text{ cm}$$

Ejemplo 10. Estimar la cantidad de humedad aprovechable para el siguiente perfil de suelo, utilizando las ecuaciones (3.9) y (3.10) para evaluar θ_{CC} y θ_{PMP} , asumiendo un valor de $\rho_a = 1.35 \text{ gr cm}^{-3}$ y un contenido de materia orgánica del 2 %:

Estrato	Espesor (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)
1	20	30	10
2	25	40	30
3	55	38	25

Resultados:

Estrato	Espesor (cm)	Arcilla (%)	Arena (%)	θ_{CC}	θ_{PMP}
1	20	30	10	0.3936	0.2132
2	25	40	30	0.3966	0.2492
3	55	38	25	0.3978	0.2424

Ejemplo 11. Estimar la humedad fácilmente aprovechable para el suelo del ejemplo anterior, para el cultivo de papa, con los siguientes datos:

Etapas	P_r (cm)	f (%)
1	25	80
2	35	50
3	60	40
4	60	70

Resultados:

Etapas 1

Estrato	P_r (cm)	f	θ_{CC}	θ_{PMP}	HA (%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.8	0.4476	0.2134	0.2342	0.18736	3.7472

Estrato	P_r (cm)	f	θ_{cc}	θ_{PMP}	HA (%)	HFA (%)	HFA (cm)
2	5	0.8	0.4506	0.2494	0.2012	0.16096	0.8048
3	0	0.8	0.4518	0.2426	0.2092	0.16736	0
Acumulado	25						4.552

Etapa 2

Estrato	P_r (cm)	f	HA (%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.5	0.2342	0.1171	2.342
2	15	0.5	0.2012	0.1006	1.509
3	0	0.5	0.2092	0.1046	0
Acumulado	35				3.851

Etapa 3

Estrato	P_r (cm)	f	HA (%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.4	0.2342	0.09368	1.8736
2	25	0.4	0.2012	0.08048	2.012
3	15	0.4	0.2092	0.08368	1.2552
Acumulado	60				5.1408

Etapa 4

Estrato	P_r (cm)	f	HA (%)	HFA (%)	HFA (cm)
1	20	0.7	0.2342	0.16394	3.2788
2	25	0.7	0.2012	0.14084	3.521
3	15	0.7	0.2092	0.14644	2.1966
Acumulado	60				8.9964

Ejemplo 12. Estimar la percolación profunda o escurrimiento superficial generada con una lluvia efectiva de 10 cm para el siguiente suelo, asumiendo una profundidad radical de 100 cm.

Estrato	Espesor (cm)	θ_{cc}	θ_i
1	20	35	18
2	25	38	25
3	65	30	26

Resultados:

Estrato	Espesor (cm)	θ_{cc} ($L^3 L^{-3}$)	θ_i ($L^3 L^{-3}$)	$\Delta\theta$	Lmax (cm)

				(L ³ L ⁻³)	
1	20	35	18	17	3.4
2	25	38	25	13	3.25
3	55	30	26	4	2.2
Total	100				8.85

Se observa que el suelo puede almacenar hasta 8.85 cm, por lo que con una lluvia efectiva de 10 cm se generarían 1.15 cm de percolación profunda o escurrimiento superficial.

Ejemplo 13. Se tienen los siguientes valores del volumen aplicado en litros en 20 unidades elementales de 50 m² (área de influencia de la zona de raíces). Calcular el valor de U_d para valores de P de 0, 0.25 y 0.5.

5404	5398	5287	5316	5224	5187	5120	5197	5189	5110
5017	5108	4960	4990	4817	4987	4776	4666	4677	4586

Resultados: las respectivas láminas infiltradas en centímetros para cada elemento, ordenadas de menor a mayor son:

9.172	9.332	9.354	9.552	9.634	9.92	9.974	9.98	10.034	10.216
10.22	10.24	10.374	10.378	10.394	10.448	10.574	10.632	10.796	10.808

El promedio de las láminas es L = 10.1016 cm. Los resultados del coeficiente de uniformidad de distribución (U_d) son de 0.908, 0.931, y 0.962 para valores de P de 0, 0.25 y 0.5, respectivamente. Para el caso de p = 0 se tiene:

$U_{d-0} = \frac{L_{p=0}}{L} = \frac{9.172}{10.1016} = 0.908$	$U_{d-0.25} = \frac{9.4088}{10.1016} = 0.931$	$U_{d-0.5} = \frac{9.7168}{10.1016} = 0.962$
---	---	--

El valor de L_{p=0.25} se calcula como el promedio del 25 % inferior de los valores de las láminas:

$$L_{p=0.25} = \frac{9.172 + 9.332 + 9.354 + 9.552 + 9.634}{5} = 9.4088$$

Ejemplo 14. Calcular los coeficientes de uniformidad de distribución estadística (SU_{d-p}) para $p = 0.25$ y 0.5 usando las ecuaciones de Hart y Reynolds (1965) y las láminas del **Ejemplo 13**.

Resultados: el promedio de las láminas es $L = 10.1016$ cm, la desviación estándar es $\sigma = 0.4862$, el coeficiente de variación es $CV = 0.04814$, por lo tanto, $SU_{d-0.25} = 0.939$ y $SU_{d-0.5} = 0.962$, que son muy aproximados a los obtenidos en el **Ejemplo 13**.

Ejemplo 15. Se realizó una prueba de uniformidad por 150 min de un sistema de aspersión con un espaciamiento entre aspersores de 10×18 m y una descarga promedio de $18 \ell \text{ min}^{-1}$. Se obtuvieron las siguientes láminas colectadas en mm en botes igualmente espaciados:

17	13	13	18	12
19	15	11	16	19
18	10	9	14	21
16	10	8	13	20

Si la lámina neta requerida es de 30 mm, estimar cuáles son las láminas brutas y tiempos requeridos para regar adecuadamente (con eficacia) el 85 % y el 95 % de la superficie.

Resultados:

N	Li	P	Lp
1	8	0.05	8.00
2	9	0.10	8.50
3	10	0.15	9.00
4	11	0.20	9.50
5	12	0.25	10.00
6	13	0.30	10.50
7	13	0.35	10.86
8	13	0.40	11.13
9	14	0.45	11.44
10	15	0.50	11.80
11	16	0.55	12.18
12	16	0.60	12.50

N	Li	P	Lp
13	17	0.65	12.85
14	18	0.70	13.21
15	18	0.75	13.53
16	18	0.80	13.81
17	19	0.85	14.12
18	19	0.90	14.39
19	20	0.95	14.68
20	21	1.00	15.00

Con datos de la prueba de eficacia del riego es:

$$EF = \frac{L_{0.25}}{L_r} = \frac{10 \text{ mm}}{15 \text{ mm}} = 0.66$$

Para incrementar los valores de EF de 66 % a 85 % y 95 %, se requiere incrementar el valor de $L_{P-0.25} = 10$ mm a 12.75 mm y a 14.25 mm para obtener valores de EF de 85 % y 95 %, respectivamente.

$$L_{P-AD=0.85} = EF * L_r = 0.85 * 15 = 12.75 \quad L_{P-AD=0.95} = EF * L_r = 0.95 * 15 = 14.25$$

Por lo tanto, el tiempo de riego se debe aumentar para incrementar los valores de $L_{P-0.25}$, de acuerdo con los siguientes factores:

$$f_{AD-0.85} = \frac{12.75}{10} = 1.275 \quad f_{AD-0.95} = \frac{14.25}{10} = 1.425$$

Los nuevos tiempos de riego para aplicar una lámina neta de 30 mm e incrementar los valores de EF son:

EF (%)	Tiempo de riego (min)	L_n (mm)	L_b (mm)
66	300	30	30
85	382	30	38.2
95	427	30	42.8

Ejemplo 16. Calcular la eficiencia del riego (E_r) usando los siguientes valores obtenidos durante un ciclo agrícola en una zona de riego de 35 ha.

Sección	Cultivo	L_e (cm)	P_r (cm)	θ_i ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	θ_f ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	L_a (cm)
1	Papa	36	60	0.3	0.27	50
2	Maíz	50	100	0.20	0.23	70
3	Trigo	38	90	0.25	0.27	60

Resultados:

Cultivo	L_e (cm)	L_a (cm)	P_r (cm)	$\Delta\theta$ ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$)	ΔL (cm)	E_a	E_r
Papa	36	50	60	-0.1	-6	0.72	0.64
Maíz	50	70	100	0.03	3	0.71	0.75
Trigo	38	60	90	0.03	2.7	0.63	0.66

Se observa que al considerar la humedad existente al inicio (θ_i) y al final del ciclo (θ_f), se obtiene una mejor estimación del volumen aplicado durante el ciclo, y en consecuencia de la eficiencia del riego.

Ejemplo 17. Calcular la eficiencia en el uso del agua (EUA) bajo tres sistemas de riego de papa, considerando los siguientes datos obtenidos para la zona de Los Mochis, Sinaloa, México.

Sistema	L_b (cm)	Rendimiento (ton ha^{-1})
Gravedad	60	32
Aspersión	45	45
goteo	37	48

Resultados:

Sistema	L_b (cm)	Rendimiento (ton ha^{-1})	Volumen ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$)	EUA (kg m^{-3})
Gravedad	60	32	6000	5.3
Aspersión	45	45	4500	10.0
Goteo	37	48	3700	13.0

“El murmullo del agua es la voz de mis antepasados”

Seattle, Gran Jefe Indio Estadunidense

**Indicadores de
riego**

4

Capítulo 4

INDICADORES DE RIEGO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

4.1 Introducción

Para que las plantas puedan realizar sus funciones de crecimiento tanto biológicas como físicas, una serie de condiciones debe cumplirse. Una de las más importantes es la absorción y movimiento del agua desde las raíces hasta la atmósfera, para ello el suministro en la zona de absorción debe ser garantizado. Cuando esto no es así, se dice que es necesario el riego.

El riego consiste en suministrar de manera artificial el agua a los cultivos cuando las aportaciones de agua naturales son insuficientes para sostener un ciclo de cultivo o parte de este. Con el riego se reduce el riesgo de bajo o nulo rendimiento en regiones donde la precipitación es incierta en su distribución o baja en cantidad. En zonas áridas muy pocos cultivos pueden crecer sin el riego. Para obtener máximos beneficios del riego, se debe conocer con precisión cuánto y cuándo aplicarlo.

Uno de los mayores logros de la agricultura en la actualidad es la posibilidad de aportar puntualmente el riego y mantener la disponibilidad del agua en el momento en que la planta la requiere. Con el auxilio de sistemas de medición y monitoreo, idealmente se conocen los requerimientos hídricos de los cultivos, los cuales se asemejan a una curva continua similar al comportamiento de la radiación solar, creciente en el día y prácticamente nula durante la noche. Derivado de esta observación, el objetivo del riego, o, mejor dicho, el uso eficiente del riego consiste en adaptar su aplicación puntual a la curva transpirativa del cultivo, con el fin de disminuir el exceso que ocasiona el drenaje, pero también el déficit que se traduce en estrés hídrico y en la reducción de la cantidad y calidad de la cosecha.

Mantener la zona de raíz con suficiente agua para que las plantas la absorban no es tarea fácil, debido a las múltiples variables que provocan algún tipo de pérdida. Las pérdidas de agua ocurren cuando esta se mueve fuera del alcance de las raíces debido a una diferencia en el gradiente hidráulico, en respuesta a procesos naturales como el escurrimiento superficial o subsuperficial, la percolación profunda y la evapotranspiración. El escurrimiento superficial se presenta cuando el gasto aplicado es mayor que la infiltración del suelo, y los excedentes se mueven superficialmente fuera del alcance de las plantas a favor de la pendiente. Si el agua se aplica en cantidades mayores a las que el suelo puede retener y almacenar en su espacio poroso, se mueve

fuera de la zona de raíces constituyendo lo que se conoce como percolación profunda. La **Figura 4.1** ilustra gráficamente los principales procesos que ocurren en la frontera de la sección de control contenida por el volumen de raíces.

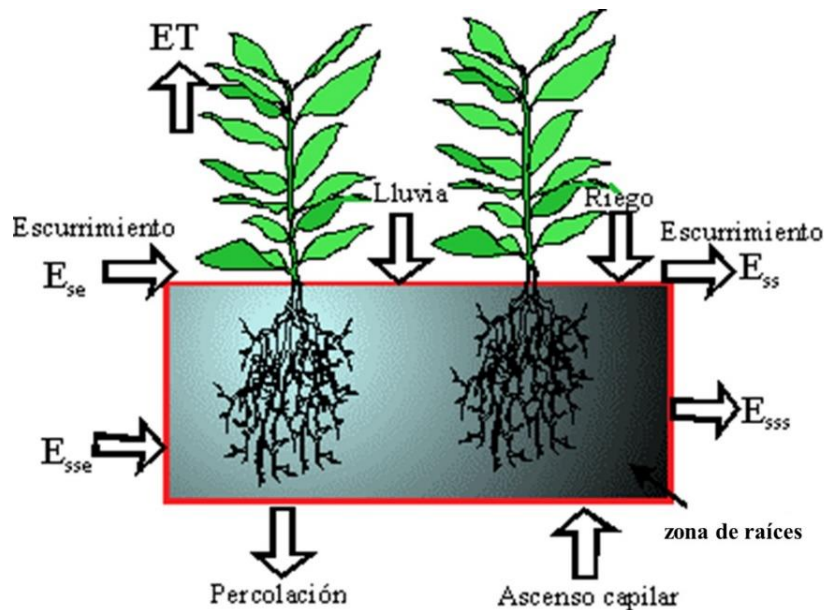


Figura 4.1 Componentes del balance hídrico en la zona radical

Los cultivos hortícolas contienen en sus tejidos entre 80 y 95 % de agua. En consecuencia, su rendimiento y calidad se ven drásticamente afectados ante las limitaciones de agua en el suelo. Una lechuga, por ejemplo, es prácticamente un “saco de agua” con pequeñas cantidades de saborizantes y vitaminas. Como el sistema radical de las hortalizas es pequeño, el retraso del riego de dos o más días puede afectar su rendimiento, en cantidad y calidad.

Para definir el momento del riego se han propuesto diferentes indicadores relacionados con el estrés hídrico de la planta. Cuando un indicador alcanza un valor crítico, definido con base en estudios experimentales, se aplica el riego. Los pasos a seguir para calendarizar el riego usando un indicador de riego X son:

1. Definir un valor crítico (x_c) del indicador X
2. Estimar el valor del indicador al inicio del ciclo x_0
3. Estimar el valor del indicador para el día i , x_i
4. Si el valor del indicador es menor o igual que el crítico ($x_i \leq x_c$), se alcanza el momento del riego, por lo cual se debe aplicar el riego y actualizar el indicador (x_i)
5. Actualizar el valor crítico (x_c) del indicador X para el día i

6. Esperar el siguiente día e ir al paso 3

La **Figura 4.2** muestra la variación temporal del indicador de riego (x_i), se observa que el indicador debe mantenerse dentro de los dos límites. El riego debe ser aplicado cuando el valor del indicador alcanza el valor crítico y mantenerse por abajo del límite superior. También muestra que se aplicaron 6 riegos y una lluvia. La presencia de lluvia retrasa el riego 2 del programa de riego representado en la misma figura.

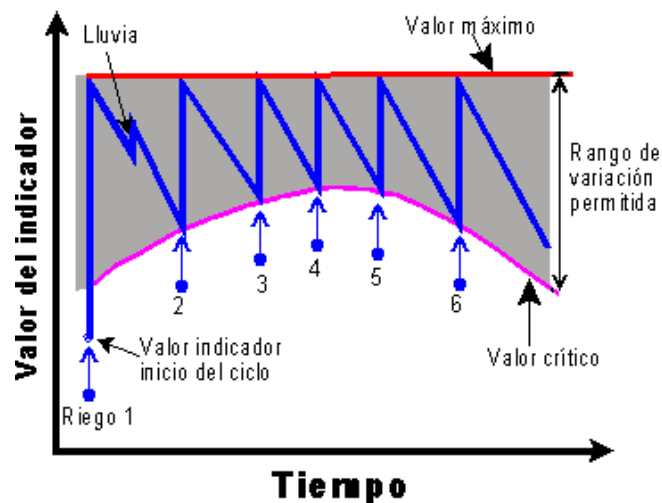


Figura 4.2 Variación de un indicador de riego de acuerdo con la calendarización del riego

Para obtener buenos rendimientos en términos de calidad y cantidad debe existir un balance entre el agua absorbida y el agua perdida por transpiración de las plantas y evaporación del suelo. Si este balance pudiera cuantificarse en forma rápida y precisa, el problema de estimar el momento del riego estaría resuelto ya que se estarían integrando la mayoría de los factores que definen el grado de sanidad hídrica del cultivo. Ante la complejidad de correlacionar varios de estos factores, se han definido diversos métodos para calendarizar el riego aislando algún factor en la forma de un indicador de riego, entre los más importantes se cuentan los indicadores edáficos, los vegetales, los evaporativos, los evapotranspirativos o el balance hídrico del sistema agua-suelo-planta-atmósfera. Los indicadores de riego se clasifican en:

1. De la planta

- Color de algún órgano vegetal como hoja o fruto
- Temperatura de algún órgano vegetal como las hojas
- Ángulo de inclinación de las hojas respecto al sol
- Humedad o potencial foliar
- Grado de enrollamiento de las hojas en cultivos herbáceos

- Grado de apertura de los estomas
- Magnitud del flujo de la savia
- Reflectancia de las hojas
- Tasa de crecimiento de algún órgano como tallo o fruto

2. Edáficos

- Contenido de humedad del suelo (humedad aprovechable)
- Potencial del agua del suelo (energía potencial)
- Conductividad térmica del suelo
- Humedad relativa del suelo
- Constante dieléctrica del suelo
- Temperatura del suelo

3. Evaporativos

- Tanque evaporímetro o evaporativo
- Atmómetro

4. Evapotranspirativos

- Lisímetros de balance o de pesada

5. Balance de humedad

- Evapotranspirómetro de Thornthwhite

4.2 Indicadores vegetales o de la planta

Las plantas son organismos primarios que pueden generar su propio alimento a partir de condiciones naturales, agua y dióxido de carbono en presencia de energía (solar). El agua que ingresa a la planta por las raíces y recorre su sistema vascular las ayuda a cumplir diversas funciones, desde las fisiológicas como la fotosíntesis y la respiración, hasta mantenerse turgentes y en posición vertical, además de regular la temperatura. Por eso, se considera que la planta misma es un sensor que indica el grado de estrés como respuesta a las actividades que se realizan en presencia de agua.

La calendarización de riego mediante indicadores vegetales se basa en el cambio físico de algún órgano de la planta que se relaciona con el estrés hídrico para definir el momento del riego. Los indicadores indirectos que permiten estimar cualitativamente el grado de estrés hídrico de la planta son el color, la temperatura de las hojas, el contenido de humedad de las hojas, el ángulo de las hojas, el grado de enrollamiento de las hojas y la amplitud de la apertura de los estomas.

El cambio de color o forma de algún órgano causado por estrés hídrico es utilizado frecuentemente por los agricultores como indicador de riego. El cambio de color varía según la especie, tipo y posición del órgano. Por ejemplo, las hojas del algodón cambian

de verde azul a verde oscuro a medida que se agudiza su estrés hídrico. En algunos cultivos, las hojas se oscurecen a medida que el estrés hídrico se desarrolla. Por ejemplo, las hojas sanas del frijol en etapa vegetativa son de color verde claro y se oscurecen adquiriendo el color de hojas maduras cuando están bajo estrés hídrico. Otro indicador vegetal es el grado de enrollamiento de la hoja. La hoja de maíz se enrolla cuando el estrés hídrico es significativo. La tasa de crecimiento del tamaño del fruto o tubérculo es otro indicador que ha sido probado con éxito en los cultivos de tomate, papa, pera, ciruelo y cítricos.

Tradicionalmente, los agricultores han dependido de la observación visual de los cultivos para calendarizar el riego, lo que ha ocasionado que muchas veces el riego se aplique tardíamente. Además, cuando los síntomas de estrés aparecen, el daño causado puede ser irreversible. Por estas razones, se debe tener cuidado cuando se utiliza alguna propiedad o característica de la planta como indicador de riego. Una alternativa es sembrar otra especie de planta que funcione como indicador de riego al mostrar síntomas (más sensibles) de estrés hídrico a menor déficit de humedad que las del cultivo de interés.

La reflectancia diferencial de las hojas a la luz infrarroja es una propiedad que ha sido usada para detectar el estrés hídrico mediante fotografías aéreas. El espectro solar permite discriminar las propiedades de la luz dependiendo de la frecuencia (cantidad de crestas por unidad de tiempo) y con base en ello establecer frecuencias radiactivas que indican estrés, como la luz infrarroja, cuya longitud de onda oscila los 1 100 nm. Las hojas estresadas por déficit hídrico reflejan menos luz infrarroja que las hojas de plantas sin problemas por este tipo de estrés.

Entre los indicadores vegetales más objetivos para calendarizar el riego destacan el potencial hídrico foliar, la conductancia estomática, el índice de estrés hídrico del cultivo y la temperatura foliar. Entre los más importantes se encuentran el potencial hídrico vegetal (PHV) y el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), que han recibido gran atención para calendarizar el riego en los últimos años.

Uno de los factores necesarios para que el agua se mueva en la planta es la diferencia de potenciales. El método basado en el potencial hídrico vegetal (PHV) consiste en evaluar la tensión o potencial de la savia en el xilema mediante la determinación de la presión necesaria, usando una cámara de presión para forzar la aparición de una gota de agua en la superficie (de corte) después de separar uno o más órganos vegetales de la planta (por ejemplo, cortar del pecíolo de la hoja). Dicho potencial expresa el nivel energético del agua en las hojas.

Una planta se encuentra bajo mínimo estrés hídrico si requiere baja presión (<300 KPa) para forzar la aparición de agua en una cámara de presión. Presiones mayores a 1 500 KPa indicarían altos niveles de estrés hídrico en el cultivo. Los valores óptimos del potencial hídrico vegetal dependen del tipo y localización del órgano de la planta, la

humedad relativa y la temperatura ambiental, y la hora de muestreo. A medida que la humedad relativa ambiental aumenta, también aumenta el PHV (menos negativo). El sentido se invierte para la temperatura, esto es, al aumentar la temperatura, el PHV disminuye haciéndose más negativo.

Existen dos maneras prácticas de medir el PHV, la primera se conoce como potencial xilemático y la segunda como potencial foliar. Para medir el potencial xilemático se envuelven las hojas con un plástico o aluminio para restringir la transpiración; después de un periodo de equilibrio, usualmente de dos horas, se cortan las hojas al nivel del pecíolo para medir la presión a la cual aparece el exudado xilemático de la hoja. Para medir el potencial foliar, el corte y medición del potencial hídrico de la hoja se realiza inmediatamente después de cubrirla con plástico. El potencial xilemático es menos variable que el potencial foliar debido al mayor tiempo de equilibrio transcurrido al realizar la medición.

El potencial hídrico vegetal tiene varias limitaciones debido a su variación durante el transcurso del día (alcanza valores mínimos al mediodía), además de ser afectado por la demanda evaporativa de la atmósfera, el contenido de humedad del suelo, la orientación, altura y edad de la hoja.

Otro método simple consiste en obtener la temperatura de la hoja por medio de un termómetro de rayos infrarrojos. La **Figura 4.3** muestra el uso de la pistola de rayos infrarrojos en campo. El uso del termómetro de rayos infrarrojos permite medir la diferencia entre la temperatura del aire y la del follaje. La diferencia en temperaturas está directamente relacionada con el déficit evapotranspirativo. El termómetro de infrarrojos estima la temperatura de varias plantas e integra el valor sobre un área de muestreo. Las lecturas se realizan en días soleados, a la misma hora, altura y ángulo de incidencia (comúnmente a 45 °C).



Figura 4.3 Pistola de rayos infrarrojos operando en campo para medir la temperatura del follaje

El agua evaporada de una superficie vegetal sirve como refrigerante para las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. La temperatura de una planta sin problemas de estrés hídrico es de 1 a 3 °C por debajo de la temperatura ambiental debido al efecto refrescante de la transpiración, que se reduce a medida que se acerca a la superficie de la hoja. Cuando el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con un consiguiente incremento en la temperatura foliar, que en algunos casos puede ser superior a la temperatura del aire circundante. La temperatura de un tejido vegetal muerto es similar a la del aire.

La presencia del agua en la planta es crucial en sus procesos fisiológicos. Muchos órganos vegetales contienen una cantidad de agua mayor al 90 % de su peso fresco, y en pocos casos es menor al 70 %. Gracias a sus propiedades, el agua actúa como un regulador de la temperatura, lo cual permite que las plantas puedan amortiguar la variación entre temperaturas altas y bajas.

En virtud de que varios indicadores vegetales como el potencial o el contenido de agua de la planta son técnicas que destruyen la muestra vegetal y además se restringen a plantas individuales u órganos vegetales, se ha propuesto un método basado en la estimación de la temperatura de las hojas conocido como el método del IEHC (índice de estrés hídrico del cultivo). Dicho método es el indicador de riego vegetal más usado para la calendarización del riego por sus características de muestreo global, facilidad, portabilidad y no-destructividad.

El método IEHC se basa en el monitoreo remoto de la temperatura del cultivo usando una pistola de rayos infrarrojos. Ehrler *et al.* (1978) determinaron que el resultado de la temperatura de las hojas menos la temperatura del aire arriba del cultivo estaba relacionado directamente con el déficit de presión de vapor atmosférico. La temperatura del cultivo (T_c) tiene un amplio rango de variación con respecto a la ambiental (T_a). Diversas investigaciones han encontrado una diferencia de temperaturas ($T_c - T_a$) de -12°C a 6 °C, dependiendo del estado hídrico de la planta y de la demanda evapotranspirativa atmosférica. Idso *et al.* (1981) normalizaron la relación entre la temperatura del follaje y el aire en varias parcelas con alfalfa para desarrollar el concepto del IEHC. El IEHC es definido de tal forma que una planta no estresada tiene un valor de cero y una completamente estresada tiene un valor de uno. La estructura del IEHC propuesta por Idso *et al.* (1981) se muestra a continuación:

$$IEHC = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_0}{(T_c - T_a)_1 - (T_c - T_a)_0} = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} \quad (4.1)$$

donde los subíndices 0 y 1 se refieren a las condiciones del cultivo no estresado y completamente estresado, respectivamente. El subíndice m se refiere a las condiciones actuales medidas en campo. T_c y T_a son las temperaturas del follaje y del aire, respectivamente. La diferencia de temperatura depende del déficit de presión de vapor

(ΔP), la diferencia entre las presiones de vapor a saturación y actual para la temperatura del aire al tiempo de medición.

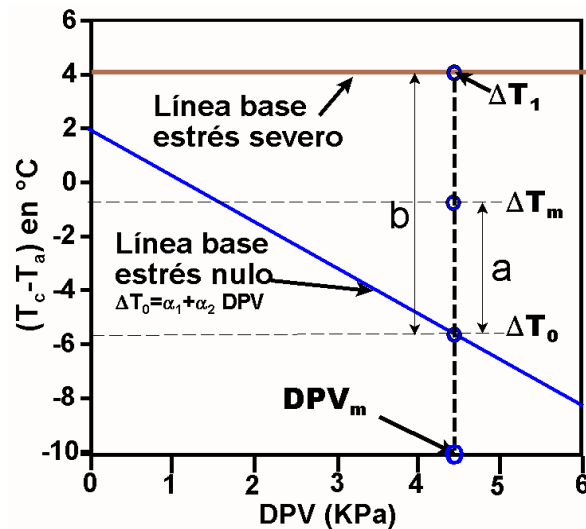


Figura 4.4 Curvas base usadas para el cálculo del IEHC

El uso de IEHC requiere de dos curvas base como las mostradas en la **Figura 4.4**. La curva base inferior es para un cultivo no estresado y la superior para un cultivo completamente estresado. El siguiente procedimiento permite obtener un estimado del IEHC:

1. Estimar las temperaturas del cultivo $(T_c)_m$ y la del aire $(T_a)_m$ en campo con la ayuda de un termómetro de rayos infrarrojos (pistola de infrarrojos)
2. Calcular la diferencia de temperaturas actuales, $\Delta T_m = (T_c - T_a)_m$
3. Obtener el déficit de presión de vapor (DPV_m) para la temperatura del aire al tiempo de medición. Para obtener la humedad relativa se puede usar un aspirpsicrómetro
4. Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo no estresado, $\Delta T_0 = (T_c - T_a)_0$, usando la siguiente ecuación (línea inferior **Figura 4.4**):

$$\Delta T_0 = \alpha_1 - \alpha_2 \text{ DPV} \quad (4.2)$$

donde α_1 , y α_2 son parámetros de regresión de la línea base obtenida experimentalmente a partir de mediciones de un cultivo bajo condiciones óptimas de

riego. La **Tabla 4.1** presenta los parámetros de la curva base de no estrés para varios cultivos.

Tabla 4.1 Coeficientes de la línea base (α_1 y α_2) para cultivos no estresados usando la Ecuación 4.2, reportados por Hanson *et al.* (1999) para California, EUA

Cultivo	α_1 (°C)	α_2 (°C KPa ⁻¹)
Alfalfa	0.51	1.92
Cebada (AE)	2.01	2.25
Cebada (DE)	1.72	1.23
Frijol	2.91	2.35
Maíz (floración)	3.11	1.97
Algodón	2.06	1.73
Pepino	4.88	2.52
Lechuga	4.18	2.96
Papa	1.17	1.83
Remolacha azucarera	2.5	1.92
Tomate	2.86	1.96
Trigo (AE)	3.38	3.25
Trigo (DE)	2.88	2.11

Nota: AE = antes de espigamiento, DE = después de espigamiento

1. Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo completamente estresado, $\Delta T_1 = (T_c - T_a)_1$. Para obtener el valor de ΔT_1 en forma experimental se corta la planta y se coloca en su lugar con ayuda de alambres, se espera un día hasta que la planta no transpire y se mide la temperatura del cultivo estresado $(T_c)_1$. En Nuevo México la diferencia de las temperaturas bajo estrés severo varía de 4 °C al inicio del verano a 6 °C al final del verano. El valor de ΔT_1 debe ser mayor que el valor de α_1 .
2. Calcular el IEHC con la siguiente ecuación:

$$IEHC = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} \quad (4.2)$$

El riego es aplicado cuando el IEHC alcanza un valor predeterminado experimentalmente como crítico, que varía dependiendo del cultivo, suelo y clima particular, por lo que muchas veces es necesario realizar estudios locales de calibración del método para aplicarlo extensivamente en una región. Determinar los valores críticos ha sido difícil, por lo que se deben obtener para cada cultivo bajo condiciones de manejo

locales. El IEHC cuantifica el estrés de la planta por déficit de agua al considerar la relación entre la evapotranspiración real (ET_r) y la transpiración potencial (ET_p) manifestada por la temperatura de la planta relativa a la temperatura del aire. La relación entre transpiración relativa y el IEHC está dada por:

$$\frac{ET_r}{ET_p} = 1 - IEHC \quad (4.4)$$

Aunque se ha probado experimentalmente la validez del IEHC para calendarizar el riego, su aplicabilidad comercial ha sido muy limitada ya que requiere del conocimiento local de la sensibilidad y respuesta del IEHC a parámetros del suelo. Además, requiere de estudios previos para definir la frecuencia de medición de temperaturas, profundidad y tipo de suelo relacionado con el IEHC, ya que varios factores pueden afectarlo.

Una de las limitaciones más severas del IEHC es que las lecturas de temperatura foliar dadas por el termómetro de rayos infrarrojos son inexactas hasta que el cultivo alcanza una cobertura total; el suelo desnudo generalmente tiene una temperatura mayor que la del follaje. Otro problema se presenta cuando existe nubosidad, alta humedad relativa o baja temperatura del aire. Para compensar estas limitaciones, se pueden usar otros métodos alternativos o complementarios, por ejemplo, tensiómetros.

Existen parámetros de difusión para estimar la resistencia de las estomas al intercambio de gases. Este índice de resistencia está relacionado con los requerimientos de agua de la planta. Altas resistencias indican cierre de estomas y altas necesidades de agua. Por su complejidad y laboriosidad, este método está restringido para propósitos de investigación.

Otro método muy prometedor en la actualidad como indicador del momento del riego es la medición del diámetro de los órganos de la planta, principalmente el tallo, con la ayuda de dendrómetros. El diámetro del tallo presenta microvariaciones naturales a lo largo del día debido a cambios hídricos en su contenido. Durante el periodo de máxima evapotranspiración presenta contracciones en el diámetro del orden de varios micrómetros, seguidos por rehidrataciones durante la noche con un consecuente aumento en el diámetro. Bajo condiciones de estrés hídrico, la expansión nocturna decrece y la contracción diurna aumenta. Los cambios en la amplitud del crecimiento diurno-nocturno se pueden asociar a la necesidad del riego.

4.3 Indicadores edáficos

Existen varios indicadores edáficos relacionados con el déficit hídrico del suelo entre los que se cuentan el contenido de humedad del suelo, el potencial mátrico del suelo y la

humedad relativa del suelo. Estos métodos permiten medir la cantidad de energía con la que el agua se encuentra retenida en sus espacios porosos, y por lo tanto, la disponibilidad para que pueda ser absorbida por las plantas.

4.3.1 Contenido de humedad (θ)

La calendarización del riego se basa comúnmente en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el desarrollo del cultivo. La **Figura 4.5** muestra los diferentes parámetros asociados con el indicador humedad del suelo. El objetivo de la calendarización del riego usando como indicador la humedad aprovechable del suelo es mantener el suelo entre la humedad crítica y capacidad de campo.

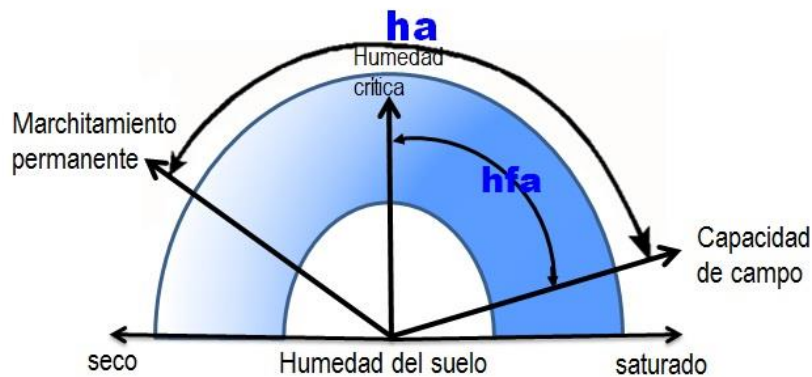


Figura 4.5 Parámetros asociados con el indicador de humedad del suelo

Al momento del riego el suelo alcanza un contenido de humedad máximo (θ_{max}) que disminuye gradualmente a medida que las plantas satisfacen sus requerimientos hídricos diarios. El contenido de humedad puede disminuir hasta ser crítico o mínimo permisible (θ_c). El valor mínimo θ_c es el punto en el cual el riego es aplicado para suministrar con agua a la zona radical en un punto inmediato antes de que ocurra el estrés de la planta, usualmente situado entre los contenidos de humedad a capacidad de campo y punto de marchitamiento permanente. El valor crítico varía dependiendo del estado fisiológico del cultivo, tipo de cultivo, variedad, suelo y clima.

Si se asume que el indicador de riego es el contenido de humedad, la **Figura 4.2** muestra la variación del contenido de humedad (θ) en función del tiempo, con seis riegos y una lluvia entre los riegos 1 y 2. En la etapa inicial del cultivo, el valor crítico (θ_c) y el intervalo de riego disminuyen poco a poco hasta alcanzar la madurez del cultivo,

para volver a incrementarse en la etapa de maduración hasta alcanzar la cosecha del cultivo.

Para definir cuánto regar es necesario definir las dimensiones del volumen del suelo a regar, que dependen de la zona radical del cultivo. Esta zona es finalmente la región potencial donde las raíces pueden extraer agua. El contenido de humedad máximo (θ_{\max}) se toma como el contenido de humedad a capacidad de campo (θ_{cc}), pero puede ser menor si existe alta probabilidad de lluvia durante el intervalo para el siguiente riego. Un valor podría alcanzar el 80 % de la humedad aprovechable ($\theta_{\max} = \theta_{PMP} + 0.8 HA$).

Este método se refiere estrictamente a cultivos en suelo. Con otras formas de cultivo, ya sea sustratos o directamente cultivos en solución, los límites de estrés están definidos además por el contenido de oxígeno en la zona radicular, y constituyen el factor limitante en este tipo de sistemas. En el **Capítulo 3** se presentó la forma de estimar directamente el contenido de humedad usando los métodos gravimétrico y volumétrico. En este capítulo se presentan los métodos para estimar el contenido de humedad indirectamente en campo y se discuten los más utilizados.

4.3.1.1 Método del tacto

El método del tacto es el método más utilizado por los agricultores para definir el momento del riego. Este método consiste en tomar una muestra del suelo para moldearla con las yemas de los dedos. El color, la consistencia y moldeado de la bola formada dependerán del contenido de humedad y textura del suelo. Este método es muy propenso a errores subjetivos.

4.3.1.2 Sonda de neutrones

El método de la sonda de neutrones, conocido también como dispersor, termalizador o aspersor de neutrones, permite determinar el contenido de humedad del suelo y se basa en la propiedad de afinidad de los átomos de hidrógeno para dispersar y disminuir su energía cuando chocan con partículas radioactivas de diámetro similar, emitidas por una fuente radioactiva. Cuando un neutrón emitido por una fuente radioactiva a alta velocidad se coloca en un suelo húmedo, inmediatamente es rodeado por una nube de neutrones termalizados (baja velocidad). La densidad de esta nube representa una condición de equilibrio que existe entre la emisión de neutrones rápidos y su termalización y captura por núcleos de hidrógeno. La **Figura 4.6** muestra un aspersor de neutrones operando en campo.

El principio físico del método está relacionado con las leyes de conservación del momento y energía, que establece que una partícula en movimiento reduce su velocidad cuando choca con una partícula estacionaria con masas iguales o menores a la partícula

movible. El neutrón es una partícula con masa significativa que puede obtenerse de un material radioactivo, con una masa muy cercana a la del átomo de hidrógeno. De esta manera, los neutrones emitidos a altas velocidades por una fuente radioactiva, por ejemplo, Am - Be, son termalizados por el hidrógeno. Los neutrones termalizados pueden ser detectados por una cámara de BF₃.



Figura 4.6 Aspersor de neutrones en campo

La cantidad de neutrones que pueden ser termalizados depende de la concentración de átomos de hidrógeno que se encuentran en el agua del suelo. El dispersor de neutrones está provisto de una sonda que contiene tanto una fuente radioactiva como un detector de neutrones. La sonda se desliza dentro de un tubo de acceso, comúnmente de aluminio, a la profundidad deseada, donde se toma la lectura de neutrones termalizados. Para una fuente radioactiva dada, la cantidad de neutrones termalizados puede ser relacionada con el contenido volumétrico de humedad. Para estimar el contenido de humedad volumétrico se utiliza la siguiente ecuación:

$$\theta = C_0 + C_1 \left(\frac{L_s}{L_p} \right) \quad (4.5)$$

donde C_0 y C_1 son parámetros obtenidos por la técnica de regresión lineal al ajustar datos experimentales al modelo lineal anterior. L_p es la lectura de los neutrones registrados por el detector cuando la sonda se encuentra encerrada en un protector de parafina, la cual se considera como condición estándar y L_s es la lectura del detector cuando la sonda se encuentra a la profundidad deseada. La estimación de los parámetros C_0 y C_1 debe realizarse en campo para cada tipo de suelo. La **Figura 4.7** muestra una curva típica de una sonda de neutrones. Los valores experimentales son obtenidos usualmente de muestras de suelo recogidas durante la instalación de los tubos de acceso.

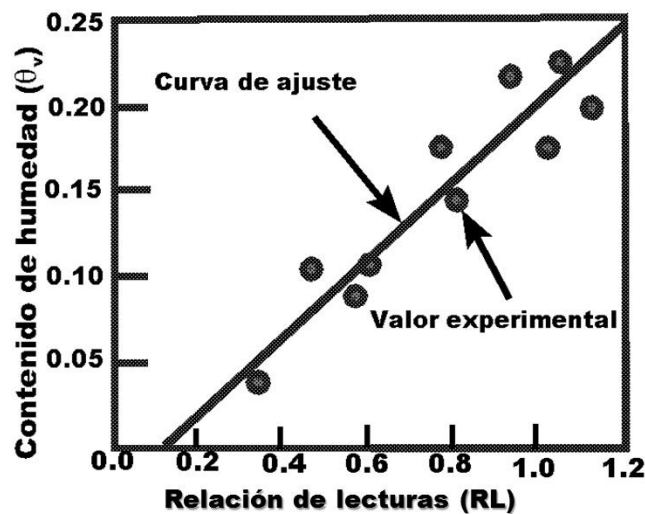


Figura 4.7 Curva de calibración típica de una sonda de neutrones

La baja resolución espacial del método no permite detectar discontinuidades o la presencia de frentes de humedad abruptos en el perfil de humedad. De hecho, este método reporta valores promedios de una esfera de muestreo cuyo tamaño cambia con el contenido de humedad. Trabajos experimentales indican que el radio de muestreo varía de 16 cm para saturación hasta 70 cm en suelos muy secos. Otra limitación de este método es la dificultad de muestreo cerca de la superficie del suelo, ya que muchos de los neutrones emitidos se liberan a la atmósfera. La restricción más severa es el requerimiento de licencia gubernamental para el uso de dispositivos con fuentes radioactivas.

4.3.1.3 Métodos dieléctricos

Los métodos dieléctricos para estimar el contenido de humedad se basan en estimar la constante dieléctrica del suelo (K). La base del método radica en los valores contrastantes entre las constantes dieléctricas del aire ($K \approx 1$), suelo ($K \approx 4$) y el agua ($K \approx 80$). Para un suelo dado a diferentes contenidos de humedad, la constante dieléctrica también cambia. Los métodos dieléctricos se dividen en dos tipos, basados en reflectometría temporal (TDR) y basados en reflectometría de frecuencia (FDR).

Uno de los métodos más usados para estimar la constante dieléctrica es el método conocido simplemente como TDR por sus siglas en inglés (Time Domain Reflectometry) que consiste en instalar dos o más varillas de acero inoxidable (líneas de transmisión eléctrica) en el suelo, a las cuales se les envía un pulso electromagnético y con un sensor se estima el tiempo de recorrido del pulso electromagnético desde que entra a las varillas hasta que retorna al encontrar una discontinuidad al final de la varilla.

La **Figura 4.8** muestra las varillas TDR. El tiempo de recorrido está asociado con las características dieléctricas del medio donde se encuentran inmersas las varillas. Se requiere de una curva de calibración, usualmente en la forma de un polinomio, para relacionar la constante dieléctrica (K) con el contenido de humedad volumétrico (θ). Como referencia se muestra en la **Figura 4.8** un tensiómetro equipado con un transductor de presión, conocido comercialmente como electrotensiómetro.

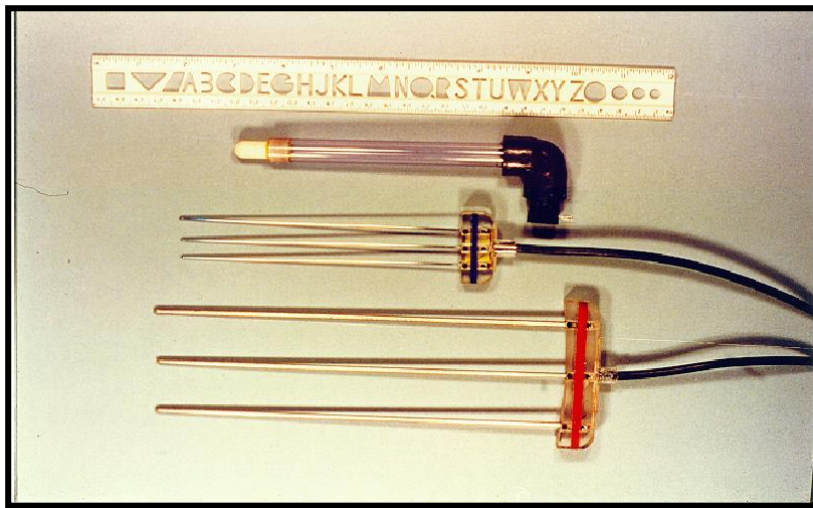


Figura 4.8 Dos varillas tipo TDR para estimar la humedad del suelo. Como referencia se presenta una regla y un minitensiómetro equipado con transductor de presión

La estimación de la constante dieléctrica (K) se expresa por:

$$K = \left(\frac{v_o}{v} \right)^2 \quad (4.6)$$

donde v es la velocidad de una onda electromagnética enviada a través de la sonda, v_o es la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s).

La onda viaja a lo largo de las varillas que tienen una longitud (L), al encontrar la discontinuidad regresa al sensor de voltaje, de esta manera se determina el tiempo de tránsito (t) del pulso en la longitud de recorrido ($2L$), de manera que la velocidad puede ser estimada como:

$$v = \frac{2L}{t} \quad (4.7)$$

De esta manera la constante dieléctrica se evalúa como:

$$K = \left(\frac{tv_o}{2L} \right)^2 \quad (4.8)$$

La ecuación anterior establece que para conocer el parámetro K es necesario estimar el tiempo de tránsito t para una sonda de longitud L . Usando un osciloscopio es posible determinar gráficamente la longitud electromagnética o aparente L_a dada por:

$$L_a = \frac{tv_o}{2} \quad (4.9)$$

Usando la relación anterior, la constante dieléctrica tiene la siguiente estructura:

$$K = \left(\frac{L_a}{L} \right)^2 \quad (4.10)$$

Como las diferencias entre los valores de K del agua pura ($K \cong 80$) y del suelo seco ($K \cong 5$) son contrastantes, es razonable asumir una fuerte relación entre K y el contenido de humedad que puede expresarse usando un polinomio de tercer grado:

$$\theta(K) = \alpha_0 + \alpha_1 K + \alpha_2 K^2 + \alpha_3 K^3 \quad (4.11)$$

Después de realizar numerosos experimentos para relacionar la constante dieléctrica (K) con el contenido de humedad volumétrico para una variedad de tipos de suelos bajo diferentes contenidos de humedad volumétrico, Topp *et al.* (1990) presentaron la siguiente ecuación:

$$\theta(K) = -0.053 + 0.0292 K - 5.5 (10^{-4}) K^2 + 4.3 (10^{-6}) K^3 \quad (4.12)$$

La **Figura 4.9** muestra la tendencia típica de los valores ajustados y experimentales entre el contenido de humedad volumétrico y la constante dieléctrica. Para aplicar el método de la reflectometría es necesario obtener los parámetros de la curva de regresión a partir de datos experimentales obtenidos en campo o laboratorio.

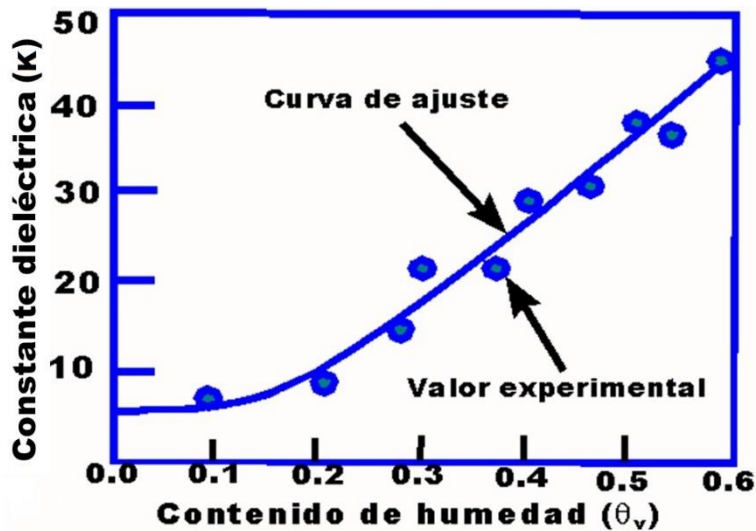


Figura 4.9 Relación típica entre constante dieléctrica y contenido de humedad volumétrico

El volumen de muestreo está dado aproximadamente por la siguiente ecuación:

$$V = \pi(0.7S)^2 L \quad (4.13)$$

donde S es el espaciamiento entre varillas extremas y L es la longitud de las varillas.

El principal problema con este método es la medición de tiempos de tránsito pequeños y la generación de pulsos abruptos. El tiempo de tránsito entre un contenido de humedad volumétrico de 0 a 100 % en una sonda con longitud menor a 30 cm es de solo 8 ns, por lo que se requiere un generador de pulsos de alta frecuencia y un osciloscopio de muestreo de alta frecuencia para poder medir tiempos pequeños. Tradicionalmente, el tiempo de tránsito es medido en la pantalla de un osciloscopio y el contenido de humedad volumétrico es calculado manualmente.

Entre las desventajas del TDR resalta la atenuación de la señal eléctrica debido a la presencia de iones en la solución del suelo. Para valores de conductividad eléctrica

mayores a 1 dS m^{-1} del extracto de saturación se requieren varias curvas de calibración para rangos de salinidad del agua. La señal usualmente es inestable para valores mayores de 5 dS m^{-1} . La energía electromagnética enviada a través de las sondas (varillas) sirve para reorientar o polarizar las moléculas del agua.

Si otras fuerzas actúan sobre las moléculas de agua, como las producidas por la materia orgánica y arcillas, es menos factible que la fuerza electromagnética aplicada polarice las moléculas de agua. Las curvas de calibración deben ser obtenidas bajo las condiciones del suelo que se quiere muestrear, esto es, similares contenidos de arcilla, materia orgánica y temperatura. Las varillas deben insertarse paralelas y evitar generar cavidades para reducir errores en las mediciones. El tipo de contacto entre las varillas y el suelo es de vital importancia en la propagación del pulso; cualquier grieta o hueco restringe su propagación. La atenuación del pulso eléctrico debido a las sales del suelo puede ser usada para estimar la conductividad eléctrica del suelo (Dalton *et al.* 1984).

Existen diferentes sensores tipo TDR en el mercado, entre los cuales destacan TRASE, TRIME, Moisture Point, ThetaProbe, Aqua-Tel, y Hydra Soil Moisture Probe. La diferencia entre estas sondas, además de su precio, es la configuración del sistema de medición en uno o más componentes (las varillas, el generador de pulso y el medidor de tiempo de tránsito del pulso). Es posible colocar varias varillas (como las mostradas en la **Figura 4.8**) en campo y medir manualmente la constante dieléctrica con la ayuda de un lector-generador portátil. Otras configuraciones incluyen todos los componentes en una sola unidad.

El otro método, conocido como tipo FDR (Frequency Domain Reflectometry), también se basa en el cambio de las propiedades de ondas eléctricas y magnéticas al pasar por un medio poroso bajo diferentes contenidos de humedad. Los sensores de frecuencia o capacitancia (FDR) consisten en dos electrodos, usualmente cilíndricos, inmersos en un material dieléctrico (que no conduce corriente eléctrica) que forman una sonda FDR. Para realizar mediciones en campo, se insertan la sonda FDR al suelo y con la ayuda de un osciloscopio se aplica a los electrodos una frecuencia de 50 a 150 Mhz, lo cual genera una frecuencia resonante.

De manera similar a la sonda de neutrones, algunas sondas FRD pueden ser móviles, por lo que requieren de tubos de acceso para bajar la sonda y muestrear a diferentes profundidades. La ventaja de estos sensores FDR es que se pueden dejar en campo para monitorear la humedad del suelo continuamente, sin embargo, por su alto costo no se pueden tener varios puntos de muestreo. Es posible colocar varios electrodos a diferentes distancias sobre la sonda para muestrear automáticamente la humedad de diferentes profundidades instalando la sonda fija en el suelo. Así como el TDR, las sondas FDR requieren de una curva de calibración. Existen varios sensores comerciales tipo FDR entre los que destacan el Aquaterr, el Enviroscan, y el Sentry.

4.3.2 Estado energético del agua del suelo (h)

La combinación de sólidos, espacio poroso y agua que existe en el complejo suelo determina la energía con la que las partículas del suelo eléctricamente cargadas retienen las moléculas de agua contenidas en el espacio acuoso, y que al ser absorbida por las plantas será ocupada por aire. Como el potencial mátrico del agua en el suelo está relacionado con la energía que una planta debe desarrollar para absorber la humedad del suelo, el movimiento de agua del suelo hacia la planta estará determinado por la diferencia de potenciales. La definición de un valor crítico del potencial mátrico (h_c) y su correspondiente contenido de humedad crítico (θ_c) ha permitido tener una mejor idea de cuándo regar basándose en el monitoreo del potencial energético del agua en el suelo y conocido como potencial mátrico.

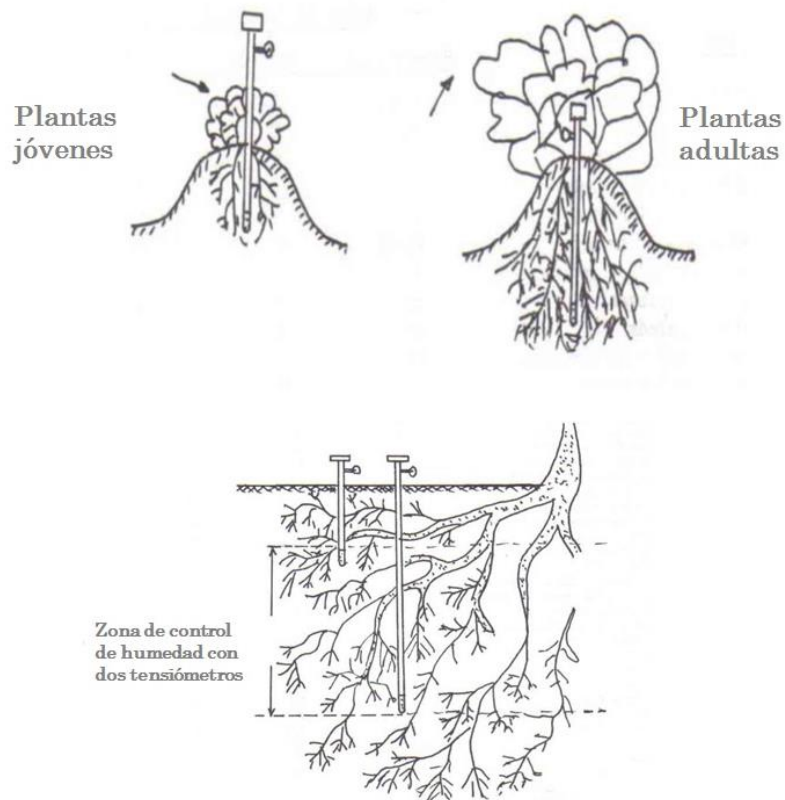


Figura 4.10 Posición relativa de los tensiómetros en función del cultivo

En los últimos años se han hecho grandes esfuerzos para definir los valores críticos (h_c) para diferentes cultivos irrigados principalmente por goteo. El método

consiste en colocar varios tensiómetros a distintas profundidades (usualmente 15, 30 y 45 cm) y cuando los tensiómetros alcanzan un valor predefinido (h_c) se inicia el riego y se finaliza cuando alcanzan otro valor predefinido (h_{max}). El control de humedad usando tensiómetros puede servir para minimizar pérdidas por percolación porque maximiza la absorción de agua por la planta. La ventaja del uso de tensiómetros es su relativo bajo costo, que permite al agricultor tener disponible uno o varios dependiendo de la variabilidad de su suelo, superficie o tipo de cultivo, para darle seguimiento a la variación de temperatura (**Figura 4.10**).

Aunque se han desarrollado varios métodos para determinar el potencial mátrico del agua en el suelo, los dos métodos más comunes para medirlo son el tensiómetro y el psicrómetro. La **Tabla 4.2** muestra los valores críticos del potencial mátrico reportados en la literatura, en centibares (1 bar = 100 centibares), a los cuales hay que regar para mantener los cultivos sin estrés hídrico que pueda afectar el rendimiento.

Tabla 4.2 Valores mínimos de la tensión mátrica (h_c) del suelo sin problemas de salinidad para definir el momento del riego en varios cultivos

Cultivo	h_c (centibares)	Cultivo	h_c (centibares)
Aguacate	40-50	Alfalfa	80-150
Apio	20-30	Brócoli (inicial)	45-55
Brócoli (final)	60-70	Cebolla seca	55-65
Cebolla verde	45-65	Cítricos	50-70
Col	60-80	Coliflor	60-70
Fresa	20-30	Frutos caducifolios	50-80
Lechuga	40-60	Limón	40
Maíz elotero	50-100	Melón	35-50
Naranja	20-100	Papa	30-50
Pepino	100-300	Soya	50-150
Sorgo	60-130	Tomate	60-100
Vid	40-100	Zanahoria	55-65

4.3.2.1 Tensiómetros

Un tensiómetro es una cápsula de cerámica enterrada en el suelo en un extremo y conectada a un sensor de presión (vacuómetro) en el otro extremo por medio de una columna de agua. Un tensiómetro debe estar cerrado herméticamente para evitar la entrada de aire y operar apropiadamente. Los tensiómetros miden la fuerza con la que el agua está retenida en el suelo, y que indica el esfuerzo que deben realizar las raíces de la planta para extraer la humedad del suelo. Las longitudes comerciales de los tensiómetros varían de 15 cm a casi 2 m (**Figura 4.11**).

Un tensiómetro mide la tensión con que el agua está adherida a las partículas del suelo y por tanto es un método usado para indicar, en forma relativa, si en el suelo existe suficiente humedad disponible para el crecimiento de las plantas. Los cambios que ocurren en el espesor de la capa de agua que rodea las partículas del suelo alteran la tensión del agua en el mismo. Estos cambios se expresan en fluctuaciones de tensión de la humedad en el suelo.

En la práctica, el tensiómetro mide los rangos de humedad de suelo bajo los cuales las raíces de las plantas absorben agua activamente. En un sentido estricto, los tensiómetros no definen cuánta agua hay en el suelo, pero sí indican cuándo hay que aplicar el riego con base en la energía de retención del agua en el suelo. Para estimar la humedad del suelo a partir de las lecturas de los tensiómetros se requieren tablas (**Tabla 3.9**) o curvas (**Figura 3.9**) que relacionan el potencial mátrico con la humedad del suelo, tal como se presentaron en el **Capítulo 3**. Una forma más precisa es obtener directamente la curva característica del suelo en laboratorio o campo.

El agua en la cápsula porosa del tensiómetro se mueve (dentro y fuera de la cápsula) respondiendo a los cambios en el estado energético del suelo que rodea a la cápsula hasta que alcanza un estado de equilibrio. A medida que el suelo se seca, el agua del tensiómetro es liberada en el suelo y se forma una cámara de vacío en la parte superior de la columna de agua, tal como lo muestra la **Figura 4.11**. Se puede colocar un transductor de presión para medir electrónicamente la presión de la cámara de vacío del tensiómetro por medio de un microprocesador o *datalogger*.⁴

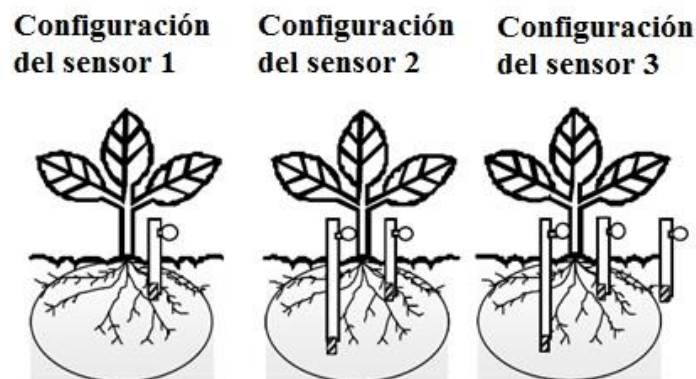


Figura 4.11 Representación esquemática de las posiciones recomendadas para colocar tensiómetros

⁴ La palabra datalogger (del inglés) es a veces traducida al español como “registrador de datos analógico” o también como “adquisidor de datos”.

La variabilidad espacial del suelo define el rango de acción de un tensiómetro. Se puede hacer un seguimiento manual si hay que revisar el movimiento de la aguja en cada periodo, o automatizarse a través de un dispositivo (generalmente eléctrico) que pueda monitorear dicho movimiento, y más aún, que emita una señal (un sonido, encender una luz, etc.) al llegar a un valor específico preestablecido para iniciar el riego. Actualmente existen en el mercado tensiómetros dotados de un dispositivo como el que se menciona, y que representa una buena opción para automatizar el riego en grandes superficies, aunque será necesario verificar periódicamente que los datos registrados estén siendo usados de manera adecuada.

El potencial mátrico del agua del suelo en contacto con la cápsula porosa (h) está dado por:

$$h = p - a - d \quad (4.14)$$

donde p es la succión medida en el vacuómetro expresada en longitud de columna de agua, y a y d son alturas o longitud de columnas de agua definidas en la **Figura 4.12 (A)**.

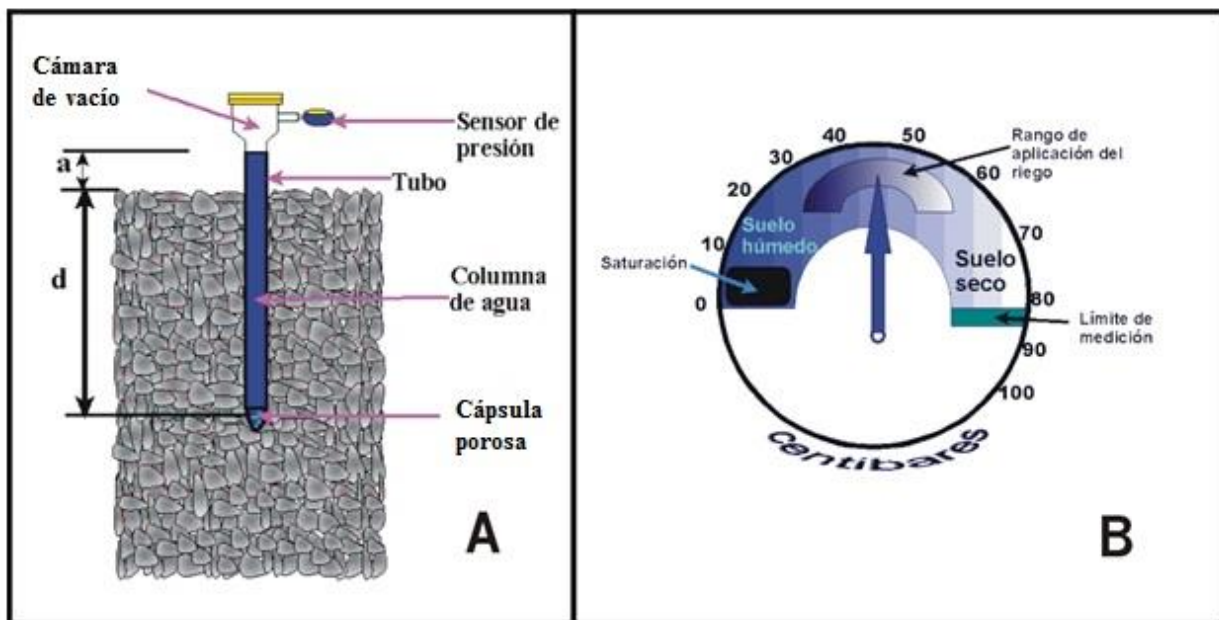


Figura 4.12 Componentes de un tensiómetro instalado en campo (a) y escala de valores del potencial mátrico en centibares (b)

El uso de los tensiómetros requiere mantener la columna de agua a una altura definida ($a + d$) o conocer sus valores para obtener mediciones correctas, sobre todo en el rango húmedo. Para altas tensiones con columnas de agua cortas, se puede ignorar la corrección de agua, i.e., $h = p$.

Ejemplo. Dada la **Figura 4.12(A)**, estimar la presión en el vacuómetro o transductor de presión si $a = 20$ cm, $d = 100$ cm, y el potencial mátrico es de $h = -200$ cm.

$$P = h + d + a = -200 + 20 + 100 = -80 \text{ cm}$$

La **Tabla 4.3** muestra las equivalencias entre las unidades más usuales para expresar el potencial del agua en el suelo.

Tabla 4.3 Equivalencias de unidades de presión y lámina (psi se refiere a libras por pulgada cuadrada)

Unidad	Equivalencia
1 bar	100 kPa = 10^5 Pa = 0.1 MPa
1 bar	100 cbar = 1 000 mbar
1 bar	1 022 cm de agua
1 atm	1 035 cm de agua = 101.325 kPa
1 kPa	1 J kg ⁻¹ = 1 000 Pa
1 bar	14.503773 psi = 33.504 ft
1 bar	1 kg cm ⁻²
1 bar	100 centibares (cbar)
1 mm de agua aplicada en una hectárea	10 m ³ = 10 000 ℓ

Ejemplo. Si el tensiómetro mide 30 centibares, calcular su equivalencia en bares, kPa, cm de columna de agua, kg cm⁻², y libra pulgada⁻² (psi):

$$30 \text{ cbar} = 0.3 \text{ bar} = 30 \text{ kPa} = 306.4 \text{ cm agua} = 0.3 \text{ kg cm}^{-2} = 4.35 \text{ psi}$$

Un valor menor a 0.1 bar indica condiciones de saturación. Una gran limitación de los tensiómetros es su estrecho rango de operación (0 a 85 centibares); por arriba de los 80 centibares el aire empieza a entrar por la cápsula porosa, con lo que se rompe el estado de equilibrio entre el agua del suelo y la del tensiómetro. La **Figura 4.12(B)** muestra la escala de valores típicos del vacuómetro o manómetro de un tensiómetro.

El valor máximo de trabajo de un tensiómetro varía con la altitud. A 1 000 msnm el valor máximo es de 60 cb y de 80-85 al nivel del mar. En la mayoría de los suelos agrícolas, más del 50 % del agua absorbida por las plantas está en ese rango de tensiones, porcentaje que puede ser mayor al 75 % para suelos arenosos. La limitación

de los tensiómetros se presenta en suelos arcillosos donde 85 cb indicarían un suelo húmedo con más del 50 % de la humedad aprovechable, por lo que, si se tiene un factor de abatimiento hídrico mayor al 50 %, el tensiómetro dejaría de funcionar cuando todavía no es el momento del riego. Sin embargo, con sistemas de riego por goteo donde la frecuencia de riego es usualmente menor de tres días, los tensiómetros funcionan porque la mayoría de los suelos agrícolas presenta tensiones menores a 80 cb.

Los tensiómetros son muy usados en cultivos de alta sensibilidad al estrés hídrico como la papa y la fresa que requieren altos niveles de humedad. Los tensiómetros generalmente se colocan en batería a varias profundidades y distancias de la raíz, con el fin de conocer el estado energético hídrico de la zona radical y el sentido del flujo del agua en el suelo. Es una práctica común colocar un tensiómetro en la zona de máxima actividad radical (entre $\frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ de la profundidad radical) y otro abajo de ésta, como un indicador de la percolación profunda o riego deficiente. Aunque el número de estaciones tensiométricas (batería de tensiómetros a diferentes profundidades) por hectárea depende de la variabilidad del suelo, se recomienda tener instalada al menos una estación por cada 5 ha.

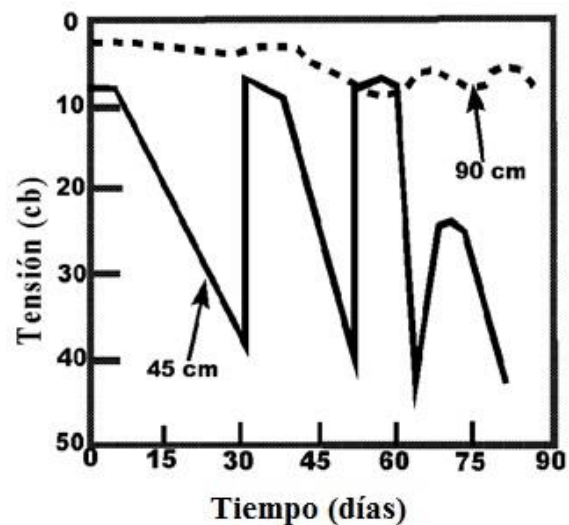


Figura 4.13 Variación de la tensión del agua en el suelo a dos profundidades, 45 y 90 cm, con un buen manejo del riego

La **Figura 4.13** describe los cambios típicos de la tensión que se observan en las lecturas de dos tensiómetros instalados a dos profundidades (45 y 90 cm), antes y después de aplicar el riego. El tensiómetro superficial (45 cm) muestra mayor variación ya que se localiza en la zona de mayor extracción de agua por las raíces. Se debe

considerar la profundidad radical y la posición de los emisores para la localización de los tensiómetros en sistemas por microirrigación. Los cambios de tensión a mayor profundidad (90 cm) son menos pronunciados, con un desfase para alcanzar los valores máximos después de un riego o lluvia. La ocurrencia de grandes variaciones en el tensiómetro profundo indicaría pérdidas de agua por percolación profunda.

La frecuencia de lectura de los tensiómetros depende del sistema de riego utilizado, por ejemplo, en el caso del riego localizado se recomienda realizar la lectura frecuentemente, si es posible, todos los días por la mañana. Para instalar tensiómetros se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Los tensiómetros deben ser llenados con agua destilada o deionizada. Se puede adicionar algún fungicida o bactericida al agua para evitar que se tape la cápsula porosa por limos biológicos.
- Nunca se debe exponer la cápsula al medio ambiente, ya que los solutos en solución pueden precipitarse y sellarla.
- La cápsula debe sumergirse en agua durante varios días para saturarla. El agua fluye de la cápsula porosa solo si esta se encuentra saturada. Si la cápsula se seca, el aire penetra y el flujo de agua disminuye o cesa. Se puede aplicar una succión para acelerar la saturación.
- Debe excavarse un pozo de instalación usando una barrena con un diámetro igual al de la cápsula porosa del tensiómetro. Nunca usar herramientas que compacten el suelo. En suelos sueltos se genera un buen contacto al insertar directamente el tensiómetro empujándolo en el suelo.
- Se debe asegurar un buen contacto entre la cápsula y el suelo, para lo cual se puede utilizar arena sílica fina o parte del suelo excavado, humedeciéndola y colocándola en el fondo del pozo. Un tensiómetro puede operar deficientemente en suelos arenosos debido a un pobre contacto hidráulico entre la cápsula y las partículas del suelo.
- La superficie del suelo próxima a la columna del tensiómetro se debe compactar para evitar que el agua penetre por las paredes del tensiómetro.
- Se llena la columna totalmente y se cierra herméticamente. Se recomienda succionar el aire del tensiómetro con una bomba de vacío para remover el aire atrapado en la columna de agua.
- El tensiómetro debe ser purgado para remover cualquier burbuja de aire acumulada en su cámara de vacío o cuando la tensión se rompe al secarse el suelo. Si el suelo se seca y las lecturas del tensiómetro se mantienen constantes, el tensiómetro ha dejado de trabajar. Si el suelo continúa secándose la cápsula pierde la saturación

con la consiguiente entrada de aire y la lectura de tensiómetro marca cero. Para que el tensiómetro vuelva a funcionar apropiadamente se requiere un incremento de la humedad del suelo, en caso contrario se vuelve a vaciar el tensiómetro.

- La parte superior del tensiómetro debe protegerse de posibles daños mecánicos o ambientales.
- Una vez instalado un tensiómetro se debe esperar al menos 24 hr para alcanzar el equilibrio hidráulico.
- La lectura debe hacer cuando exista el menor flujo de humedad en el suelo, generalmente por la mañana.

4.3.2.2 Problemas de manejo

- Si se observan burbujas con lecturas de tensión baja ($h < 50$ cb), es probable que se deba a un contacto deficiente entre la cápsula porosa y el suelo.
- Si el sensor de presión marca condiciones de saturación cuando el suelo está seco, es posible que se haya roto el vacío en el tensiómetro debido a la entrada de aire por la cápsula, por lo cual el tensiómetro ha dejado de trabajar. Se debe abrir y rellenar de agua después del siguiente riego.
- Los tensiómetros superficiales responden rápidamente a los cambios de manejo superficiales (riego, evaporación, absorción de agua por raíces, etc.), mientras que los colocados a profundidades fuera de la zona radical tienen cambios menos drásticos.

4.3.2.3 Psicrómetro-termopar

Un psicrómetro-termopar puede ser usado para inferir el potencial de la solución del suelo usando la presión de vapor del aire que está en equilibrio con el agua en una muestra del suelo. Un psicrómetro para medir potenciales *in situ* básicamente consiste de una cápsula porosa que permite el paso del vapor de agua presente en el suelo; la presión de vapor dentro de la cámara de la cápsula porosa permanece en equilibrio con la del aire del suelo.

Dentro de la cámara de la cápsula hay un termopar; al recibir una corriente eléctrica directa pequeña, la temperatura de la unión de los dos metales disimilares del termopar disminuye abajo de la temperatura del punto de rocío de la atmósfera. En ese punto el vapor de agua se condensa en la unión funcionando como un termómetro de bulbo húmedo. El enfriamiento es entonces discontinuado y la temperatura de la unión se mide con un voltímetro al tiempo que la unión es enfriada, ya que las gotas condensadas en

la unión se re-evaporan. La temperatura de la unión depende de la velocidad de evaporación, la cual está relacionada con la humedad relativa presente en el suelo. El voltaje es entonces medido en la unión mientras el agua se está evaporando para posteriormente convertirlo a temperatura.

En general los pasos para evaluar el potencial son leer el voltaje, convertirlo a temperatura, después a presión de vapor y por último a potencial usando tablas o ecuaciones derivadas de principios físicos. Valores de humedad relativa comprendidos entre 1 y 0.9288 tienen asociado un rango correspondiente de potenciales que varían de 0 a 100 bares. La mayor restricción de los psicrómetros es la dificultad para medir pequeños cambios de temperatura asociados con la alta humedad relativa presente en suelos húmedos. Típicamente, los psicrómetros son primordialmente usados en suelos secos con potenciales menores de -5 bares.

4.3.2.4 Resistencias eléctricas en bloques porosos

Cuando un bloque poroso está en contacto con el suelo ambos se equilibran de manera que los cambios en las propiedades eléctricas o termales del bloque están en relación con el suelo que lo rodea. Esto es, el bloque adquiere un contenido de humedad similar al del suelo que lo rodea. El principio de medición se basa en que la cantidad de agua en el bloque puede ser estimada por la resistencia generada al paso de una corriente eléctrica entre dos electrodos insertados en el material poroso, usualmente hecho de yeso.

La resistencia al flujo eléctrico está relacionada con el contenido de humedad. Al secarse el suelo, también el bloque se seca y la resistencia eléctrica del suelo se incrementa debido a que el área que conduce la corriente eléctrica se reduce. Lo anterior es equivalente a usar un cable de diámetro cada vez más pequeño para conducir la corriente eléctrica entre dos electrodos. A mayor contenido de humedad, menor es la resistencia al paso de una corriente eléctrica. Los electrodos consisten de dos mallas formadas por una serie de alambres paralelos. Es posible generar curvas que relacionen la resistencia eléctrica del bloque con el contenido de humedad.

Una de las limitaciones de la mayoría de los bloques porosos disponibles en el mercado es su sensibilidad a la temperatura del suelo y a la concentración de sales (característica que se agrava en suelos sódicos) que pudieran formarse entre los dos electrodos, así como la disolución del material poroso sobre todo en suelos que permanecen húmedos por largos periodos. Las lecturas de los bloques son distorsionadas en suelos con conductividades eléctricas del extracto de saturación mayores a 1.5 dS/m. La mayoría de los bloques están hechos de yeso, ya que el yeso amortigua el efecto de la salinidad en la resistencia o conductancia eléctrica.

La variabilidad en las condiciones del bloque dificulta la calibración de los mismos. A diferencia de los tensiómetros, los bloques porosos funcionan mejor en el rango seco (mayor de 80 KPa), requieren poco mantenimiento, pero su periodo de vida útil es más corto. El tiempo para alcanzar un equilibrio entre el bloque poroso y el suelo es mayor que entre el tensiómetro y el suelo. Algunos bloques comerciales están equipados con un sistema de ajuste por temperatura ya que la resistencia disminuye cuando la temperatura incrementa.

Los bloques son fáciles de instalar, mantener y manejar. Para instalar los bloques de yeso se requiere excavar un pozo de acceso a la profundidad requerida y colocar una pasta de suelo y agua (lodo) para que al colocar el bloque se genere un buen contacto entre el suelo y el bloque. Los suelos arenosos presentan un pobre contacto hidráulico con el bloque, por lo que la respuesta del bloque a los cambios de humedad es lenta. Antes de colocar el bloque en el campo se debe saturar por algunos minutos en un recipiente. Se rellena el pozo y se coloca una etiqueta al cable del bloque con la profundidad de instalación.

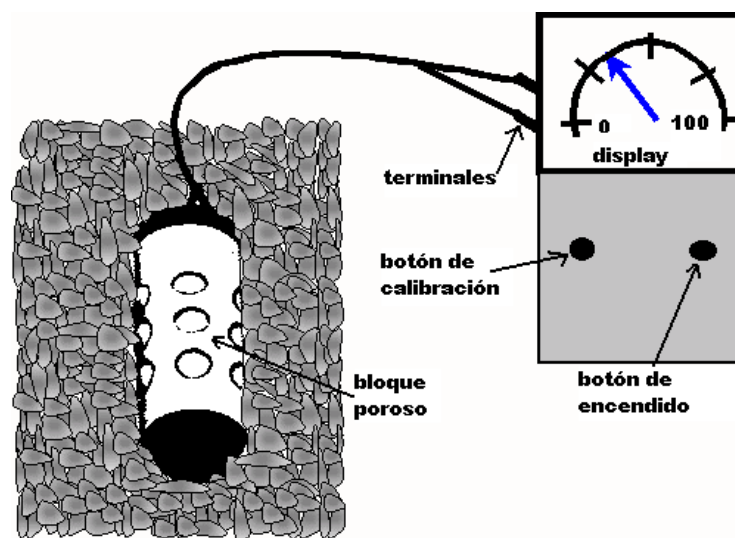


Figura 4.14 Bloque poroso con su medidor de resistencia eléctrica

Algunos bloques porosos pueden ser equipados con una fuente de calor y varios sensores de temperatura para determinar la conductividad térmica del bloque, relacionada con el contenido de humedad. La ventaja de estos sensores térmicos es que no son afectados por la concentración de sales en solución. La **Figura 4.14** muestra el sensor tipo Watermark que tiene algunas ventajas sobre los bloques porosos tradicionales, tales como el uso de material poroso granular de difícil disolución y el uso

de una membrana sintética porosa para contener el material poroso y los electrodos. Usualmente los distribuidores de bloques también comercializan el instrumento para leer la resistencia cuyo costo promedio es del orden de los 300 dólares. No es conveniente usar un medidor de resistencia eléctrica comercial ya que funciona con corriente continua o directa (DC), y en este caso lo que se requiere es corriente alterna (AC), puesto que al usar corriente directa o continua se corre el riesgo de polarizar los electrodos, lo que resulta en lecturas inestables.

4.4. Indicadores evaporativos

En cultivos al aire libre, se dice que mientras la atmósfera esté dispuesta a recibir humedad, se mantendrá el cambio de estado de líquido a vapor conocido como evaporación (si ocurre de una superficie libre o rugosa), y transpiración (si proviene de los estomas de las hojas). Atendiendo este principio se han desarrollado métodos para su estimación; uno de los más utilizados es el tanque evaporímetro, pero también se pueden usar atmómetros para estimar indirectamente el consumo hídrico diario de las plantas.

Estos dispositivos miden la evaporación en una superficie evaporante libre o en una superficie porosa artificial. La evapotranspiración se estima a partir de dos factores; uno depende de las características climáticas y el otro del cultivo, y consiste en multiplicar los cambios en el volumen de agua del dispositivo evaporante por un coeficiente empírico calibrado localmente del cultivo. La desventaja de estos dispositivos es que requieren una cuidadosa selección del sitio, mantenimiento y sobre todo una calibración para cada cultivo.

4.4.1 Tanque evaporímetro

Un tanque evaporímetro consiste en un depósito que almacena agua abierto a la atmósfera. La tasa evaporativa de un tanque puede ser calculada ajustándola en función del tamaño del tanque evaporativo. La **Figura 4.15** muestra que, a medida que la humedad del aire disminuye, la variabilidad de la tasa evaporativa está en función del tamaño del tanque. Se utiliza un tanque evaporímetro tipo A (**Figura 4.16**) para poder comparar los resultados.

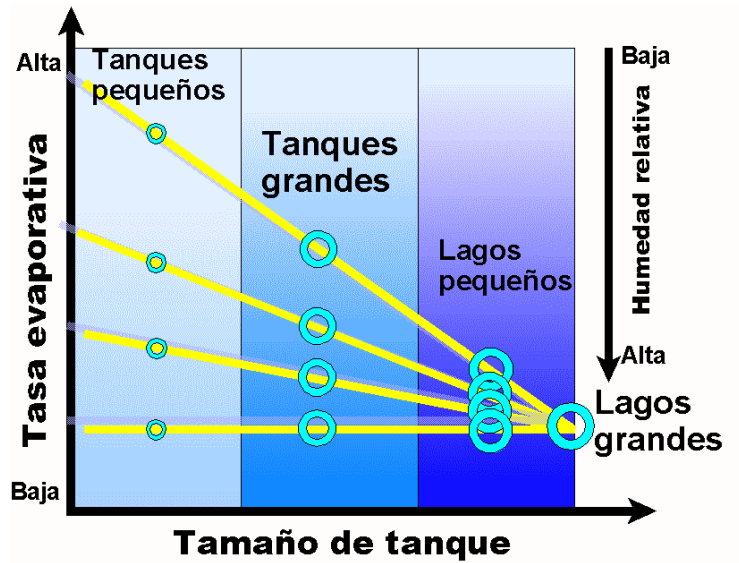


Figura 4.15 Variación de la tasa evaporativa en función del tamaño del tanque de medición (Adaptado de Ward, 1967)



Figura 4.16 Tanque evaporímetro tipo A

Aunque la pérdida de agua de un tanque evaporímetro responde a las mismas variables atmosféricas que la de una superficie vegetal, existen varios factores que deben considerarse:

- La cobertura vegetal en el sentido del barlovento (de frente a la dirección del viento) con respecto al tanque define en gran medida las demandas evaporativas de la atmósfera. La evaporación del tanque será significativamente mayor si el viento dominante pasa por suelo desnudo y no por pasto antes de llegar a la zona evaporante. Se recomienda seguir las recomendaciones en cuanto a distancias mínimas despejadas en la proximidad del tanque.
- La altura del tanque, y las características vegetales en este reducido espacio, donde ocurren turbulencias que afectan el microclima alrededor del tanque y en consecuencia variaciones al proceso físico.
- El albedo o coeficiente de reflexión de la superficie libre es menor (5-8 %) que el correspondiente para los cultivos (20-25 %), si se considera que una superficie más clara tiene un albedo mayor que una superficie más oscura, por lo que el contenido de humedad en el suelo (y por tanto el color) aporta variación en el proceso.
- El alto calor específico de los cuerpos de agua permite almacenar calor durante el día y ser liberado por convección en la noche, generando evaporación durante este periodo, cuando alrededor del 95 % de la evapotranspiración de los cultivos se presenta durante el día.
- Las condiciones microclimáticas alrededor de las superficies vegetales, en términos de turbulencia, temperatura y humedad, difieren de las imperantes en la superficie libre.

4.4.2 Atmómetro

Un atmómetro es un recipiente cerrado cuya superficie evaporante no es una superficie libre sino una superficie porosa artificial que se encuentra siempre saturada. Los atmómetros ofrecen las siguientes ventajas sobre los tanques evaporímetros:

- Son más pequeños (generalmente de 15.2 cm de diámetro) y en consecuencia más fáciles de instalar, transportar y mantener.
- Su superficie (porosa) evaporante húmeda se asemeja a la resistencia difusiva y reflectiva de las hojas.
- Por sus dimensiones, responden rápidamente a las condiciones atmosféricas cambiantes.
- Mínimo flujo de calor de los lados del reservorio
- Mínimo error debido a precipitaciones

Sin embargo, una limitación fuerte es su alta sensibilidad al viento y a la energía radiante. Ante estas observaciones es necesario seguir las recomendaciones de estandarización y calibración de los tanques evaporímetros y atmómetros. La evaporación se incrementa en un 10 % si se pinta de negro un tanque evaporímetro galvanizado blanco.

4.4.3 Relación de Bowen

Este método estima la tasa evapotranspirativa real a partir del gradiente vertical de temperatura y vapor en el aire asumiendo condiciones estacionarias de flujo para los coeficientes de transferencia de vapor que se asumen proporcionales a los de calor y *momentum*. Considerado como un método simplificado, la relación de Bowen parte de la conservación de energía (balance energético) y consiste en estimar la densidad de flujo de calor latente, usando un gradiente de temperatura y humedad, acoplado con mediciones de la radiación neta y la densidad de flujo de calor del suelo. Durante mucho tiempo se consolidó como el método estándar para estimar el flujo evaporativo en la atmósfera, sin embargo, con el desarrollo de la correlación turbulenta se han observado ventajas sensibles para su uso.

4.4.4 Correlación turbulenta

El método de la correlación turbulenta utiliza el principio de la relación de Bowen, considerando que la evaporación puede ser estimada en la forma de agua perdida por la superficie evaporante o lo que es lo mismo, en función de la ganancia de vapor por el ambiente. El vapor de agua, el calor, el bióxido de carbono y otras sustancias atmosféricas son transportadas verticalmente en corrientes de aire llamadas turbulentas. La correlación turbulenta es un método combinatorio que se ha tomado como el estándar en trabajos experimentales, pero se ha visto limitado debido al considerable costo del equipo que se necesita para aplicarlo.

La estimación de la evapotranspiración real con esta técnica se basa en la medición del movimiento ascendente y descendente de las turbulencias y sus concentraciones de vapor. Para esto se asume que la atmósfera actúa como un sistema abierto en el que los cambios en el flujo de vapor de agua a través de una capa límite en la vecindad de la interfase cultivo-atmósfera proporciona un buen estimador de la evapotranspiración del cultivo.

Este método proporciona medidas directas del flujo de calor latente filtrándolo de la difusividad, del perfil del viento y de posibles fuerzas en movimientos ascendentes. Consiste en expresar la densidad del flujo como la varianza entre las fluctuaciones en la velocidad vertical y concentración de vapor en un periodo establecido, generalmente de

una fracción de segundo. El método requiere medir la velocidad vertical del viento (anemómetros sónicos de alta precisión), las variaciones instantáneas de la temperatura y la densidad de vapor de agua usando termopares y girómetros analizadores de gases de alta precisión y rápida respuesta.

Aunque en cultivos protegidos donde el vector del viento se ve afectado por el tipo de ventilación, lo que podría afectar el cálculo, sería interesante observar el comportamiento de los sensores bajo estas condiciones y tratar de establecer adecuaciones que permitan el uso de esta metodología en el cálculo de la evapotranspiración en invernaderos, y tratar de competir con los costos de este método.

4.5 Indicadores evapotranspirativos

El objetivo del riego es reponer el agua que la planta ha perdido en el sentido de que ha consumido esta agua en sus procesos fisiológicos, que ha sido removida de su sistema vascular y finalmente liberada hacia la atmósfera, lo que comúnmente se llama evapotranspiración (ET). Estimar el momento del riego se relaciona con medir la evapotranspiración de los cultivos. Los indicadores evapotranspirativos miden directamente la evapotranspiración en campo o laboratorio. Aunque esta tarea no es fácil por la gran cantidad de factores que involucra, existen varios dispositivos para medir de manera bastante precisa la evapotranspiración, entre los que destacan los lisímetros en sus diferentes modalidades.

En laboratorio se puede estimar la ET usando cámaras de evapotranspiración para medirla directamente. El procedimiento consiste en encerrar un área del cultivo en una cámara con paredes transparentes a la radiación y estimar la cantidad de agua transpirada de las plantas midiendo el flujo de aire y la concentración de vapor de agua que entra y sale de la cámara. La desventaja de usar estas cámaras es que, al restringir el intercambio de gases y calor, las condiciones dentro de la cámara no son representativas del ambiente externo donde se desarrollan los cultivos.

Otros dispositivos considerados experimentalmente exactos para calcular cuánta agua consumen las plantas son los lisímetros, usados para calibrar otras maneras de medir la evapotranspiración, tanto modelos numéricos como sensores. Los lisímetros reproducen idealmente las condiciones del cultivo y suelo de interés para determinar la evapotranspiración (**Figura 4.17**). Un lisímetro es el medio más preciso para medir continuamente la transferencia de vapor de agua del suelo (evaporación) y de las plantas (transpiración) a la atmósfera. En un lisímetro se trata de reproducir el ambiente de los cultivos en condiciones naturales, aislando parte de la zona radical con un control de los procesos difíciles de medir, para estimar con precisión los componentes de la ecuación de balance.

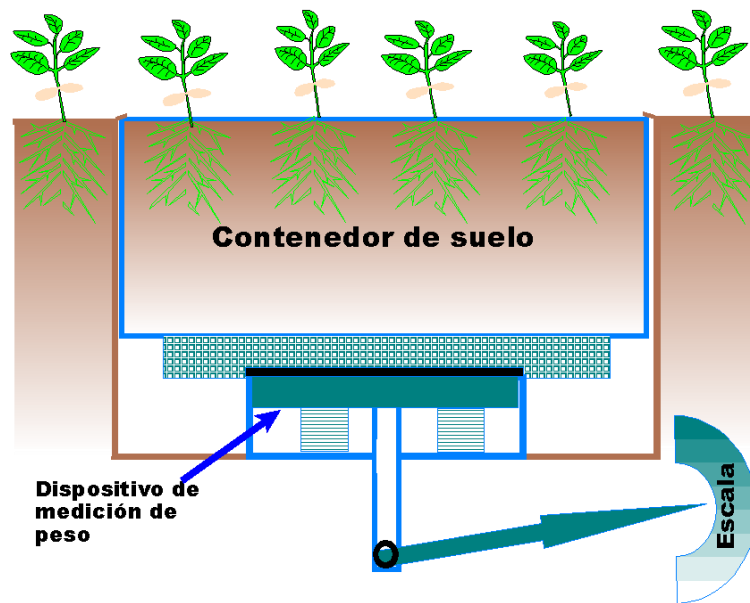


Figura 4.17 Representación simplificada de un lisímetro de pesada

Un lisímetro consiste de un depósito que está enterrado, tiene paredes verticales, está abierto en la parte superior, y en su interior se coloca una muestra del terreno que se quiere estudiar. Los vegetales que se pueden cultivar en un lisímetro son aquellos cuya profundidad y desarrollo radicular no sean afectados por las dimensiones del mismo.

Los lisímetros son de dos tipos, de balance y de pesada. En el lisímetro de balance se elabora la caja y posteriormente se rellena con el material donde se desarrolla el cultivo, dejando una salida para cuantificar el volumen drenado. El contenido del suelo es llevado a un nivel bien determinado, el nivel del fondo del lisímetro, y se recoge y mide el agua de drenaje. Las dimensiones del lisímetro dependen del objetivo del estudio, de manera que sus valores de superficie oscilan entre 1 y 10 m², con una profundidad de 1 m de suelo o más. El lisímetro de pesada, por otra parte, se construye en el lugar donde se lleva a cabo el experimento y solo se perforan las paredes y el piso donde se coloca la balanza para llevar el control del contenido de humedad con base en el peso.

Se puede combinar un lisímetro de balance con uno de pesada de acuerdo con las posibilidades y exigencias particulares. La instalación de un lisímetro de pesada es bastante costosa, pero en cultivos de invernadero donde se coloca el sustrato en la maceta, esta se puede poner sobre una balanza de precisión para poder hacer la ecuación de balance por cada maceta (planta).



Figura 4.18 Esquema del lisímetro de balance

La evapotranspiración del cultivo se puede determinar con un lisímetro volumétrico mediante las siguientes ecuaciones; se mide E_{Tr} si el suelo está cubierto de vegetación y E_v si está desnudo.

$$RR = \text{RIEGO} - \text{DRENAJE} = Tr + Ev$$

En la etapa inicial del cultivo, sin embargo, una vez que el cultivo incrementa su follaje (IAF), la ecuación queda:

$$RR = \text{RIEGO} - \text{DRENAJE} = E_{Tr}$$

Los lisímetros son los únicos dispositivos que proporcionan una estimación directa del flujo de agua que se presenta en las superficies del suelo y vegetal, por lo que se utilizan constantemente para calibrar otros métodos. Los lisímetros deben reunir los siguientes criterios:

1. Deben construirse para mantener el mismo perfil de humedad bajo condiciones naturales
2. Deben manejarse de la misma manera que el área que se desea reproducir
3. Deben aislarse e instalarse con sumo cuidado para reproducir el suelo a estudiar
4. Deben extenderse por debajo de la zona radical o mantener la misma humedad en el límite inferior del suelo a estudiar

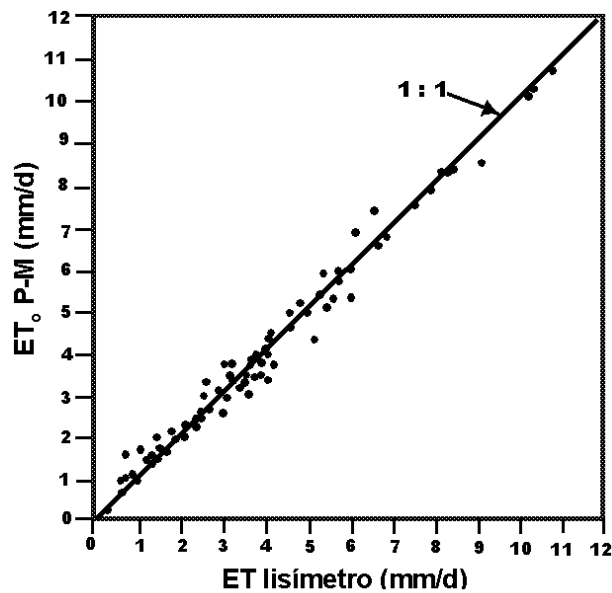


Figura 4.19 Valores promedio mensuales de la evapotranspiración de referencia usando la ecuación de Penman-Monteith, así como los valores correspondientes a lisímetros instalados en once localidades alrededor del mundo (Allen *et al.*, 1998)

Los lisímetros son indispensables para probar nuevas teorías y ecuaciones. La **Figura 4.19** muestra una comparación entre los datos promedio mensuales de evapotranspiración medidos con lisímetros, reportados por Allen *et al.* (1998), y los obtenidos con la ecuación de Penman-Monteith en once localidades alrededor del mundo.

La **Figura 4.20(A)** muestra la superficie de un lisímetro; al fondo de la imagen se pueden apreciar dos estaciones meteorológicas automatizadas. Los lisímetros constituyen una herramienta vital en el desarrollo y mejora de ecuaciones para estimar la evapotranspiración de referencia y los coeficientes de cultivo. En un lisímetro el cultivo es plantado en un tanque, ya sea con suelo alterado o inalterado, en el cual se puede cuantificar la pérdida del agua debida a evaporación del suelo o la transpiración de los cultivos. Los cambios evapotranspirativos son cuantificados ya sea por diferencia sucesiva entre pesos, volúmenes o alguna otra propiedad del lisímetro que permita estimarlos.

Usualmente los lisímetros tienen un tubo de acceso en el centro para medir los cambios en el contenido de humedad usando la sonda de neutrones. En la base del lisímetro normalmente hay un sistema de drenaje que permite extraer y medir el agua drenada. En ocasiones el sistema de drenaje permite mantener un nivel freático y medir el agua requerida para mantener ese nivel en la base del lisímetro. La **Figura 4.20(B)**

muestra un lisímetro de pesada que consta de un sistema de pesas para medir los cambios de peso ocurridos en el tanque lisimétrico.

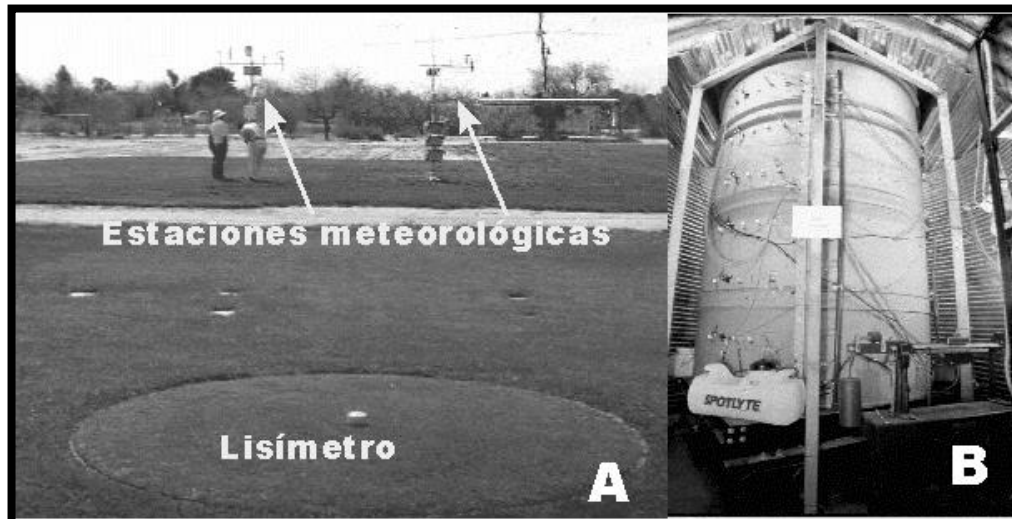


Figura 4.20 Lisímetro de pesada. a) Imagen de la superficie del suelo. Al fondo se ven dos estaciones meteorológicas; b) imagen interior con detalles del sistema de monitoreo

Los lisímetros suelen estar equipados con un sistema de medición, tal como se muestra en la **Figura 4.20(B)**, para estimar algunas variables del suelo en diferentes puntos de muestreo. Las variables más importantes son el contenido de humedad, que se estima usando TDR y sonda de neutrones; el potencial mátrico, calculado con un tensiómetro; la conductividad eléctrica, para la que se usa TDR, y la calidad del agua que se estima usando tubos de succión para su análisis químico posterior. Desgraciadamente, y debido a los altos costos de instalación y mantenimiento, el uso de lisímetros está restringido a labores de investigación. En la República Mexicana solamente hay tres lisímetros, en la Universidad Autónoma Chapingo, en el Colegio de Postgraduados y en el CENID-RASPA del INIFAP de Durango (**Figura 4.21**).

El método de los medidores de flujo de savia permite estimar la tasa transpirativa, calculando la tasa a la cual la savia pasa a través de los tubos vasculares. Existen varias técnicas para estimar el tiempo que toma a la savia moverse entre dos puntos de la planta. El método más usado en la actualidad es el del pulso de calor, que consiste en instalar una serie de anillos de resistencias alrededor del tallo, los cuales suministran un pulso de calor.

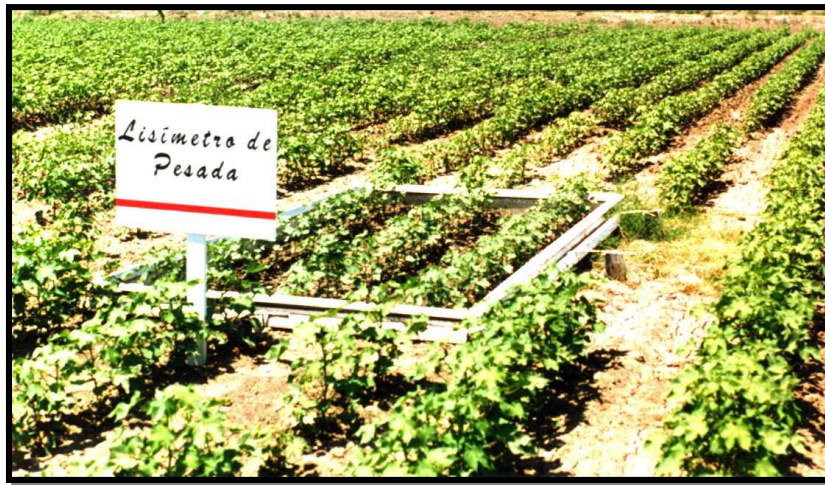


Figura 4.21 Toma aérea del lisímetro de pesada instalado en el CENID-RASPA del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias de La Laguna, México

Para determinar si hay movimiento de savia, se colocan dos sensores de temperatura por arriba y abajo de las resistencias de generación de calor. Existe flujo de savia si los sensores de temperatura muestran un cambio. La **Figura 4.22** muestra la medición de savia en dos ramas de un árbol. La **Figura 4.23** muestra dos acercamientos al medidor de flujo de savia y al equipo de adquisición de datos.



Figura 4.22 Medidores de savia instalados en dos ramas de un árbol

Comercialmente, los sensores de flujo de savia son una tecnología utilizada con éxito en la determinación de la transpiración de las plantas. Su medición se basa en la analogía del flujo de la savia, en el sentido de que 99 % del flujo de savia es agua. Estos sensores estiman indirectamente el flujo de savia por medio del balance de energía de una sección del tallo. La cantidad de calor transportado por la savia está directamente relacionada con el flujo de savia transportado por el floema, lo que se convierte en un flujo casi en tiempo real, expresado en masa/tiempo (**Figura 4.22**).



Figura 4.23 Sensor de flujo de savia para estimar la evapotranspiración del cultivo

La medición involucra el calentamiento continuo de una porción corta del tallo (Sakuratani, 1981; Baker y van Bavel, 1987). A diferencia de otros métodos, estos sensores no requieren calibración ya que el flujo de la savia se determina directamente por el balance de energía y las velocidades de convección calorífica. Estos métodos constituyen una manera accesible y práctica de medir el consumo de agua de las plantas, tan importante en términos económicos y ecológicos en la agricultura, y pueden aplicarse con la misma facilidad en horticultura y en la producción de plantas en invernaderos, viveros o ambientes controlados. Algunas de sus características son:

- Medición directa de la transpiración
- Sensor de tipo trampa de collar
- Núcleo interno flexible que se adecua a la forma del tallo
- Balance de energía calorífica constante
- Registro y monitoreo en tiempo real

Beneficios:

- No requieren calibración
- Reutilizables y portátiles (muy manuales)
- No dañinos, se adecuan al tamaño de la planta
- Miden flujo másico absoluto

4.5.1 Teoría del balance de energía en el tallo

El sensor usa dos termocoples espaciados simétricamente a 0.75 cm aproximadamente por medio de los que se le aplica la fuente de calor (Q_h), equivalente a la entrada de la fuente de poder (P_{in}). Las ecuaciones para calcular el balance de energía son generadas por los componentes que se muestran en la **Figura 4.24**.

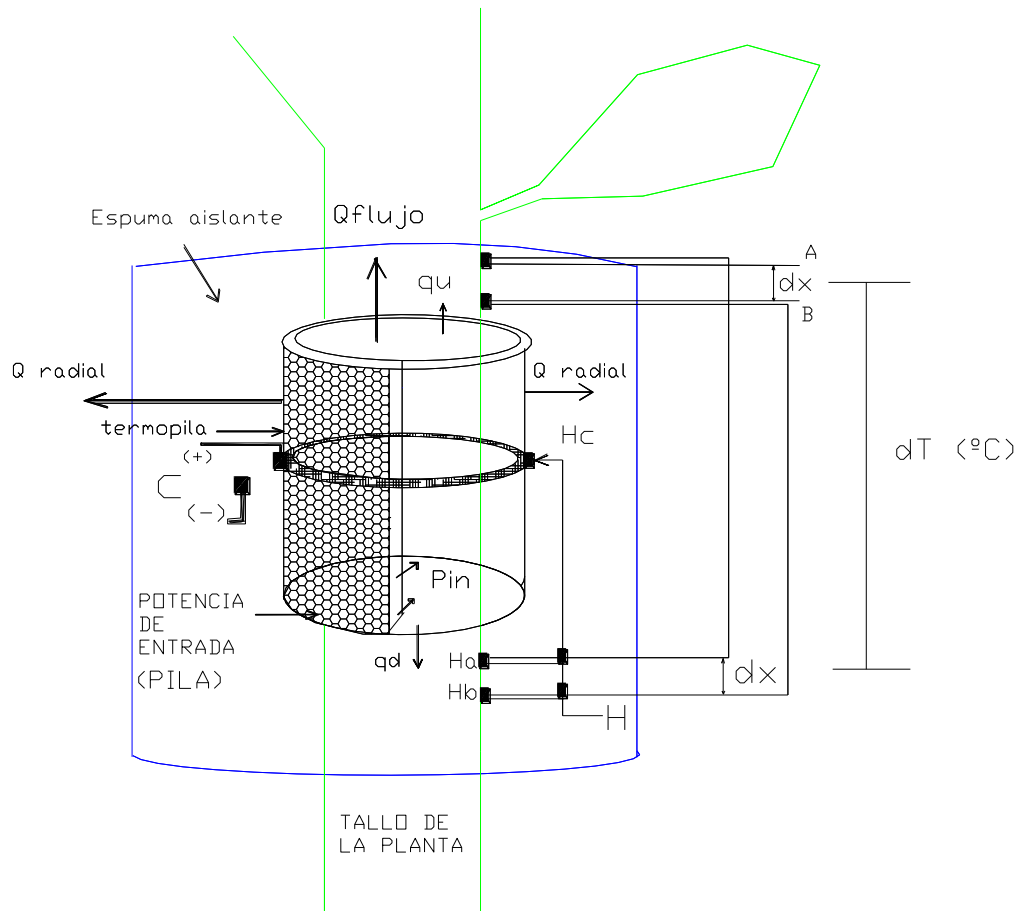


Figura 4.24 Esquema que muestra las variables para el cálculo del flujo de savia

El balance de se expresa por medio de la siguiente ecuación:

$$Pin = Qr + Qv + Qf \quad (W) \quad (4.15)$$

donde Pin es la entrada de calor a través de una pila o corriente eléctrica (V), que se puede asociar con la ley de Ohm, y que indica:

$$Pin = \frac{\text{VoltajeEntrada}}{\text{atenuador}} = \frac{Vin^2}{\text{resistencia} \quad R} \quad (4.16)$$

Qr es el flujo de calor radial conducido, expresado como:

$$Qr = Ksh * CH \quad (4.17)$$

donde Ksh es la constante de conductividad térmica en la cubierta, dada en $\left(\frac{W}{mV}\right)$, que es un término difícil de evaluar. Para determinarla se aplica la **Ecuación 4.16**, haciendo $QF=0$ como sigue:

$$Pin = Qr + Qv \quad (4.18)$$

y

$$Ksh(CH) = Pin - Qv \quad (4.19)$$

Por lo tanto, después de computar Pin y Qv se resuelve:

$$Ksh = \frac{(Pin - Qv)}{CH} \quad \frac{W}{mV} \quad (4.20)$$

CH es el dato que arrojará el sensor conectado en el puerto C del *data logger*, y se refiere al voltaje de calor radiante de la termopila (mV). Qv es el flujo de calor axial o vertical conducido por medio del tallo, tiene dos componentes relacionados por las leyes de Fourier, se puede establecer la siguiente relación:

$$Qv = Qu + Qd \quad (4.21)$$

donde:

$$Q_u = K_{st} * A * \frac{dT_u}{dX} \quad (4.22)$$

Análogamente,

$$Q_d = K_{st} * A * \frac{dT_d}{dX} \quad (4.23)$$

donde:

K_{st} es la conductividad térmica del tallo $\left(\frac{W}{m * K}\right)$

A es el área de la sección del tallo en m^2

$\frac{dT_d}{dX}$ es el gradiente de temperatura según la dirección del flujo (d (down), hacia abajo y

u (p) hacia arriba, ambos $\left(\frac{C}{m}\right)$; y

dX es el espaciamiento de la unión en el termopar (m)

En los termocoples hay dos alambres diferentes que miden la temperatura de la savia. El canal AH mide la diferencia de temperatura A-Ha (mV). El canal BH mide la diferencia en temperatura B-Hb (mV). Por sustracción de estas dos señales queda:

$$BH - AH = (B - Hb) - (A - Ha) = (B - A) + (Ha - hB) \quad (mV) \quad (4.24)$$

El resultado proporciona los dos componentes de la conducción del flujo de calor axial fuera del diámetro del tallo. Los componentes del Q_v se combinan con un común denominador, lo que resulta en una ecuación desglosada:

$$Q_v = K_{st} * A * \frac{BH - AH}{dX} * 0.04 \frac{mV}{^{\circ}C} \quad (4.25)$$

El factor 0.04 mV/C convierte la señal diferencial del termocople a grados centígrados. El valor de K_{st} adopta tres valores: 0.042 W/m. K para tallos grandes, 0.54 para herbáceos y 0.28 para tallos huecos. Y finalmente, Q_f es el calor convectivo acarreado por la savia, en este caso, la incógnita. Los datos que se recolectan son las conexiones de los termocoples unidos en tres canales (AH, BH Y CH) y la potencia de entrada (P_{in}), con lo que se llega al cálculo del flujo. Después de dividir por el calor específico del agua y el incremento de la temperatura de la savia, el flujo calorífico es convertido directamente a tasa de flujo de masa.

Una vez resuelta la **Ecuación 4.16** para Q_f , se calcula la tasa de flujo por unidad de tiempo desde la ecuación para el flujo de savia como lo describen Sakuratani (1981)

y Baker y van Bavel (1987). Esta ecuación lleva el residual del balance de energía (watts) y lo convierte en tasa de flujo dividida por el incremento de temperatura de la savia, de la capacidad de calor del agua. Este razonamiento se sigue del hecho de que la savia contiene 99 % de agua, lo que permite asumir que la capacidad calorífica, C_p , es constante en el tallo. Así, se establece la relación de que 1 watt equivale a 1 joule/segundo, con lo que se puede convertir a tasa de flujo (g/s), y por lo tanto se puede cuantificar este incremento. Con este sistema de ecuaciones se llega a la expresión relevante:

$$Q_F = P_{in} - q_v - q_U - Q_d \quad (4.26)$$

La partición del flujo de calor por conducción radial (Q_r) y vertical (Q_v) se estima a partir del calor generado (P_i) por una termopila a través de dos termocoples que miden la temperatura en dos posiciones del tallo (ΔT). El flujo convectivo (Q_f) se calcula con base en el residuo de la ecuación de balance de energía en la zona de muestreo del tallo. El flujo de calor transportado por la savia se convierte a flujo de masa al dividir Q_f por la capacidad de calor del agua y por el incremento de temperatura debido al flujo de savia.

$$F = \frac{Q_F}{C_p \cdot dT} \quad (4.27)$$

La estimación de los flujos radial y vertical requiere de un estimado de la conductividad térmica ($0.54 \text{ W m}^{-2} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) de la planta bajo estudio y un buen aislamiento de la fuente de calor del exterior. En ausencia de flujo de savia, la conductividad del sustrato (K_{sh}) relaciona directamente el flujo de calor radial con el calor generado por la termopila cuando Q_f es nulo, en horas de la madrugada o durante días lluviosos.

$$F = \frac{P_{in} - Q_v - Q_r}{C_p \cdot dT} \quad (4.28)$$

donde:

C_p es el calor específico del agua ($4.186 \text{ j/g }^\circ\text{C}$) y dT es el incremento de la temperatura de la savia. ($^\circ\text{C}$), y puede ser relacionado con la siguiente expresión:

$$dT = \frac{(AH - BH/2)}{0.040} \frac{mV}{mV/^\circ\text{C}} \quad ^\circ\text{C} \quad (4.29)$$

Este incremento (dT) se mide en mV promediando las señales de AH y BH, y se convierte a grados centígrados ($^{\circ}\text{C}$) al dividir por la constante de conversión de temperatura del termocople, como se aprecia en la ecuación 4.29.

4.6 Balance de humedad

La estimación de las entradas y salidas de agua de la zona de raíces puede ser integrada en ecuaciones que permiten estimar el contenido de humedad del suelo diario u horario. En el **Capítulo 6** se presenta con más detalle cómo puede utilizarse este método para calendarizar el riego.

4.7 Sitios de muestreo

El sistema agua-suelo-planta-atmósfera es altamente heterogéneo en espacio y tiempo, por lo que elegir el sitio correcto cuando se instalan sensores para medir un indicador de riego en campo suele ser complicado. El mejor sitio de muestreo está asociado con las condiciones representativas promedio de las zonas de raíces desde el punto de vista de estrés hídrico. Sin embargo, cuando el valor del indicador de riego en esta zona reporta un valor crítico, algunas partes del cultivo y pueden haber mostrado síntomas de estrés hídrico, por lo que el mejor sitio debe ser la zona más crítica del terreno de acuerdo con las siguientes características:

- Zonas con deficiente aplicación o penetración de agua
- Zonas con drenaje rápido y poco almacenamiento
- Zonas con el menor contenido de humedad
- Zonas con mayor representatividad en términos de tipo, variedad y fase fenológica del cultivo
- Zonas sin problemas de acceso, lectura y protección del equipo de medición
- Zonas donde el indicador responda de manera rápida y precisa a las condiciones de estrés de la planta

En los sistemas de riego por microirrigación, la localización de los sensores de humedad depende de los siguientes factores:

- Espaciamiento y gastos de emisores
- Salinidad del suelo
- Distribución radical del cultivo
- Propiedades hidrodinámicas del suelo

El muestreo del contenido de humedad bajo riego de alta frecuencia es complicado ya que los cambios de humedad son pequeños y no fácilmente detectables debido a la baja resolución de los sensores de humedad. En otras ocasiones, la localización del punto de muestreo se complica ante la alta variabilidad del contenido de humedad que depende de las propiedades hidrodinámicas del suelo, de la distancia al emisor y de la localización en la zona radical. En este caso, se requieren mayores puntos de muestreo en función de la distancia del emisor y en diferentes puntos de la zona radical.

Actualmente no existe un indicador de riego usado comercialmente para calendarizar el riego en grandes zonas de riego ya que algunos son tediosos y caros para implantarlos en campo, y otros son puntuales y sujetos a una alta variabilidad en el indicador. La mayoría son subjetivos, por lo que la responsabilidad recae en la persona que toma la decisión de regar.

4.8 Ejemplos

Ejemplo 1. Calcular el índice de estrés hídrico de un cultivo de papa si la temperatura del aire es de 20 °C y la temperatura del cultivo es de 18 °C. Asumir un valor de $\Delta T_1 = 4$ °C.

i. $(T_c)_m = 18$ °C y $(T_a)_m = 20$ °C

ii. $\Delta T_m = (T_c)_m - (T_a)_m = 18 - 20 = -2$ °C

iii. Obtener el déficit de presión de vapor (ΔP) para la temperatura del aire al tiempo de medición.

$$e_s = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27T}{T+237.3}\right)} = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27(20)}{20+237.3}\right)} = 2.34 \text{ KPa}$$

$$e_a = e_s \frac{HR}{100} = 2.34 \frac{40}{100} = 0.936 \text{ KPa}$$

$$DPV = e_s - e_a = 2.34 - 0.936 = 1.404 \text{ KPa}$$

iv. Calcular la diferencia de temperatura para un cultivo no estresado, ΔT_0

$$\Delta T_0 = \alpha_1 - \alpha_2 \Delta P = 1.17 - 1.83(1.404) = -1.4$$

La **Tabla 4.1** Presenta los parámetros de la curva base para estrés nulo (α_1 y α_2) para papa.

v. Estimar el valor de ΔT_1 para un cultivo completamente estresado. Se asume que:

$$\Delta T_1 = 4 \text{ }^\circ\text{C}$$

vi. Calcular el IEHC:

$$IEHC = \frac{\Delta T_m - \Delta T_0}{\Delta T_1 - \Delta T_0} = \frac{-2 - (-2.744)}{4 - (-2.744)} = 0.11$$

Ejemplo 2. Estimar el contenido de humedad volumétrico usando la relación de Topp et al. (1990) para los siguientes valores de la constante dieléctrica (K): 3.24, 9.61, 10.89, 13.69 y 14.44. Usando la relación $\theta(K) = -0.053 + 0.0292K - 5.5(10^{-4})K^2 + 4.3(10^{-6})K^3$, se obtienen los siguientes resultados:

K	3.24	9.61	10.89	13.69	14.44
θ_v (cm ³ cm ⁻³)	0.036	0.1806	0.2053	0.2547	0.2669

“Se respira el cambio de fronteras de la humedad al viento, del viento a las raíces”

Pablo Neruda

Evapotranspiración

5

Capítulo 5

EVAPOTRANSPIRACIÓN

Waldo Ojeda Bustamante y Agustín Ruiz García

5.1 Introducción

Las plantas consumen grandes volúmenes de agua. Por cada kilogramo de producto agrícola se requieren varios cientos de kilogramos de agua. Por ejemplo, se requieren alrededor de 100 kilogramos de agua para producir un kilogramo de azúcar. Para producir 10 toneladas de maíz, que representan el rendimiento promedio por hectárea en algunas regiones de México, se requieren 6 000 m³ de agua. Este volumen corresponde a una lámina de 600 mm distribuida a lo largo del ciclo fisiológico del cultivo; al final hay 2 m³ de agua en 10 ton de maíz con una humedad del grano del 20 %. En muy pocos lugares de México es posible obtener esa cantidad de agua en forma de lluvia, excepto durante los meses de verano que es cuando se concentran las lluvias en la mayor parte del territorio mexicano.

Una planta de maíz transpira 1.25 litros de agua a la atmósfera en sus etapas fenológicas iniciales, que pueden incrementarse hasta 14 litros en la etapa de máxima demanda. El porcentaje de agua en una planta fisiológicamente activa varía del 60 al 95 %. Su función es diversa y fundamental en los siguientes procesos: fotosíntesis, transporte de minerales y fotosintatos, soporte estructural, y crecimiento.

Los tallos de la planta cuentan con pequeños conductos (xilema) que se dividen en múltiples conductos en las ramas y hojas para finalizar en pequeñas aperturas llamadas estomas. De igual manera, en la parte inferior el xilema se ramifica en múltiples conductos que forman el sistema radical de la planta. El agua que absorben las raíces se transporta a través del xilema por toda la planta. Una pequeña porción del orden del 1 % es retenida en los tejidos vegetales: la mayoría (99 %) es transpirada o liberada a la atmósfera por medio de los estomas. El uso consuntivo de un cultivo considera el agua evapotranspirada hacia la atmósfera y aquella que permanece almacenada en las plantas de dicho cultivo.

Aunque también existe la transpiración cuticular, la transpiración estomática es la más importante. Cerca del 90 % del agua transpirada y la mayoría del bióxido de carbono pasa por los estomas. La apertura y cierre de los estomas es controlado por dos células oclusivas o guardas que al llenarse de agua se vuelven rígidas y turgentes, provocando que la cavidad estomática se abra. Cuando las células oclusivas se deshidratan, colapsan y la cavidad se cierra, impidiendo el intercambio gaseoso de la planta con la atmósfera.

Cuando el agua está fluyendo por las hojas se crea una presión mayor que la atmosférica en las células de las hojas, estado que se conoce como turgencia de la hoja. Durante la noche la transpiración prácticamente es nula, sin embargo, la absorción de agua por las raíces puede continuar a una tasa reducida que puede generar una presión positiva en la hoja y forzar la liberación de agua por la hoja en forma líquida, fenómeno conocido como gutación.

Las plantas se dividen en tres grandes grupos dependiendo de la manera en que utilizan el bióxido de carbono: C3, C4 y CAM. Las plantas C3 (por ejemplo, la soya) presentan la menor eficiencia en el uso del agua debido a que tienen menor resistencia estomatal que las plantas C4 (por ejemplo, el sorgo). El metabolismo de las plantas CAM incrementa la eficiencia en el uso del agua debido a que abren sus estomas por la noche, cuando el gradiente del vapor de presión entre el medio ambiente y las hojas es menor.

El número de estomas depende del tipo de cultivo; por ejemplo, una hoja de maíz contiene alrededor de 7 000 estomas por cm^2 , mientras que un árbol de vid tiene cerca de 30,000 estomas por cm^2 en su área foliar. Usualmente se presentan más estomas en el envés que en el haz de la hoja; así, la papa presenta tres veces más densidad estomática en el envés que en el haz de la hoja.

Aunque la mayor parte del agua se pierde por transpiración, su deficiencia tiene graves consecuencias en el crecimiento, rendimiento y susceptibilidad de los cultivos a enfermedades y daños por insectos. La transpiración es causada por la interacción del aire ambiental generalmente seco (con un déficit de vapor) y la superficie saturada de la hoja. Hillel (1991) hace una analogía del proceso transpirativo con el funcionamiento de una lámpara de petróleo: la mecha (hoja) es abastecida de petróleo a través de un cordón (raíz) sumergido en petróleo (agua). Este abastecimiento debe ser continuo mientras la flama esté activa bajo la influencia de las fuerzas físicas impuestas en ambos extremos del cordón. La evaporación depende de la disponibilidad tanto de agua como de energía.

Los procesos de evaporación y transpiración son afectados por los cambios que experimentan las distintas variables atmosféricas. La **Figura 5.1** muestra los cuatro componentes meteorológicos que determinan la evapotranspiración de un cultivo: radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. Ambos procesos, evaporación del suelo y transpiración de las plantas, son conocidos colectivamente como evapotranspiración y están relacionados con el cambio de fase del agua de líquido a vapor. La diferencia es que en la transpiración el agua es evaporada de las superficies de las hojas después de haber sido transportada de las raíces, mientras que en la evaporación el agua acumulada en la parte superior del perfil del suelo es liberada directamente a la atmósfera en forma de vapor de agua.

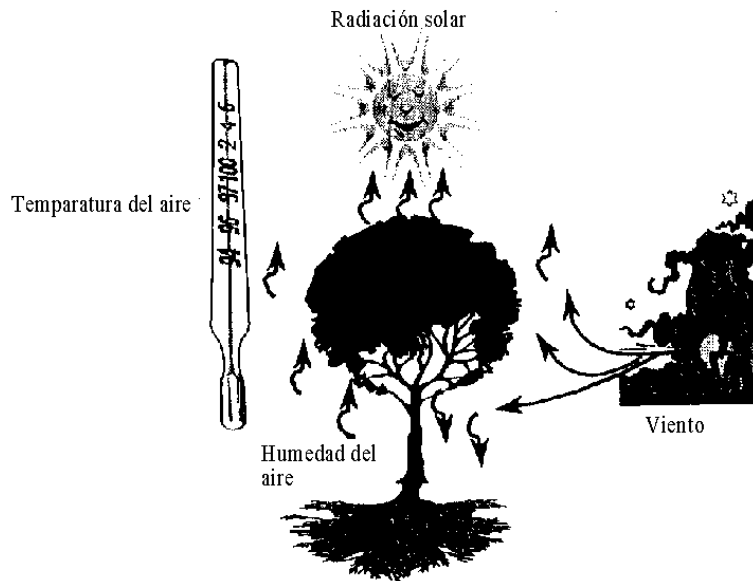


Figura 5.1 Componentes meteorológicos relacionados con la evapotranspiración

La evaporación y transpiración son procesos físicos muy similares que difieren por el tipo de superficie evaporante. Los principales factores que controlan la evapotranspiración son los siguientes:

- Energía solar
- Albedo
- Capacidad de almacenamiento energético del suelo
- Energía advectiva
- Déficit de presión de vapor
- Velocidad del viento
- Interceptación energética
- Tipo de superficie vegetal
- Disponibilidad de agua
- Propiedades hidrodinámicas del suelo

Hay una marcada variación horaria entre los procesos que constituyen la evapotranspiración. La **Figura 5.2** muestra la variación de la evaporación del suelo y la transpiración para un periodo de 24 horas sin un evento de riego. Es difícil separar los procesos de transpiración y evaporación ya que se presentan de manera simultánea. Al inicio del ciclo la evaporación constituye el principal componente de la evapotranspiración, sin embargo, a medida que se desarrolla el cultivo y aumenta el área foliar, la transpiración pasa a ser el principal proceso de pérdida de agua de un cultivo

como se muestra en la **Figura 5.3**. Cuando el índice de área foliar alcanza su valor máximo, el proceso transpirativo también llega a su valor máximo.

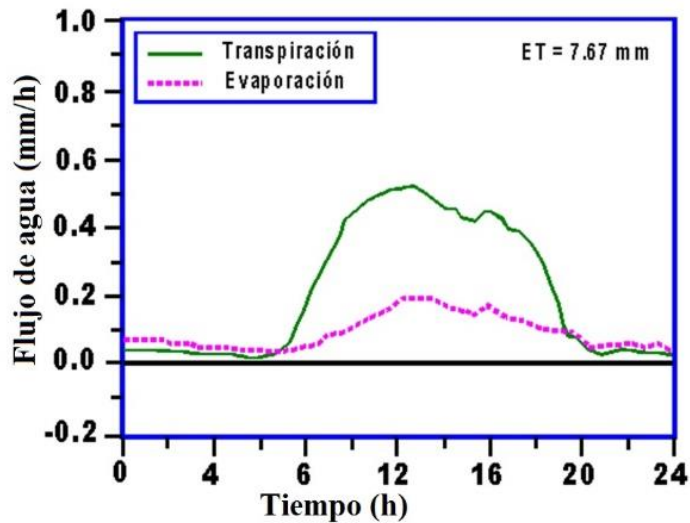


Figura 5.2 Variación horaria de la evaporación del suelo y transpiración sin la presencia de un evento de riego (Thompson *et al.* 1996)

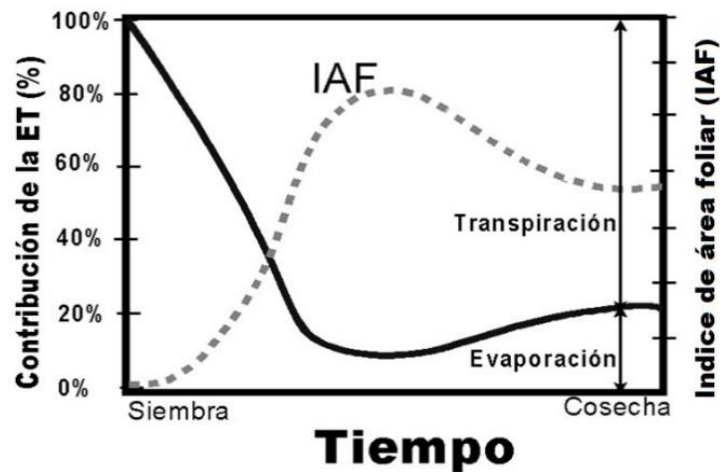


Figura 5.3 La variación de los componentes de la evapotranspiración durante el ciclo fenológico de un cultivo (Allen *et al.*, 1998)

La evapotranspiración es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y de vital importancia en la planeación y operación de zonas de riego, principalmente en aquellas donde los recursos hidráulicos son escasos y, muchas veces, inciertos. Alrededor de dos terceras partes del agua precipitada sobre la superficie terrestre retornan a la atmósfera por medio de la evapotranspiración. El tercio restante, en tanto, escurre o percola. La **Figura 5.4** muestra una versión detallada del ciclo hidrológico en el nivel de la fitósfera.

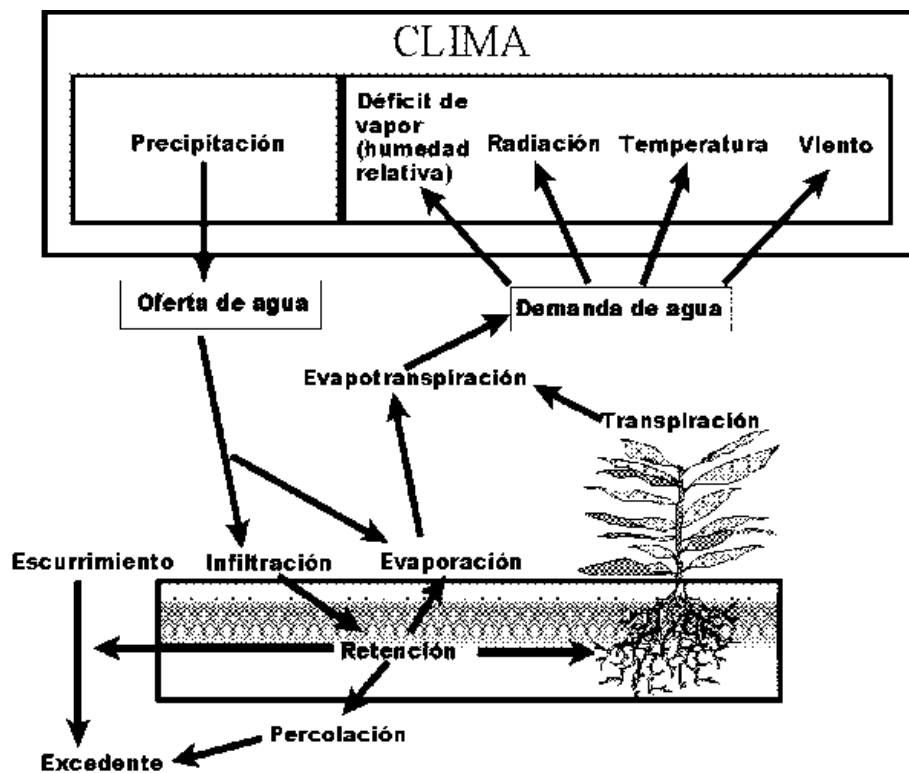


Figura 5.4 Balance hídrico en el nivel de la fitósfera

Se requiere energía para cambiar el estado energético de las moléculas de agua y pasar del estado líquido a vapor. Una de las principales variables que determinan la evapotranspiración (ET) es la radiación solar. La radiación solar proporciona la energía para calentar el agua líquida hasta que eventualmente se evapore; naturalmente, la radiación solar es más intensa al mediodía y nula en la noche. La transferencia de calor de la atmósfera al suelo es otra variable relacionada con la radiación. Dicha transferencia es mayor cuando la temperatura del aire es mayor que la del suelo.

El viento es otra variable importante en la transferencia de vapor atmosférico; es un agente de remoción del vapor húmedo alrededor de las hojas, al que cambia por aire seco. Existe una capa de aire saturado alrededor de las hojas, cuyo espesor, conocido

como capa límite, depende de las características transpirativas de las hojas. La frontera de la capa límite se encuentra donde la humedad del aire se iguala a la humedad atmosférica. A mayor velocidad del viento, menor es el espesor de la capa límite. En ausencia del viento el vapor de agua se acumularía y eventualmente saturaría la espesa capa de aire que se encuentra en la vecindad de las hojas con la consiguiente reducción de la tasa evapotranspirativa. Entre menor sea la capa límite, mayor es la transpiración de la superficie foliar adyacente. Durante un día sin condiciones extremas, los vientos son usualmente ligeros o prácticamente inexistentes en las primeras horas del día, se incrementan durante la tarde y se reducen en la noche.

Otra variable meteorológica relacionada con la evapotranspiración es la humedad del aire. El aire seco tiene mayor capacidad para absorber y transportar vapor de agua que el aire húmedo a la misma temperatura; en consecuencia, el aire seco produce un incremento de la ET. En ausencia de un frente húmedo, la humedad del aire es normalmente baja durante el día y alta durante la noche.

La transpiración se ha visto como un mal necesario. Las plantas requieren de la entrada de bióxido de carbono a través de los estomas para generar fotosintatos. El cierre de estomas está asociado con la falta de agua en la zona de raíces y a la alta demanda evaporativa de la atmósfera en las hojas. Como lo han comprobado diversas investigaciones en campo y laboratorio, existe una relación directa entre la transpiración y el rendimiento de un cultivo.

Los estomas de la mayoría de las plantas se abren durante el día y se cierran durante la noche. La piña es una excepción pues su sentido de apertura es inverso y los estomas se abren por la noche. La transpiración funciona como refrescante de la planta, por lo que el cierre de estomas trae consigo el calentamiento de las hojas debido a la radiación solar y, en consecuencia, un incremento de la respiración que se traduce en una reducción de los fotosintatos producidos.

Por cuestiones prácticas, la evapotranspiración es expresada como una lámina de agua que se transfiere a la atmósfera y se expresa usualmente en milímetros (mm) para un intervalo de tiempo fijo, generalmente un día, aunque puede ser una semana, un mes o un ciclo agrícola. De esta manera, si un cultivo tiene una evapotranspiración de 400 mm durante su ciclo fenológico, en una zona agrícola con una precipitación efectiva de 150 mm, se requiere suministrar 250 mm mediante riegos para satisfacer los requerimientos hídricos faltantes. Una tasa evapotranspirativa de 10 mm d⁻¹ en una hectárea es equivalente a un volumen de 100 m³ ha⁻¹ d⁻¹, a un suministro continuo durante 24 h de 1.16 ℓ s⁻¹, y a un flujo energético total de 24 500 MJ.

Aunque la tasa evapotranspirativa está asociada en gran parte con las condiciones meteorológicas, alrededor de las hojas existen otros factores del suelo y cultivo que la controlan. La tasa evapotranspirativa depende de tres factores principales: la demanda evaporativa de la atmósfera, las condiciones edáficas (capacidad transmitiva, retención

y almacenamiento del agua, humedad actual) y de las características de la cubierta vegetal. Existe un desfase entre el flujo transpirativo que deja la hoja y el flujo que entra por la hoja, debido a la resistencia al flujo al pasar por los multiconductos de la planta. Durante el día, el máximo flujo transpirativo se presenta primero que el máximo flujo absorbente radical, lo que ocasiona un marchitamiento temporal en las horas de mayor transpiración.

La **Figura 5.5** describe el proceso para el cálculo de la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) iniciando con datos ambientales de la interrelación planta-atmósfera para obtener la evapotranspiración de referencia (ET_o). Posteriormente se ajusta de acuerdo con las características del cultivo en condiciones estándares y se obtiene la evapotranspiración del cultivo en estas condiciones (ET_c), la cual es finalmente ajustada considerando las condiciones del suelo y las prácticas de manejo para obtener la evapotranspiración real.

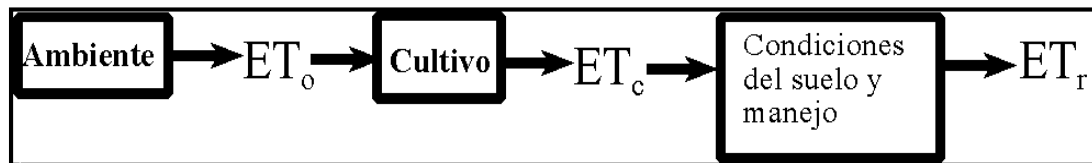


Figura 5.5 Pasos requeridos para estimar la evapotranspiración real de un cultivo

5.2 Evapotranspiración potencial

El concepto de evapotranspiración potencial (ET_p) fue propuesto en 1948 por Thornthwaite y por Penman para expresar la evapotranspiración de una superficie continuamente húmeda, que tiene como única limitante la energía disponible. Para dar mayor validez y precisión a las estimaciones de ET, fue necesario usar el concepto de evapotranspiración de referencia, ET_o , en lugar del de evapotranspiración potencial. Muchos autores toman ambos conceptos como sinónimos. Sin embargo, en la actualidad se prefiere usar el término de evapotranspiración potencial para referirse a la evapotranspiración máxima posible de un cultivo bajo condiciones óptimas de humedad y sanidad.

5.3 Evapotranspiración de referencia

La estimación periódica de la ET en una zona de riego constituye la base de la calendarización del riego para los diferentes cultivos presentes. Como es difícil generar una metodología para estimar directamente la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) es necesario estimar primeramente la evapotranspiración de un cultivo de

referencia (ET_0). Al asumir un cultivo definido bajo condiciones óptimas de humedad, el concepto de evapotranspiración de referencia permite aislar las demandas evapotranspirativas de la atmósfera de otros factores como prácticas de manejo, tipo y fase de cultivo.

La evapotranspiración de referencia es la evapotranspiración potencial de un cultivo con características específicas (de referencia), usualmente pasto o alfalfa, que tiene sentido físico ya que su evapotranspiración se puede estimar a través de estimaciones directas de los cambios en peso de un tanque lisimétrico. Es posible transformar los resultados de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia (alfalfa y pasto) usando un factor de escalamiento. La **Figura 5.6** compara la evapotranspiración en dos cultivos de referencia (alfalfa y pasto) estimados a partir de una ecuación tipo Penman cuyos parámetros fueron calculados con datos de lisímetros de varias localidades alrededor del mundo. La evapotranspiración del pasto representa del 76 % al 100 % del consumido por la alfalfa, con un promedio de 83 %.

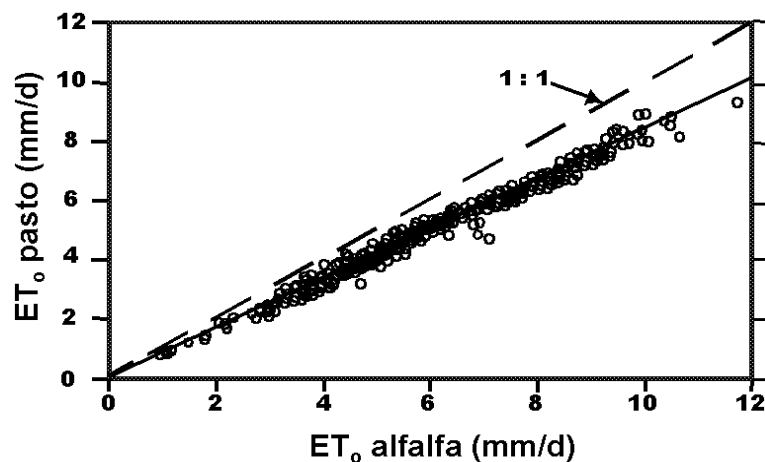


Figura 5.6 Comparación de la evapotranspiración de dos cultivos de referencia: pasto y alfalfa (Wright, 1996)

Según la FAO, la ET_0 es la tasa evapotranspirativa de una superficie con una cobertura completa de un cultivo hipotético sin limitaciones de agua con una altura de 12 cm, una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 que se asemeja a una cobertura de pasto con una altura uniforme. El pasto perenne ballico (*rye grass*) es la variedad más comúnmente usada como cultivo de referencia en estudios lisimétricos.

Shuttleworth (1993) definió la evapotranspiración de un cultivo de referencia (ET_0) como la tasa de evapotranspiración de un pasto idealizado con una altura fija de 12 cm, un albedo de 0.23 y una resistencia superficial de 69 s m^{-1} , mientras que Allen *et al.* (1998), asumen una resistencia de 70 s m^{-1} que corresponde a una superficie de

suelo semiseca producto de una frecuencia de riego semanal. Para la Asociación Americana de Ingenieros Civiles (ASCE), el cultivo de referencia es alfalfa con una altura entre 30 y 45 cm.

La evapotranspiración de referencia (ET_0) puede determinarse mediante mediciones directas en lisímetros, pero dado su alto costo de instalación y operación, además de las dificultades para reproducir naturalmente las condiciones reales del cultivo, la estimación indirecta de la ET_0 basada en ecuaciones semiempíricas y empíricas seguirá siendo el principal medio de estimación. Por muchos años el método de Thornthwaite fue usado para estimar la ET_0 , pero actualmente se cuestiona su validez en climas templados, ya que puede subestimar los valores reales hasta en un 50 %. La **Tabla 5.1** muestra valores típicos de la ET_0 para diferentes regiones agroclimáticas.

Tabla 5.1 Evapotranspiración de referencia ET_0 en mm d^{-1} para diferentes regiones agroclimáticas (adaptado de Allen *et al.*, 1998)

Regiones	Temperatura media anual (°C)		
	< 10 °C Fría	20 °C Moderada	> 30 °C Caliente
Tropicales			
Húmedas	2-4	3-5	5-7
Subhúmedas	3-5	5-6	7-8
Semiáridas	4-5	6-7	8-9
Áridas	4-5	7-8	7-10
Subtropicales (lluvias en verano)			
Húmedas	2-3	3-5	5-6
Subhúmedas	3-5	5-6	6-7
Semiáridas	4-5	6-7	7-8
Áridas	4-5	6-8	7-9
Subtropicales (lluvias en invierno)			
Húmedas-subhúmedas	2-3	4-5	5-6
Semiáridas	3-4	5-6	7-8
Áridas	3-4	6-7	7-9
Templadas			
Húmedas y semihúmedas	1-2	2-4	4-7
Semiáridas y áridas	1-3	4-7	6-9

La **Figura 5.7** muestra la variación diaria de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en el Valle del Carrizo, Sinaloa, México, estimada usando la ecuación de Penman-Monteith a partir de datos meteorológicos colectados por una estación agrometeorológica automatizada durante los años de 1995 a 1998. También indica variaciones diarias de alrededor 2 mm en los años analizados, lo cual podría incrementarse hasta en 4 mm, si se considera una eficiencia global (conducción y aplicación) del 50 % en la zona de riego (desde la fuente de suministro hasta la parcela) para los meses de demanda máxima (bajo cobertura total), en los cuales la ET_r es muy cercana a la ET_o .

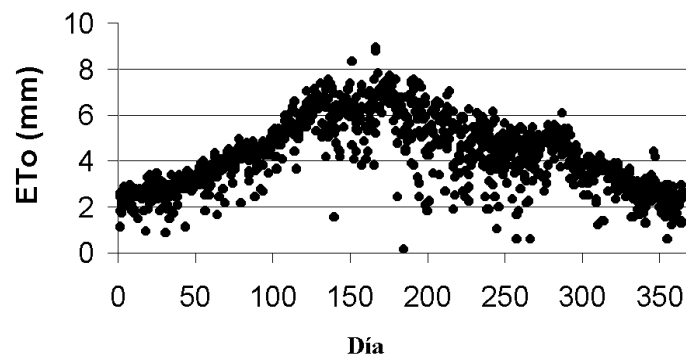


Figura 5.7 Variación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) en el Valle del Carrizo (1995-1998)

5.3.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia

No se debe confundir la evapotranspiración estimada con la evapotranspiración medida. Solamente los lisímetros y los métodos micrometeorológicos como el método de la correlación turbulenta proporcionan medidas muy aproximadas a la evapotranspiración real del cultivo, mientras que los demás solo proporcionan una estimación de la evapotranspiración de referencia. Existen diferentes métodos para estimar la evapotranspiración indirectamente usando ecuaciones aproximadas que manipulan valores de las variables meteorológicas en la interfase cultivo-atmósfera.

Hay varios métodos para estimar la evapotranspiración de referencia con diferentes requerimientos de datos y grado de precisión. Algunos requieren datos mensuales, otros diarios, algunos horarios, y los más precisos datos de segundos. Para unos se requieren de mediciones de las cuatro variables meteorológicas (humedad y temperatura ambiental, radiación solar y velocidad del viento) relacionadas con la evapotranspiración, mientras que para otros solo se requiere de alguna combinación de las cuatro variables. Los métodos fundamentados en principios físicos resultan particularmente interesantes, puesto que son aplicables a localidades distintas de

aquellas en las que han sido generados y calibrados, en contraposición con los métodos empíricos cuya validez se restringe a aquellas localidades en las cuales han sido calibrados. Los métodos para estimar la ET pueden ser clasificados en cinco grandes grupos:

1. Aerodinámicos
2. Balance energético
3. Combinatorios
4. Semiempíricos
5. Empíricos

Los métodos aerodinámicos se basan en las leyes de transferencia de calor y masa, los de balance energético, en principios físicos de conservación de masa y energía, y los combinatorios son una mezcla de los aerodinámicos y de balance energético. Los métodos semiempíricos parten de principios físicos para obtener una ecuación base, sin embargo, la mayor parte de sus parámetros se estima mediante la técnica de regresión. Por último, los métodos empíricos se basan en ecuaciones totalmente empíricas, en las que los parámetros se obtienen por la técnica de regresión y no se fundamentan en principios físicos.

5.3.2 Correlación turbulenta (Eddy correlation)

La evaporación puede ser estimada en la forma de agua perdida por la superficie evaporante o como ganancia de vapor en el ambiente. El vapor de agua junto con el calor, bióxido de carbono (CO_2) y otras sustancias atmosféricas son transportadas verticalmente en corrientes de aire llamadas turbulencias o *eddies*. La estimación de la evapotranspiración real con la técnica de la correlación turbulenta se basa en medir tanto el movimiento ascendente y descendente de las turbulencias como sus concentraciones de vapor. Se asume que la atmósfera es un sistema abierto, por lo que los cambios en el flujo de vapor de agua a través de una capa límite en la vecindad de la interfase cultivo-atmósfera proporciona un buen estimador de la evapotranspiración del cultivo.

El método de la correlación turbulenta es de tipo combinatorio y se ha usado como el estándar en trabajos experimentales, sin embargo, su aplicación generalizada es limitada por el alto costo de los equipos que requiere. Proporciona medidas directas del flujo de calor latente, sin ninguna suposición en la difusividad turbulenta, el perfil del viento o en la influencia de las fuerzas de movimientos ascendentes. Consiste en expresar la densidad del flujo como la varianza entre las fluctuaciones en la velocidad vertical y concentración de vapor en un periodo definido, usualmente del orden de una fracción de segundo.

Las mediciones de la velocidad del viento, la humedad y la temperatura pueden presentar alta fluctuación temporal por lo que los sensores deben responder de manera instantánea. Se requiere estimar las distribuciones de los movimientos responsables de la transferencia vertical del vapor de agua para medir los flujos de calor sensible y de calor latente. El método requiere medir la velocidad vertical del viento (comúnmente usando anemómetros sónicos de alta precisión), las variaciones instantáneas de la temperatura y la densidad de vapor de agua usando termopares e higrómetros analizadores de gases de alta precisión y respuesta rápida.

5.3.3 Relación de Bowen

Existe un método simplificado que estima la tasa evapotranspirativa real a partir del gradiente vertical de temperatura y vapor en el aire asumiendo condiciones estacionarias de flujo para los coeficientes de transferencia de vapor que se asumen proporcionales a los de calor y momentum. El método conocido como relación de Bowen parte de la conservación de energía (balance energético) y consiste en estimar la densidad del flujo de calor latente, usando un gradiente de temperatura y humedad, acoplado con mediciones de la radiación neta y la densidad del flujo de calor del suelo. El método de Bowen había sido considerado como el método estándar para estimar el flujo evaporativo en la atmósfera, hasta que la correlación turbulenta mostró su superioridad.

5.3.4 Ecuaciones semiempíricas

En los últimos 50 años se han desarrollado una gran variedad de métodos semiempíricos para estimar la evapotranspiración en diferentes condiciones climáticas. El problema de las fórmulas empíricas es su extrapolación fuera de las zonas para las que fueron generadas. Su uso resulta restringido puesto que dichas fórmulas requieren de una rigurosa calibración local y tienen poca utilidad global. Por ejemplo, el método de Blaney-Criddle desarrollado para la zona oeste árida de los Estados Unidos se comporta adecuadamente allí; sin embargo, no es recomendable utilizarlo en zonas cuyas condiciones meteorológicas diarias son altamente variables, por ejemplo, en zonas húmedas que no son bien representadas por valores semanales o mensuales.

Otro de los métodos empíricos que ha sido usado extensivamente para calendarizar el riego en tiempo real, principalmente en riego por goteo, es el método del tanque evaporímetro, basado en la medición de la evaporación de un tanque estandarizado que proporciona información integral, concentrando en un solo valor los efectos combinados de las variables meteorológicas (radiación, viento, insolación, déficit de presión de vapor, etc.).

La **Tabla 5.2** presenta los cuatro métodos adoptados en el manual 24 de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977), para estimar la evapotranspiración de acuerdo con la disponibilidad de los datos climáticos y que fueron recomendados por expertos consultores en evapotranspiración. La FAO recomendó el método de Penman con modificaciones para ajustar las variables locales de los métodos de Blaney y Criddle, Makkink (radiación) y tanque evaporímetro USWB clase A, métodos que se discuten a continuación.

Tabla 5.2 Datos meteorológicos requeridos por los métodos de evapotranspiración recomendados por la FAO de acuerdo con la disponibilidad climática (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Método	Temperatura	Humedad	Velocidad del viento	Radiación solar	Evaporación
FAO Blaney Criddle	⊗	○	○	○	
FAO Radiación	⊗	○	○	⊗	
FAO Penman-Montieth	⊗	⊗	⊗	⊗	
Tanque evaporímetro		○	○	○	⊗

Dato esencial medible: ⊗

Estimación requerida: ○

El método de Penman-FAO es una adaptación del método presentado por Penman en 1948, con una nueva función del viento, derivada de datos obtenidos con lisímetros distribuidos alrededor del mundo. En respuesta a la recomendación de varios expertos la FAO ha adoptado la versión de Penman-Montieth como el estándar para estimar la evapotranspiración de referencia (Smith *et al.*, 1996, Allen *et al.*, 1998).

El método de la radiación es prácticamente el método de Makkink, desarrollado para Holanda, con la adición de un factor de corrección para adaptarlo a condiciones variables de humedad y viento. Su validez ha sido extendida a zonas con una amplia gama de condiciones climáticas. En general el método de la radiación muestra buenos resultados en zonas húmedas donde el componente aerodinámico (viento) es relativamente pequeño, sin embargo, su comportamiento es errático y subestima la evapotranspiración bajo condiciones áridas.

El Método de Blaney-Criddle fue adaptado por la FAO a una amplia variedad de condiciones climáticas, introduciendo un factor de corrección dependiente de las condiciones de humedad, viento y nubosidad. El método del tanque evaporímetro ha sido adaptado por la FAO definiendo un factor del tanque que depende de las condiciones climáticas del lugar y del tipo de entorno vegetal que rodea al tanque. La limitación más severa del método del tanque es su susceptibilidad a las condiciones microclimáticas de operación del tanque.

En estudios realizados por Jensen *et al.* (1990) se analizó la precisión de 20 métodos para estimar la ET_0 al compararlos con datos lisimétricos de 11 sitios con condiciones climáticas contrastantes. Los resultados, resumidos en la **Tabla 5.3**, muestran una amplia variación bajo dos grandes tipos climáticos; el método de Penman-Monteith resulta ser el de mejor aproximación a lo medido en lisímetros. Estudios realizados por otros investigadores, bajo condiciones áridas y húmedas, han confirmado lo anterior (Choisnel *et al.*, 1992).

La ecuación de Penman y sus diferentes variantes ha sido mostrada en diferentes estudios de varias partes del mundo como la de mayor precisión, con una diferencia menor al 15 % de la ET_0 medida. Dicha ecuación combina dos términos, el relacionado con la radiación solar y el aerodinámico (viento y déficit de saturación), que permiten expresar de una mejor manera las variaciones de la ET en el ámbito local. Sin embargo, las ecuaciones tipo Penman tienen la desventaja de requerir varios datos meteorológicos (**Tabla 5.2**), que muchas veces no se encuentran disponibles en la mayoría de las regiones agrícolas. Otra dificultad menor es la complejidad de los cálculos involucrados.

La FAO recomienda usar el método de Penman-Monteith para estimar la evapotranspiración de referencia (Allen *et al.*, 1998). Las ventajas del método de Penman-Monteith son las siguientes:

- Modelo físicamente basado
- Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo
- Incorpora parámetros aerodinámicos
- Probado intensamente en varias localidades alrededor del mundo
- Buena aproximación para estimar la evapotranspiración de referencia para pasto

Tabla 5.3 Comparación de varios métodos para estimar la evapotranspiración de referencia tomando como base datos de 11 lisímetros alrededor del mundo (Jensen *et al.*, 1990)

Zona	Húmeda			Árida		
	Rango #	Error %	Error estándar	Rango #	Error %	Error Estándar
Métodos combinatorios						
Penman-Monteith	1	+4	0.32	1	-1	0.49
FAO-24 Penman (c=1)	14	+29	0.93	6	+12	0.69
FAO-24 Penman (corregido)	19	+35	1.14	10	+18	1.1
FAO-PPP-17 Penman	4	+16	0.67	5	+6	0.68
Penman (1963)	3	+14	0.60	7	-2	0.7
Penman 1963, VPD #3	6	+20	0.69	4	+6	0.67
1972 Kimberley-Penman	8	+18	0.71	8	+6	0.73

Zona	Húmeda			Árida		
	Rango #	Error %	Error estándar	Rango #	Error %	Error Estándar
Indicador de Comparación						
1982 Kimberley-Penman	7	+10	0.69	2	+3	0.54
Businger-van Bavel	16	+32	1.03	11	+11	1.12
Métodos radiactivos						
Priestley Taylor	5	-3	0.68	19	-27	1.89
FAO-Radiación	11	+22	0.79	3	+6	0.62
Métodos de temperatura						
Jensen-Haise	12	-18	0.84	12	-12	1.13
Hargreaves	10	+25	0.79	13	-9	1.17
Turc	2	+5	0.56	18	-26	1.88
SCS Blaney-Criddle	15	+17	1.01	15	-16	1.29
FAO Blaney-Criddle	9	+16	0.79	9	0	0.76
Thornwaite	13	-4	0.86	20	-37	2.4
Métodos del tanque evaporímetro						
Tanque tipo A	20	+14	1.29	17	+21	1.54
Christiansen	18	-10	1.12	16	-6	1.41
FAO Tanque tipo A	17	-5	1.09	14	+5	1.25

El método de Penman-Montieth puede proporcionar estimaciones directas de la evapotranspiración real de los cultivos ajustando los valores del albedo y las resistencias aerodinámica y superficial para reflejar las condiciones específicas del cultivo de interés. La elección del método de estimación de la ET_0 es primordial para obtener un balance hídrico correcto y en consecuencia un pronóstico del riego eficiente. A continuación se describen con detalle tres métodos para estimar la evapotranspiración de referencia.

5.3.5 Método del tanque evaporímetro

El método del tanque evaporímetro es el más antiguo y simple de los métodos para estimar la evapotranspiración de referencia y en general la evapotranspiración de los cultivos. Al medir la evaporación en una superficie de agua, integra indirectamente las condiciones. La ecuación para estimar la evapotranspiración tiene la siguiente forma:

$$ET_0 = K_t E_t \quad (5.1)$$

donde el coeficiente de tanque K_t es requerido porque la evaporación del agua en un tanque es generalmente mayor que la evaporación en el suelo o aun en cuerpos de agua. El valor de K_t varía durante el año dependiendo de las condiciones atmosféricas y de la cobertura vegetal alrededor del tanque, con un promedio anual entre 0.7 y 0.8.

Para evitar problemas en la construcción e instalación del tanque, se ha normalizado lo que se conoce como tanque evaporímetro tipo A, que consiste en un tanque cilíndrico de lámina galvanizada con un espesor de 0.8 mm, un diámetro de 120.65 cm y una altura de 25.4 cm, que se coloca en el suelo sobre apoyos de madera. El fondo del tanque debe quedar 15 cm arriba de la superficie original del suelo.

Frevert *et al.* (1983) presentaron una ecuación para evaluar K_t cuyos parámetros fueron obtenidos por la técnica de regresión usando datos experimentales tabulados por Doorenbos y Pruitt (1977) para tanques evaporímetros tipo A, que fueron simplificados por Cuenca y Jensen (Cuenca, 1989) y dieron como resultado una ecuación con la siguiente estructura:

$$K_t = 0.475 - 0.00024U_2 + 0.00516 HR_m + 0.00118d - 0.000016 HR_m^2 - 0.101 \times 10^{-5} d^2 - 0.8 \times 10^{-8} HR_m^2 U_2 - 1 \times 10^{-8} HR_m^2 d \quad (5.2)$$

donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en km d^{-1} , HR_m es la humedad relativa media diaria en porcentaje y d es la cobertura vegetal alrededor del tanque en metros por el lado del barlovento ($d < 1\ 000$ m). Los parámetros promedio de la ecuación son obtenidos para el periodo de análisis.

Ejemplo. Estimar el coeficiente del tanque evaporímetro de acuerdo con las siguientes características del tanque: $U_2 = 175 \text{ km d}^{-1}$, $HR_m = 60 \%$ y $d = 1\ 000$ m. Usando los datos anteriores y la **Ecuación (5.2)** se estima que $K_t = 0.81396$.

Una ecuación empírica alternativa a la anterior es presentada por Allen *et al.*, (1998) para estimar el valor de K_t de un tanque tipo A rodeado de cobertura vegetal:

$$K_t = 0.108 - 0.0286U_2 + 0.0422 \ln(d) + 0.1434 \ln(HR_m) - 0.000631 (\ln(d))^2 \ln(HR_m) \quad (5.3)$$

donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s^{-1} .

Para el caso de evaporímetros tipo A rodeados de suelo desnudo, Allen *et al.* (1998) presentaron la siguiente ecuación:

$$K_t = 0.61 + 0.00341 HR_m - 0.000162 U_2 HR_m - 0.00000959 u_2 d + 0.00327 u_2 \ln(d) - 0.00289 u_2 \ln(86.4 d) - 0.0106 \ln(86.4 u_2) \ln(d) + 0.00063 (\ln(d))^2 \ln(86.4 u_2) \quad (5.4)$$

donde U_2 es la velocidad del viento a 2 m de altura en m s^{-1} .

Los límites de aplicabilidad de las ecuaciones de Allen *et al.* (1999) son definidos por las siguientes restricciones:

$$1m \leq d \leq 1,000m$$

$$30\% \leq HR_m \leq 84\%$$

$$1ms^{-1} \leq u_2 \leq 8ms^{-1}$$

La siguiente ecuación permite estimar la velocidad del viento a una altura de 2 m (U_2) para el caso en el que se tenga una estimación de la velocidad (U_z) a una altura diferente z :

$$U_2 = U_z \left[\frac{2}{z} \right]^{0.2} \quad (5.5)$$

Existen varios factores que tienden a producir discrepancias considerables de la evapotranspiración de referencia (ET_o) estimada por el tanque evaporímetro. Entre los más importantes están:

- El color del tanque puede producir diferencias significativas en la evaporación del agua. Un tanque negro evapora más que uno de color blanco debido a que absorbe más energía calorífica.
- El albedo de una superficie del agua (0.05 - 0.08) es menor que el de superficies vegetales (0.2 - 0.25).
- El alto calor específico del agua permite a un cuerpo de agua almacenar calor durante el día y continuar evaporando durante la noche, mientras que en las superficies vegetales la evapotranspiración se presenta principalmente durante el día.
- Las condiciones microclimáticas sobre una superficie libre de agua, en términos de turbulencia, humedad y temperatura, son diferentes a las imperantes en las superficies vegetales.
- La apertura estomática responde a las condiciones ambientales imperantes, de manera que los estomas se pueden cerrar con poca humedad en el aire, mientras que en una superficie de agua no existen tales restricciones.

Las condiciones de humedad del suelo, área, altura y tipo de la cobertura vegetal alrededor del tanque pueden cambiar las direcciones del flujo de calor. Un cultivo de porte alto cerca del tanque puede funcionar como cortina rompevientos que restringe el transporte de vapor del agua. La **Figura 5.8** muestra la variación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) obtenida directamente de un tanque evaporímetro usando un coeficiente de tanque de $K_t = 0.791$ y de una estación meteorológica usando la ecuación de Penman-Montieth para el año de 1998 en Chapingo, México.

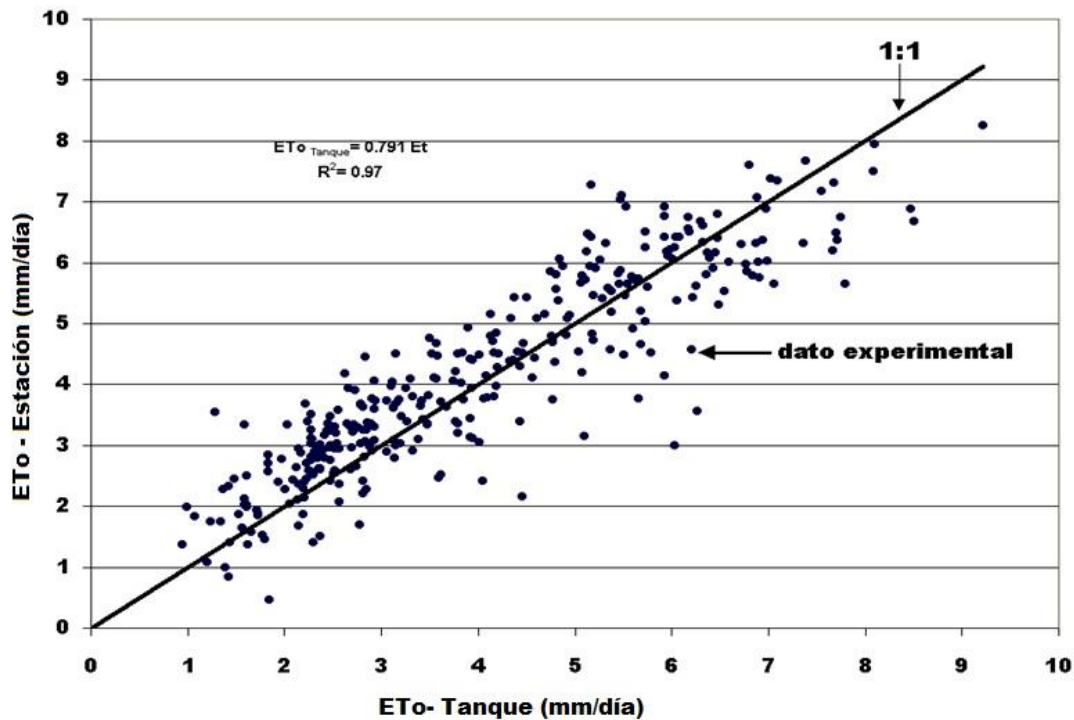


Figura 5.8 Valores de la ET_0 obtenidos a partir de un tanque evaporímetro y una estación meteorológica (ecuación de Penman-Montieth)

5.3.6 Método de Blaney-Criddle

Si se considera que la disponibilidad de datos meteorológicos en la mayoría de las zonas de riego del país es limitada, sobretodo en nuevas zonas de riego. Posiblemente el método de Blaney-Criddle es el único método que se pueda utilizar para estimar la evapotranspiración de referencia, con validez limitada a periodos mensuales. La ecuación original requiere de solamente datos de temperatura y de la latitud del lugar de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$ET_0 = p(0.46 * \bar{T} + 8.13) \quad (5.6)$$

donde ET_0 es la evapotranspiración de referencia en mm d^{-1} como promedio mensual, \bar{T} es la temperatura media diaria del mes en $^{\circ}\text{C}$, y p es el porcentaje diario de las horas de insolación en relación al total del año de acuerdo con la siguiente relación:

$$p_i = \frac{h_d^i}{\sum_{i=1}^{365} h_d^i} 100 \quad (5.7)$$

donde p_i es el porcentaje de horas de insolación para el día i con respecto al número total de horas de insolación en el año; h_d^i es el número de horas de insolación para el día i . Por ejemplo, un valor diario de $p_i = 0.41$ % significa que ese día aporta el 0.41 por ciento del total de horas de insolación del año. Frecuentemente p se presenta como un valor representativo mensual, existen tablas donde se encuentra el valor de p para el día 15 de cada mes. El valor de p depende de la latitud del lugar considerado. La siguiente ecuación permite calcular el valor de p en función del ángulo de declinación solar en grados (δ) y la latitud en grados:

$$p = 0.00304 \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen}(\delta) \text{sen}(\text{latitud})}{\cos(\delta) \cos(\text{latitud})} \right) \quad (5.8)$$

La declinación solar es evaluada en función de día del año de acuerdo con la siguiente relación:

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.39795 \cos(0.98563(J - 173))) \quad (5.9)$$

donde J es el día juliano bajo consideración variando de 1 a 365, a excepción de los años bisiestos que varía de 1 a 366. Para el hemisferio sur la constante “- 173” en la Ecuación 5.9 debe ser remplazada por “+ 9.5.”

Ejemplo. Se tienen datos de la temperatura media mensual para el mes de junio de la estación norte (26° 26' latitud norte) de la red agrometeorológica del Valle del Carrizo, Sinaloa con un promedio mensual $\bar{T} = 15.7^\circ\text{C}$.

$$\delta = \text{sen}^{-1}(0.39795 \cos(0.98563(166 - 173))) = 23.27^\circ$$

$$p = 0.00304 \cos^{-1} \left(\frac{-\text{sen}(23.27) \text{sen}(26.43)}{\cos(23.27) \cos(26.43)} \right) = 0.3111 \%$$

Para una latitud de 26.43° y día 15 de junio ($J = 166$) se tiene que $p = 0.31$ % por lo tanto la evapotranspiración de referencia diaria para el mes de junio parte de la **Ecuación (5.6)** y resulta que $ET_o = 0.31(0.46 \cdot 15.7 + 8.13) = 4.76 \text{ mm d}^{-1}$.

Doorenbos y Pruitt (1977), bajo los auspicios de la FAO, desarrollaron diversos trabajos tendientes a mejorar el método de Blaney-Criddle que resultaron en la siguiente ecuación:

$$ET_o = f_e \{a + b[p(0.46\bar{T} + 8.13)]\} \quad (5.10)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia para pasto en mm d^{-1} , p es el porcentaje medio diario anual de insolación durante el periodo bajo análisis, \bar{T} es la temperatura media en $^{\circ}\text{C}$, a y b son coeficientes de calibración climática, y f_e es un factor de ajuste por la elevación sobre el nivel del mar.

Aunque el método original de Blaney-Criddle fue recomendado para periodos mensuales de cálculo, la versión de la FAO ha mostrado excelentes resultados en los cálculos de evapotranspiración diaria (Allen y Pruitt, 1986). Los coeficientes a y b fueron estimados por regresión usando datos meteorológicos y lisimétricos de 13 sitios alrededor del mundo. Doorenbos y Pruitt (1977) presentaron la siguiente ecuación para evaluar el parámetro a :

$$a = 0.0043 HR_{min} - \frac{n}{N} - 1.41 \quad (5.11)$$

donde HR_{min} es la humedad relativa mínima en porcentaje, n/N es la relación de horas de insolación (n) con respecto a las del fotoperiodo (N).

Doorenbos y Pruitt (1977) presentaron los diferentes valores del parámetro b en forma tabular como función de la humedad relativa, velocidad del viento y la relación n/N . Sin embargo, Frevert *et al.*, (1983) generaron una ecuación usando técnicas de regresión múltiple y los datos tabulares de Doorenbos y Pruitt, que fue posteriormente simplificada por Cuenca y Jensen (Cuenca, 1989) con la siguiente estructura:

$$b = 0.82 - 0.0041 HR_{min} + 1.07 \frac{n}{N} + 0.066 U_d - 0.006 HR_{min} \frac{n}{N} - 0.0006 HR_{min} U_d \quad (5.12)$$

donde U_d es la velocidad del viento en m s^{-1} durante las horas diurnas a una altura de 2 m. La FAO define arbitrariamente las horas diurnas de 7 am a 7 pm. El factor f_e puede ser estimado por la siguiente relación:

$$f_e = 1 + 10^{-4} ELEV \quad (5.13)$$

donde $ELEV$ es la elevación del sitio en estudio en metros sobre el nivel del mar.

5.3.7 Ecuación de Priestley y Taylor

Una de las ecuaciones más simples basada en datos de temperatura y radiación solar, pero con significado físico, fue propuesta por Priestley y Taylor para calcular la evapotranspiración de referencia (mm d^{-1}) con la siguiente estructura:

$$ET_o = \kappa \frac{\Delta R_n}{\lambda (\Delta + \gamma)} \quad (5.14)$$

donde κ es el parámetro de Priestley-Taylor, Δ es la pendiente de curva de la presión de vapor a saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), λ es el calor latente de vaporización (2.45 MJ kg^{-1}), γ es la constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), y R_n es la radiación neta ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). El parámetro κ puede ser obtenido al comparar valores estimados con los valores experimentales. Priestley y Taylor propusieron un valor de $\kappa = 1.26$ cuando la superficie está en su tasa evapotranspirativa máxima posible (evaporación potencial).

Es posible expresar la energía por unidad de área en lámina evaporable y viceversa. Esta energía es conocida como calor requerido para vaporizar agua libre o simplemente calor latente de vaporización (λ) y tiene un valor de 2.45 MJ kg^{-1} a $20 \text{ } ^\circ\text{C}$. Esto indica que se requieren 2.45 MJ para vaporizar un kilogramo de agua o un litro de agua o 0.001 m^3 y que se formaría una lámina de un milímetro al aplicar un litro de agua (0.001 m^3) en un m^2 , que requerirán de una energía de 2.45 MJ m^{-2} para evaporarla.

Ejemplo. Estimar la evapotranspiración de referencia asumiendo que $\Delta = 0.162 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, $R_n = 9.89 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, $\gamma = 0.067286 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ y una densidad del agua de $\rho = 1000 \text{ kg m}^{-3}$:

$$ET_o = \kappa \frac{\Delta R_n}{\lambda (\Delta + \gamma)} = 1.26 \frac{0.162 \times 9.89}{2.45(0.162 + 0.067286)} = 3.6 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{ d}} \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ kg}} \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 3.6 \text{ mm d}^{-1}$$

En la **Tabla 5.4** se presentan algunas equivalencias de interés con el cálculo de la evapotranspiración de referencia.

Tabla 5.4 Equivalencias de unidades relacionadas con la evapotranspiración

Unidad	Equivalencia
1 MJ	$1 \times 10^6 \text{ J}$
1 langley	1 cal cm^{-2}
1 W m^{-2}	$0.0864 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} = 2.0636 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 0.035 \text{ mm d}^{-1}$
1 $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$23.884 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 11.6 \text{ W m}^{-2} = 0.408 \text{ mm d}^{-1}$
1 mm d^{-1}	$2.45 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1} = 58.6 \text{ cal cm}^{-2} \text{ d}^{-1} = 28.57 \text{ W m}^{-2}$

5.4 Evapotranspiración real de los cultivos bajo condiciones estándares (ET_c)

Hasta ahora se ha presentado cómo evaluar la evapotranspiración de referencia, sin embargo, el objetivo final de este capítulo es la estimación de la evapotranspiración real de los cultivos bajo condiciones estándares (ET_c). En estas condiciones, se asume que el cultivo se encuentra bajo niveles óptimos de humedad, sanidad, fertilidad del suelo, y con un buen manejo agronómico para obtener los máximos rendimientos potenciales.

La **Tabla 5.5**, compilada por Doorenbos y Pruitt (1977), resume las variaciones de la ET_c bajo diferentes condiciones ambientales alrededor del mundo. La alta variabilidad de la evapotranspiración se debe tanto a la enorme variabilidad climática como a las variedades disponibles.

Tabla 5.5 Rangos de variación de la evapotranspiración de los principales cultivos durante su ciclo fenológico (Doorenbos y Pruitt, 1977)

Cultivo	ET_c acumulada (mm)	Cultivo	ET_c acumulada (mm)
Aguacate	650-1 000	Alfalfa	600-1 500
Algodón	550-950	Arroz	500-950
Cacao	800-1 200	Cafeto	800-1 200
Caña de azúcar	1000-1 500	Cebolla	350-600
Dátil	900-1 300	Frijol	250-500
Frutales caducifolios	700-1 050	Granos pequeños	300-450
Hortalizas	250-500	Lino	450-900
Maíz	400-750	Naranja	600-950
Nogal	700-1000	Papa	350-625
Papa dulce	400-675	Plátano	700-1 700
Remolacha azucarera	450-850	Semillas oleaginosas	300-600
Sorgo	300-650	Soya	450-825
Tabaco	300-500	Tomate	300-600
Toronja	650-1 000	Vid	450-900

La metodología para estimar la evapotranspiración real de un cultivo (ET_r) consiste de tres partes (ver **Figura 5.5**):

1. Estimar la tasa de referencia con especificaciones en el suministro de agua y tipo de cultivo bien definido (ET_o).
2. Ajustar la tasa de referencia en función de las características del cultivo a fin de obtener la evapotranspiración potencial del cultivo (ET_c).

3. Ajustar la ET_c en función de las condiciones locales y prácticas agrícolas que influyen en la estimación de la evapotranspiración real (ET_r) como la salinidad, el déficit hídrico, el tamaño de las parcelas, los métodos de riego y cultivo.

Una vez que se ha estimado la evapotranspiración de referencia (ET_o) como primer paso (1), el siguiente paso (2) es calcular la evapotranspiración real máxima de un cultivo que correspondería a su evapotranspiración potencial (ET_p) o evapotranspiración de cultivo bajo condiciones estándares (ET_c), y consiste en multiplicar la evapotranspiración de referencia por un factor de escala llamado coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) que depende principalmente del tipo y etapa fisiológica del cultivo. La ecuación que define dicha relación es:

$$ET_c \approx ET_p = K_{cb} ET_o \quad (5.15)$$

El último paso (3) para evaluar la ET_r es tomar en cuenta las condiciones locales y de manejo del cultivo. Hasta ahora se ha considerado a K_{cb} como independiente del contenido de humedad del suelo.

Bajo un déficit de humedad, los estomas de las plantas se cierran y la tasa evapotranspirativa se reduce, por lo tanto, el valor de la evapotranspiración debe reducirse con la introducción de un factor de estrés (K_e) que varía entre 0 y 1. De esta manera, la estimación de la evapotranspiración de los cultivos bajo condiciones no estándares (ET_r) es más realista y menor que la evapotranspiración bajo condiciones estándares (ET_c). Una versión para estimar la evapotranspiración real es:

$$ET_r = K_e K_{cb} ET_o \quad (5.16)$$

En la ecuación anterior se realiza un ajuste a la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares para incorporar las condiciones del suelo con el factor K_e . Diferentes enfoques han sido propuestos para incluir otros factores que afectan el consumo de agua por los cultivos bajo condiciones de suelo y manejo no óptimas.

5.4.1 Coeficiente de cultivo basal (K_{cb})

Los coeficientes de cultivo basal (K_{cb}) son la representación cuantitativa normalizada de la evapotranspiración de un cultivo (ET_c) en relación con la evapotranspiración de referencia (ET_o) a lo largo del ciclo fenológico de un cultivo.

$$K_{cb} = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (5.17)$$

El coeficiente de cultivo basal integra implícitamente varias características primarias que distinguen a los cultivos del cultivo de referencia, entre las que destacan las siguientes:

- Reflectancia o albedo de la superficie follaje-suelo
- Altura del cultivo
- Resistencia del follaje a la transferencia de vapor
- Evaporación del suelo

Se ha dedicado un gran esfuerzo para obtener los coeficientes de cultivo basal de los diferentes cultivos agrícolas en cada etapa fenológica. Existen valores de K_{cb} en función del tiempo reportados para varios cultivos agrícolas. El manual 24 de la FAO (Doorenbos y Pruitt, 1977) o su versión actualizada, conocida como manual 56 (Allen *et al.*, 1998), se han tomado como la fuente estándar de curvas de K_{cb} . En dichos manuales se presentan las curvas para K_{cb} en función del tiempo transcurrido desde la siembra o trasplante. Para cultivos anuales, existe una variación distinguible de acuerdo con la etapa fenológica. La **Figura 5.9** muestra la variación de K_{cb} para las cuatro fases fenológicas (inicial, desarrollo, intermedia, tardía) en las que se puede dividir el ciclo de un cultivo anual bajo condiciones de riego.

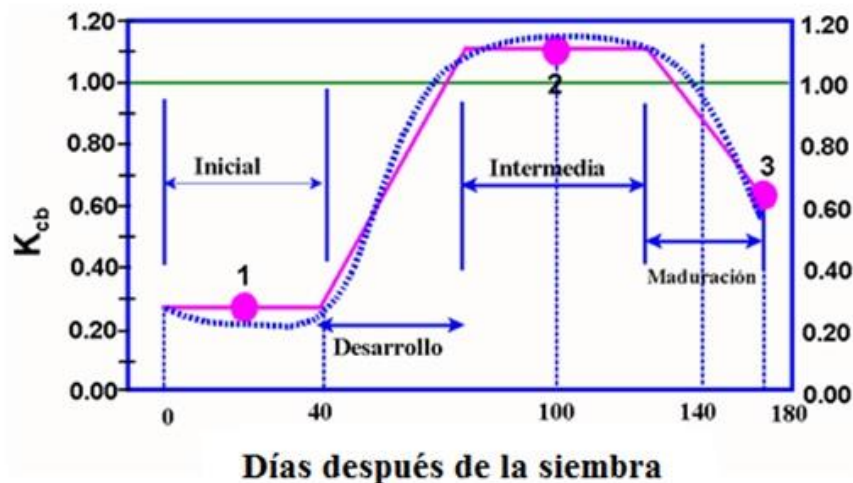


Figura 5.9 Variación del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) en función del ciclo fenológico con la curva real y la curva aproximada por interpolación lineal

Durante la etapa inicial el valor de K_{cb} es bajo. El cultivo empieza a consumir agua hasta que emerge. Sin embargo, desde que se siembra el valor del K_{cb} es mayor que cero ya que considera la evaporación del suelo. El valor de K_{cb} para la etapa inicial depende de la ET_o y del intervalo de riego o lluvia. Para la siguiente fase (intermedia), el valor del K_{cb} refleja la fisiología del cultivo y su área foliar. Cuando el cultivo alcanza cobertura máxima, el valor del K_{cb} es máximo ya que el cultivo está capturando la máxima cantidad de radiación solar. En la etapa final el consumo de agua de los cultivos empieza a disminuir gradualmente hasta llegar a la cosecha, pudiendo llegar a cero dependiendo de la condición final del producto, si es en verde o en seco. Las etapas principales que definen la variación del coeficiente de cultivo son:

- **Inicial.** Desde la germinación hasta el crecimiento temprano, cuando la cobertura vegetal es baja (menor al 10 %).
- **Desarrollo del cultivo.** Desde el final de la etapa inicial hasta que se alcance una cobertura vegetal efectiva del 70-80 %.
- **Intermedia o crítica.** Desde el final de la etapa de desarrollo hasta el inicio de la maduración. En la etapa intermedia se presentan los requerimientos hídricos máximos de los cultivos, con valores mayores o cercanos del cultivo de referencia por lo que $K_{cb} \geq 1$, tal como se muestra en la **Figura 5.10**.

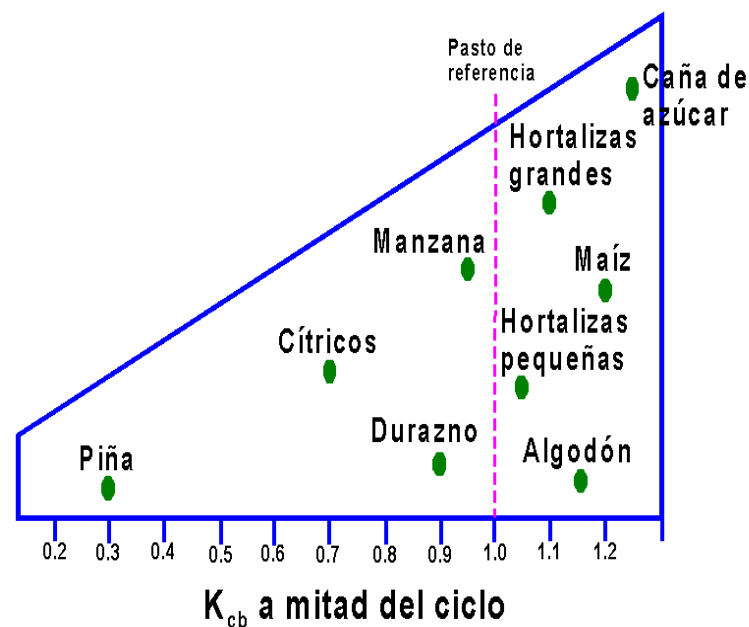


Figura 5.10 Valores típicos de K_{cb} para diferentes cultivos en la etapa de máxima cobertura vegetal (Allen et al., 1998)

- **Tardía o de maduración.** Desde la etapa intermedia hasta la madurez total o cosecha. El valor del coeficiente K_{cb} en la última etapa depende del grado de humedad del producto vegetal a cosechar. Los granos verdes se cosechan cuando la planta todavía está transpirando, mientras que la cosecha de granos secos se realiza cuando la transpiración es prácticamente nula, como se muestra en la **Figura 5.11**. Por ejemplo, el maíz para ensilar tiene un valor de K_{cb} al momento de la cosecha, mayor que el maíz para elote y mucho mayor que el maíz para grano.

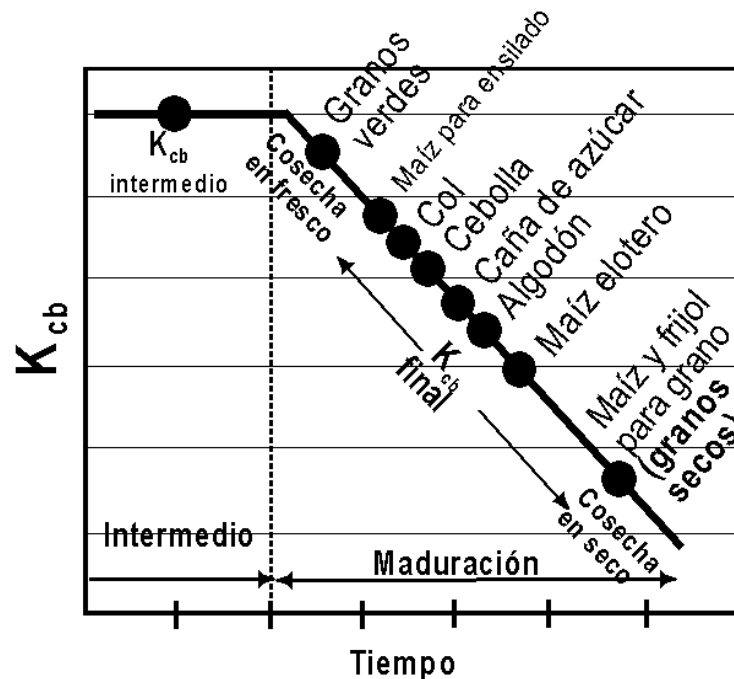


Figura 5.11 Variación cualitativa del coeficiente de cultivo basal para varios cultivos en la última fase fenológica (Allen et al., 1998)

Hasta ahora se han visto los coeficientes de cultivo basales (K_{cb}) típicos bajo condiciones climatológicas estándares que, de acuerdo con Allen et al. (1998), son aquellas con un clima subhúmedo con humedades relativas diurnas de 45 % y con vientos menores a 2 m s^{-1} . Las variaciones del K_{cb} en el periodo de máxima cobertura vegetal bajo condiciones extremas se muestran en la **Figura 5.12.**, donde el extremo derecho representa condiciones de máxima demanda dadas por condiciones de demanda evapotranspirativa extrema (días secos y con vientos), mientras que el izquierdo representa condiciones de demanda mínima (días calmados y húmedos).

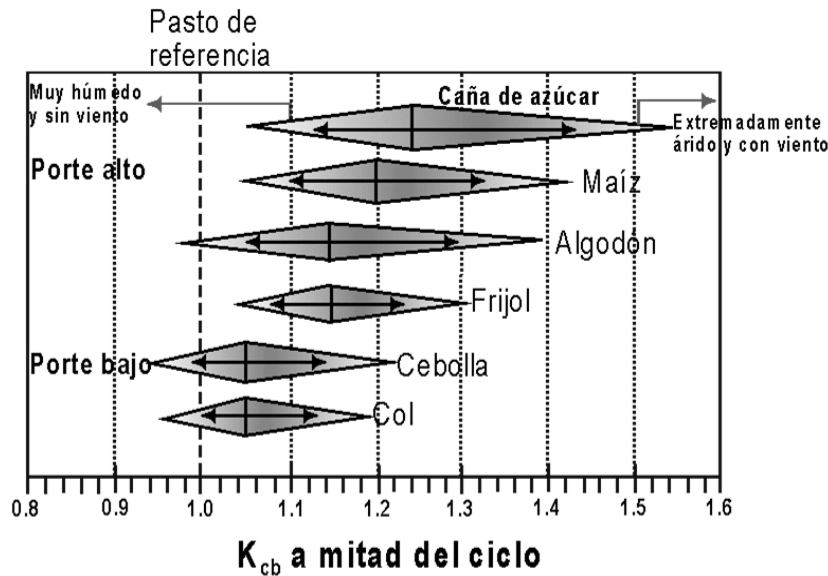


Figura 5.12 Variación del K_{cb} en función de las condiciones climáticas durante la etapa de máxima cobertura vegetal (Allen *et al.*, 1998)

La opción de expresar el coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) en función de los días después de emergencia, trasplante o cualquier otra forma explícita del tiempo, se asocia con varios errores debido a la variabilidad climática entre ciclos agrícolas. Ante estas limitaciones han surgido alternativas como la normalización de los K_{cb} en función del tiempo (Jensen *et al.*, 1990), días grado de crecimiento, unidades termales solares o evapotranspiración de referencia acumulada.

5.4.2 Cálculo del coeficiente de cultivo mediante el método FAO

El método de la FAO para calcular los valores de K_{cb} , consiste en ajustar la curva real (ver **Figura 5.9**) con base en cuatro segmentos de líneas rectas, para lo cual se asume un valor constante para las etapas inicial e intermedia. El método requiere de tres valores de K_{cb} , así como la duración de las cuatro fases para formar la curva de K_{cb} tal como se muestra cualitativamente en la **Figura 5.9** y cuantitativamente en la **Tabla 5.6**. Para la etapa inicial se asume un valor constante del coeficiente basal ($K_{cb,1} = C$) para lo cual Doorenbos y Pruitt (1977) presentaron una gráfica para su estimación; sin embargo, Cuenca (1989) presentó las siguientes ecuaciones para evaluarlo, obtenidas a partir de las curvas de Doorenbos y Pruitt:

$$K_{cb,1} = \{1.286 - 0.27 \ln(I_r)\} e^{(-0.01 - 0.042 \ln(I_r)) ET_o,1}, \quad I_r \leq 4 \text{ días} \quad (5.18)$$

donde I_r es el intervalo de riego o lluvia en días para la etapa inicial y $ET_o J_1$ corresponde al promedio de la evapotranspiración de referencia en mm d^{-1} durante la etapa inicial. Para intervalos de riego mayores de cuatro días la relación es:

$$K_{cb} J_1 = 2(I_r)^{-0.49} e^{(-0.02-0.04 \ln(I_r)) ET_o J_1}, \quad I_r > 4 \text{ días} \quad (5.19)$$

Ejemplo. La frecuencia de riego o lluvia para la primera etapa es de $I_r = 10$ días y se asume una evapotranspiración promedio en la primera etapa de 5.5 mm d^{-1} ; el valor del coeficiente de cultivo usando la **Ecuación (5.19)** es de 0.35. Para la etapa de desarrollo se asume una relación lineal. Para estimar el valor de K_{cb} en el día n (D_n) dentro de la fase i ($K_{cb} J_n$) se puede usar la siguiente ecuación:

$$K_{cb} J_n = K_{cb} J_{i-1} + \frac{D_n (K_{cb} J_i - K_{cb} J_{i-1})}{DF_i} \quad (5.20)$$

donde $K_{cb} J_i$ y $K_{cb} J_{i-1}$ son los valores de K_{cb} al final e inicio de la etapa i bajo interpolación lineal, respectivamente, y DF_i es la duración en días de la fase i .

Para la etapa crítica o intermedia se asume un valor de K_{cb} constante, mientras que para la etapa de maduración se asume una relación lineal de manera similar a la etapa de desarrollo. Los parámetros para estimar el K_{cb} de acuerdo con la metodología de la FAO se encuentran representados en la **Tabla 5.6** para varios cultivos durante el ciclo otoño-invierno en el norte del estado de Sinaloa, México.

Tabla 5.6 Coeficientes de cultivo (K_{cb}) para varios cultivos para la región norte de Sinaloa, México

Fase	Inicial	Desarrollo	Intermedia	Maduración
Algodón				
Duración (días)	30	65	70	75
K_{cb}	0.26	-	1	0.5
Maíz				
Duración (días)	20	70	40	50
K_{cb}	0.3	-	1.1	0.5
Sorgo				
Duración (días)	20	30	25	20
K_{cb}	0.3	-	1	0.55
Trigo				
Duración (días)	15	40	35	40
K_{cb}	0.26	-	1.1	0.45

Ejemplo de cálculos. Determinar los valores de K_{cb} para maíz de grano en los días 24 y 150 en la región de Los Mochis, Sinaloa, durante el ciclo otoño-invierno, de acuerdo con los parámetros de la **Tabla 5.6**:

$$K_{cb}]_{n=24} = K_{cb}]_1 + \frac{D_{24} (K_{cb}]_3 - K_{cb}]_1)}{DF_2} = 0.3 + \frac{4 * (1.1 - 0.3)}{70} = 0.35$$

$$K_{cb}]_{n=150} = K_{cb}]_3 + \frac{D_{150} (K_{cb}]_4 - K_{cb}]_3)}{DF_3} = 1.1 + \frac{20 * (0.5 - 1.1)}{50} = 0.86$$

donde D_{24} corresponde al día 4 de la fase de desarrollo y D_{150} corresponde al día 20 de la fase de maduración.

5.4.3 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo basal (K_{cb})

El coeficiente de cultivo está relacionado con el índice de área foliar. La **Figura 5.13** muestra una sección de 10 m por 1 m de una línea de cultivo y el porcentaje de cobertura en el área de 10 m² es alrededor del 60 %. De esta manera el coeficiente de cultivo será del 60 % del valor máximo del coeficiente de cultivo; si este último se asume igual a 1, el coeficiente de cultivo sería de 0.6. En algunas ocasiones se presentan los coeficientes de cultivo para hortalizas en función del ancho de la cobertura vegetal (A_v) y ancho de la cama (A_c).

$$f_c = \frac{A_v}{A_c} \quad (5.21)$$

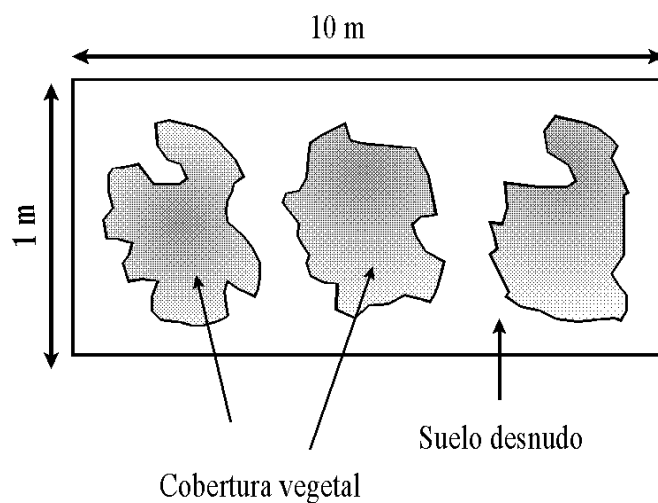


Figura 5.13 Cálculo empírico del coeficiente de cultivo

En la **Tabla 5.7** se presentan algunos coeficientes para la zona de California en función del factor de cobertura f_c .

Tabla 5.7 Coeficientes de cultivo para algunas hortalizas sembradas en el estado de California (EUA) en función del ancho del follaje y ancho de cama (Hanson *et al.*, 1999)

Cultivo	Factor de cobertura (f_c)									
	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
Brócoli	0.20	0.29	0.4	0.48	0.60	0.70	0.78	0.87	0.98	1.02
Cebolla	0.25	0.48	0.61	0.72	0.78	0.83	0.88	0.91	0.92	0.93
Fresa	0.08	0.26	0.34	0.43	0.50	0.59	0.65	0.71		
Lechuga	0.18	0.30	0.38	0.49	0.60	0.70	0.79			

Hanson *et al.*, (1999) presentaron la siguiente ecuación que permite estimar el coeficiente de cultivo en la etapa de desarrollo del cultivo en función del factor de cobertura f_c y de los valores de K_c en las etapas inicial y crítica (intermedia):

$$K_c = K_{c1} + (K_{c2} - K_{c1}) \frac{(f_c - 1)}{6.5} \quad (5.22)$$

donde K_{c1} es el coeficiente de cultivo para la etapa inicial (10 % de cobertura vegetal) y K_{c2} es el coeficiente de cultivo para la etapa crítica (75 % de cobertura vegetal)

Ejemplo. Si se tiene un cultivo de cebolla con un valor de $K_{c1} = 0.18$ y $K_{c2} = 0.93$, calcular el valor de K_c para un factor $f_c = 0.5$.

$$K_c = K_{c1} + (K_{c2} - K_{c1}) \frac{(f_c - 1)}{6.5} = 0.18 + (0.93 - 0.18) \frac{0.5 - 0.1}{6.5} = 0.23$$

5.4.4 Coeficiente de cultivo para frutales jóvenes

Se han propuesto diferentes alternativas para estimar la evapotranspiración de frutales en árboles jóvenes con respecto a los cálculos para árboles maduros usando un factor de corrección basado en el área sombreada.

$$K_{cb}^* = K_{cb} f_s \quad (5.23)$$

donde K_{cb}^* es el coeficiente de cultivo basal para un frutal joven, K_{cb} es el coeficiente de cultivo basal para un frutal maduro y f_s es el porcentaje evapotranspirativo de un árbol joven expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros.

Para estimar el volumen transpirado por un frutal se puede utilizar la relación siguiente:

$$V_n = ET_r A_t = K_{cb} f_s ET_o A_t \quad (5.24)$$

donde ET_r es la evapotranspiración acumulada desde el último riego para un frutal maduro, A_t es el área total cultivada y f_s es el factor de sombreado, dado por la siguiente ecuación:

$$f_s = (f_o - 1) e^{-(f_1 R)^2} + 1 \quad (5.25)$$

donde:

f_o es el valor inicial de la evapotranspiración de un árbol recién plantado con respecto a uno maduro, usualmente entre 0.1 y 0.3

f_1 es un factor de forma de crecimiento del tipo de árbol; un valor de $f_1 = 3$ define la forma de crecimiento de árboles jóvenes de acuerdo con datos experimentales que presentan un valor máximo de sombreado cuando $R > 0.7$.

R es la fracción de sombreado, fracción de la superficie con cobertura vegetal, usualmente calculada como el área sombreada por la planta con respecto al área total de influencia de una planta. La fracción de sombrado R puede estimarse como:

$$R = \frac{A_s}{A_t} \quad (5.26)$$

donde A_s es el área de sombreado de un árbol joven; asumiendo un sombreado circular de diámetro D_s del follaje se tiene:

$$A_s = \pi \frac{D_s^2}{4} \quad (5.27)$$

Para efectos prácticos, el diámetro D_s puede estimarse a partir de la sombra proyectada por el follaje sobre la superficie del suelo al mediodía (entre las 12 y las 13 horas). El área total de un árbol maduro puede estimarse con base en el espaciamiento de los árboles:

$$A_t = S_h S_a \quad (5.28)$$

donde S_h es el espaciamiento entre hileras de árboles y S_a es el espaciamiento entre árboles dentro de las hileras

Ejemplo. Estimar el volumen evapotranspirado de una hectárea de naranjos jóvenes desde el último riego, asumiendo un valor de ET_r para árboles maduros de 10 cm, valores de R de 0.1, $f_o = 0.2$ y $f_1 = 3$.

$$f_s = (f_o - 1) e^{-(f_1 R)^2} + 1 = (0.2 - 1) e^{-(3 \times 0.1)^2} + 1 = 0.2688$$

$$V_n = ET_r A f_s = 0.10 \text{ m}(10000 \text{ m}^2) 0.2688 = 268.85 \text{ m}^3$$

La **Figura 5.14** presenta la forma de la **Ecuación 5.25** para un valor inicial de $f_o = 0.2$ y $f_1 = 3$.

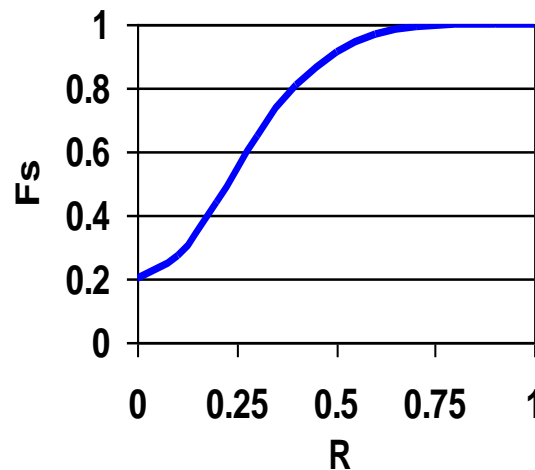


Figura 5.14 Variación del factor evapotranspirativo (f_s) para árboles jóvenes, expresado como un porcentaje de la evapotranspiración de árboles maduros, en función del porcentaje de sombreado (R)

Es común expresar los requerimientos de riego en volumen de agua por unidad de longitud para cultivos en hilera. La siguiente expresión permite estimar el volumen a aplicar por unidad lineal de hilera de cultivo:

$$V_n = \frac{ET_r A}{L_t} f_s \quad (5.29)$$

donde L_t es la longitud total de todas las líneas de cultivo, que usualmente coincide con la longitud de las cintas o laterales regantes.

5.5 Coeficientes de cultivo bajo condiciones no estándares (K_c)

Se han presentado las bases para estimar la evapotranspiración bajo condiciones estándares, esto es, sin problemas de sanidad, humedad y manejo. A continuación se presentan las ecuaciones de los coeficientes requeridos para un cultivo bajo condiciones no estándares. Aunque la estimación precisa del coeficiente de cultivo bajo condiciones no estándares es difícil, existe una ecuación propuesta por Harrington y Heerman (1981), que puede usarse para calcular el valor del coeficiente de cultivo bajo condiciones de humedad no estándares K_c .

$$K_c = K_{cb}K_e + K_v \quad (5.30)$$

donde K_{cb} es el coeficiente basal del cultivo (sin déficit hídrico y de cualquier otra restricción que afecte el crecimiento normal de un cultivo), K_e es el factor de reducción de K_{cb} debido exclusivamente al estrés hídrico o déficit de humedad hídrico, y K_v es un factor evaporativo de ajuste que considera la evaporación de la superficie del suelo después de un evento de riego.

Cuando la humedad aprovechable está cercana al 100 %, las plantas se encuentran con un estrés mínimo ($K_e = 1$). A medida que la humedad aprovechable se aproxima a cero, el estrés de la planta se incrementa y por ende la planta reduce su transpiración potencial y el factor K_e se aproxima a cero. Existen varias propuestas para estimar este factor, como la de Ritchie (1973), quien utilizó una relación lineal para evaluarlo por medio de fracciones, representando la relación entre la humedad aprovechable (HA) y la humedad aprovechable crítica (HA_c), de acuerdo con las siguientes expresiones lineales:

$$K_e = \frac{HA}{HA_c}, \quad \text{sí } HA < HA_c \quad (5.31)$$

$$K_e = 1.0, \quad \text{sí } HA \geq HA_c$$

donde HA_c es el valor crítico de la humedad aprovechable en porcentaje que representa la tolerancia a la sequía del cultivo. Un valor pequeño (25 % - 50 %) implica un cultivo tolerante a la sequía mientras que un valor alto (75 % - 100 %) representa un cultivo sensible a la sequía.

Jensen *et al.* (1970) propusieron otra ecuación logarítmica empírica que relaciona a K_e en función de la humedad aprovechable disponible (HAD) de acuerdo con la siguiente relación:

$$K_e = \frac{\ln(HAD + 1)}{\ln(101)} \quad (5.32)$$

La humedad aprovechable disponible en porcentaje es evaluada de acuerdo con la siguiente expresión:

$$HAD(\%) = 100 \left[1 - \frac{D}{HA} \right] \quad (5.33)$$

donde D es el déficit de humedad actual en L y HA es la humedad aprovechable total en L en la zona radical. Para un suelo estratificado la humedad aprovechable total es evaluada con la siguiente expresión:

$$HA = \sum_{j=1}^n P_j HA_j \quad (5.34)$$

donde n es el número de estratos que conforman la zona radical y P_j es el espesor del estrato j , de manera que la suma de todos los estratos (P_j) debe ser igual a la profundidad radical (P_r). El espesor del último estrato va aumentando para ajustarse a la profundidad radical del día i :

$$P_{r-i} = \sum_{j=1}^n P_j \quad (5.35)$$

Cuando $HAD = 100\%$ se tiene que $K_e = 1$, lo cual indica que el cultivo no se encuentra bajo estrés hídrico. Cuando $HAD = 0\%$ se tiene un factor de estrés hídrico $K_e = 0$, que indica que el cultivo se encuentra totalmente estresado por déficit hídrico. La **Figura 5.15** muestra una representación gráfica de ambos métodos para evaluar K_e ; para la relación lineal se presentan dos valores de HA_c (40 y 80 %).

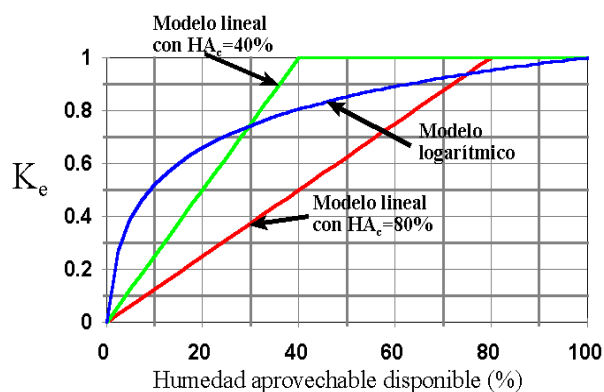


Figura 5.15 Variación del factor de estrés hídrico del suelo (K_e) de acuerdo con dos modelos: lineal y logarítmico

La **Tabla 5.8** muestra los requerimientos de riego estimados para el trigo durante el ciclo otoño - invierno de 1998 a 1999 en el Valle del Carrizo, Sinaloa, asumiendo que no hubo lluvias significativas durante el ciclo. Se observa una alta dependencia de los riegos a la fecha de siembra. La diferencia entre la lámina potencial y la real es que la primera no considera un estrés hídrico (K_e) de los cultivos, mientras que la segunda sí lo considera. La diferencia se debe a las características intrínsecas del riego por gravedad al cambiar el suelo de un alto a un bajo contenido de humedad varias veces durante el ciclo fenológico de un cultivo. Al disminuir el contenido de humedad, también disminuye la evapotranspiración real del cultivo por debajo de la evapotranspiración potencial.

Tabla 5.8 Requerimientos netos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el Valle del Carrizo. L_n es lámina neta parcelaria

Fecha de siembra de trigo	Número de riegos auxilio	Máx. L_n por riego auxilio (mm)	L_n potencial (mm)	L_n real (mm)	Máximo intervalo de riego (días)	Mínimo intervalo de riego (días)
5/11/98	2	67	264	222	56	25
15/11/98	2	66	270	214	57	25
25/11/98	3	67	283	245	57	25
5/12/98	3	65	303	262	54	23
15/12/98	3	65	324	280	55	20
25/12/98	3	71	328	284	53	17
5/1/99	4	65	381	331	50	16

La evaporación del agua del suelo depende de varios factores como:

- Porcentaje de cobertura (sombreado) del cultivo
- Cantidad de humedad disponible en la superficie
- Propiedades hidrodinámicas del estrato superior del suelo
- Capacidad evapotranspirativa de la atmósfera

Una manera empírica de estimar el componente evaporativo del suelo es usar parámetros empíricos relacionados con los factores anteriores. Wright (1982) presentó un procedimiento para estimar el factor evaporativo K_v basado en la siguiente ecuación:

$$K_v = F_m (1 - K_{cb}) \left(1 - \sqrt{\frac{t}{t_d}} \right) \quad (5.36)$$

donde F_m es el factor de mojado que define la fracción de la superficie del suelo mojado por el sistema de riego (ver **Tabla 5.9**), t_d son los días requeridos para secar la superficie del suelo (**Tabla 5.10**), t son los días transcurridos desde el evento de riego o lluvia. La ecuación anterior es válida para $t \leq t_d$, para $t > t_d$, K_v toma un valor de cero.

Tabla 5.9 Factor de mojado (F_m) para diferentes sistemas de riego (Martin *et al.*, 1990)

Sistema de riego	F_m
Lluvia	1
Aspersión	1
Melgas y bordos	1
Surcos Profundos	1
Surcos poco profundos	0.5
Surcos alternos	0.5
Goteo	0.25

Tabla 5.10 Valores típicos de tiempos de secado (t_d) y el factor de persistencia (P_f) para suelos agrícolas (Hill *et al.*, 1983)

Factor	Arcilla	Franco arcilloso	Franco limoso	Franco arenoso	Arena franca	Arena
t_d	10	7	5	4	3	2
P_f	3.89	2.9	2.26	1.92	1.6	1.29

La cantidad de agua evaporada de la superficie húmeda de un suelo (EV_s) para un día t está dada por:

$$EV_s = K_v ET_o \quad (5.37)$$

donde ET_o es la evapotranspiración de referencia para el día t .

Sin embargo, el valor total posible del agua evaporada debe ser menor de la cantidad de lluvia o riego aplicada. Hill *et al.* (1983) presentaron una alternativa para tomar en cuenta esta posibilidad al introducir un factor de persistencia P_f definido en la **Tabla 5.10**. La evaporación total de una superficie húmeda del suelo durante un evento de mojado-secado (EV_t) puede ser estimada con la siguiente ecuación:

$$EV_t = P_f F_m [1 - K_{cb}] ET_o \quad (5.38)$$

donde P_f es un factor de persistencia que representa el efecto acumulado de la evaporación de superficie del suelo húmedo, los valores ET_o y K_{cb} son valores promedio durante el periodo de secado, y el valor máximo posible de EV_t es la cantidad de lluvia o riego aplicado.

Ejemplo. Se tiene un suelo arcilloso regado por surcos alternos. Calcular el valor de K_v para el día 2, con $ET_o = 5 \text{ mm/d}$ y $K_{cb} = 0.5$, después de aplicado el riego.

$$K_v = 0.5(1 - 0.5) \left(1 - \sqrt{\frac{2}{10}} \right) = 0.1382$$

$$EV_s = 0.1382 * 5 = 0.691 \text{ mm / d}$$

La **Figura 5.16** describe el comportamiento del coeficiente de cultivo basal (K_{cb}) relacionado con un manejo de cultivo estándar, mientras que el coeficiente K_c define condiciones más realistas al considerar un manejo del cultivo no estándar.

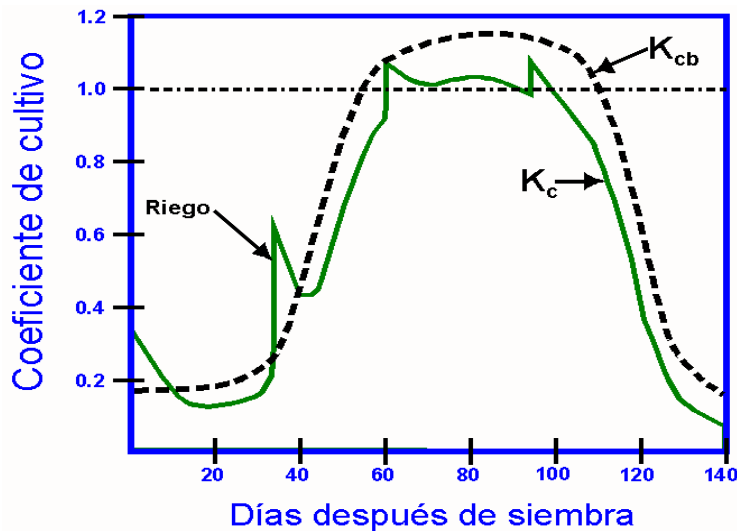


Figura 5.16 Comparación del coeficiente de cultivo bajo condiciones estándares (K_{cb}) y no estándares (K_c)

La **Figura 5.17** muestra la variación de los tres tipos de evapotranspiración. La parte superior muestra la evapotranspiración de referencia (ET_o), la curva intermedia describe la evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándares (ET_c) y finalmente la curva inferior muestra la evapotranspiración real (ET_r) para el cultivo de

maíz, bajo riego por gravedad, sembrado el 17 de octubre de 1996 y cosechado el 27 de febrero con una duración de 134 días.

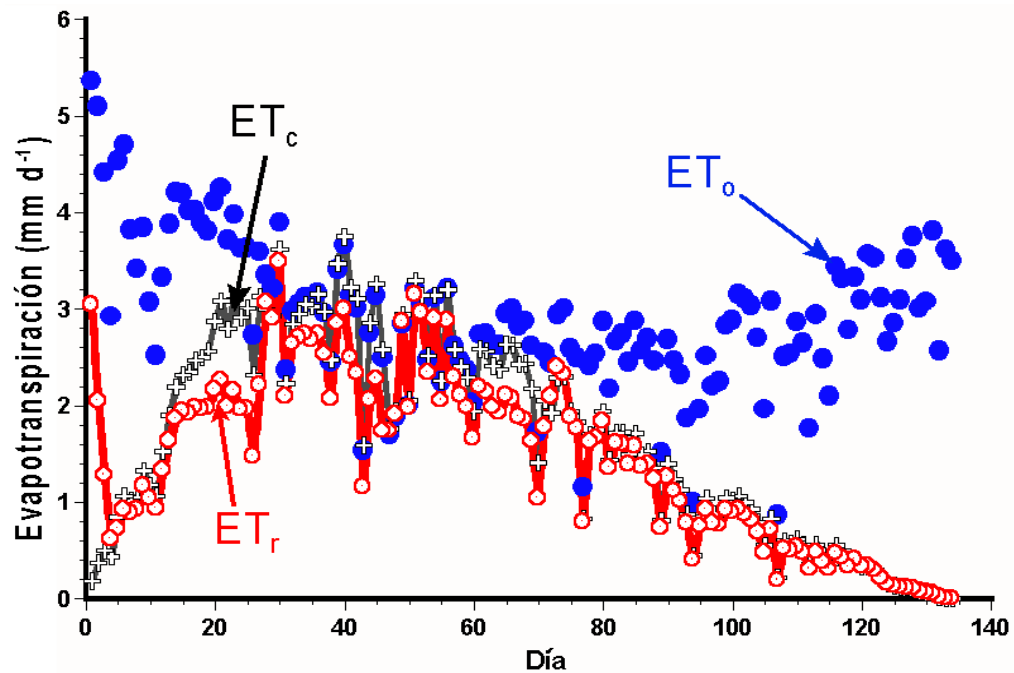


Figura 5.17 Variación de la evapotranspiración en sus tres versiones (referencia, cultivo y real) para el cultivo de maíz otoño-invierno en el Valle del Fuerte, Sinaloa

5.6 Ejemplos

Ejemplo 1. Estimar el coeficiente de un tanque evaporímetro rodeado de cultivos irrigados con las siguientes características: $U_2 = 4 \text{ m s}^{-1}$, $HR_m = 60 \%$, $d = 100 \text{ m}$. Utilizando la Ecuación 5.3 de Allen et al. (1998); para un tanque tipo A rodeado de cultivos irrigados:

$$K_r = 0.108 - 0.0286 (4 \text{ m s}^{-1}) + 0.0422 \ln(100 \text{ m}) + \\ + 0.1434 \ln(60) - 0.000631 (\ln(100 \text{ m}))^2 \ln(60)$$

$$K_r = 0.108 - 0.1144 + 0.194338189 + 0.58712909 - 0.054790477$$

$$K_r = 0.720276714$$

Ejemplo 2. Calcular el calor requerido para evaporar 8.8 milímetros de lámina acumulados es una hectárea, asumiendo un valor del calor latente de vaporización de $\lambda = 2.45 \text{ MJ kg}^{-1}$

$$\text{volumen} = \text{área} * \text{lámina} = 10,000 \text{ m}^2 (0.0088 \text{ m}) = 88 \text{ m}^3$$

$$\text{masa} = \text{volumen} * \text{densidad} = 88 \text{ m}^3 (1000 \text{ Kg m}^{-3}) = 88,000 \text{ Kg}$$

$$\begin{aligned} \text{energía total requerida} &= \text{masa} * \text{calor latente de vaporización} = m \lambda = \\ &= 88,000 \text{ Kg} (2.45 \text{ MJ Kg}^{-1}) = 215,600 \text{ MJ} \end{aligned}$$

$$\text{energía total requerida por m}^2 = \frac{215,600 \text{ MJ}}{10,000 \text{ m}^2} = 21.56 \text{ MJ m}^{-2}$$

“Mundo de lo prometido, agua. Todo es posible en el agua”

Pedro Salinas

**Calendarización
del riego**



6

Capítulo 6

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

6.1 Introducción

La calendarización del riego involucra actividades de planeación y toma de decisiones en las que el administrador u operador de una zona de riego debe involucrarse antes y durante un ciclo agrícola. La información que se debe tener en forma oportuna y completa es el pronóstico de los cambios probables en el contenido de humedad, el pronóstico de la fecha y lámina del próximo riego para cada una de las parcelas, la estimación cuantitativa de los efectos adversos en la calidad y cantidad del rendimiento al posponer o adelantar el riego, y por último los parámetros que permiten evaluar si los objetivos del riego fueron cumplidos después de que fue aplicado (**Figura 6.1**).



Figura 6.1 Componentes de la calendarización del riego

La idea central de la calendarización del riego es estimar cuánto y cuándo aplicar el riego a los cultivos a lo largo de su ciclo fenológico, para lo que se debe tener una metodología que permita determinar el uso consuntivo de los cultivos, los requerimientos estacionales de riego de los cultivos, y la predicción de la tasa

a la cual el contenido de humedad disminuirá en los próximos días sin la aplicación adicional de agua. Con la aparición de sensores confiables, de alta precisión y de lectura rápida, es posible evaluar si los objetivos de la calendarización del riego se cumplieron.

La calendarización del riego, esquemáticamente representada en la **Figura 1.3**, es el proceso de programación de los riegos de un cultivo para reponer el agua del suelo que se ha perdido (consuntivamente), antes de causar daño fisiológico debido al estrés hídrico. El proceso de calendarización del riego es una tarea compleja ya que involucra varios factores: la tasa consuntiva de los cultivos que varía hora a hora, la capacidad de retención y transmisión de agua en los suelos, el tipo y capacidad de los sistemas de suministro del riego y el tipo de sistema de aplicación del riego.

La calendarización del riego depende principalmente de la capacidad extractiva de los cultivos, pero modificada por una gran variedad de factores de manejo. Por ejemplo, una hectárea de cítricos en su máxima demanda requiere alrededor de la mitad de agua de la demandada por una hectárea de alfalfa en su máxima demanda. Algunos cultivos como la papa son muy sensibles al estrés hídrico mientras que otros como el algodón pueden ser estresados en ciertas etapas fisiológicas para mejorar la calidad y cantidad del rendimiento. Láminas de riego pequeñas pueden propiciar eficiencias bajas en riego por gravedad o altas pérdidas por evaporación en riego por aspersión.

Algunas zonas tales como los distritos de riego por gravedad del noroeste de México tienen políticas para el suministro del agua de riego. Por ejemplo, en el distrito de riego del Valle del Carrizo, Sinaloa, México, el agua puede solicitarse durante tres días de la semana (lunes, miércoles y viernes) y es entregada de 48 a 72 horas después de que la solicitud es procesada. Otras veces el calendario de riego tiene que adaptarse a las prácticas de quimigación que cada día son más frecuentes. Algunas veces se tiene que aplicar un riego de presembrado para germinar y eliminar las malas hierbas antes de sembrar.

En terrenos con superficie irregular regados por gravedad, se pueden presentar bajas eficiencias al aplicar láminas de riego pequeñas, por lo que resulta preferible la aplicación de láminas pesadas con el consiguiente incremento de amplitud de los intervalos entre cada riego para aumentar así la eficiencia de aplicación. Muchas veces no se tienen las condiciones de humedad propicias para el buen desarrollo de algunas actividades culturales como la cosecha, labranza, control de heladas, plagas y enfermedades, y aplicación de químicos. Estas prácticas de manejo tienen que ser consideradas durante la calendarización del riego para evitar el estrés hídrico de los cultivos. La calendarización del riego depende de los siguientes factores:

1. Demandas hídricas de los cultivos

- Tipo de cultivo
- Etapa fenológica
- Condiciones climáticas
- Profundidad de las raíces

2. Condiciones de la parcela de riego

- Longitud del surco o melga
- Pendiente
- Capacidad de infiltración del suelo
- Contenido de humedad del suelo
- Distancia a la fuente de agua

3. Sistema de riego

- Capacidades mínimas y máximas del sistema
- Aplicación de agroquímicos
- Intensidad de aplicación
- Capacidad del sistema de suministro

4. Prácticas de manejo

- Germinación de malas hierbas
- Labores de labranza
- Lavado de sales
- Control de erosión
- Modificación del régimen de temperaturas del suelo
- Control de heladas, plagas y enfermedades
- Rompimiento de costras
- Control de la calidad y cantidad del rendimiento

5. Factores humanos

- Sistema administrativo de distribución del agua
- Demandas de energía bajas
- Días de descanso o festivos

6. Efectos del clima

- Vientos de alta velocidad

- Temperaturas frías
- Lluvia
- Heladas
- Ciclones

7. Características fisicoquímicas de los insumos

- Conductividad eléctrica
- PH
- Sólidos disueltos

El éxito de la implantación de un programa de calendarización del riego depende de la información disponible sobre la zona de riego de interés. Salazar *et al.* (1987) indicaron que el éxito de un programa de calendarización de riego se debió a los pasos seguidos en su implantación:

- Entrevistas con los agricultores para conocer y documentar prácticas de manejo y producción.
- Inventario de los suelos, cultivos, fuentes de agua, etc.
- Evaluación de los sistemas de riego en relación con su capacidad, uniformidad, eficiencia potencial, edad, flexibilidad, costos de operación y problemas potenciales.
- Calendarización del riego usando un sistema informático basado en el método del balance hídrico, con verificación en campo del calendario calculado usando métodos vegetales visuales, tacto, y tensiómetros. Los calendarios son actualizados una o dos veces por semana dependiendo del cultivo y tipo de servicio contratado. Los agricultores pueden conectarse a la computadora de la compañía consultora para obtener información sobre las fechas, tiempos y campos a regar.
- Realizar un seguimiento del desarrollo de los cultivos, patrones de riegos y suelos usando fotografías aéreas, infrarrojas y a color. Las observaciones hechas son usadas para determinar puntos de muestreo, identificar problemas en los sistemas y afinar prácticas de manejo.
- Resumir y discutir el programa de calendarización propuesto con el agricultor varias veces durante y después del ciclo agrícola. Al final del ciclo se comparan los resultados obtenidos en aquellas parcelas cuyos riegos fueron calendarizados científicamente, respecto de aquellos obtenidos en los

campos sin seguimiento. Se hacen recomendaciones para mejorar la programación del riego en el siguiente ciclo.

Aunque existen varios métodos para calendarizar el riego en forma racional, en esta sección se discutirá con detalle el método del balance hídrico. Dicho método es usado extensivamente en varias partes del mundo para calendarizar el riego en grandes zonas de riego con buenos resultados.

6.2 Método del balance hídrico

Los agricultores siempre han estado en busca de una receta mágica que les permita predecir el contenido de humedad del suelo sin la necesidad de un muestreo intensivo. Lo anterior es posible si se realiza un balance riguroso de los componentes relacionados con el cambio en el contenido de humedad. Tradicionalmente los sistemas se han operado con base en el contenido de humedad presente en el suelo, de tal manera que la calendarización del riego se concentra en entender y realizar un balance de humedad en la zona de raíces.

El contenido de humedad del suelo puede ser determinado en un intervalo, que suele ser de un día, usando la siguiente ecuación de balance de humedad que es una aplicación de la ley de conservación de materia y que establece que la materia no puede ser creada o destruida, solo cambia de estado o posición:

$$\Delta V = V_{entra} - V_{sale} \quad (6.1)$$

donde ΔV es el cambio en el volumen de agua almacenada en la zona de las raíces.

Si el volumen de entrada es mayor al de salida, el valor de ΔV es positivo, por lo que hay ganancia; en caso contrario, hay pérdidas de humedad en la zona radical. Si se asume un volumen con área unitaria, se pueden describir los cambios de volumen en forma unidimensional. Al tomar en cuenta cada uno de los componentes de las entradas y salidas potenciales de la zona de las raíces y despreciando el escurrimiento subsuperficial, en términos unidimensionales, se tiene:

$$\Delta H = \text{entradas} - \text{salidas} = (P + R + A_c) - (ET + PP + E_s) \quad (6.2)$$

donde ΔH es el cambio de humedad en términos de lámina de riego, P la precipitación, R el riego aplicado, A_c el ascenso capilar del manto freático a la zona de raíces, ET la evapotranspiración de los cultivos, PP la percolación, E_s el

escurrimiento superficial y E_{ss} es el escurrimiento subsuperficial. La **Figura 6.2** muestra gráficamente cada uno de los componentes que intervienen en el balance del agua en la zona de raíces.

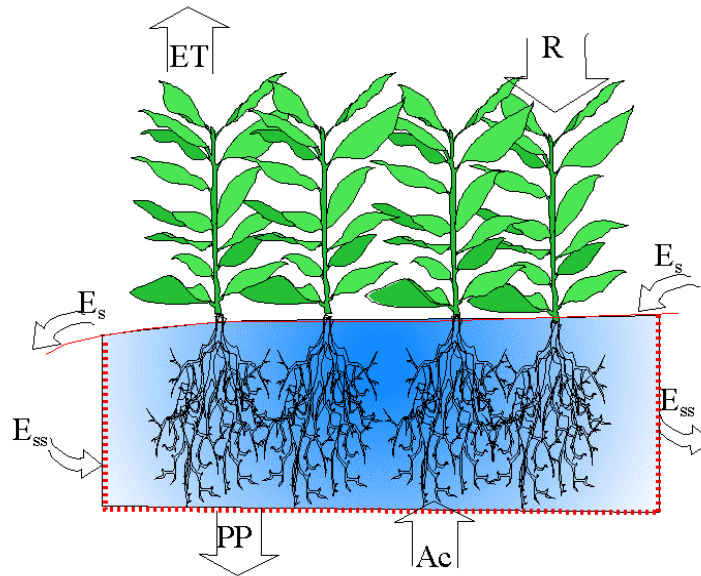


Figura 6.2 Componentes que intervienen en el balance de agua en la zona de raíces

Por simplicidad, en grandes zonas de riego con mantos freáticos profundos se deprecia el escurrimiento superficial y el ascenso capilar. Para poder usar el método del balance hídrico en la calendarización del riego, primero se define el intervalo, que puede ser horario, diario, mensual, etc. Si el cambio en el contenido de humedad ΔH , en términos de lámina, es determinado con intervalos diarios, su valor puede estimarse como la diferencia entre los contenidos de humedad al final de los días $i-1$ y i , (H_{i-1} y H_i):

$$\Delta H = H_i - H_{i-1} \quad (6.3)$$

De esta manera, para predecir el contenido de humedad al final del día i (H_i), expresado en lámina, se usa la siguiente ecuación:

$$H_i = H_{i-1} + P_{e-i} + R_i - ET_i - PP_i \quad (6.4)$$

donde P_{e-i} es la precipitación efectiva en mm que ocurrió en el día i , R_i es el riego aplicado (mm) en el día i , ET_i es la evapotranspiración del cultivo (mm) para el día i , PP_i es la cantidad de agua en mm que se percola fuera de la zona de raíces durante

el día i . Para expresar el contenido de humedad de lámina a humedad volumétrica se requiere conocer la profundidad radical (ver sección 3.1.10).

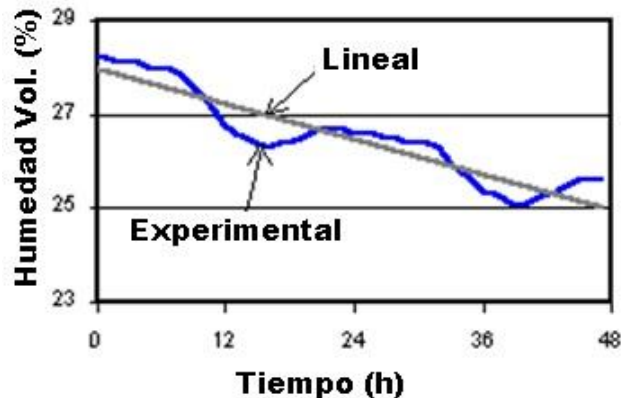


Figura 6.3 Variación horaria de la humedad en el estrato superior de un suelo cultivado

La ecuación de balance asume que los cambios de humedad son lineales para el periodo de análisis i , sin embargo, en la realidad los cambios son no lineales como se puede ver en la **Figura 6.3**, que muestra el contenido de humedad (θ_v) en el estrato superior de 30 cm por un periodo de dos días (48 h). Se observa una alta variabilidad del contenido de humedad en el estrato superior. Por la mañana existe un movimiento ascendente de humedad proveniente de los estratos inferiores, mientras que al mediodía existe un decremento de humedad en el estrato superior producido por la alta demanda evapotranspirativa atmosférica y la limitada capacidad del suelo para suministrar humedad de estratos superiores. Los agricultores llaman a este fenómeno “revenimiento del suelo”, y evitan realizar algunas labores culturales con maquinaria muy temprano o muy tarde (Hernández, 2001). Para propósitos prácticos, la aproximación lineal del contenido de humedad produce una calendarización del riego consistente y precisa.

La mayoría de los paquetes computacionales desarrollados para calendarizar el riego usan la **Ecuación 6.4**. Parten de un valor del contenido de humedad inicial (H_i), medido directamente en el terreno o estimado, y actualizan el contenido al finalizar cada intervalo, generalmente diario, usando valores o estimaciones de la precipitación, riego, evapotranspiración, y percolación que ocurrieron en dicho intervalo. Los riegos se calendarizan para cuando el déficit de humedad disminuye a un valor crítico (H_c) previamente definido según el tipo de cultivo y suelo.

Para poder aplicar la ecuación del balance hídrico se requiere tener las estimaciones de algunos parámetros del suelo específicos de cada sitio. La mayoría de estos parámetros deben estimarse en el campo o en el laboratorio. Algunos pueden estimarse indirectamente usando parámetros básicos del suelo. La exactitud del método del balance hídrico depende de la magnitud de los siguientes errores potenciales:

- Limitaciones en la metodología para evaluar la evapotranspiración real del cultivo: ecuaciones para predecir ET_0 inexactas, coeficientes de cultivo y desarrollo radical inexactos, etc.
- Errores en la instrumentación meteorológica
- Heterogeneidad en la lluvia en el cultivo bajo análisis
- Inexactitud en la medición de la lluvia y riego aplicado
- Problemas para estimar la lluvia efectiva
- Errores en la estimación del valor inicial del contenido de humedad (H_0)

En un lisímetro, la evapotranspiración puede ser estimada realizando muestreos frecuentes de la humedad del suelo y reescribiendo la **Ecuación 6.4** de la siguiente manera:

$$ET_i = P_{e-i} + R_i - PP_i - (H_i - H_{i-1}) \quad (6.5)$$

Otra alternativa para calendarizar el riego es usar el déficit de humedad (D_i) como indicador de riego. El déficit de humedad se define como la lámina de riego requerida para alcanzar el nivel de humedad deseable, usualmente dada por el contenido a capacidad de campo. Realizando un balance de humedad en la zona radical, es posible estimar el déficit de humedad actual (D_i) al final de un periodo i si se conocen la magnitud de los flujos que ocurren en la frontera de la zona radical durante el periodo.

$$D_i = D_{i-1} + (ET_i + PP_i - P_{e-i} - R_i) \quad (6.6)$$

donde D_{i-1} es el déficit de humedad al final del periodo $i - 1$.

El riego se aplica cuando el déficit actual sea igual al déficit crítico:

$$D_i \approx D_{c-i} \leq DT_i \quad (6.7)$$

donde DT es el déficit de humedad total o humedad aprovechable en la zona radical para el periodo i .

El déficit crítico (D_{c-i}) para el periodo i se define como el límite a partir del cual el rendimiento es afectado por la ocurrencia de estrés hídrico. Dicho valor es dinámico durante el ciclo fenológico del cultivo y puede ser estimado con la siguiente relación:

$$D_{c-i} = f_i DT_i \quad (6.8)$$

donde f_i es el factor del máximo abatimiento hídrico permisible para el día i que depende principalmente del tipo y etapa fenológica del cultivo (ver Capítulo 3).

Un día es usualmente el periodo usado para realizar los cálculos asociados al método del balance hídrico. La **Figura 6.4** muestra la variación diaria típica del déficit actual (D_i) a lo largo del ciclo fenológico para el cultivo de papa regado por gravedad. Se muestran como referencia los valores del déficit crítico (D_c). El riego es aplicado cuando el valor de D_i se aproxima a D_c . Los valores de D_c varían dependiendo de los valores del factor de abatimiento (f) y profundidad radical.

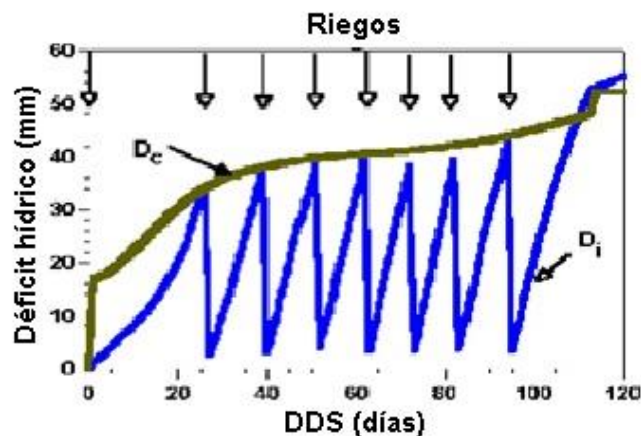


Figura 6.4 Variación del déficit de humedad durante el ciclo fenológico del cultivo en días después de siembra (DDS)

Uno de los problemas en calendarizar el riego usando el método del balance hídrico es la disponibilidad de los coeficientes de calendarización (profundidad radical, factor de abatimiento y coeficiente de cultivo) que definen la zona extractiva de la zona radical, la sensibilidad al estrés y la capacidad evapotranspirativa de los cultivos.

A continuación se discute en detalle cada uno de los términos asociados con los cálculos para realizar la calendarización del riego usando el método del balance hídrico.

6.3 Profundidad de raíces (P_r)

La extracción de agua por las raíces es crítica para el desarrollo de un cultivo. El flujo extractivo de las raíces responde al flujo transpirativo de las hojas. Ante una disminución en la reserva hídrica del suelo, los estomas se cierran, lo que puede afectar irreversiblemente el desarrollo normal de un cultivo y finalmente resultar en una disminución de su rendimiento. Varios factores condicionan la distribución radical de un cultivo, entre los que destacan los siguientes:

- Tipo de cultivo
- Condiciones hídricas del suelo (patrón de mojado y contenido de humedad)
- Compactación del suelo
- Textura del suelo
- Temperaturas extremas en el suelo
- Suministro limitado de oxígeno
- Densidad de siembra
- Estado sanitario del cultivo
- Alto contenido de aluminio por bajo pH
- Baja fertilidad del suelo
- Presencia de materiales fitotóxicos bajo condiciones anaeróbicas

Las plantas extraen el agua que se encuentra en el área de influencia de las raíces, principalmente por los pelos radicales (**Figura 6.5**). Las plantas con un sistema radical denso, como los pastos, pueden absorber la mayor parte de la humedad disponible, mientras que los cultivos con limitada densidad radical, como las hortalizas, dependen en su mayor parte de las propiedades hidrodinámicas del suelo para transportar agua de la zona de oferta a la zona de demanda.

El uso del método del balance hídrico requiere conocer la profundidad radical dinámica. El objetivo del riego es mantener la zona radical en condiciones óptimas de humedad. A medida que la planta se desarrolla, la zona radical también crece hasta alcanzar un tamaño máximo. Típicamente la zona radical se extiende tanto lateral como verticalmente. El desarrollo radical se restringe por factores ambientales, fisiológicos y genéticos como la invasión de zonas radicales vecinas,

la presencia de zonas compactadas, ensalitradas,⁵ anegadas, ácidas o alcalinas, anaeróbicas e inhibitorias del crecimiento.



Figura 6.5 Componentes que intervienen en la extracción de agua realizada por las raíces

La profundidad de la zona radical debe ser determinada en el campo para los cultivos de interés con alto grado de confiabilidad. A falta de estos datos, existen varias tablas de datos publicadas para la mayoría de los cultivos comerciales, aunque pueden ser difíciles de extrapolar a condiciones particulares ya que estas condiciones pueden ser completamente diferentes a las consideradas para obtener los valores de las tablas.

Una planta anual puede desarrollar un sistema radical denso de varios metros por cm^3 de suelo para explorar el suelo en busca de humedad. La **Tabla 6.1** muestra que el diámetro de las raíces de trigo y cebada varían de 0.05 cm para la raíz principal y de 0.001 cm para los pelos radicales, con una densidad de 1 cm de raíces principales y de 1 000 cm de pelos radicales por cm^3 de suelo (Wild, 1993). Esa extensa red de absorción debe suministrar continuamente agua y sales a la planta en un medio escaso, diluido, y en competencia con otros organismos del suelo. La densidad de raíces, la longitud efectiva de raíces por unidad de volumen, es uno de los principales factores relacionados con la tasa de absorción de agua por medio de las raíces.

El balance de humedad tiene que realizarse dentro de la sección de control dada por el volumen de raíces, por lo que se debe tener un estimador del

⁵ En México se usa el término ensalitramiento para indicar que el suelo ha sufrido un proceso de degradación inducida por acumulación de sales disueltas en el agua de riego.

crecimiento dinámico de la zona radical. A medida que las raíces crecen también crece la sección de control. Típicamente se asume que las raíces de cultivos anuales inician su desarrollo después de la siembra a una profundidad un poco mayor a la profundidad de siembra o trasplante. Durante la germinación los requerimientos de riego son bajos y utilizados en generar la humedad óptima alrededor de la semilla.

Tabla 6.1 Densidad radical de cebada y trigo para diferentes tipos de raíces (Wild, 1993)

Diámetro	Eje principal 0.05	Lateral de 2º orden 0.02	Lateral de 3º orden 0.01	Pelos radicales 0.001
Núm. de raíces del siguiente nivel superior por cm	-	2	1	1 000
Longitud de raíces (cm) por cm ³ de suelo	1	5	2	1 000

La profundidad de la sección de control está delimitada por la profundidad efectiva radical que puede tomarse como la profundidad donde se tiene el 90 % del sistema radical, que corresponde al 75 % del total de la profundidad máxima y donde se absorbe alrededor de 90 % de la humedad del suelo. **La Figura 6.6** indica que el 40 % de la absorción de agua por las raíces se presenta en la cuarta parte superior de la zona radical.

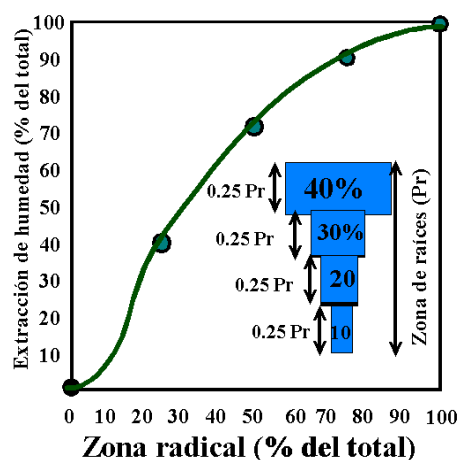


Figura 6.6 Patrón típico de extracción de humedad realizada por las raíces

Se puede asumir que la profundidad radical aumenta linealmente hasta alcanzar una profundidad máxima con un volumen de exploración más o menos constante. La mayoría de los modelos de crecimiento de raíces asumen un crecimiento lineal que inicia a la profundidad de siembra y termina a una profundidad máxima donde se presenta la mayor parte de la absorción del agua por las raíces. La **Figura 6.7** ilustra el crecimiento radical lineal a lo largo del ciclo fenológico usado en el cultivo de papa en el Valle de San Luis del estado de Colorado, EE.UU. (Salazar *et al.*, 1996).

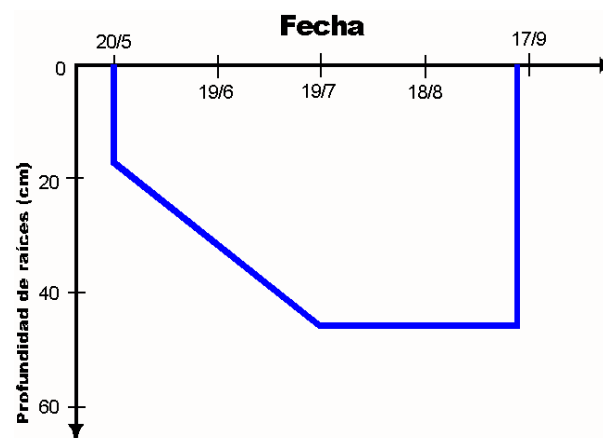


Figura 6.7 Crecimiento radical lineal de la papa

Fereres *et al.* (1981) propusieron el siguiente modelo lineal para estimar la profundidad radical:

$$P_r = P_o + (P_{max} - P_o) \frac{t}{t_{max}} \quad (6.9)$$

$$P_r = P_{max}, \quad t > t_{max}$$

donde t es el tiempo después de siembra (T), t_{max} es el tiempo en llegar a la profundidad radical máxima (T), P_{max} es la profundidad máxima radical (L) y P_o es la profundidad de siembra (L).

La relación t/t_{max} define el desarrollo vegetativo (D_v) de un cultivo en el rango 0 a 1. Cuando D_v es máximo se ha alcanzado la máxima profundidad. Otros modelos algebraicos describen el comportamiento de la profundidad radical en función de parámetros generalmente empíricos. Palacios y Martínez (1978) propusieron el siguiente modelo para estimar la profundidad radical dinámica (P_r):

$$P_r = \frac{t/t_{max}}{W + (1-W) t/t_{max}} P_{max} \quad (6.10)$$

$$P_r = P_{max}, \quad t > t_{max}$$

donde W es un parámetro que depende del tipo de crecimiento radical del cultivo.

Un valor W de cero indicaría un valor constante y un valor de uno indicaría una relación lineal, $P_r = D_v P_{max}$. La **Figura 6.8** describe la variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo (D_v) para cuatro valores de W (0.1, 0.5, 1 y 2).

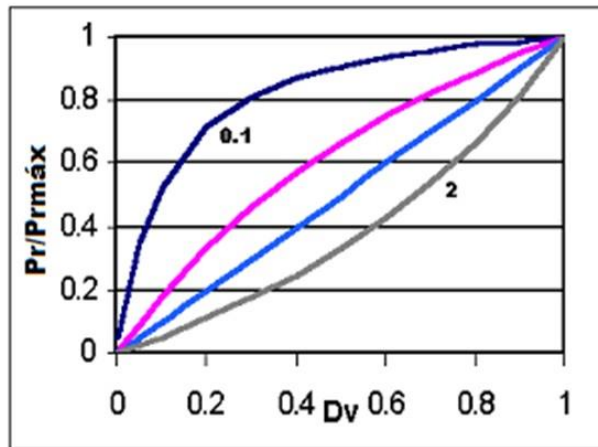


Figura 6.8 Variación de la profundidad radical relativa en función del desarrollo vegetativo para cuatro valores (0.1, 0.5, 1 y 2) del parámetro W de la ecuación (6.10)

El siguiente modelo lineal permite estimar la profundidad radical dinámica (P_r) usando una estimación del coeficiente de cultivo (K_c):

$$P_r = P_{min} + (P_{max} - P_{min}) \frac{K_c(t)}{K_{max}} \quad \text{para } t \leq t(K_m) \quad (6.11)$$

$$P_r = P_{min}, \quad \text{para } t \geq t(K_m)$$

donde P_{min} es la profundidad radical mínima o de siembra, P_{max} es la profundidad radical máxima, $K_c(t)$ es el valor del coeficiente de cultivo a un tiempo t y K_{max} es el valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c).

Un modelo más complejo para estimar la profundidad radical fue propuesto por Hanks y Hill (1980):

$$P_r = \frac{P_o + (P_{\max} - P_o)}{1 - \exp\left[\alpha_o - \alpha_1 \left(\frac{t}{t_{\max}}\right)\right]}, \text{ para } t \leq t_{\max} \tag{6.12}$$

$$P_r = P_{\min}, \text{ para } t > t_{\max}$$

donde α_o y α_1 son parámetros empíricos obtenidos por regresión.

Una de las prácticas más comunes en algunas regiones agrícolas es retrasar el riego para forzar la penetración de raíces y desarrollar un sistema radical profundo. La **Figura 6.9** muestra la densidad radical en función de la profundidad y el intervalo de riego para varios cultivos.

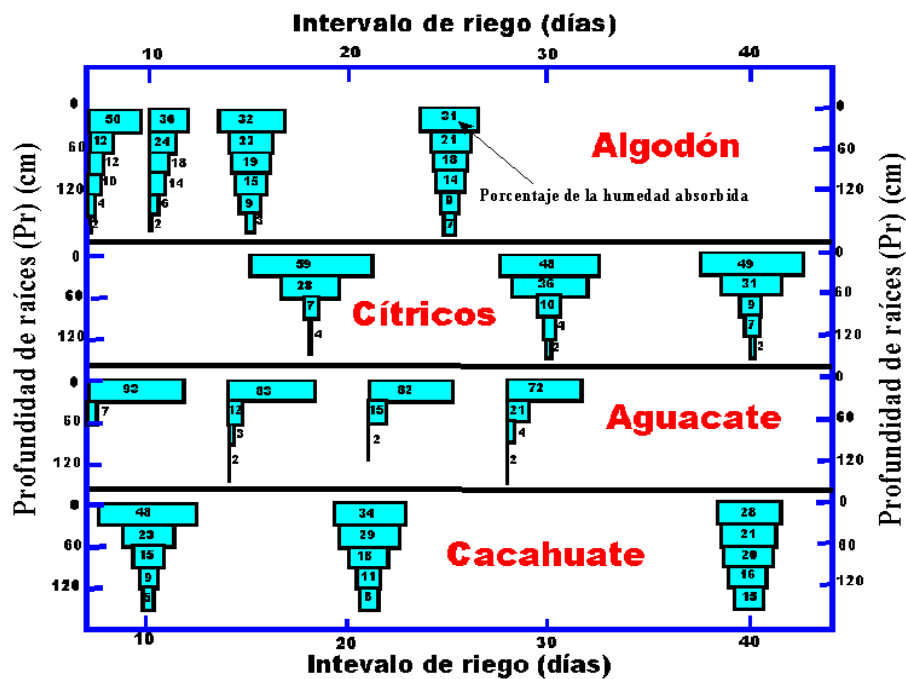


Figura 6.9 Desarrollo radical en función de la frecuencia de riego (Lomas y Levin, 1978)

Se observa una marcada disminución en la densidad radical en el estrato superior a expensas del crecimiento radical en estratos profundos a medida que el intervalo de riego se incrementa, lo que indica que el cultivo genera biomasa radical

a expensas del rendimiento localizado en otros órganos vegetales. Borg y Grimes (1986) propusieron el siguiente modelo para estimar la profundidad radical:

$$P_r = P_{\max} (0.511 + 0.511 \operatorname{sen}_{rad} (3.03 \frac{t}{t_{\max}} - 1.47)), t \leq t_{\max} \quad (6.13)$$

$$P_r = P_{\max}, \quad t > t_{\max}$$

La forma y el tamaño de la zona radical son dinámicos en tiempo y espacio dependiendo de la especie y etapa fenológica, sin embargo, su desarrollo típico puede ser afectado por las condiciones físico-químicas de la zona radical. La **Tabla 6.2** muestra las profundidades de raíces efectivas de los principales cultivos, donde se presenta del 80-90 % de la extracción del agua. La profundidad de exploración efectiva de las raíces es una característica de cada especie cuando las condiciones de porosidad, humedad y nutricionales no son limitantes.

Cultivos particulares como la alfalfa y caña de azúcar mantienen un sistema de raíces casi constante por varios ciclos. Otros cultivos como la lechuga y papa desarrollan sistemas radicales someros concentrados en los 50 cm superiores. Especies como el cilantro, perejil, espinacas y cebollas concentran sus raíces en los 30 cm superiores. En cuanto a la forma, también existe una variación entre especies. Las raíces de las cucurbitáceas, por ejemplo, se pueden extender lateralmente hasta distancias de 2 m, mientras que en el espárrago las raíces se extienden hasta profundidades de 2 m, pero con poco desarrollo lateral. A mayor profundidad de raíces mayor es el volumen de exploración y por lo tanto mayor es la capacidad de sobrevivir en periodos de sequía.

Tabla 6.2 Profundidad efectiva aproximada de los principales cultivos agrícolas (FAO, 1990)

Cultivos de raíces poco profundas (30-60 cm)	Crucíferas (repollo, coliflor, etc.), apio, lechuga, cebolla, papa, espinaca y otras hortalizas, excepto remolachas, zanahoria, y calabaza
Cultivos de raíces de profundidad media (50-100 cm)	Plátano, frijol, remolachas, zanahorias, trébol, cacao, calabaza, cacahuate, palmeras, arvejas o guisantes, pimientos, soya, remolacha azucarera, girasol, tabaco, tomates
Cultivos de raíces profundas (90-150 cm)	Alfalfa, cebada, cítricos, algodón, dátiles, frutales de hojas caducas, lino, vid, maíz, melón, avena, olivo, cártamo, sorgo, caña de azúcar, trigo

La **Tabla 6.3** muestra la máxima penetración de las raíces de varios cultivos de acuerdo con la textura del suelo. Esta tabla es solo un indicador de la profundidad máxima de las raíces en función de la textura y no pretende sustituir los valores presentes en el campo.

Tabla 6.3 Profundidad efectiva de exploración de las raíces (cm) de acuerdo con la textura del suelo (Palacios, 1998)

Cultivo	Textura		
	Ligera	Media	Pesada
Algodón	120	90	78
Cacahuete	80	60	50
Calabazas	100	75	60
Cebada	100	75	60
Cebolla	50	40	35
Col	90	60	50
Espárrago	250	170	130
Fresa	110	85	70
Frijol	100	75	60
Jitomate	110	85	70
Lechuga	50	40	30
Maíz	120	90	75
Melón	130	100	70
Papa	120	90	75
Pepino	90	60	50
Sorgo	100	75	60
Soya	100	75	60
Tabaco	120	90	75
Trigo	100	75	60
Alfalfa	250	180	150
Caña de azúcar	110	85	70
Cítricos	180	140	110
Frutales (caducos)	240	180	160
Frutales (perennes)	260	200	170
Nogal	300	250	220
Pastos	110	80	65
Vid	120	90	75

Existen varios criterios para determinar la profundidad radical efectiva para un determinado suelo. El criterio común es usar el impedimento mecánico del suelo

para el crecimiento de las raíces. Estudios realizados por varios investigadores indican que, para varias especies vegetales cultivadas, la penetración de raíces en los suelos se detiene cuando los valores de resistencia de los suelos al penetrómetro es de 20 a 30 bar, lo cual da una idea de la profundidad del suelo explorable cuando se dispone de este tipo de información.

En el campo, la presencia de lecho rocoso, capas endurecidas de tepetate o la discontinuidad en la presencia de raíces también pueden ser indicadores de la profundidad del suelo. El crecimiento de raíces también puede verse impedido por mantos freáticos elevados, por estratos de suelo compactos y saturados de humedad o por estratos de arena gruesa o grava.

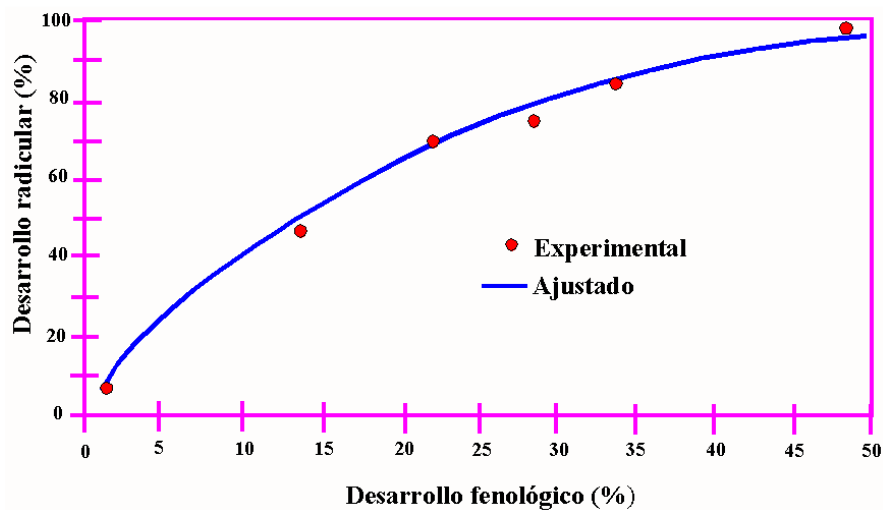


Figura 6.10 Desarrollo radical en función del porcentaje de desarrollo para el maíz

La **Figura 6.10** ejemplifica datos de la profundidad dinámica en función del porcentaje de desarrollo para un cultivo (maíz) obtenidos experimentalmente en El Carrizo, Sinaloa, México. Se observa que a mitad del ciclo se alcanza la profundidad máxima de crecimiento radical. La **Figura 6.11** muestra las diferentes etapas en la germinación de una planta dicotiledónea.

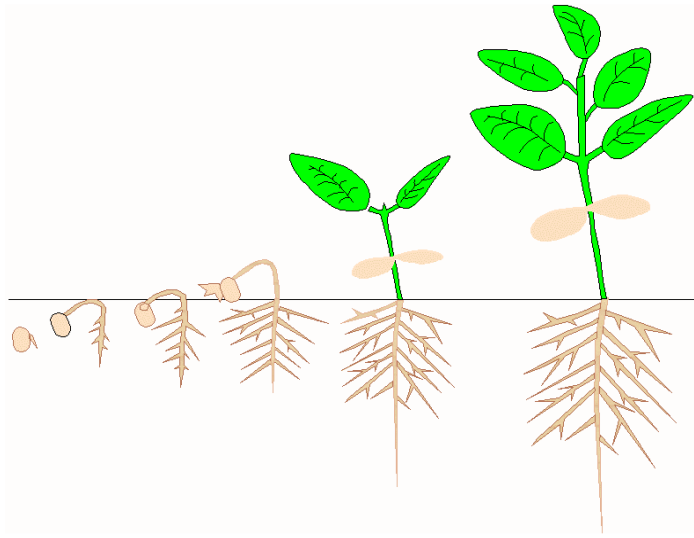


Figura 6.11 Estados en la emergencia de una planta dicotiledónea (Merva, 1995)

La presencia de un estrato endurecido o un suelo poco profundo afecta radicalmente el desarrollo potencial de las raíces. La profundidad máxima del suelo (Pr_{max}) es la profundidad de material poroso favorable para la penetración de las raíces. Los suelos favorables para la producción agrícola son profundos, con buen drenaje, textura y estructura. La profundidad máxima de raíces (P_{max}) puede ser limitada por barreras físicas o químicas, así como por la presencia de mantos freáticos someros. La **Tabla 6.4** muestra la productividad del suelo en función de su profundidad de acuerdo con el Potash y Phosphate Institute (1994).

Tabla 6.4 Influencia de la profundidad máxima del suelo en la productividad (PPI, 1994)

Profundidad del suelo utilizable por las raíces (cm)	Productividad relativa (%)
30	35
60	60
90	75
120	85
150	95
180	100

Como la capacidad de retención de agua de los suelos es variable dependiendo del tipo de suelo, es necesario realizar el balance de humedad por estratos.

6.4 Precipitación efectiva (P_e)

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación que se almacena en la zona de raíces; no incluye el agua percolada, interceptada, escurrida o evaporada que al precipitarse no se acumula en la zona radical. Su estimación ha estado sujeta a una diversidad de estudios, sin embargo, debido a la complejidad en su estimación, solo han sido de utilidad algunas relaciones empíricas, la mayoría válidas para periodos de un mes y de poca utilidad para periodos cortos o eventos de precipitación.

La estimación en campo de la precipitación efectiva es difícil por las prácticas cambiantes de manejo y por los costos en estimar el contenido de humedad (antes y después de una lluvia), la intensidad y duración de la lluvia, la velocidad de infiltración, y las características superficiales del suelo. Cahoon *et al.* (1990) encontraron que lluvias menores de 5.1 mm resultaron inefectivas en reducir el déficit de humedad del suelo después de analizar datos de varios años del estado de Arkansas.

Una calendarización de riego óptima debe considerar la posible lluvia con alta probabilidad de presentarse durante el intervalo de riego posterior al riego. En este caso no es necesario llevar el suelo a capacidad de campo sino a un valor menor que considere la lámina de riego suministrable por la posible lluvia. La ecuación general para evaluar la precipitación efectiva tiene la forma siguiente:

$$P_e = K_p P \quad (6.14)$$

donde K_p es un factor de ajuste y P es la precipitación observada.

Ogrosky y Mockus (1964) presentaron un método de estimación del coeficiente K_p para evaluar la precipitación efectiva con la siguiente forma:

$$\frac{1}{K_p} = 1.53 \frac{P}{ET_r} + 0.8 \quad (6.15)$$

donde P es la precipitación observada (L) y ET_r es la evapotranspiración real acumulada (L) desde el último evento de precipitación o riego.

Ejemplo. Si se tiene que la evapotranspiración real de un cultivo desde la última precipitación es de 30 mm y la precipitación observada es de 10 mm, el factor K_p es de 0.763 y $P_e = 7.63$ mm.

Existen otras formas para evaluar la precipitación efectiva:

$$P_e = K_1 + K_2 P \quad (6.16)$$

donde P es la precipitación observada, y K_1 y K_2 son coeficientes que dependen de la magnitud de la lluvia. Por ejemplo, para climas áridos y subhúmedos se recomiendan valores de $K_1 = -10$ y $K_2 = 0.6$; para valores de $P < 70$ mm, valores de $K_1 = -24$ y $K_2 = 0.8$, y para valores de $P > 70$ mm. Los coeficientes K_1 y K_2 fueron obtenidos analizando estadísticas de lluvias.

Existe otro método conocido como SCS que, aunque fue desarrollado para cuencas hidrológicas, puede utilizarse para estimar la precipitación efectiva durante el ciclo agrícola de un cultivo. El escurrimiento superficial puede estimarse con la siguiente expresión:

$$E_s = \frac{(P - I_a)^2}{(P - I_a) + S} \quad (6.17)$$

donde:

E_s es el escurrimiento superficial

I_a es la abstracción inicial que define el agua precipitada interceptada por el follaje del cultivo, el agua infiltrada y el agua almacenada antes de que el escurrimiento se presente

S es la abstracción potencial máxima de una lluvia (P) en mm que se estima con la siguiente ecuación:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6.18)$$

donde CN es el número de curva para un contenido de humedad antecedente (CHA) previo a la lluvia tipo II (CHA_{II}).

La **Tabla 6.5** define los números de curva para diferentes tipos de coberturas y condiciones hidrológicas asumiendo una humedad tipo CHA_{II} . La **Tabla 6.6** presenta las características de los suelos que definen los diferentes grupos hidrológicos usados en la **Tabla 6.5**. La **Tabla 6.7** presenta las condiciones que

describen cada uno de los tres tipos de condición de contenido de humedad antecedente (CHA).

Para una condición de humedad tipo I se usa la siguiente ecuación para cambiar la curva dada por la **Tabla 6.5** para CHA_I:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.305 - 0.01305 CN_{II}} \quad (6.19)$$

Para una condición de humedad tipo III se usa la siguiente ecuación para cambiar la curva dada por la **Tabla 6.5**:

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 - 0.0057 CN_{II}} \quad (6.20)$$

La precipitación efectiva, almacenada en la zona de raíces, puede estimarse con la siguiente expresión, si se asume que la mayor parte de la abstracción inicial se infiltra:

$$\begin{aligned} P_e &= S - PP, \text{ si } S \geq D_t \\ P_e &= S, \text{ si } S < D_t \end{aligned} \quad (6.21)$$

donde PP es la percolación profunda, D_t es déficit total de humedad y S es la abstracción máxima potencial de una lluvia.

Para estimar los componentes de la precipitación se usan las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} I_a &= 0.2S \\ L_t &= 0.8S \end{aligned} \quad (6.22)$$

Sustituyendo el estimador de I_a en la **Ecuación 6.17** se obtiene una nueva relación simplificada para estimar el escurrimiento superficial:

$$E_s = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S} \quad (6.23)$$

Tabla 6.5 Número de curva (CN_{II}) de escurrimiento para diferentes complejos hidrológicos suelo-cobertura para un contenido de humedad antecedente tipo II y $I_a = 0.2S$

Uso de suelo o cobertura	Cobertura		Grupo de suelo hidrológico			
	Práctica de manejo	Condición hidrológica	A	B	C	D
Barbecho	HR	-	77	86	91	94
Cultivos en hilera	HR	P	72	81	88	91
	HR	B	67	78	85	89
	C	P	70	79	84	88
	C	B	65	75	82	86
	CT	P	66	74	80	82
	CT	B	62	71	78	81
Granos pequeños	HR	P	65	76	84	88
	C	P	63	74	82	85
	C	B	61	73	81	84
	CT	P	61	72	79	82
	CT	B	59	70	78	81
Legumbres con alta densidad	HR	P	66	77	85	89
	HR	B	58	72	81	85
	C	P	64	75	83	85
	CT	B	55	69	78	83
	CT	P	63	73	80	83
		B	51	67	76	80
Pradera	-	-	30	58	71	78

Nota: Tipo de manejo: HR-Hileras rectas, C-contorno, CT-contorno y terracedo; condición hidrológica: P-pobre, B-buena.

Los pasos para obtener el escurrimiento (E_s) y la precipitación efectiva (P_e) usando el método del SCS son:

1. Clasificar el suelo de acuerdo con su uso y cobertura
2. Clasificar el suelo de acuerdo con su práctica de manejo y condición hidrológica
3. Clasificar el suelo de acuerdo con su grupo hidrológico (**Tabla 6.6**)
4. Obtener el número de curva (CN) de la **Tabla 6.5** asumiendo que el contenido de humedad antecedente es tipo II (CHA_{II})
5. Clasificar el suelo de acuerdo con su contenido de humedad antecedente actual CHA_a (**Tabla 6.7**)

6. Ajustar el número de curva (CN) en caso de que el $CHA \neq CHA_{II}$. Para condición CHA_I usar la **Ecuación 6.19** y para CHA_{III} usar la **Ecuación 6.20**
7. Obtener la abstracción total (S) en mm usando la **Ecuación 6.18**
8. Estimar el escurrimiento usando la **Ecuación 6.23**
9. Estimar el déficit de humedad en la zona radical
10. Estimar la precipitación efectiva P_e con la **Ecuación 6.21**

La **Figura 6.12** describe la variación del escurrimiento superficial (E_s) para diferentes magnitudes de lluvia y números de curva (CN). Se observa una disminución en el escurrimiento a medida que CN disminuye.

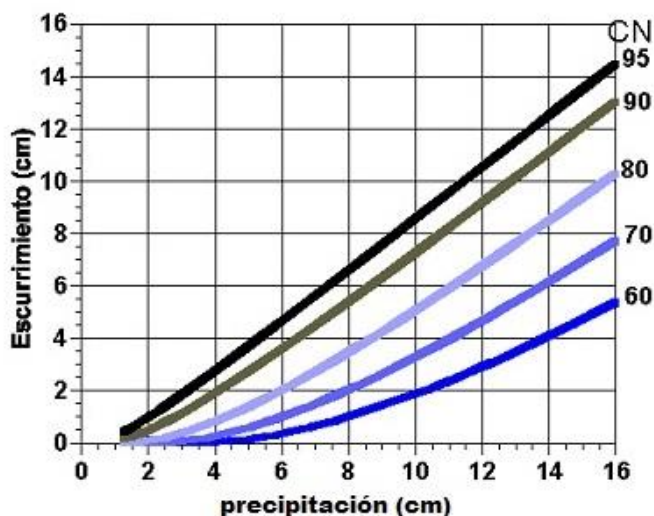


Figura 6.12 Variación del escurrimiento (E_s) en función de la precipitación y el número de curva

Tabla 6.6 Grupos de suelos hidrológicos

Tipo	Características del suelo
A	Alta velocidad de infiltración, aun bajo condiciones húmedas
B	Infiltración moderada bajo condiciones húmedas
C	Baja velocidad de infiltración bajo condiciones húmedas
D	Baja infiltración bajo condiciones húmedas, arcillas expansivas o con un estrato impermeable

Tabla 6.7 Tipos de contenidos de humedad antecedente previa (CHA)

Tipo de contenido de humedad antecedente (CHA)	Total de lluvia antecedente en los cinco días previos		Condición
	Sin cultivo	Con cultivo	
I	< 13 mm	< 35 mm	Bajo potencial de escurrimiento, condiciones secas
II	13 - 28 mm	35 - 53 mm	Condición promedio
III	> 28 mm	> 53 mm	Alto potencial de escurrimiento, suelos prácticamente saturados de lluvias previas

6.5 Ascenso capilar (A_c)

Un porcentaje de los requerimientos hídricos de los cultivos puede ser aportado por el ascenso de agua de mantos freáticos someros. El porcentaje de aportación depende de los siguientes factores:

- Profundidad de la zona de raíces
- Profundidad del manto freático
- Propiedades fisicoquímicas del agua freática
- Textura y estructura del perfil del suelo
- Cantidad y frecuencia del riego

En un experimento con lisímetros para estimar las aportaciones del ascenso capilar a los requerimientos de riego en algodón (Ayars y Hutmacher, 1994) se encontró que, a medida que la salinidad del agua se incrementa, la aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos de la planta disminuye. El mismo efecto se presenta con la profundidad del manto freático. La **Figura 6.13** muestra los cambios de las aportaciones freáticas a los requerimientos para dos profundidades (1.2 y 2 m) con una calidad de agua de 7.7 dS/m.

Se observa que cerca del 50 % de los requerimientos hídricos de los cultivos son aportados por ascenso capilar de un manto freático a 1.2 m de profundidad cuando el cultivo se encuentra a su máxima capacidad evapotranspirativa. Cuando la profundidad cambia a 2 m la aportación disminuye al 35 %. El valor de K_{cb} en el eje de las ordenadas de la **Figura 6.13** es para un cultivo sin aportaciones significativas de un manto freático. Ayars y Hutmacher (1994) disminuyeron en

10 cm las láminas netas aplicadas convencionales (sin manto freático somero) al considerar la contribución del manto freático sin una merma en el desarrollo y rendimiento del cultivo.

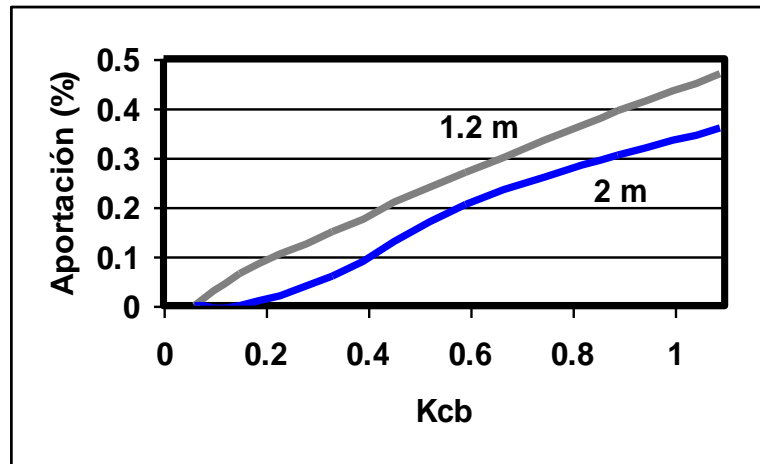


Figura 6.13 Porcentaje de aportación del ascenso capilar a los requerimientos hídricos en función del coeficiente de cultivo para algodón a dos profundidades (1.2 y 2 m) del manto freático y una salinidad de 15.4 dS/m (adaptado de Ayars y Hutmacher, 1994)

Gardner (1958) presentó una solución analítica para el flujo ascendente estacionario de un manto freático asumiendo la siguiente relación para la conductividad hidráulica no saturada:

$$K(h) = K_s e^{-\alpha h} \quad (6.24)$$

donde K es la conductividad hidráulica saturada ($L T^{-1}$), y α es un parámetro del suelo (L^{-1}) usualmente obtenido por regresión. Suelos ligeros, que tienen poros grandes y se drenan con poca succión, tienen usualmente valores más grandes de α que los correspondientes para suelos pesados. Estos últimos tienen una distribución de poros más amplia y valores de α pequeños, tal como se muestra en la **Tabla 6.8**.

La solución analítica derivada por Gardner (1958) para el flujo ascendente máximo estacionario de un manto freático somero en presencia de evaporación de un suelo desnudo tiene la siguiente estructura:

$$A_c = K_s \left(\frac{1}{e^{P_{nf} \alpha} - 1} \right) \quad (6.25)$$

donde A_c es la tasa de ascenso capilar (LT^{-1}) debido al gradiente evaporativo entre las superficies del suelo y el manto freático; K_s es la conductividad hidráulica a saturación (LT^{-1}); P_{mf} es la profundidad del manto freático (L), y α define la característica hidrodinámica del suelo usando el modelo de Gardner.

Parámetros hidrodinámicos de algunos suelos se encuentran en la **Tabla 6.8**. El ascenso capilar evaporativo no puede ser mayor a la evapotranspiración potencial de una superficie libre.

Tabla 6.8 Parámetros del modelo de Gardner para la conductividad hidráulica para diferentes suelos reportados por Amoozegar-Fard et al. (1984)

Suelo	α (cm^{-1})	K_s ($cm\ hr^{-1}$)
Franco arcilloso	0.126	4.03200
Franco Arenoso "Columbia"	0.100	5.00400
Arena Dackley	0.513	0.36000
Franco arenoso fino "Gila"	0.0443	0.87480
Franco "Guelph"	0.034	1.32120
Franco limoso "Ida"	0.026	0.10512
Franco "Indio"	1.69	1.40400
Franco arcilloso "Latene"	0.0386	0.18756
Franco "Panoche"	0.0416	3.96000
Franco arcilloso "Pima"	0.014	0.41400
Arena "Plainfield"	0.126	12.38400
Franco arenoso	0.111	3.60000
Franco limoso	0.0139	0.20664
Arcilla "Yolo"	0.0367	0.03348
Franco arenoso fino "Yolo"	0.024	0.14652

6.5.1 Ejemplo

Estimar la tasa evaporativa máxima para el suelo franco arcilloso de la **Tabla 6.8**, para una profundidad de 50 cm.

$$A_c = K_s \left(\frac{1}{e^{\frac{P_{mf}}{\alpha}} - 1} \right) = \frac{4.032 \text{ cm hr}^{-1}}{e^{50\text{cm}(0.126\text{cm}^{-1})} - 1} = 0.007418 \text{ cm hr}^{-1} = 1.78 \text{ mm d}^{-1}$$

Hargreaves y Samani (1992) mencionan que si la parte inferior de las raíces están en contacto con un manto freático somero (1.5 a 2 m), las raíces pueden absorber de 20 a 50 % de sus requerimientos diarios del manto freático dependiendo de las propiedades hidrodinámicas del suelo. La **Figura 6.14** muestra la contribución de un manto freático somero en las demandas hídricas de los cultivos para diferentes distancias entre la parte inferior de la zona de raíces y la parte superior del manto freático. Por ejemplo, si el agua subterránea se encuentra a 70 cm debajo de la zona radical en un suelo franco-arenoso, la contribución del agua subterránea a los requerimientos hídricos es de aproximadamente 2.5 mm d⁻¹.

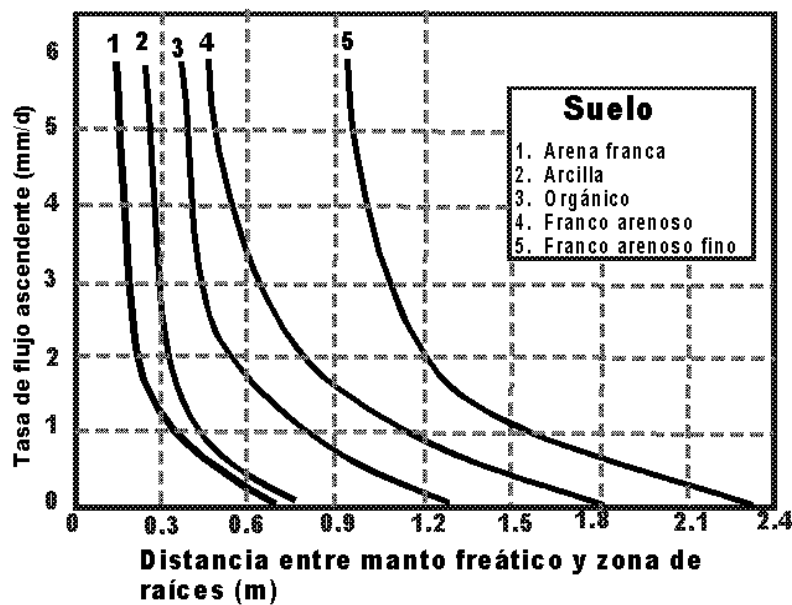


Figura 6.14 Contribución del manto freático a la zona de raíces en mm/d (Doorenbos y Pruitt, 1977)

6.6 Requerimientos de lavado

Si la conductividad eléctrica es menor de 0.7 dS/m y las pérdidas de agua por percolación profunda son mayores al 15 % de los requerimientos hídricos de los cultivos, no es necesario aplicar láminas de lavado (FAO, 1980). Para el agua de riego con alto contenido de sales (valores de CE_i entre 0.7 y 3 dS/m), se requieren láminas de lavado para mantener un contenido bajo de sales en la zona de raíces. En este caso, el agua percolada puede ser insuficiente para mantener un contenido adecuado de sales en el suelo.

El equilibrio entre la salinidad del suelo y el contenido de sales del agua de riego es una función de la cantidad de sales percoladas de la solución del suelo y la cantidad de agua de riego que se mezcla con la solución del suelo. Esta tasa se llama fracción de lavado (FL), y depende de las características del suelo, el método de riego y el manejo del agua. La fracción de lavado es la parte del agua aplicada que debe drenarse de la zona de raíces para mantenerlas en los niveles de salinidad deseada. Puede ser calculada usando un balance de sales en estado de equilibrio:

$$L_d CE_d = L_i CE_i \quad (6.26)$$

donde L_d es la lámina de agua drenada de la zona de raíces (L), L_i es la lámina total infiltrada (L), CE_i es la conductividad eléctrica del agua de riego y CE_d es la conductividad eléctrica del agua drenada de la zona de raíces.

La lámina infiltrada es la suma de los requerimientos de riego del cultivo (L_r) y de lavado o drenado (L_d). Para calcular la fracción de lavado es necesario establecer los valores críticos de la salinidad del suelo (CE_d). Por ejemplo, en términos de la conductividad eléctrica de la pasta saturada, que en promedio no debe exceder la zona de raíces. La fracción de lavado (FL) puede calcularse usando la siguiente ecuación alternativa:

$$FL = \frac{L_d}{L_i} = \frac{CE_i}{CE_d} \quad (6.27)$$

El análisis anterior asume un balance unidimensional de las sales en el perfil de suelo. Para sistemas de riego por goteo, el análisis es un poco diferente ya que las sales se acumulan en los límites del bulbo de mojado que se forma.

6.6.1 Ejemplos

Ejemplo 1. Si se tiene que la lámina requerida es de 70 mm, la CE_i de 0.5 dS/m, y una $CE_d = 5$ dS/m para un cultivo moderadamente tolerante a la salinidad, calcular la lámina total de riego a aplicarse.

$$L_i = L_r + L_d = L_r + L_i \frac{CE_i}{CE_d}$$

$$L_i = \frac{L_r}{1 - \frac{CE_i}{CE_d}} = \frac{L_r}{1 - FL} = \frac{70}{1 - \frac{0.5}{5}} = 77.78 \text{ mm}$$

De esta manera, se requieren 7 cm para satisfacer los requerimientos de riego del cultivo y de 1 cm para lavar las sales de la zona radical.

Doorenbos y Pruitt (1977) proponen la siguiente relación para riego por gravedad y por aspersión de baja frecuencia:

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} \quad (6.28)$$

donde CE_r es la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo en la zona radical (dS/m).

La relación para riego de alta frecuencia (microirrigación) es:

$$FL = \frac{CE_i}{2(CE_r)_{max}} \quad (6.29)$$

donde $(CE_r)_{max}$ se refiere a la conductividad máxima tolerable por el cultivo (rendimiento nulo) obtenido del extracto de saturación del suelo (ver **Tabla 6.9**).

Ejemplo 2. Estimar la fracción de lavado (FL) para un cultivo de papa regada por surcos con agua, con una salinidad de 2 dS/m y con un rendimiento potencial del 90 %. De acuerdo con la **Tabla 6.9**, el valor de $CE_r = 2.5$ dS/m para un rendimiento del 90 %, por lo tanto:

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} = \frac{2}{5 * 2.5 - 2} = 0.19$$

Tabla 6.9 Tolerancia a la salinidad de algunos cultivos agrícolas, en términos de conductividad eléctrica (CE), en función del rendimiento esperado (en porcentaje con respecto al rendimiento máximo potencial)

Cultivo	100 %		90 %		80 %		50 %		$(CE_r)_{\text{máx}}$
	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	CE_r	CE_i	
Aguacate	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	3.7	2.4	6
Alfalfa	2.0	1.3	3.4	2.3	5.4	3.6	8.8	5.9	16
Algodón	7.7	5.1	9.6	6.4	13.0	8.4	17.0	12.0	27
Brócoli	2.8	1.9	3.9	2.6	5.5	3.7	8.2	5.5	14
Cebolla	1.2	0.8	1.8	1.2	2.8	1.8	4.3	2.9	8
Frijol	1.0	0.7	1.5	1.0	2.3	1.5	3.6	2.4	7
Fresa	1.0	0.7	1.3	0.9	1.8	1.2	2.5	1.7	4
Lechuga	1.3	0.9	2.1	1.4	3.2	2.1	5.2	3.4	9
Limón	1.7	1.1	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8
Maíz	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10
Manzano y pera	1.7	1.0	2.3	1.6	3.3	2.2	4.8	3.2	8
Melón	2.2	1.5	3.6	2.4	5.7	3.8	9.1	6.1	16
Naranja	1.7	1.1	2.3	1.6	3.2	2.2	4.8	3.2	8
Papa	1.7	1.1	2.5	1.7	3.8	2.5	5.9	3.9	10
Rábano	1.2	0.8	2.0	1.3	3.1	2.1	5.0	3.4	9
Sorgo	4.0	2.7	5.1	3.4	7.2	4.8	11.0	7.3	18
Soya	5.0	3.3	5.5	3.7	6.2	4.2	7.5	5.0	10
Tomate	2.5	1.7	3.5	2.3	5.0	3.4	7.6	5.0	13
Trigo	6.0	4.0	7.4	4.9	9.5	6.3	13.0	8.7	20
Vid	1.5	1.0	2.5	1.7	4.1	2.7	6.7	4.5	12
Zanahoria	1.0	0.7	1.7	1.1	2.8	1.9	4.6	3.1	8

Nota: El subíndice r se refiere a la conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo y el subíndice i al agua de riego (adaptado de Ayers y Westcot, 1976). Los valores de CE son expresados en dS m^{-1} .

Los cultivos son más sensibles al estrés osmótico (salinidad) en sus primeras etapas fenológicas debido a la alta sensibilidad de los nuevos tejidos de las hojas a efectos osmóticos e iónicos.

6.7 Cálculo del balance hídrico

Para calendarizar el riego basándose en un balance hídrico se llevan a cabo los siguientes pasos:

1. Seleccionar la fecha inicial (usualmente la fecha de siembra o de primer riego) y estimar el contenido de humedad inicial para el día $i = 0$ (H_0).

2. Estimar la profundidad radical para el día i (P_r).
3. Estimar el factor de abatimiento (f) para el día i en función del cultivo y etapa fenológica.
4. Estimar el coeficiente de cultivo para el día i . Cuando no hay cultivo, el K_c es menor de 0.2.
5. Estimar las láminas para las constantes de humedad del suelo para la profundidad radical dada: lámina almacenada a capacidad de campo (LCC), lámina almacenada a punto de marchitamiento permanente (LPMP), lámina de la humedad aprovechable (LHA), y lámina de la humedad fácilmente aprovechable (LHFA).

$$L_{CC} = \theta_{CC} P_r \quad (6.30)$$

$$L_{PMP} = \theta_{PMP} P_r \quad (6.31)$$

$$L_{PMP} = \theta_{PMP} P_r \quad (6.32)$$

$$LHFA = f (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) P_r = f (HA) P_r \quad (6.33)$$

1. Estimar el factor de estrés hídrico (K_e) para el día i , donde HA es la humedad aprovechable en porcentaje para el día i :

$$HA = \frac{(\theta_{CC} - \theta_i)}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} 100 \quad (6.34)$$

2. Estimar la evapotranspiración real (ET_r) para el día i :

$$HA = \frac{(\theta_{CC} - \theta_i)}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} 100 \quad (6.35)$$

3. Si hubo lluvia en el día i , estimar la precipitación efectiva (P_e) para el día i .
4. Registrar el riego (R) en el día i cuando se inicie en la mañana del día i , pero si fue por la tarde, se registra en el día siguiente ($i+1$).

5. Estimar la cantidad de agua percolada (PP_i) en función de la lámina máxima (L_{max_i}) que puede almacenar el suelo a un contenido de humedad antecedente (θ_i).

$$L_{max} = (\theta_{cc} - \theta_i)Pr_i \quad (6.36)$$

La lámina percolada puede ser estimada como:

$$PP_i = R_i + Pe_i - L_{max_i} \text{ si } (R + P_e)_i > L_{max_i} \quad (6.37)$$

6. Realizar el balance de humedad para el día i .

$$L_i = L_{i-1} + R_i + Pe_i - ETr_i - PP_i \quad (6.38)$$

7. Estimar el contenido de humedad crítica (θ_c) y la lámina crítica (L_c).

$$\theta_c = \theta_{CC} - f(\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (6.39)$$

$$L_c = \theta_c P_r \quad (6.40)$$

8. Si la humedad en términos de lámina (L_i) es menor que la crítica (L_c), aplicar el riego al siguiente día con una lámina de riego igual a:

$$L_r = L_f - L_i \quad (6.41)$$

Usualmente la lámina final (L_f) es la lámina a capacidad de campo (L_{CC}).

9. Ir al paso 2.

6.7.1 Ejemplo de cálculo

A continuación se presenta un ejemplo para la estimación de la fecha y lámina de riego. Dada la siguiente información del perfil de suelo que se asume homogéneo:

Profundidad (cm)	Arena (%)	Arcilla (%)	Limo (%)	θ_{sat}	θ_{cc}	θ_{pmp}
0-200	41	36	23	0.380	0.361	0.224

Calendarización del riego: teoría y práctica	6. Calendarización del riego
--	------------------------------

Y asumiendo un contenido de humedad inicial del perfil del suelo de $\theta_i = 0.321$, una profundidad de raíces constante de 100 cm y un $f = 0.4$, realizar el balance de humedad considerando las entradas y salidas representadas en la siguiente tabla:

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ET_r (mm)	7.79	8.74	7.41	7.04	8.09	8.68	8.48	8.7	6.77	5.73
Precipitación efectiva (mm)		0.51				6.11				

En los 100 cm de la zona de raíces se pueden almacenar alrededor de 361 mm de agua [$L_{CC} = (0.361-0.0) * 1\ 000 = 361$ mm] que corresponden al contenido de humedad a capacidad de campo. Como el contenido de humedad inicial es de $\theta_i = 0.321$, el contenido de humedad expresado como lámina, almacenada en los 100 cm de suelo es de $L_i = 321$ mm para el día 1. El riego tiene que aplicarse cuando el contenido de humedad alcance un valor de $\theta_c = 0.3062$ que corresponde a una lámina disponible en el suelo de 306.2 mm [$L_c = 0.361 - (0.361-0.224) * 0.4 * 1\ 000$]. De esta manera, en la siguiente tabla se muestra que se requieren dos riegos (día 3 y 10) con una lámina total de 110.8 mm.

Balance de humedad para el periodo de 10 días

Día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
L_i (mm)	321	313.2	305.0	353.6	346.5	338.4	335.9	327.4	318.7	312.0
ET _r (mm)	7.79	8.74	7.41	7.04	8.09	8.68	8.48	8.7	6.77	5.73
Precipitación efectiva (mm)	0	0.51	0	0	0	6.11	0	0	0	0
Riego (mm)	0	0	56.0	0	0	0	0	0	0	54.8
Percolación (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L_f (mm)	313.2	305.0	353.6	346.5	338.4	335.8 3	327.4	318.7	312.0	361.0

La lámina de riego L_i y L_f son los contenidos de humedad, expresados como láminas, al inicio y fin del día respectivo. En el ejemplo anterior se asume que se conoce la evapotranspiración, sin embargo, su valor debe estimarse tal como se discute con detalle en el Capítulo 5.

6.8 Requerimientos de riego (RR)

Los requerimientos de riego netos (RR_n) se definen como la suma de necesidades de agua menos las aportaciones de agua a la zona radical ocurridas durante un periodo:

$$RR_n = ET + LL - Pe - Am \quad (6.42)$$

donde ET es la evapotranspiración real de los cultivos (L), LL es la lámina de lavado (L), Pe es la precipitación efectiva (L) y Am es la aportación del manto freático (L).

En ausencia de lluvias e ignorando aportaciones menores, se toman los requerimientos de riego como la evapotranspiración real acumulada desde el último riego. Los requerimientos de riego brutos (RR_b) definen la lámina bruta a aplicar y se calculan dividiendo la lámina neta entre la eficiencia.

6.9 Intervalo de riego (IR)

El intervalo de riego (IR), es el tiempo entre dos riegos y puede ser calculado con la siguiente ecuación:

$$IR = \frac{HFA}{RRDD} \quad (6.43)$$

donde HFA es la humedad fácilmente aprovechable y $RRDD$ son los requerimientos de riego de diseño diario durante el intervalo de riego.

Ejemplo. Se tiene que $HFA = 150\text{mm}$ y el valor de $RRDD = 10.71 \text{ mm d}^{-1}$, calcular el intervalo de riego. Si se utiliza la ecuación anterior (6.43) se obtiene un intervalo de $IR = 14$ días.

Para diseñar un sistema de riego se requieren los requerimientos de riego de diseño diarios ($RRDD$), que son el RR diario que el sistema debe suministrar para proporcionar una cantidad adecuada de riego durante el periodo de máxima demanda. Grandes valores de $RRDD$ están relacionados con cultivos de sistema radical profundo, sensitivos al estrés hídrico y con grandes consumos de agua. De igual manera se tienen grandes valores de $RRDD$ en lugares con bajas precipitaciones y altas temperaturas.

Es difícil estimar los $RRDD$ ya que se necesita conocer el valor de RR durante el intervalo de riego de máxima demanda. El servicio de conservación de suelos de los E.E.U.U recomienda la siguiente ecuación para el cálculo de $RRDD$ para fines de diseño de sistemas de riego:

$$RRDD = 0.034 \frac{ET_m^{1.09}}{HFA^{0.09}} \quad (6.44)$$

donde ET_m , es la evapotranspiración total promedio para el mes de máxima demanda (mm) y HFA es la humedad fácilmente aprovechable que se encuentra entre dos riegos consecutivos a la profundidad de raíces durante el periodo de máxima demanda.

6.10 Número de riegos (NR)

El número de riegos (NR) es el total de riegos requeridos durante el ciclo fenológico del cultivo y puede ser estimado usando la siguiente ecuación:

$$NR = \frac{RR_{acum}}{HFA} \quad (6.45)$$

donde RR_{acum} son los requerimientos de riego acumulados desde la siembra hasta la cosecha.

Ejemplo. Si se tiene que un suelo tiene $HFA = 75$ mm por metro de suelo y el cultivo tiene una profundidad de raíces promedio de $Pr = 150$ cm, calcular el número de riegos si $RR_{acum} = 500$ mm.

$$NR = \frac{500mm}{(75mm/m)1.5m} = 4.44 \approx 5 \text{ riegos}$$

6.11 Próximo riego

Uno de los objetivos de la calendarización del riego es estimar la fecha del próximo riego. La siguiente ecuación permite estimar los días que faltan para el próximo riego:

$$ND = \frac{HD}{ET_{prom}} \quad (6.46)$$

donde HD es la humedad fácilmente aprovechable disponible (mm) en la zona radical y ET_{prom} es un estimador de la evapotranspiración real promedio del cultivo ($mm\ d^{-1}$) hasta que se aplique el riego.

Ejemplo. Si se tienen 20 mm de humedad disponible en el suelo y una evapotranspiración promedio del cultivo en los siguientes días de 4 mm d⁻¹, estimar el número de días que faltan para el siguiente riego.

$$ND = \frac{HD}{ET_{prom}} = \frac{20 \text{ mm}}{4 \text{ mm d}^{-1}} = 5 \text{ días}$$

6.12 Capacidad del sistema (Q_s)

Para poder satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos, un sistema de riego debe proveer del caudal necesario conocido como la capacidad del sistema (Q_s), volumen/tiempo, el cual puede ser estimado usando la siguiente ecuación si se asume que se tiene solamente un cultivo:

$$Q_s = \left(\frac{RRDD}{E_r} \right) S_r \quad (6.47)$$

donde *RRDD* son los requerimientos de riego de diseño diarios (LT⁻¹); *S_r* es el área (L²) dominada por el sistema de riego y *E_r* es la eficiencia de riego, eficiencia desde que sale el agua de la fuente hasta que llega a la zona de raíces, en fracción decimal, que se obtiene al multiplicar la eficiencia de aplicación (*E_a*) por la eficiencia de conducción (*E_c*):

$$E_r = E_a E_c \quad (6.48)$$

El término de capacidad de sistema (Q_s) se utiliza con frecuencia en el diseño de sistemas de riego para indicar el caudal máximo necesario para satisfacer los requerimientos máximos de un área de riego. Sin embargo, también puede indicar el caudal de abastecimiento en la cabecera de la parcela para aplicar una lámina de riego en un tiempo dado.

Por ejemplo, si *A* = 50 ha, *E_r* = 60 %, y *RRDD* = 8 mm d⁻¹, de acuerdo con la ecuación anterior y homogeneizando unidades se tiene:

$$Q_s = \left(\frac{0.008 \text{ m d}^{-1}}{0.6} \right) 500,000 \text{ m}^2 = 6,666.67 \text{ m}^3 / \text{d}^{-1} = 77.16 \text{ l s}^{-1}$$

que indica el caudal necesario que el sistema de riego debe suministrar, 77.16 lps las 24 horas del día. Si solamente se va a operar el sistema 20 horas, se tendría:

$$Q_s = 6,666.67 \frac{m^3}{d} \frac{1d}{20hr} = 333.334 m^3 / hr^{-1} = 92.6 \ell s^{-1}$$

Por lo tanto, la capacidad del sistema en ℓs^{-1} se incrementaría alrededor del 20 % (24 hr/20, hr = 1.2). Para un tiempo de operación de 10 horas sería $q_s = (77.16 \ell s^{-1}) (24 \text{ hr}/10 \text{ hr}) = 185.18 \ell s^{-1}$, lo cual indica un incremento del 140 % con respecto a la capacidad para 24 horas. La ecuación general para calcular la capacidad del sistema (Q_s) en ℓs^{-1} es:

$$Q_s = K \frac{RRDD_z A}{E_r HPD} \quad (6.49)$$

donde:

K es una constante con un valor de 277.8 para las unidades usadas

$RRDD_z$ son los requerimientos de riego de diseño diario de la zona de riego (mm/día). $RRDD$ es equivalente a la lámina bruta (L_b) a aplicar

A es el área total (ha) a regar

E_r es la eficiencia global de riego (porcentaje)

HPD son las horas por día que el sistema opera (h)

La **Tabla 6.10** contiene los gastos requeridos (capacidad del sistema) para aplicar una lámina bruta (L_b) en una hectárea dada de acuerdo con diferentes horas de operación del sistema.

Tabla 6.10 Capacidad de descarga diaria requerida (Q_a) en ℓs^{-1} por hectárea según la ecuación 6.49

Capacidad del sistema requerido en ℓs^{-1} por hectárea				
L_b (cm)	Horas de operación diaria del sistema (hr día ⁻¹)			
	12	16	20	24
0.5	1.2	0.9	0.7	0.6
0.88	2.0	1.5	1.2	1.0
1	2.3	1.7	1.4	1.2
2	4.6	3.5	2.8	2.3
3	6.9	5.2	4.2	3.5
4	9.3	6.9	5.6	4.6
5	11.6	8.7	6.9	5.8
6	13.9	10.4	8.3	6.9

Capacidad del sistema requerido en $\ell \text{ s}^{-1}$ por hectárea				
L_b (cm)	Horas de operación diaria del sistema (hr día ⁻¹)			
	12	16	20	24
7	16.2	12.2	9.7	8.1
8	18.5	13.9	11.1	9.3
9	20.8	15.6	12.5	10.4
10	23.1	17.4	13.9	11.6
15	34.7	26.0	20.8	17.4
20	46.3	34.7	27.8	23.1

Un gasto de $1 \ell \text{ s}^{-1}$ durante 24 hr en una hectárea es equivalente a aplicar una lámina de riego de 8.8 mm asumiendo una eficiencia de aplicación del 100 % (ver segunda hilera de la **Tabla 6.10**). Un requerimiento de riego diario de 8.8 mm/d puede ser muy conservador en zonas húmedas y subhúmedas.

Al gasto por hectárea se le conoce como coeficiente unitario de riego (*CUR*). Existen varias reglas empíricas relacionadas con el *CUR*, por ejemplo, el valor de $1 \ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ se ha usado durante muchos años para definir el gasto necesario al diseñar zonas de riego, de esta manera 100 ha requieren de $100 \ell \text{ s}^{-1}$ para satisfacer las necesidades hídricas de los cultivos en la época crítica.

6.13 Tiempo de riego (T_r)

Uno de los problemas a los que se enfrenta continuamente un agricultor es definir el tiempo de riego que permita aplicar la lámina apropiada a la zona de raíces del cultivo. Existen varios métodos para definir el tiempo de riego, los dos más importantes están basados en:

- El flujo entregado en la cabecera de la parcela
- En la intensidad de la aplicación del sistema

El primero se usa primordialmente en sistemas de riego por gravedad y el segundo en sistemas de riego presurizados.

6.13.1 Estimación del tiempo de riego basado en el flujo de entrega

Para definir los tiempos de riego en sistemas por gravedad se usa la ecuación de continuidad en términos de la diferencia entre el volumen de agua que ha entrado

(V_e) y el que ha salido (V_s) de la parcela, que debe ser igual al que se ha almacenado (V_a) en un tiempo de riego (T_r).

$$V_e - V_s = V_a \quad (6.50)$$

Si se asume que el volumen de salida es pequeño y se estiman los volúmenes de entrada y almacenados se tiene:

$$V_e = V_a \quad (6.51)$$

$$\text{Volumen} = Q T_r = L_b A \quad (6.52)$$

donde Q_s es el gasto de abastecimiento en la cabecera de la parcela o capacidad de descarga del sistema y L_b es la lámina total aplicada a la parcela de área A .

Si se tiene un estimador de la lámina bruta en función de la lámina neta (L_n) que corresponde a la lámina a almacenar en la zona de raíces y la eficiencia de aplicación (E_a), resolviendo para T_r se obtiene la siguiente relación:

$$T_r = \frac{\text{volumen bruto}}{\text{gasto}} = K \frac{A L_n}{Q_s E_a} \quad (6.53)$$

donde T_r es el tiempo de riego (min) para aplicar la lámina neta L_n (cm), Q_s es el gasto disponible en lps; A es la superficie a regar en ha; E_a es la eficiencia de aplicación en forma decimal y K es una constante de conversión igual a 1 668 que resulta al usar las unidades indicadas.

6.13.1.1 Ejemplo

Calcular el tiempo de riego para aplicar una lámina neta de 8 cm, en una hectárea con una eficiencia de aplicación del 70 % y un gasto continuo de 10 l s^{-1} . Usando la **Ecuación 6.53** resulta un tiempo de riego de 1 906 min que corresponden a 31.8 hr.

A manera ilustrativa, la **Figura 6.15** muestra la duración del riego (T_r) en horas para aplicar una lámina bruta (L_b) de 10 cm en función de la superficie a regar bajo cuatro gastos de suministro de 40 (línea superior), 80, 120 y 160 l s^{-1} (línea inferior) calculado usando la **Ecuación 6.53**.

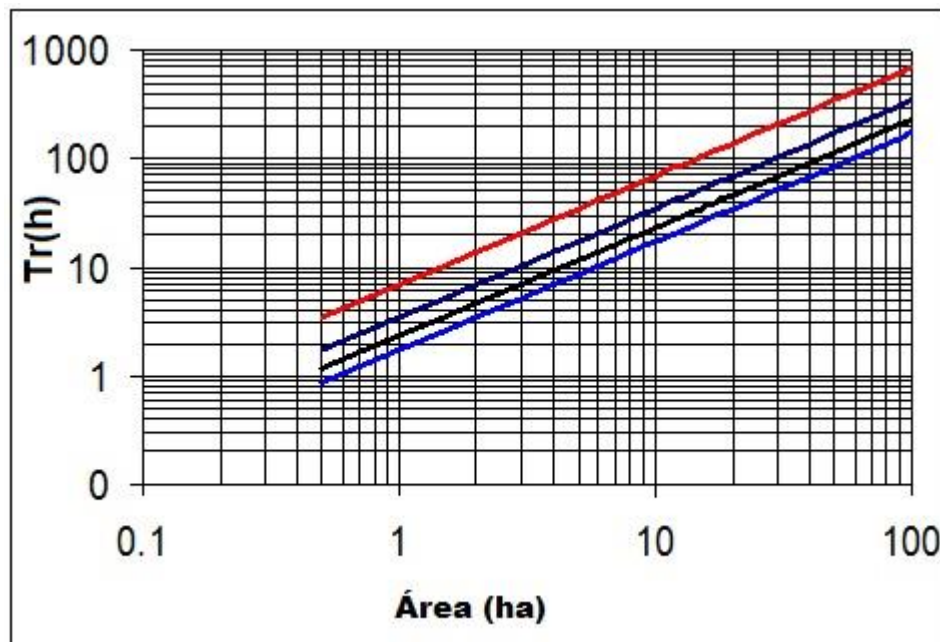


Figura 6.15 Tiempo de riego para aplicar una lámina bruta de 10 cm en función del área dominada bajo cuatro gastos (40, 80, 120 y 160 $\ell \text{ s}^{-1}$)

6.13.2 Estimación del tiempo de riego basado en la intensidad de aplicación

Los tres pasos para obtener el tiempo de riego usando la intensidad de aplicación de los emisores son:

1. Determinar los requerimientos brutos desde el último riego en mm (RR_b).
2. Determinar la intensidad de aplicación del sistema en mm/hr (I_a).

$$I_a = K \frac{Q}{A} \quad (6.54)$$

donde Q es el gasto de aplicación del emisor(es) en $\ell \text{ min}^{-1}$ o simplemente lpm, A es el área de influencia del emisor(es) en m^2 , y K es un factor de conversión igual a 60 para las unidades usadas.

3. Determinar el tiempo de riego en horas usando la siguiente ecuación:

$$T_r = \frac{RR_b}{I_a} \quad (6.55)$$

6.13.2.1 Ejemplos

Ejemplo 1. Calcular la intensidad de aplicación para un sistema de riego por goteo con cintilla con un espaciamiento de 90 cm y un gasto de 2.5 lpm/100 m de cinta:

$$I_a = K \frac{Q}{A} = 60 \frac{2.5}{100 \times 0.9} = 1.66 \text{ mm hr}^{-1}$$

Ejemplo 2. Estimar la intensidad de aplicación para un sistema por aspersión portátil con un espaciamiento entre aspersores de 6 m y con un espaciamiento de laterales de 6 m. El gasto medio de los aspersores es de 15 ℓ min⁻¹.

$$I_a = K \frac{Q}{A} = 60 \frac{15 \text{ ℓ min}^{-1}}{6 \text{ m} \times 6 \text{ m}} = 25 \text{ mm hr}^{-1}$$

Ejemplo 3. Calcular el tiempo de riego si se tiene un déficit hídrico desde el último riego (dos días) de $RR_b = 7 \text{ mm}$ y una velocidad de aplicación del sistema de $a = 1.16 \text{ mm h}^{-1}$:

$$T_r = \frac{RR_{br}}{I_a} = \frac{7 \text{ mm}}{1.16 \text{ mm h}^{-1}} = 6 \text{ h}$$

Para regar una sección de riego se requieren 6 horas. Si se tienen tres secciones de riego en una parcela de 1 ha, se requiere un tiempo de riego neto de 18 horas y un gasto de aproximadamente 92 ℓ s⁻¹.

6.14 Lámina de riego aplicada

En ocasiones se requiere conocer la lámina de riego aplicada por un sistema de riego. Resolviendo para L_b la **Ecuación 6.53** se obtiene una expresión para estimarla:

$$L_b = \frac{L_n}{E_a} = K \frac{T_r Q_s}{A} \quad (6.56)$$

donde L_b es la lámina neta (cm), T_r es el tiempo de riego, Q_s es el gasto de aplicación, A es la superficie a regar en ha, y K es una constante de conversión que depende de las unidades usadas (ver **Tabla 6.11**).

Tabla 6.11 Valores del coeficiente K para diferentes unidades usadas en la Ecuación 6.56

Lb	K	A	Qs	Tr
cm	6×10^{-4}	ha	$\ell \text{ s}^{-1}$	min
cm	0.036	ha	$\ell \text{ s}^{-1}$	h
cm	1×10^{-7}	ha	$\ell \text{ min}^{-1}$	min
cm	6×10^{-4}	ha	$\ell \text{ min}^{-1}$	H

Usando la **Ecuación 6.56** se generó la **Tabla 6.12** que presenta la lámina bruta aplicada en una hectárea por un sistema de riego en función del gasto en $\ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y el tiempo de riego en h. Se observa que para un gasto de 1 en $\ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ y un tiempo de riego de 24 horas (1 día) se aplica una lámina de 8.6 mm.

Tabla 6.12 Lámina bruta en cm, aplicada en función del gasto y tiempo de riego

Tr (h)	Gasto ($\ell \text{ s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$)								
	0.50	0.75	1	2	4	6	10	60	80
1	0.02	0.03	0.04	0.07	0.14	0.22	0.36	2.2	2.9
2	0.04	0.05	0.07	0.14	0.29	0.43	0.72	4.3	5.8
3	0.05	0.08	0.11	0.22	0.43	0.65	1.08	6.5	8.6
4	0.07	0.11	0.14	0.29	0.58	0.86	1.44	8.6	11.5
6	0.11	0.16	0.22	0.43	0.86	1.30	2.16	12.9	17.3
8	0.14	0.22	0.29	0.58	1.15	1.73	2.88	17.3	23.0
10	0.18	0.27	0.36	0.72	1.44	2.16	3.60	21.6	28.8
12	0.22	0.32	0.43	0.86	1.73	2.59	4.32	25.9	34.5
14	0.25	0.38	0.50	1.01	2.02	3.02	5.04	30.2	40.3
18	0.32	0.49	0.65	1.30	2.59	3.89	6.48	38.8	51.8
24	0.43	0.65	0.86	1.73	3.46	5.18	8.64	51.8	69.1
30	0.54	0.81	1.08	2.16	4.32	6.48	10.80	64.8	86.4
72	1.30	1.94	2.59	5.18	10.4	15.5	25.9	155.5	207.3

6.15 La calendarización del riego y los métodos de riego

En las secciones anteriores se han presentado los principios para calendarizar el riego. La mayoría de ellos se aplica para el riego por gravedad y por aspersión, donde el suelo funciona como un almacén de humedad, por lo que el riego es pesado y de poca frecuencia. En sistemas de riego por goteo o por microaspersión,

el riego es ligero y con mucha frecuencia, a intervalos de unos cuantos días. Los métodos para calendarizar el riego basado en el intervalo y lámina de riego se clasifican en los siguientes tipos:

1. Intervalo constante - lámina variable
2. Intervalo variable - lámina constante
3. Intervalo variable - lámina variable
4. Intervalo constante - lámina constante

Los tres primeros tipos son los más usados; su aplicabilidad depende del tipo de sistema de aplicación de riego utilizado y de las características evapotranspirativas del cultivo. El último esquema resulta poco aplicable debido a su uso deficiente del agua; de usarse, podría generar condiciones de subirrigación o sobreirrigación. Su uso podría restringirse a invernaderos, donde las condiciones ambientales son muy estables; sin embargo, las láminas deben incrementarse a medida que el cultivo se desarrolla.

6.15.1 Riego por gravedad

La calendarización del riego en sistemas por gravedad es usualmente bajo, un esquema variable tanto en lámina como en intervalo de riego (**Figura 6.16**). Al inicio del ciclo las láminas son pequeñas y los intervalos son grandes; a medida que se alcanza la máxima demanda de riego, los intervalos se acortan y las láminas se incrementan, para llegar a disminuir las láminas y alargar los intervalos de riego en la parte final del ciclo fenológico del cultivo. Bajo este esquema de calendarización se presentan periodos de superávit y déficit de humedad que mantienen a la planta bajo un estrés hídrico considerable, tal como se indica en la **Figura 6.16**.

Por sus características, el riego por gravedad (surcos y melgas) puede tener bajas eficiencias al aplicar láminas pequeñas. El agua entra en la parte superior de la parcela y corre a lo largo del surco o melga, presentándose un necesario sobrerriego en la parte superior y un subriego en la parte final (inferior). Es posible mejorar el riego, al diseñar, nivelar y manejar correctamente los caudales en los surcos o melgas para aplicar eficientemente láminas pequeñas (menores de 8 cm). En caso contrario, el riego es muy ineficiente.

Como los tiempos de avance, infiltración y recesión del agua en las melgas o surcos dependen de las características del suelo, longitud, rugosidad y geometría del surco o melga, así como de los gastos de aplicación, el manejo del riego se dificulta por la gran variabilidad del suelo en espacio y tiempo. Ante esta problemática, el regador tiene que tener un buen conocimiento de las variables que intervienen en el riego.

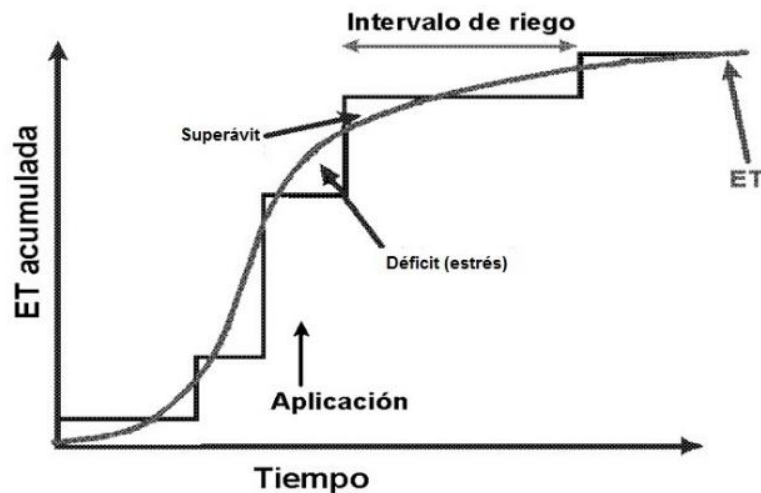


Figura 6.16 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego por gravedad

En riego por gravedad se requiere realizar los cambios en el manejo del riego durante el ciclo agrícola. Entre las prácticas de manejo más comunes para mejorar la eficiencia y uniformidad del riego se encuentran la variación de gastos, el riego intercalado, y el riego intermitente. Uno de los problemas más comunes en el riego por gravedad es la aplicación de grandes láminas de agua, especialmente durante el primer riego.

6.15.2 Riego por aspersión

Por su versatilidad, la calendarización del riego en los sistemas de riego por aspersión es muy variada. Permite calendarizar de manera similar a los sistemas de riego por gravedad, intervalo y láminas variables. Sin embargo, en los sistemas de riego de movimiento continuo (lineal y circular), se fija una lámina de aplicación por vuelta y no se cambia con frecuencia, por lo que el riego se programa de acuerdo con una lámina definida y un intervalo variable que depende de las características evapotranspirativas del cultivo. En los sistemas fijos o portátiles, es posible usar el esquema de intervalo fijo con lámina variable ya que se puede regular la lámina con el tiempo de riego por sección de riego.

El riego por aspersión puede aplicar láminas de riego uniformemente con pérdidas mínimas por percolación y escurrimiento. Por los altos costos de mano de obra y transporte, no se recomienda aplicar láminas pequeñas en los sistemas

portátiles. Se deben aplicar láminas tan grandes como lo permita el suelo y el cultivo. La limitante anterior no existe en los sistemas de movimiento lineal o circular, en los cuales es posible aplicar láminas pequeñas y frecuentes. Aunque tienen la limitante potencial de incrementar la humedad ambiental hasta poder propiciar condiciones favorables para la presencia de enfermedades y plagas.

Las condiciones atmosféricas adversas limitan la aplicación del riego por aspersión; pueden ser altas velocidades de viento a las que están asociadas bajas eficiencias de aplicación del riego, alto déficit de vapor atmosférico que restringe la aplicación de láminas pequeñas.

Para sistemas de riego por aspersión cada aspersor comercial cuenta con tablas de información preparadas por el fabricante en donde se pueden obtener datos como la intensidad de aplicación (véase **Tabla 6.13**) a partir de la intensidad de aplicación por aspersor y el espaciamiento entre aspersores. Con datos de la intensidad de aplicación (I_a), obtenida de la **Tabla 6.13**, y los requerimientos de riego brutos (RR_b) es posible obtener los tiempos de riego que aplica un sistema de riego por aspersión usando la **Ecuación 6.55**.

6.15.3 Riego por microirrigación

La calendarización de riego en los sistemas de riego por microirrigación (goteo y microaspersión) se hace bajo el esquema de intervalo constante y lámina variable. Se tienen dos o más intervalos fijos de riego durante el ciclo, por ejemplo 3, 2, 1, 2, 3 días, que indican que al inicio los riegos son cada tercer día, después cada dos y en la época de máxima demanda son diarios, para alargarse después a dos y finalizar cada tres al final del ciclo. Las láminas de riego son variables dependiendo de las características evapotranspirativas del cultivo durante el intervalo de riego. La lámina variable se aplica al variar el tiempo de riego por sección.

La estimación de la evapotranspiración presentada en secciones anteriores asume que el agua se infiltra de la superficie terrestre, mojando la totalidad desde la superficie del suelo. Para el caso del riego por goteo, donde solamente se moja una parte de la superficie, se deben hacer algunas correcciones para estimar correctamente la evapotranspiración.

Una de las características distintivas del riego por goteo es la baja intensidad de aplicación, pero con gran frecuencia, incluso varias veces durante un día. Estos sistemas son diseñados para aplicar las demandas diarias de los cultivos durante largos periodos. A diferencia de los sistemas de riego por aspersión son diseñados para aplicar los requerimientos hídricos de los cultivos en pocas horas, es decir, alta intensidad con baja frecuencia.

La baja intensidad con alta frecuencia tiene la ventaja de generar un ambiente hídrico favorable para las raíces al suministrar el riego en casi la misma tasa en que se va consumiendo, tal como lo muestra la **Figura 6.17**. El intervalo de variación en la humedad del suelo es corto y constante, ya que el intervalo de riego es pequeño. Al tener el contenido de humedad del suelo muy abajo del contenido de humedad a saturación, el flujo del agua es controlado por las fuerzas capilares, lo que resulta en una reducción en las pérdidas por percolación pues el movimiento del agua se concentra en la zona de raíces donde se presentan las mayores variaciones del potencial. A medida que el intervalo de riego se reduce, el método de aplicación se aproxima al riego hidropónico donde el riego es continuo.

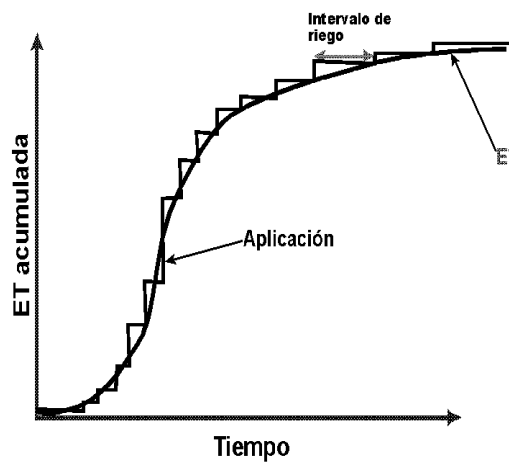


Figura 6.17 Evapotranspiración acumulada y lámina acumulada en un sistema de riego de baja intensidad y alta frecuencia

Tabla 6.13 Intensidad de aplicación en pulgadas por hora en función del espaciamiento entre aspersores y el gasto de aplicación del aspersor

Espaciamiento (ft)	Gasto de aplicación del aspersor en galones por minuto																							
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	15	20	25	30	40	50	70	100	200	300	400		
20x20	0.48	0.72	0.96	1.20	1.44	1.69																		
30x30	0.21	0.32	0.43	0.54	0.64	0.75	0.86	0.96	1.07	1.18	1.28	1.61												
30x40	0.16	0.24	0.32	0.40	0.48	0.56	0.64	0.72	0.80	0.88	0.96	1.20	1.61											
30x50		0.19	0.26	0.32	0.39	0.45	0.51	0.58	0.64	0.71	0.77	0.96	1.28	1.61										
30x60			0.21	0.27	0.32	0.37	0.43	0.48	0.54	0.59	0.64	0.80	1.07	1.34	1.61									
40x40		0.18	0.24	0.30	0.36	0.42	0.48	0.54	0.60	0.66	0.72	0.90	1.20	1.50										
40x50		0.19	0.24	0.29	0.34	0.39	0.43	0.48	0.53	0.58	0.72	0.96	1.20	1.44										
40x60			0.20	0.24	0.28	0.32	0.36	0.40	0.44	0.48	0.60	0.80	1.00	1.20	1.61									
50x50			0.19	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39	0.42	0.46	0.58	0.77	0.96	1.16	1.54									
50x60			0.19	0.22	0.26	0.29	0.32	0.35	0.39	0.48	0.64	0.80	0.96	1.28	1.61									
50x70				0.19	0.22	0.25	0.28	0.30	0.33	0.41	0.55	0.69	0.83	1.10	1.38									
60x60							0.21	0.24	0.27	0.29	0.32	0.40	0.54	0.67	0.80	1.07	1.34							
60x70							0.21	0.23	0.25	0.28	0.34	0.46	0.57	0.69	0.92	1.15	1.61							
60x80							0.20	0.22	0.24	0.30	0.40	0.50	0.60	0.80	1.00	1.40	2.01							
80x80							0.12	0.14	0.15	0.17	0.18	0.23	0.30	0.38	0.45	0.60	0.75	1.05	1.50					
120x120															0.20	0.27	0.33	0.47	0.67	1.34				
180x180																0.12	0.15	0.21	0.30	0.59	0.89	1.19		
240x240																	0.12	0.17	0.33	0.50	0.67			
300x300																		0.11	0.21	0.32	0.43			

6.16 Calendarización del riego bajo condiciones de escasez

La disminución del rendimiento de los cultivos debido al estrés hídrico depende de la especie y la fase fenológica donde se presente. El manual 33 de la FAO (Doorenbos y Kassan, 1986) presenta un análisis de la variación en el rendimiento debido al déficit hídrico para varios cultivos de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\left(1 - \frac{R_r}{R_m}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m}\right) \tag{6.57}$$

donde R_r es el rendimiento real, R_m es el rendimiento máximo posible, ET_r es la evapotranspiración real, ET_m es la evapotranspiración máxima y K_y es el factor de respuesta en el rendimiento debido al estrés hídrico.

Un valor de $K_y = 1$ significa que una reducción de ET_r con respecto a ET_m causa el mismo efecto en la reducción en R_r con respecto a R_m . Por ejemplo, si se estresa el maíz durante su fase más sensible (floración) y se tiene un valor de $K_y = 1.5$, esto indica que con una reducción en 50 % de ET_r ($ET_r / ET_m = 0.5$) se tendría una reducción en 75 % ($1.5 * 0.5$) en el rendimiento. Sin embargo, si se tiene la misma reducción en ET_r durante la etapa de maduración ($K_y = 0.2$), se tendría una reducción del rendimiento de solamente un 10 % ($0.2 * 0.5$). Analizando la **Tabla 6.14**, se observa que los cuatro cultivos ahí citados son más sensibles durante la etapa de floración y en menor grado durante la formación de grano. Si se requiere estresar el cultivo, su efecto negativo es menos pronunciado durante la maduración, a excepción del tomatillo.

Las **Tablas 6.15** y **6.16** muestran la variación de la evapotranspiración real (columna 5) y evapotranspiración potencial (columna 4) para los cultivos de maíz y trigo de acuerdo con las fechas de siembra convencionales en el Valle del Carrizo, Sinaloa.

Tabla 6.14 Valores del parámetro K_y para algunos cultivos agrícolas (Doorenbos y Kassan, 1986)

Cultivo	Etapa fenológica				
	Vegetativo	Floración	Formación de grano o producto	Maduración	Total ciclo
Caña de azúcar	0.75		0.5	0.1	1.2
Frijol	0.2	1.1	0.75	0.2	1.15
Maíz	0.4	1.5	0.5	0.2	1.25
Melón	0.45 - 0.7	0.8	0.8	0.3	1.1

Cultivo	Etapa fenológica				
	Vegetativo	Floración	Formación de grano o producto	Maduración	Total ciclo
Papa	0.45 - 0.8	-	0.7	0.2	1.1
Sorgo	0.2	0.55	0.45	0.2	0.9
Soya	0.2	0.8	1.0	-	0.85
Trigo invierno	0.2	0.6	0.5	-	1.00
Trigo primavera	0.2	0.65	0.55	-	1.15
Tomate	0.4	1.1	0.8	0.4	1.05

Tabla 6.15 Láminas netas (L_n) de riego en función de la fecha de siembra para el maíz en el DR 076

Fecha de siembra de maíz	Número de riegos de auxilio	Máx. L_n por riego auxilio (mm)	L_n potencial (mm)	L_n real (mm)	Máx. intervalo de riego (días)	Mín. intervalo de riego (días)
5/9/98	4	53	330	286	44	21
15/9/98	4	53	347	300	46	23
25/9/98	4	56	335	290	47	24
5/10/98	4	56	350	312	50	24
15/10/98	4	63	372	326	55	21
25/10/98	5	60	397	351	57	20
5/11/98	5	61	417	370	60	20
15/11/98	5	68	445	391	60	18
25/11/98	5	64	475	429	58	16
5/12/98	6	73	515	454	56	14
15/12/98	7	65	544	486	55	14
25/12/98	7	74	563	504	54	12
5/1/99	8	65	606	542	52	11

Tabla 6.16 Requerimientos de riego en función de la fecha de siembra para el trigo en el DR 076

Fecha de siembra de maíz	Número riegos auxilio	Máx. L_n por riego auxilio (mm)	ET potencial (mm)	ET real (mm)	Máx. intervalo de riego (días)	Mín. intervalo de riego (días)
5/11/98	2	67	264	222	56	25
15/11/98	2	66	270	214	57	25
25/11/98	3	67	283	245	57	25

Calendarización del riego: teoría y práctica	6. Calendarización del riego
--	------------------------------

Fecha de siembra de maíz	Número riegos auxilio	Máx. Ln por riego auxilio (mm)	ET potencial (mm)	ET real (mm)	Máx. intervalo de riego (días)	Mín. intervalo de riego (días)
5/12/98	3	65	303	262	54	23
15/12/98	3	65	324	280	55	20
25/12/98	3	71	328	284	53	17
5/1/99	4	65	381	331	50	16

6.17 Ejemplos

Ejemplo 1. Se obtuvieron los siguientes valores experimentales para el crecimiento radical de trigo en India (Subbaiah y Rao, 1994):

t(día)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	120
Pr(m)	0.1	0.28	0.56	0.75	0.96	1.2	1.43	1.62	1.8	1.8

Estimar la profundidad radical usando los modelos propuestos por Fereres *et al.* (1981), Borg y Grimes (1986), Palacios y Martínez (1978) y Hanks y Hill (1980) usando los siguientes parámetros:

Variable	Valor
Duración ciclo	120 días
T_{\max}	80 días
P_{\max}	1.8 m
P_o	0.08 m
W	0.81
α_o	2.30
α_1	5

Modelo de Fereres *et al.* (FF):

$$P_r = P_o + (P_{\max} - P_o) \frac{t}{t_{\max}} ; t < t_{\max}$$

$$P_r = P_{\max}, \quad t > t_{\max}$$

Modelo de Borg y Grimes (BG):

$$P_r = P_{\max} (0.511 + 0.511 \operatorname{sen}_{rad}(3.03 \frac{t}{t_{\max}} - 1.47)), t \leq t_{\max}$$

$$P_r = P_{\max}, \quad t > t_{\max}$$

Modelo de Palacios y Martínez (PM):

$$P_r = \frac{t/t_{max}}{W + (1-W) t/t_{max}} P_{max}$$

Modelo de Hanks y Hill (HH):

$$P_r = \frac{P_o + (P_{max} - P_o)}{1 - \exp\left[\alpha_o - \alpha_1 \left(\frac{t}{t_{max}}\right)\right]}; t < t_{max}$$

$$P_r = P_{min}, \text{ para } t > t_{max}$$

Resultados:

Tipo	t(día)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	120
Experimental	Pr(m)	0.1	0.28	0.56	0.75	0.96	1.2	1.43	1.62	1.8	1.80
Modelos	FF	0.10	0.30	0.51	0.725	0.94	1.155	1.37	1.585	1.80	-
	BG	0.01	0.10	0.32	0.62	0.96	1.30	1.58	1.77	1.84	-
	PM	0.03	0.27	0.52	0.766	0.99	1.21	1.42	1.61	1.80	1.90
	HH	0.17	0.28	0.47	0.71	0.99	1.25	1.46	1.60	1.69	-

Ejemplo 2. Determinar la lámina de riego total a aplicar en un sistema de riego por aspersión si la demanda máxima del cultivo de papa es de 6 mm d⁻¹, la eficiencia de aplicación del 85 %, y la conductividad eléctrica del agua de riego de 1 dS m⁻¹. Se espera tener una reducción en rendimiento menor al 20 %.

De la **Tabla 6.9** se obtiene un valor máximo del extracto de saturación (CE_r) de 3.1 dS m⁻¹ para papa con un rendimiento esperado del 80 % del potencial.

$$FL = \frac{CE_i}{(5CE_r - CE_i)} = \frac{1}{5(3.1) - 1} = 0.069$$

La lámina de agua que debe aplicarse para mantener un balance de sales neutral durante el periodo de máxima demanda es:

$$L_i = \frac{L_r}{1 - FL} = \frac{6 \text{ mm } d^{-1}}{1 - 0.069} = 6.44 \text{ mm } d^{-1}$$

La lámina bruta requerida es:

$$L_b = \frac{L_i}{e_a} = \frac{6.44}{0.85} = 7.6 \text{ mm } d^{-1}$$

Ejemplo 3. Si se tiene un gasto de 60 lpm para regar una parcela de 1 ha, estimar el tiempo requerido para aplicar una lámina bruta de 7 mm.

$$T_r = K \frac{A L_b}{Q} = 166.66 \frac{1 \text{ ha } 7 \text{ mm}}{60 \text{ lpm}} = 19.44 \text{ hr}$$

Si se tienen tres secciones de riego, se requieren 6.5 horas netas (19.44/3) para regar cada sección de riego.

Ejemplo 4. Estimar la reducción en rendimiento debido a la presencia de estrés hídrico durante diferentes etapas fenológicas y durante todo el ciclo del cultivo de maíz, esto es, se aplica la misma lámina de riego, pero se reduce (presencia de estrés) durante una etapa fenológica.

R _m (Ton ha ⁻¹)	ET _r /ET _m en ETAPA (%)				
	Vegetativa	Floración	Formación de grano	Maduración	Total
8	50	50	50	50	50
8	70	70	70	70	70
8	80	80	80	80	80
8	90	90	90	90	90

Reducción en rendimiento (1 - R_r / R_m):

R ^m (Ton ha ⁻¹)	Reducción en rendimiento en ETAPA en % (1-R _r /R _m)				
	Vegetativa	Floración	Formación grano	Maduración	Total
8	20	75	25	10	62.5
8	12	45	15	6	37.5
8	8	30	10	4	25
8	4	15	5	2	12.5

Rendimiento esperado (R_r):

Rendimiento esperado (R _r) en ton ha ⁻¹				
Vegetativa	Floración	Formación de grano	Maduración	Total
20	75	25	10	62.5
12	45	15	6	37.5
8	30	10	4	25
4	15	5	2	12.5

Ejemplo de cálculo para la etapa vegetativa con una aplicación de los requerimientos de riego del 50 % ($ET_r / ET_m = 0.5$).

Estimación del rendimiento esperado (R_r) con respecto al rendimiento máximo (R_m), para un valor de $K_y = 0.4$ y de $ET_r / ET_m = 0.5$:

$$\frac{R_r}{R_m} = 1 - K_y \left(1 - \frac{ET_r}{ET_m} \right) = 1 - 0.4(1 - 0.5) = 0.8$$

El rendimiento esperado (R_r) al aplicar solamente el 50 % de los requerimientos de riego durante la etapa vegetativa del maíz es:

$$R_r = 0.8(R_m) = 0.8(8 \text{ ton ha}^{-1}) = 6.4 \text{ ton ha}^{-1}$$

Reducción en rendimiento: $\text{reducción} = 1 - \frac{R_r}{R_m} = 1 - 0.8 = 0.2 = 20\%$

“Cuando bebas agua, recuerda la fuente”

Proverbio chino

**Calendarización
del riego en
invernadero**



7

Capítulo 7

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN INVERNADERO

Jorge Flores Velázquez y Waldo Ojeda Bustamante

7.1 Introducción

Las plantas necesitan agua para su crecimiento y para controlar su temperatura, especialmente en los días soleados y con poca ventilación. La transpiración ha sido definida como el proceso por el cual el vapor de agua escapa de las plantas, principalmente desde los estomas de las hojas a la atmósfera. La transpiración es gobernada por las mismas relaciones físicas que rigen la evaporación y se ve afectada por los mismos factores, además de otros que son característicos del tipo de vegetación.

En un invernadero, las condiciones ambientales han sido modificadas para hacer más eficiente el proceso transpirativo y fotosintético. Una considerable cantidad de energía se requiere para evaporar el agua de las cavidades estomáticas. Si el agua no se evaporara, esta energía se acumularía y calentaría la planta. Sin la transpiración las plantas podrían alcanzar temperaturas letales.

El proceso de la transpiración en un invernadero es particularmente importante, debido al reducido espacio en el que se desarrolla la planta y la intrínseca relación entre las variables ambientales que interactúan con ella. El suelo tiene un papel fundamental pues es el embalse que regula el suministro disponible para el uso de las plantas. La transpiración está controlada esencialmente por la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y el gradiente de presión de vapor. Además de las plantas y el suelo, para el calendario del riego deben atenderse factores tales como magnitud de las superficies de las raíces, tipo de hojas, densidad de las plantas y conductividad hidráulica del suelo.

El movimiento del agua del suelo hacia la planta inicia con la absorción de agua por las raíces; después es conducida ascendente a través de pequeños conductos tubulares conocidos como xilemas, los cuales se dividen hacia las ramas y hojas para finalizar en terminales que permiten la interacción con la atmósfera, llamados estomas.

En este capítulo se exponen los parámetros útiles para la calendarización del riego en invernaderos. Se describen los procesos de transpiración que indicarán la lámina de agua a reponer mediante el riego. La distribución de esta cantidad de agua depende del

medio de cultivo y de la edad de la planta. Como su espacio es reducido, el riego debe ser casi continuo, por lo que la exigencia del manejo se vuelve crítica. En un invernadero se debe establecer un calendario de alta frecuencia en el riego.

7.2 El riego en invernaderos

Un invernadero es aquella estructura que protege al cultivo de la lluvia y el viento mediante una cubierta transparente, usualmente en forma de película plástica o de vidrio. Esta cubierta permite el paso de la radiación solar lo que dificulta la pérdida de calor, en particular la banda del infrarrojo térmico. El grado de modificación climática depende del nivel tecnológico de los materiales empleados en su construcción y de los equipos complementarios de climatización, calefacción, humidificación, ventilación, enriquecimiento carbónico, iluminación artificial, etc.

La combinación de todos estos factores hace que los frutos de las plantas en un invernadero sean más suaves, tiernas y succulentas en comparación con las que crecen en campo abierto (**Figura 7.1**). Esta modificación climática permite adelantar cosechas, aumentar rendimientos o cultivar fuera de época. En los últimos años se ha producido una expansión de la superficie protegida en forma de acolchados, túneles e invernaderos como respuesta a la demanda de productos frescos durante todo el año.



Figura 7.1 Características de un pimiento cultivado en invernadero

La modificación de las condiciones ambientales implica también la modificación de las necesidades hídricas de un cultivo en invernadero con respecto a un cultivo a cielo abierto. El uso de cubiertas protectoras agrega un componente que modifica las

condiciones en las cuales se desarrollan los cultivos, pues disminuyen la evapotranspiración al reducir la radiación incidente y confinar el vapor de agua en un ambiente cerrado (**Figura 7.2**). A mayor control climático, menor es el consumo evapotranspirativo de los cultivos.



Figura 7.2 Invernadero tipo cenital de 5 naves

Dependiendo de las condiciones climáticas del lugar se han desarrollado diversos tipos de invernaderos, a fin de satisfacer necesidades de ventilación para controlar la temperatura y la humedad relativa. Uno de los invernaderos más importantes en regiones templadas es el que presenta una cubierta plástica que normalmente no dispone de calefacción o solo de manera parcial para periodos cortos. Este tipo de invernadero es representativo en México, sin embargo, el largo periodo estival con altas temperaturas origina problemas al cultivo y el manejo en el interior. Aunado a esto, las técnicas de enfriamiento pasan por la optimización de la ventilación natural, a la utilización de sistemas de humidificación y en casos extremos la ventilación forzada (Montero *et al.*, 2002).

En cuanto al ambiente, los invernaderos presentan aspectos negativos como sus necesidades energéticas en climas fríos, la acumulación de residuos plásticos y aspectos paisajísticos. Entre los aspectos positivos están el mejor uso de recursos naturales tales como la radiación solar, el suelo y especialmente el agua. Se trata de un sistema intensivo que en su manejo mismo conlleva la necesidad de aprender a controlar los sistemas que a su vez lo integran.

7.3 Requerimientos de riego de los cultivos en invernadero

Además de las ventajas relativas al manejo de la cosecha y una mejor calidad en los frutos, una de las ventajas sustantivas de esta tecnología es precisamente el uso eficiente del agua. Hablar de un ambiente protegido o en invernadero implica un estricto control de las variables climáticas que interactúan con el cultivo. Entre los factores definitivos sobre la producción y desarrollo de las plantas se encuentra el riego, el cual se pretende aplicar de manera puntual y en las dosis exactas que el cultivo requiere, por lo que conocer los requerimientos de riego constituye una parte medular en el diseño de un sistema de riego en invernadero.

El agua que las plantas absorben es utilizada para su crecimiento y para controlar su temperatura. La cantidad de agua que la planta necesita depende de varios requerimientos; el más importante es el que se da a través de los estomas, por donde además también ocurre el proceso de entrada de bióxido de carbono que se requiere para llevar a cabo la fotosíntesis y en consecuencia, para el crecimiento de la planta.

Aun cuando el agua es absorbida por las raíces de la planta, es el proceso de la transpiración el que define la cantidad de agua que ha de ingresar a las plantas. En este sentido, el suelo o medio de cultivo tiene un papel fundamental pues es el embalse que regula el suministro de agua disponible para el uso de las plantas. La transpiración está controlada esencialmente por la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento y el gradiente de presión de vapor. Depende también de factores de las plantas y del suelo, tales como la magnitud de las superficies de las raíces, tipo de hojas, densidad de las plantas y conductividad hidráulica del suelo (**Figura 7.3**).

La transpiración estomática es la más importante, pues cerca del 90 % del agua transpirada y la mayoría del bióxido de carbono circula por los estomas. La apertura y cierre de los estomas está controlado por células oclusivas que al llenarse de agua se vuelven rígidas y turgentes, lo cual permite la abertura estomática. Pero cuando la planta está deshidratada o en proceso de deshidratación, estas células colapsan provocando que la cavidad se cierre, lo que impide realizar el intercambio de gases entre la planta y la atmósfera. Cuando el agua está fluyendo por las hojas se crea una presión mayor que la atmosférica en las células de las hojas, estado que se conoce como turgor de la hoja. Durante la noche prácticamente no hay transpiración, sin embargo, las raíces pueden continuar absorbiendo agua a una tasa reducida, lo que generaría una presión positiva en la hoja y forzaría la liberación de agua por la hoja en forma líquida, fenómeno conocido como gutación (**Figura 7.4**).

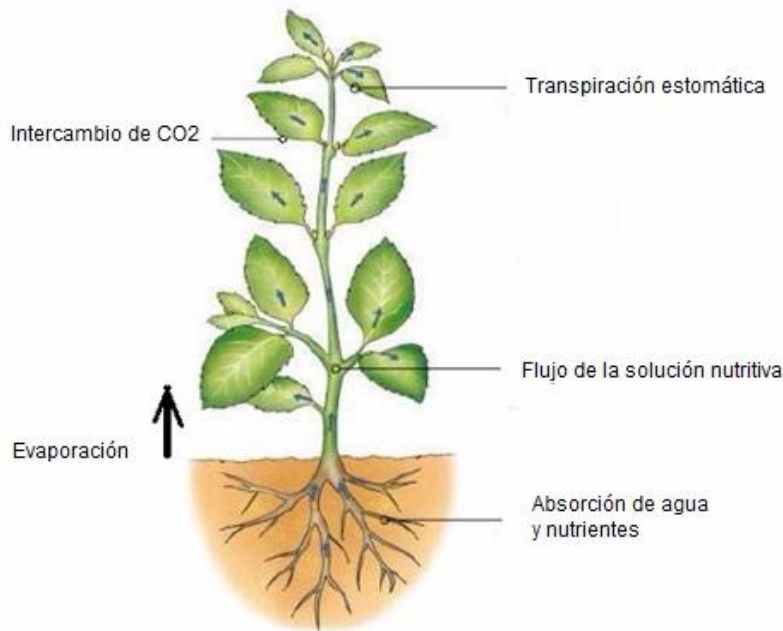


Figura 7.3 Circulación del agua del suelo a través de la planta hasta la atmósfera

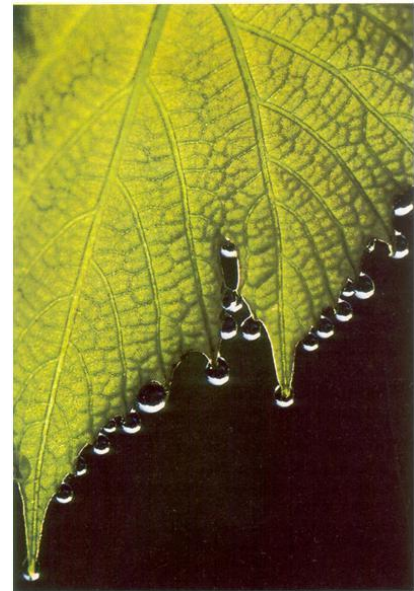


Figura 7.4 El proceso de gutación

Aunque la mayor parte del agua se pierde por transpiración, su deficiencia tiene graves consecuencias en el crecimiento, rendimiento y susceptibilidad de los cultivos a enfermedades y daño por insectos. Hay una marcada variación horaria en los procesos evaporativos y transpirativos que se presentan en un invernadero y es difícil separarlos, pues se presentan de manera simultánea. En condiciones de invernadero la evaporación del suelo o sustrato puede reducirse al mínimo, sobre todo cuando la superficie del suelo está cubierta.

En el invernadero el balance hídrico puede reducirse a la **Ecuación 7.1** (**Figura 7.5**).

$$RR = RIEGO - DRENAJE \pm \Delta\theta = Evaporacion + Transpiracion = ETr \quad (7.1)$$

En un invernadero, el planteamiento de la ecuación de balance hídrico permite definir la dosis de riego (**Figura 7.5**). Idealmente, después de aplicar una cantidad de agua mediante el riego y restar el excedente que ha sido drenado, la cantidad de agua que la planta utiliza constituye la lámina a reponer mediante el siguiente riego. El agua por reponer es la que la planta y el medio de cultivo están perdiendo, y que en su conjunto se denomina evapotranspiración.

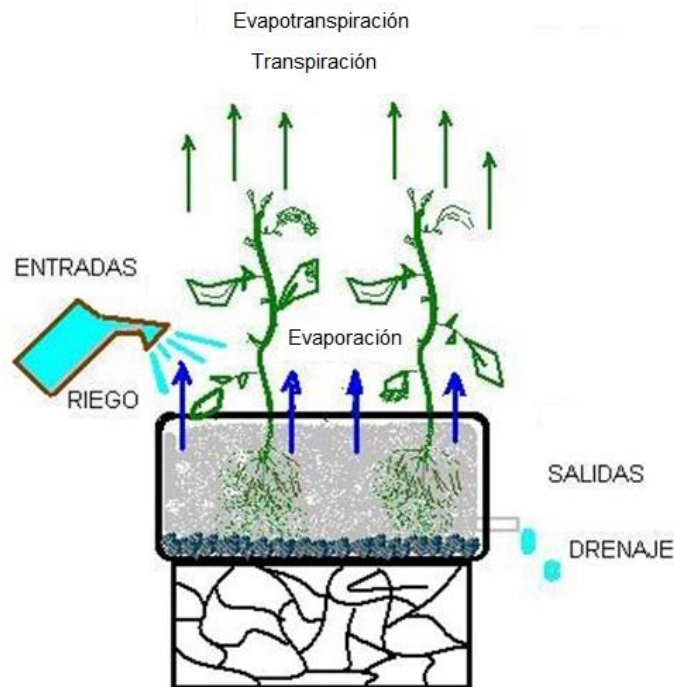


Figura 7.5 Formación de la ecuación de balance al nivel lisímetro

7.3.1 Evapotranspiración

En el planteamiento del balance hídrico dentro del invernadero, hay que restituir la transpiración del cultivo convertida en lámina de riego. Este parámetro es el más difícil de cuantificar debido a que es el operador natural mediante el cual parte del agua utilizada por las plantas regresa al sistema atmosférico en forma de vapor. En condiciones de invernadero, la evaporación directa del agua en el sustrato es mínima, por lo que el agua se pierde básicamente en el proceso transpirativo de las plantas, o por el drenaje, en el caso de los sistemas abiertos.

La evaporación es un proceso continuo que ocurre mientras el aire en contacto con la superficie no alcanza niveles de saturación con relación al vapor de agua en el aire. Cuando este punto de saturación se iguala, la condensación debe ocurrir para que la evaporación pueda continuar. Los efectos no se pueden analizar de manera aislada, pues la evaporación está conectada al balance energético del invernadero, donde al reducir la superficie de exposición, el agua solo es evapotranspirada por la planta (**Figura 7.6**).



Figura 7.6 Cultivo de frijol en invernadero. Un alto índice de área foliar para transpirar

Los métodos para estimar la evapotranspiración en invernadero son una extensión de los tradicionales en campo abierto, pero hay que adecuar metodologías para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y la real. De acuerdo con la FAO, una manera de calcular la evapotranspiración de los cultivos es tomar en cuenta los factores climáticos mediante el cálculo de la evapotranspiración de referencia y la edad del cultivo caracterizada por un coeficiente de cultivo (K_c), usando la ecuación generalizada $ET_r = K_c ET_o$.

Los valores experimentales de ET_r se obtienen a partir de las estimaciones en el cambio de humedad o extracción de agua mediante lisímetros, o a través de un muestreo intensivo de humedad con sensores. Una forma más rápida es usar métodos micro meteorológicos, como la correlación turbulenta o la relación de Bowen, que requiere de estimaciones instantáneas, del orden del segundo, asociados con el flujo de vapor sobre una cubierta vegetal.

Como las condiciones y manejo de los cultivos (tutorado, densidad, altura, etc.) en invernadero son distintas a los de ambientes abiertos, es necesario obtener los coeficientes de cultivo bajo ambientes protegidos. Fernández *et al.* (2001) obtuvieron experimentalmente las curvas del coeficiente para varios cultivos hortícolas. Los valores de ET_o y ET_r se obtuvieron directamente en invernaderos por medio de lisímetros (**Figura 7.7**).

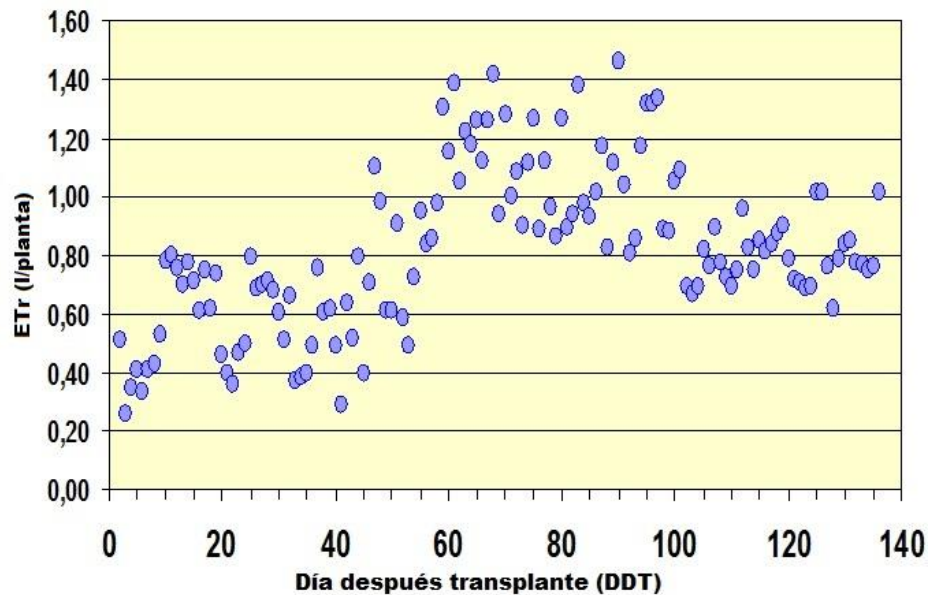


Figura 7.7 Evolución temporal de la ET_r en el ciclo de cultivo del tomate en invernadero

7.4 Métodos para calcular la evapotranspiración de referencia (et_o) con base en datos meteorológicos

La estimación periódica de la evapotranspiración de referencia (ET_o) constituye la base de la calendarización del riego. Hay que aclarar que la mayoría de las ecuaciones son empíricas, algunas desarrolladas desde hace más de 50 años, pero debido a la complejidad de los factores que involucran, fue necesario esperar el desarrollo de estaciones meteorológicas automatizadas que permitieran la generación o estimación de los factores de dicha ecuación. Por otro lado, estas ecuaciones se generaron a partir de experimentos desarrollados a cielo abierto y bajo condiciones específicas que han evolucionado en el tiempo y espacio adecuándose mediante modificaciones y coeficientes, de manera que se puedan aplicar a la mayoría de las regiones del mundo.

Lograr el potencial productivo de los cultivos en invernadero implica conocer los procesos que en él se desarrollan, debido a que generalmente estos se encuentran fuertemente interrelacionados. Así, la transpiración de la planta será resultado del contenido de humedad en el ambiente y del suelo o sustrato, lo cual involucra variables tales como temperatura, velocidad del viento, radiación, edad de la planta, etc.

En la **Figura 7.8** se exponen algunos de los procesos y variables que influyen en el proceso transpirativo, y por lo tanto en la programación del riego en invernaderos. Sin embargo, la evapotranspiración de referencia es un parámetro muy complicado de

estimar. En el siguiente apartado se revisarán algunos de los métodos que se han empleado para calcularla.

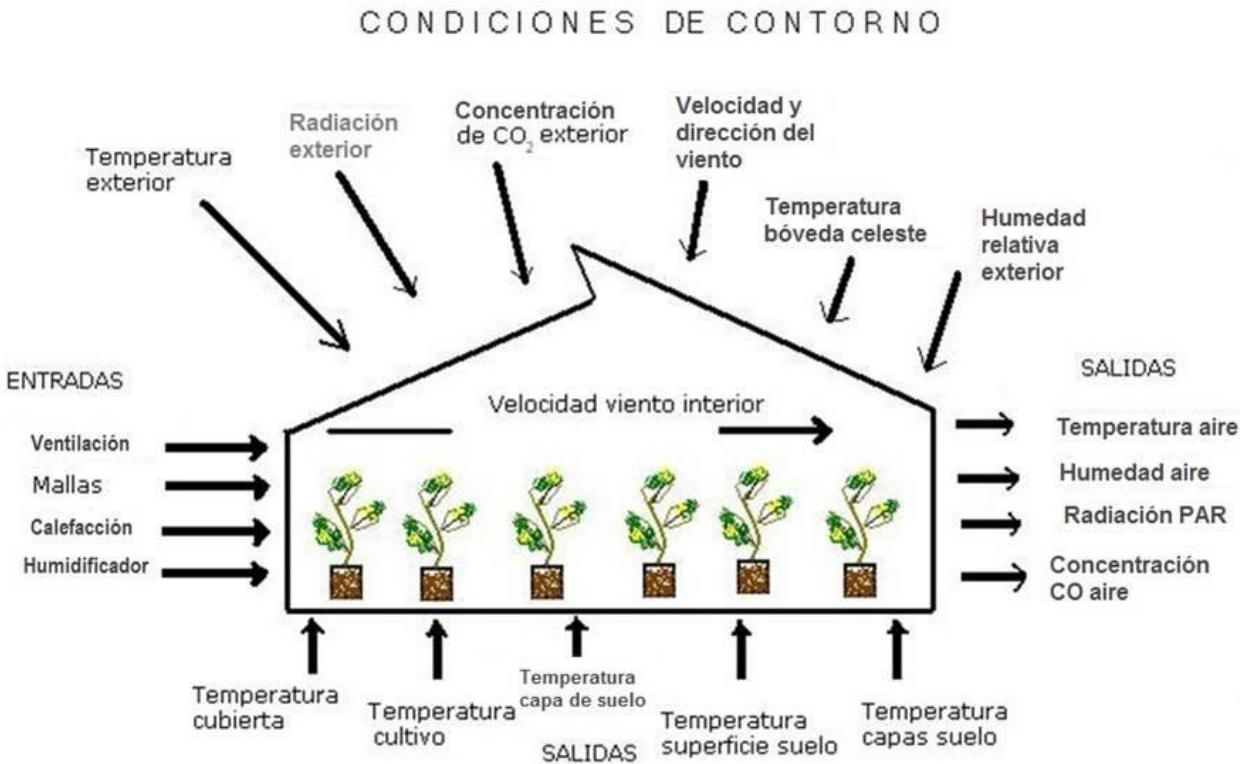


Figura 7.8 Procesos inherentes al balance de energía en un invernadero

7.5 Métodos directos para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_r)

7.5.1 Lisímetro

Un lisímetro es un depósito que está enterrado, sus paredes son verticales, está abierto en la parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar. En este depósito se recomienda cultivar vegetales cuya profundidad y desarrollo radicular no se vean afectados por las dimensiones del mismo (**Figura 7.9**). Existen básicamente dos tipos de lisímetros, de balance y de pesada.

En el caso del lisímetro de balance primero se elabora la caja y luego se rellena con el material donde se desarrollará el cultivo, dejando una salida para cuantificar el volumen drenado. El contenido del suelo se lleva a un nivel bien determinado, el fondo del lisímetro, y se recoge y se mide el agua de drenaje. Las dimensiones de un lisímetro de balance varían de acuerdo con el objetivo del estudio, con valores de superficies que oscilan entre 1 y 10 m², y con una profundidad de 1 m de suelo o más.

Por otra parte, el lisímetro de pesada se construye en el lugar donde se lleva a cabo el experimento y solo se perforan las paredes y el piso donde se coloca la balanza para llevar el control del contenido de humedad con base en el peso.

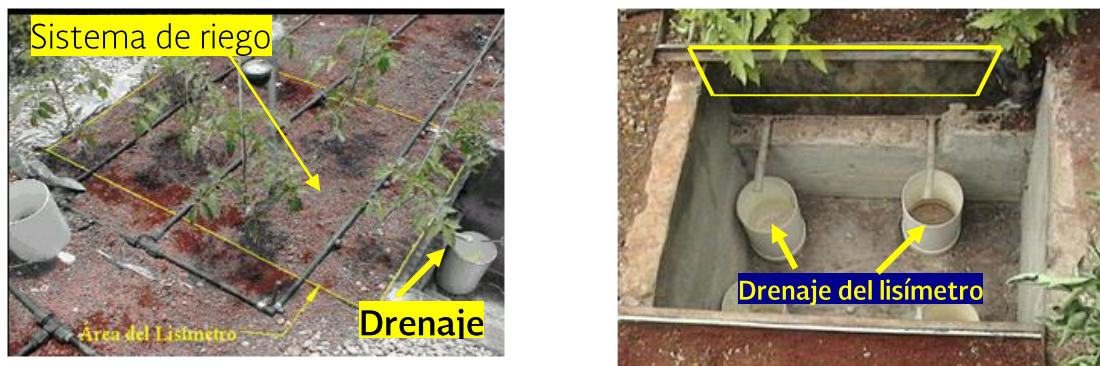


Figura 7.9 Esquema de un lisímetro de balance en un invernadero

Estos dos tipos de lisímetros se pueden combinar de acuerdo con las posibilidades y exigencias. La instalación de un lisímetro de pesada resulta bastante costosa, pero en cultivos de invernadero donde se coloca el sustrato en la maceta, es posible colocarla sobre una balanza de precisión y poder hacer la ecuación de balance por cada maceta (planta). Se puede determinar la evapotranspiración del cultivo mediante la ecuación de balance en un lisímetro volumétrico, en un invernadero (**Figura 7.5**). Se mide ETr si el suelo está cubierto de vegetación y Ev si está desnudo.

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = Tr + Ev \quad (7.2)$$

En la etapa inicial del cultivo, sin embargo, una vez que el cultivo incrementa su follaje (IAF) la ecuación queda:

$$RR = \text{RIEGO-DRENAJE} = ETr \quad (7.3)$$

7.6 Calendarización del riego

Una vez determinada la cantidad de agua (Lr) que hay que reponer al cultivo para su óptimo desarrollo y mejorar los rendimientos, surge la necesidad de abastecerlo en tiempo y forma adecuada con el mínimo exceso para evitar el lavado de sales y para ahorrar en el consumo de agua y nutrientes que por esta vía se administran. El calendario de riego se refiere a la oportuna aplicación en tiempo y cantidad de agua que la planta ha utilizado en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración. En riego de alta frecuencia, como es el caso de los invernaderos, uno de los retos más importantes es adecuar la oferta a la demanda. Esto parece sencillo, pero se puede complicar porque la evapotranspiración del cultivo es un fenómeno continuo, a diferencia del riego, que se aplica de manera puntual.

Las pérdidas de agua ocurren cuando se mueve fuera del alcance de las raíces debido a una diferencia de gradiente hidráulico, en respuesta a procesos naturales como la percolación y evaporación. Cuando el agua se aplica en exceso, de tal manera que el suelo no puede retenerla y almacenarla en su espacio poroso, ocurre la percolación profunda y las raíces no pueden aprovechar el agua. En sistemas cerrados estas limitantes cobran mayor importancia porque se suelen usar sustratos como soporte de la planta, y sus características de porosidad y capacidad de retención de humedad en relación con el suelo difieren sustancialmente.

Así, es posible determinar la programación de riego en días o un riego diario en el caso de los suelos, mientras que en sustratos la cantidad de riegos puede ir desde los 4 al día en etapas iniciales, hasta los 30 en la máxima demanda. Esto se debe a que en sistemas cerrados el volumen de suelo (sustratos) está limitado por la capacidad de la bolsa o de la cama según el caso, y por la capacidad de retención hídrica de dicho sustrato que, al ser mucho menor que la del suelo, obliga a reducir el volumen del riego, pero aumentar su cantidad (**Figura 7.10**).



Figura 7.10 Sistema de riego por goteo en sustrato tezontle rojo

Entre los métodos actuales para estimar el momento del riego está la técnica llamada *Speaking plant* que, traducida al español sería “hablarle a la planta” y consiste en colocar una serie de sensores a las plantas para determinar el punto en el cual comienzan a sentir estrés debido a la falta de agua. El momento del riego se puede determinar con base en tres métodos:

1. Utilizando variables climáticas
2. Mediante variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato
3. Usando indicadores de estrés en la planta

Lograr los mejores rendimientos tiene implicaciones diversas, pero debe haber un balance entre el agua absorbida y el agua perdida por transpiración y evaporación. Estimar el momento del riego puede complicarse sobre en todo en lo que se refiere a poder cuantificar de manera rápida y precisa estos cambios. Las dificultades para correlacionar los diversos factores para la calendarización del riego han llevado a calcularlos por separado, es decir, se aísla alguno de ellos y se propone como indicador de riego. En los invernaderos, dependiendo del indicador que se desee medir, existen diferentes instrumentos que constituyen una potente herramienta para dicho fin; la **Tabla 7.1** muestra los más importantes.

Tabla 7.1 Principales variables climáticas y sensores para determinar el momento del riego (Bringas, 2003)

Variables climáticas	Sensores
Temperatura Humedad relativa Radiación solar Radiación PAR CO ₂	Termopares, resistivímetros (Pt, Cu) Psicrómetros, capacitómetros Solarímetros, piranómetros Sensores ‘Quantum’ Analizadores de gas por infrarrojo (IRGA)
Variables del sustrato	Sensores
Temperatura Potencial hídrico Contenido de humedad	Termopares, resistivímetros (Pt, Cu) Tensiómetros Sensores acústicos (RMN)
Variables de la planta	Sensores
Temperatura orgánica Transpiración Flujo de savia Fotosíntesis Diámetro del tallo Potencial hídrico Contenido hídrico	Termopares, termómetros infrarrojos Lisímetros, balances Flujómetros Cámaras foliares Transductores de variación lineal Psicrómetros foliares, cámara de presión Sensores acústicos (RMN)

7.6.1 Métodos basados en variables climáticas

Son métodos basados en la capacidad evaporante que tiene la atmósfera para succionar el agua de la superficie terrestre, principalmente en forma de calor latente de vaporización. En invernadero es importante adaptar las condiciones para que dichos indicadores sean representativos, esto es, por ejemplo, la cantidad de agua en el sustrato debe ser suficiente y constante. Se ha detectado una relación directa entre las variables climáticas y el proceso de evapotranspiración (Fernández et al., 2001). La **Figura 7.11** muestra la relación que existe entre la radiación y la transpiración del cultivo; en los días soleados con más de $600 \text{ w m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ se puede observar mayor transpiración que en los días nublados.

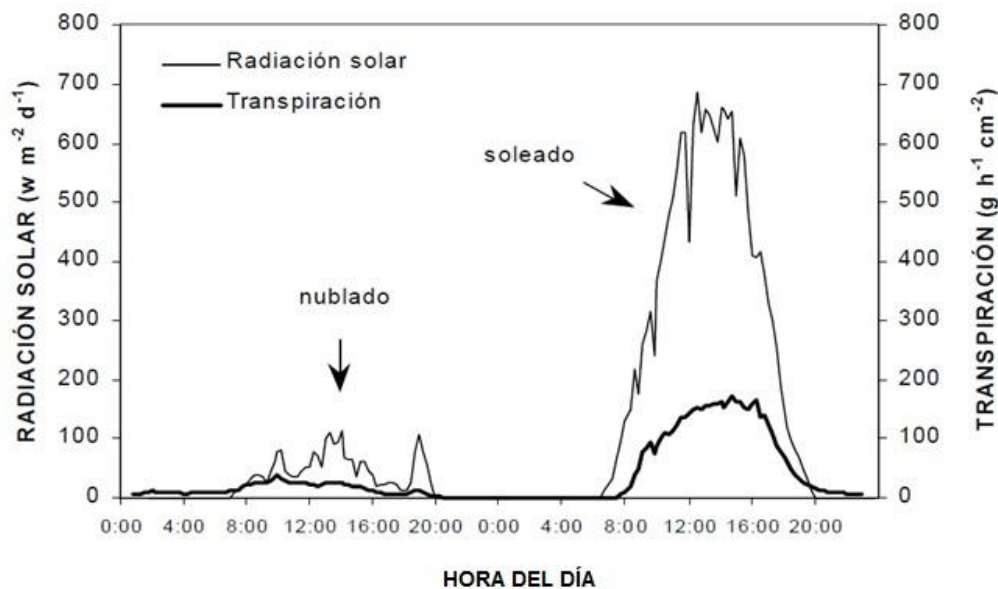


Figura 7.11 Variación de la transpiración en función de la radiación al interior del invernadero

7.6.1.1 Radiación solar

La cantidad de radiación solar debe ser suficiente para que se lleve a cabo la transpiración; es un factor que involucra la física de la evaporación y asume que el agua requiere una cierta cantidad de energía, normalmente 2.45 kJ por milímetro. Esto puede también ser escrito como: 1 kJ de radiación puede evaporar 0.41 ml de agua (Nederhoff, 2001). La radiación se mide generalmente fuera del invernadero, mientras que la transpiración ocurre en el interior de este. Una parte de la radiación solar (25-30 %)

nunca alcanza las plantas debido a la reflexión del techo. Por lo tanto 1 kilojoule de radiación solar medida fuera no evapora 0.41 ml de agua dentro del invernadero.

- 1 kilojoule medido afuera transpira aproximadamente 0.3 ml dentro del invernadero. Haciendo transformaciones, $1 \text{ kJ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ puede evaporar 0.3 ml de agua cada segundo por metro cuadrado. Esto implica que en una hora ($0.3 \times 3600 = 1080 \text{ ml m}^{-2} \text{ h}^{-1}$), o lo que es lo mismo, $1 \text{ l m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.
- Una intensidad de radiación de 1000 W m^{-2} ($1000 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) proporciona una tasa transpirativa en el invernadero de $1 \text{ litro m}^{-2} \text{ h}^{-1}$.
- La radiación total es el producto de la intensidad por el tiempo y usualmente se expresa en J cm^{-2} . Cuando la intensidad de la radiación es máxima (alrededor de 1000 W m^{-2} o $1000 \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) durante 1000 segundos (16.6 min) la suma de la radiación es 1000000 J m^{-2} , lo que equivale a 100 J cm^{-2} (porque 1 m^2 es igual a 10000 cm^2).
- También se puede conseguir la misma suma de radiación con una intensidad de 200 W m^{-2} durante 5000 s (1 h 23.3 min).
- Con estas relaciones es fácil observar que 100 J cm^{-2} pueden transpirar 0.03 ml de agua por cm^2 , que es igual a 300 ml m^{-2} .

La suma de la radiación medida fuera de 100 J cm^{-2} provoca una transpiración de 300 ml m^{-2} en el invernadero. El conocimiento de estos datos puede ayudar a hacer varios cálculos, por ejemplo, para el cálculo de la demanda por estación, y para escoger el escenario en el control del riego. Si se pretende reponer la cantidad de agua transpirada, se deben proporcionar 300 ml m^{-2} cada vez que se acumula una radiación de 100 J cm^{-2} recibidos. No obstante, existen buenas razones para dar más agua que solo la transpirada. Una cierta cantidad de agua puede ser aplicada por pequeños volúmenes y alta frecuencia, o grandes volúmenes y menor frecuencia, con las consecuencias de mayor drenaje. Al decidir el volumen y la frecuencia de riego también hay que considerar el tipo de crecimiento y la sincronización desde el inicio por la mañana hasta el término por la tarde.

7.6.1.2 Déficit de presión de vapor (DPV)

El aire tibio puede conducir mucho más vapor de agua que el aire frío; por cada incremento de la temperatura, el contenido de agua se duplica (**Tabla 7.2**). La humedad del aire también se puede expresar como déficit de presión de vapor (DPV) en kilopascales (kPa). El DPV es un indicador de la cantidad de agua que se pierde comparada con la saturada (esto es, comparada con el 100 % de humedad relativa). El DPV es la fuerza de conducción para la transpiración, es decir, la fuerza de la presión de vapor para que la planta transpire.

Técnicamente se recomienda usar el DPV más que la HR para controlar la transpiración. Como se observa en la **Tabla 7.2**, las variables de humedad relativa, humedad absoluta, déficit de presión de vapor y punto de rocío están relacionadas. Entender estas relaciones permite establecer los comparativos del momento adecuado para aplicar el riego. A su vez, calefacción y ventilación son medidas para controlar la humedad, y por ende el DPV. Si se incrementa la temperatura, el aire puede contener mayor cantidad de vapor de agua, lo que hace decrecer la humedad relativa, pero incrementa el DPV (**Tabla 7.2**).

Tabla 7.2 Humedad del aire en diferentes unidades (Nederhoff, 2001)

HR %	10 °C			15 °C			20 °C			25 °C			30 °C		
	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C	HA g/m ³	DPV kPa	Pto de R °C
100	9.4	0	10.0	12.9	0	15.0	17.3	0	20.0	23.1	0	25.0	30.4	0	30.0
95	8.9	0.06	9.2	12.2	0.09	14.2	16.5	0.12	19.2	21.9	0.16	24.1	28.9	0.21	29.1
90	8.5	0.12	8.4	11.6	0.17	13.4	15.6	0.23	18.3	20.8	0.32	23.2	27.4	0.42	28.2
85	8.0	0.18	7.6	10.9	0.26	12.5	14.7	0.35	17.4	19.6	0.48	22.3	25.9	0.64	27.2
80	7.5	0.25	6.7	10.3	0.34	11.6	13.9	0.47	16.4	18.8	0.63	21.3	24.3	0.85	26.2
75	7.1	0.31	5.8	9.6	0.43	10.6	13.0	0.59	15.4	17.3	0.79	20.3	2.8	1.06	25.1
70	6.6	0.37	4.8	9.0	0.51	9.6	12.1	0.70	14.4	16.2	0.95	19.1	21.3	1.27	23.9
60	5.6	0.49	2.6	7.7	0.68	7.3	10.4	0.94	12.0	13.9	1.27	16.7	18.3	1.70	21.4
50	4.7	0.61	0.1	6.4	0.85	4.7	8.7	1.17	9.3	11.6	1.59	13.9	15.2	2.12	18.4
40	3.8	0.74	-2.9	5.2	1.02	1.5	6.9	1.41	6.0	9.2	1.90	10.5	12.2	2.55	14.9
30	2.8	0.86	-6.7	3.9	1.20	-2.4	5.2	1.64	1.9	6.9	2.22	6.2	9.1	2.97	10.5

Nota. HR=humedad relativa (%); HA= humedad absoluta (g/m³); DPV= déficit de presión de vapor (kPa); Pto de R=temperatura del punto de rocío (°C)

La forma de controlar un invernadero a menudo pone un límite para mantener una cierta humedad de aire, por ejemplo 70 u 80 % RH. Esto no siempre es claro ya que los ordenadores pueden usar una temperatura supuesta mínima, pues la misma cantidad de humedad puede diferir en función de la temperatura. La temperatura puede usarse para estimular la transpiración, estimular el movimiento de aire, la activación supuesta de las plantas, cuidar el secado de las plantas cuando la humedad es alta, o permitir el enriquecimiento de CO₂.

7.6.2 Métodos basados en variables que indiquen el contenido de humedad en el suelo o sustrato

La calendarización del riego se basa comúnmente en la verificación rutinaria de la humedad del suelo en la zona radical durante el ciclo fisiológico del cultivo. Cuando se usa la cantidad de humedad en el suelo como indicador para la calendarización de riego,

hay que considerar mantener el suelo o sustrato con humedad que pueda ser aprovechada por la planta.

Los sensores que miden el contenido de agua en el suelo permiten conocer cómo el cultivo va extrayendo el agua del suelo, de forma que el riego puede programarse para mantener un contenido de agua en el suelo entre dos niveles de humedad. La **Figura 7.12** muestra la evolución del contenido de agua en el suelo durante varios ciclos de riego. Se fija el límite superior para evitar drenaje, y por tanto el lavado de fertilizantes, y el límite inferior representaría el punto a partir del cual el cultivo sufre estrés hídrico. El equipo usado para estos fines es variado; sin embargo, su uso depende, entre otras características, del tipo de sustrato, frecuencia de riegos y área de raíces.

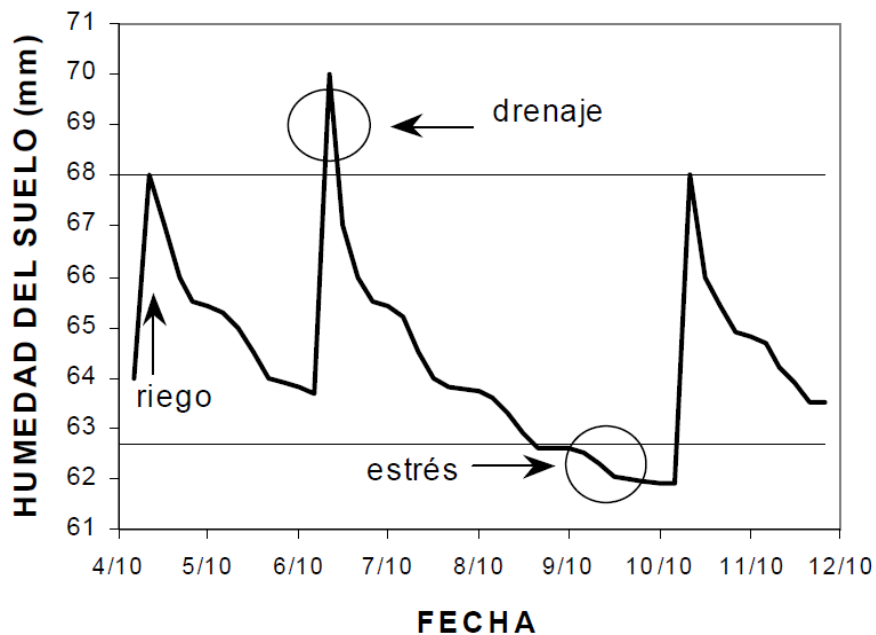


Figura 7.12 Evolución del contenido de agua del suelo tras varios ciclos de riego (Fernández *et al.*, 2001)

7.7 Programación del riego

Debido al constante incremento en la superficie cultivada en invernaderos, la programación del riego se ha vuelto fundamental en este tipo de sistemas. Se han desarrollado metodologías dirigidas a solucionar el problema de la aplicación del riego, que actúen atendiendo los procesos evapotranspirativos que sufre el cultivo, activando el riego mediante sensores externos (**Figura 7.13**).



Figura 7.13 Sistema de riego por goteo tipo “espaguete” en bolsas de tezontle

En el sistema invernadero es normal que en el riego se apliquen los fertilizantes, por eso todos los equipos de fertirrigación suelen ser automáticos, de manera que la aplicación puede ser programada en función de la demanda. Los equipos de fertirrigación cuentan con electrodos que cuantifican la cantidad de iones (solución nutritiva o toxicidad) para relacionar los requerimientos de la planta y combinar la aplicación del suministro hídrico con el aporte de los fertilizantes dependiendo de la demanda instantánea del cultivo.

7.7.1 Algunas maneras de programar el riego en invernadero

7.7.1.1 Volumen constante

Una vez definida la lámina de riego bruta y diaria puede hacerse una distribución del agua; así, por ejemplo, si en la etapa inicial se está cultivando tomate, cuyos requerimientos de riego varían entre los 400 y 500 ml dependiendo del medio de cultivo, se pueden aplicar 4 riegos de 100 ml cada uno.

7.7.1.2 Tiempo constante

Existen temporizadores muy prácticos que permiten programar una serie de riegos durante el día, manteniendo un tiempo constante. Por ejemplo, si cada planta tiene un gotero de 2 lph, significa que se aplica 0.55 ml s^{-1} , por lo que, si se necesita aplicar 400 ml, se debe regar 182 seg, o lo que es lo mismo, dar 4 riegos de 3 min cada uno.

Una combinación de estos métodos puede afinar el riego. Si se pretende aplicar una mayor cantidad de agua (volumen), o hacerlo de manera más frecuente a la hora de máxima insolación, podría ser una dosis constante (volumen) y una frecuencia variable, o viceversa, mantener la frecuencia constante y variar los volúmenes. El mejor método deberá elegirse en función de las características del cultivo, del medio de cultivo y del clima específico de la región.

7.7.1.3 Balance hídrico (demanda del cultivo)

Cuando se utilizan valores instantáneos se dice que la programación es en tiempo real; en cambio, si se utiliza una serie de datos históricos de la variable que se haya seleccionado, se calculan promedios, y con base en ellos se programa el riego, la programación se haría en tiempo promedio.

Entre los factores que permiten determinar la demanda del cultivo se mencionó, entre otros, el lisímetro de balance, dispositivo que permite llevar un control diario entre la cantidad de agua aplicada (RR) y la consumida por la planta (ETr). Mientras la planta incrementa su área foliar, incrementa también la superficie de exposición y por ende el número de estomas, lo que resulta en un incremento de la transpiración, es decir, los requerimientos de riego. Otro dispositivo que permite hacer este cálculo es la balanza, sobre todo en cultivos en sustrato. Una balanza registra el peso antes y después de la aplicación del riego; la diferencia es el peso de la planta, por lo que así se cuenta con una aproximación bastante precisa del momento del riego.

7.7.1.4 Método de la radiación

Dado que hay una relación entre la radiación solar y la transpiración del cultivo, es posible programar el riego mediante sondas de radiación, las cuales captan el nivel de radiación solar ($W m^{-2}$) que resulta proporcional al consumo hídrico del cultivo. Cuando se alcanza este valor, se acciona el riego. Esta programación se puede fijar partir de umbrales preestablecidos de radiación; una vez en el umbral, se activa el riego y el contador se pone a cero para iniciar un nuevo ciclo. Este método se puede aplicar tanto a cultivos en suelo como hidropónicos. En la **Figura 7.14** se esquematiza el procedimiento, que se describe a continuación:

1. Definir el valor crítico para iniciar el riego, en este caso $X_c = 20 Mj m^{-2}$.
2. Estimar el valor del indicador al inicio del ciclo x_0 .
3. Ajustar el valor del indicador por día i , x_i .
4. Comprobar si el indicador es menor o igual al crítico ($x_i \leq x_c$), y evaluar si se alcanza el momento del riego. Si es así, se aplica el riego y se actualiza el indicador (x_i).
5. Actualizar el valor crítico (x_c) del indicador X para el día i .

Este proceso es iterativo y depende del indicador; mientras más pequeño sea el intervalo, más preciso será el riego. En la **Figura 7.14** se ha definido el riego cada 3 Mj m⁻² por lo que se aplicarán 5 riegos. Las flechas indican la hora y el volumen que habrá sido calculado previamente en función del consumo evapotransporativo con alguno de los métodos expuestos.

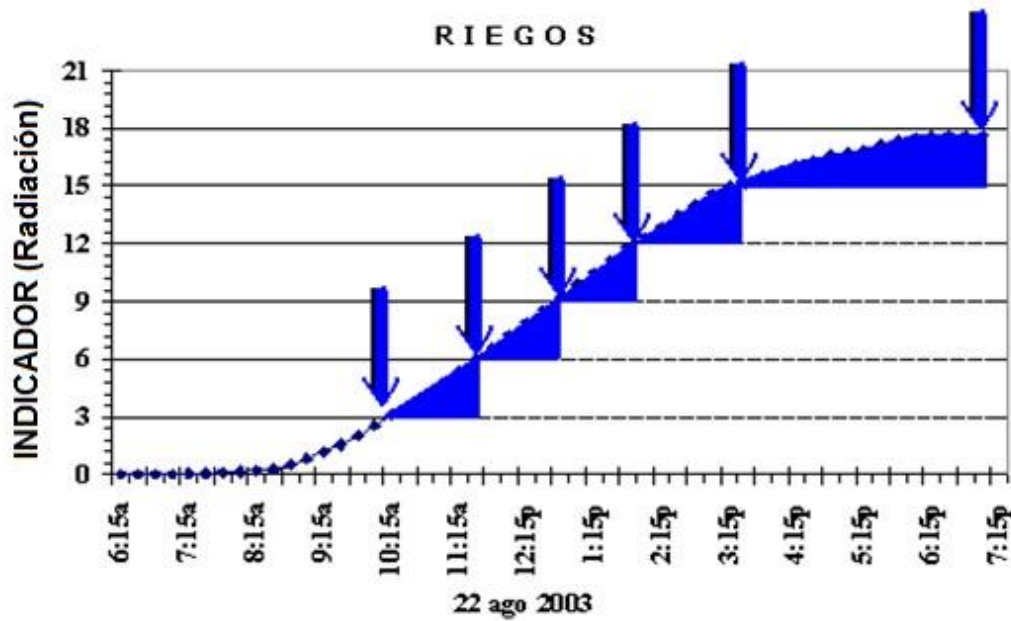


Figura 7.14 Calendarización del riego en función de la radiación

Las plantas consumen grandes volúmenes de agua, de manera que por cada kilogramo de producto agrícola se requieren varios cientos de kilogramos de agua. La eficiencia en invernadero de un metro cúbico de agua, es decir, la producción en kilos que se obtiene gracias al uso de esta cantidad de agua, puede llegar a ser hasta dos y tres veces superior en una superficie invernada que en un cultivo al aire libre. La **Figura 7.15** muestra la evolución de la transpiración de un cultivo de tomate en pleno desarrollo en un día, estimado mediante el sensor de flujo de savia y su respuesta correspondiente al momento de aplicar los riegos. Resalta el mayor espaciamiento en tiempo del primer al segundo riego (de 10 a. m. hasta las 11:30 a. m.); luego los riegos son más continuos.

Un inconveniente de la programación del riego en función de la radiación es el margen de error en días nublados, en cuyo caso se aconseja combinar la radiación con algún otro factor, tal como una bandeja de drenaje, que confirme que la cantidad de agua aplicada es suficiente. Algunos resultados sobre este método (Flores et al., 2005)

indican que en días soleados es conveniente aplicar un riego al final del día, y en época de máxima demanda se recomienda aplicar también un riego a la salida del sol.

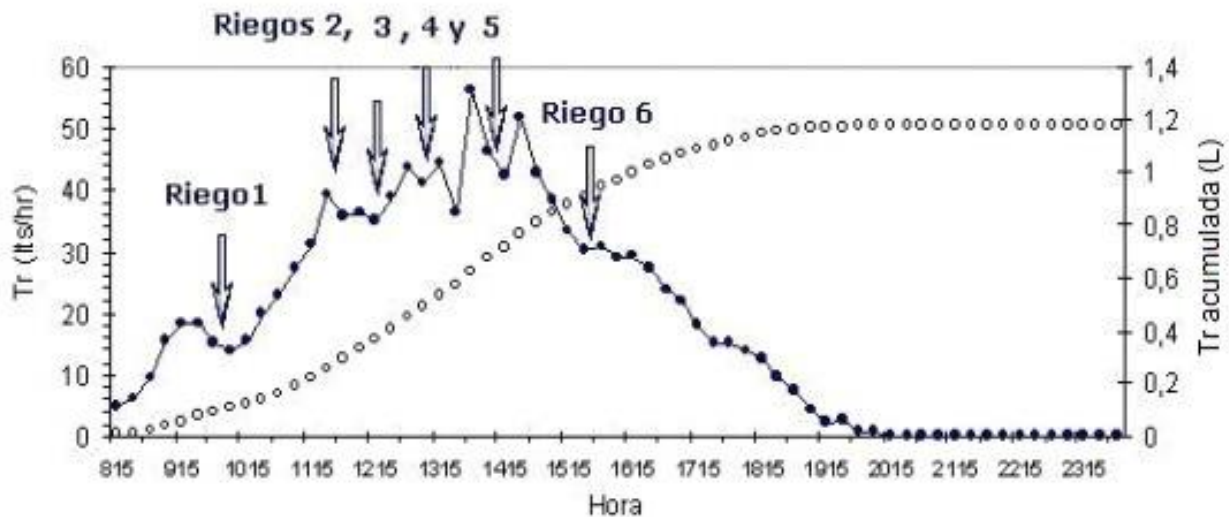


Figura 7.15 Sensibilidad del cultivo en la aplicación de los riegos

7.7.1.5 Riego a la demanda

En cultivos protegidos, y sobre todo con riego tecnificado bien diseñado, este es uno de los métodos más usados, ya que muestra resultados robustos (**Figura 7.16**). Se basa principalmente en el contenido de humedad del suelo o sustrato, a diferencia de los métodos anteriores que utilizan indicadores ambientales o de la planta. Este método consiste en llevar un control preciso de la cantidad de riego aplicado en el tiempo, de acuerdo con lo consumido por la planta en sus procesos de transpiración. Se suele usar una bandeja de lixiviación para aplicarlo.

La bandeja de lixiviación es un recipiente que contiene la solución hídrica y nutritiva que la planta necesita, y permite cuantificar las variaciones hídricas del cultivo que se encuentra en su parte superior. Se llama riego a la demanda porque, cuando la planta absorbe tanta agua que hace descender el nivel de la solución, un electrodo emite una señal para que se restituya mediante el riego.

Una de las limitantes para elaborar el calendario del riego en ambientes controlados es la falta de información que permita estimar los volúmenes suficientes y poder aplicarlos oportunamente. Con la aplicación de riego de manera tradicional, aún en sistemas intensivos, existe una tendencia a sobriregar pues suele regarse poco y con mucho volumen. Sin embargo, debido a la capacidad de retención del sustrato, solo

una pequeña parte del agua es aprovechada por la planta. Se recomienda incrementar la frecuencia de riegos a medida que el volumen de sustrato disminuya.



Figura 7.16 Cultivo de hortalizas en sistemas hidropónicos

Mediante el balance hídrico se pueden estimar los requerimientos de riego de los cultivos bajo invernadero. Así mismo, el uso de lisímetros de balance permite obtener datos con buena precisión. Los lisímetros de balance presentan las ventajas de que son económicos, fáciles de instalar, y su condicionante mínima es que exista drenaje, es decir, un control estricto en la aplicación del riego; si se manejan adecuadamente, son una herramienta muy útil para determinar el volumen de riego.

Tomando en cuenta las densidades, tipo de invernadero y características de manejo establecidas en el centro de México (4 pl m^{-2}), el sistema productivo del tomate en invernadero presenta una productividad de agua, cultivo y calidad del fruto por arriba de los reportados a cielo abierto. Los resultados obtenidos por Flores, (2005) muestran que la evapotranspiración del cultivo varió de $200 \text{ ml planta}^{-1}$ en las etapas iniciales hasta $1\ 500 \text{ ml}$ en la etapa de máxima demanda. El volumen acumulado por planta fue de 110 litros con una productividad del agua de 35 Kg m^{-3} de agua bruta aplicada, y un consumo de 22.06 litros para producir un kilo de tomate.

El uso de sensores de flujo de savia aplicados al cultivo de tomate en invernadero es un método confiable para estimar la transpiración (**Figura 7.17**), y por lo tanto se puede usar para ajustar la programación del riego diario en tiempo real. Esta es su principal ventaja, a pesar de su elevado costo y que su instalación y manejo requieren de conocimientos electrónicos.



Figura 7.17 Sensor de flujo de savia para determinar el momento del riego

El uso del tanque evaporímetro tipo A dentro del invernadero con cultivo de tomate presenta restricciones para calcular la evapotranspiración porque la cercanía del cultivo influye en la medición. Las variaciones temporales de la humedad relativa debidas a la evolución transpirativa del tomate y las bajas tasas de ventilación derivan en una técnica deficiente para el cálculo, por lo que el uso de este tipo de tanque debe complementarse con otras técnicas.

El método de la radiación es útil para definir la frecuencia de riego. Una vez que se conoce experimentalmente la cantidad total de agua requerida, se usan datos de radiación para determinar el número de riegos y el horario de aplicación, lo que constituye la mayor adecuación de la demanda evapotranspirativa (continuo) a la aplicación del riego (discreta).

Es necesario mejorar las metodologías tradicionales de aplicación del riego de baja frecuencia y espacios radicales reducidos. De acuerdo con el programa convencional del riego en invernaderos, una manera de hacer más eficiente el uso del agua es aumentar el número de riegos y hacer periodos más cortos en las horas de máxima incidencia radioactiva. Esto se puede mejorar con la aplicación adicional de un riego fuera del calendario establecido dependiendo de las condiciones climáticas, por ejemplo, en días soleados, hay que aplicar un riego similar por la noche; cuando el sol se ha ocultado y en días nublados (baja radiación), es conveniente aplicar el riego al inicio del día, prácticamente con la salida del sol.

7.8 Soporte de la planta (medio de cultivo)

En Europa, Canadá y Estados Unidos el 95 % del cultivo de tomate en invernadero se desarrolla en sustrato artificial e inerte. Algunas veces a estos sistemas se les llama hidroponía, pero este término se refiere a sistemas como la NFT (*Nutrient Film Technique*) en el que no se usa ningún sólido para el crecimiento de las plantas. El cultivo en sustrato se inicia a finales del siglo XIX con fines experimentales y con una aplicación práctica relativamente reciente. Desde un punto de vista ecológico, el sustrato supone evidentes ventajas, precisamente por su condición de aislamiento del suelo o terreno natural, aunque hay ciertos inconvenientes en cuanto al origen y acopio de los materiales necesarios para su preparación, así como las características de los residuos que pueden generarse una vez utilizados aquellos (**Figura 7.18**).



Figura 7.18 Diversas técnicas usadas como medio de cultivo, aeroponía, hidroponía, acuaponía, etc.

Así, por ejemplo, el empleo de lana roca supone eliminar entre 60 y 80 m³ ha⁻¹ de dicho material cada dos años. La lana roca no es biodegradable y sus residuos son nocivos para la salud humana (Benoit, 1990). No sucede lo mismo con los restos de sustratos orgánicos que si son biodegradables y pueden incorporarse al suelo.

La hidroponía es un sistema de producción en el que las raíces de las plantas se irrigan con una mezcla de elementos nutritivos esenciales disueltos en el agua y en el que, en vez de suelo, se utiliza como sustrato un material generalmente inerte y estéril, o simplemente la misma solución nutritiva, con el objeto de proporcionar las condiciones físicas, químicas y sanitarias más adecuadas para el desarrollo vegetal (**Figura 7.19**).

Puede no mediar ningún sustrato, con lo que las raíces quedan inmersas en la solución nutritiva o inclusive suspendidas en el aire. La hidroponía como un sistema de producción de flores y hortalizas es, desde hace más de tres décadas, una realidad en el ámbito mundial.



Figura 7.19 Sistema hidropónico con movimiento circular

El interés por esta técnica en el ámbito mundial obedece fundamentalmente a los altísimos rendimientos que se pueden obtener por unidad de superficie (100 a 1 000 % más que el cultivo convencional en suelo) y a la mejor calidad de los productos obtenidos (lo que significa mejor mercado y precio de venta). Todo esto se debe fundamentalmente al logro de un balance ideal entre el oxígeno para la respiración de la raíz, el agua y los nutrientes, a la ausencia total de malas hierbas, al mayor control que se tiene sobre plagas y enfermedades, al mantenimiento del pH dentro de un rango óptimo, y a que posibilita una mayor densidad de población.

Como ventajas adicionales se pueden mencionar la mayor precocidad en los cultivos, el ahorro de agua y fertilizantes, la posibilidad de usar aguas duras o relativamente salinas y la posibilidad de cosechar varias veces al año. En el mundo se han desarrollado muy diferentes modalidades de cultivos hidropónicos a escala comercial, que se pueden agrupar en tres categorías:

- Cultivo en solución. No hay sustrato; las raíces de las plantas se encuentran sumergidas total o parcialmente en la solución que tiene los elementos nutritivos. La oxigenación se consigue usando diferentes mecanismos que pueden ser

sumergir solo parte de la raíz, burbujear oxígeno, dejar la raíz en el aire y asperjarla con la solución a intervalos. La técnica de la película nutritiva y la aeroponía son dos modalidades recientes.

- Cultivo en grava. Comprende todas aquellas modalidades que utilizan como sustrato las gravas comunes (en diámetros generalmente de 4 a 20 mm) y otros sustratos semejantes tales como tezontles, piedra pómez, ladrillo quebrado, etc. En este tipo de cultivo el principal problema no es la oxigenación sino abastecer continuamente de agua (solución) a la raíz. Esto se logra con riegos muy frecuentes (4 a 10 veces al día), lo que requiere de grandes cisternas y de un poderoso bombeo continuo, por lo que este tipo de cultivo cada vez se usa menos.
- Cultivo en agregado. Se refiere a modalidades que utilizan sustratos de partículas pequeñas (menores de 3 mm) con propiedades de retención de humedad pero que a la vez permiten suficiente aireación a la raíz. Agrolita, vermiculita, *peat moss* (turba de pantano), lana de roca, espumas sintéticas, arenas, aserrín, etc. son ejemplos de sustratos que corresponden a esta categoría, que es la forma de hidroponía que más se practica a escala mundial.

De estos tres tipos, los más utilizados son los cultivables en sustratos en sus diversas modalidades. Se denomina sustrato a un medio sólido inerte que cumple dos funciones esenciales: anclar y aferrar las raíces protegiéndolas de la luz y permitiéndoles respirar, y contener el agua y los nutrientes que las plantas necesitan. Destacan los siguientes tipos de sustratos:

- Orgánicos: cascarilla de arroz, viruta y aserrín de madera, cáscara de coco. Estos sustratos no se recomiendan para el cultivo hidropónico, ya que no son duraderos y, al degradarse, pueden obstruir el paso de la solución nutritiva o del oxígeno. Además, pueden contaminar el cultivo con facilidad al pudrirse, desarrollando hongos o lama.
- Naturales: grava, arena, tezontle, piedra pómez con carbón mineral, piedra volcánica (como el basalto), perlita, vermiculita, ladrillo triturado, tejas molidas (libres de elementos calcáreos o cemento).
- Sintéticos: hule espuma, “tecnosport”, pelets o esponjas de polipropileno (trozos de plástico), poliuretano, poliestireno, polietileno, etc.

El sustrato debe estar formado por tres fases, sólida, líquida y gaseosa. Para fines de riego, la fase líquida es la más importante ya que define la disponibilidad de agua para las plantas, sirve de soporte a la solución nutritiva y su conocimiento desde

los puntos de vista energético e hidráulico permite establecer las dosis y frecuencias de riego de un modo práctico.



Figura 7.20 Turba usada como sustrato

Para que un sistema de cultivo sin suelo pueda emplearse comercialmente es necesario que permita el desarrollo de la raíz en perfectas condiciones, de manera que debe aportar de forma óptima los siguientes elementos:

- **Aireación:** la raíz obtiene la energía que necesita por medio de la respiración quemando carbohidratos, y requiere por tanto disponer del oxígeno necesario para ello. Después de cada riego, y una vez establecido el equilibrio hídrico, deberá quedar en el medio suficiente aire para asegurar el suministro de oxígeno. Las necesidades dependerán de la intensidad respiratoria, que se relaciona con la temperatura, la fase de desarrollo, etc., pero en cualquier caso se requiere que un mínimo de 20-30 % del espacio útil quede ocupado por aire en sistemas que utilizan sustrato.
- **Agua:** deberá estar continuamente disponible para la planta en condiciones de extracción muy favorables. El volumen y la configuración de espacios condicionará la frecuencia y dosis de riego.
- **Solutos:** entre los elementos químicos disueltos deberán encontrarse todos los necesarios para la nutrición de la planta en cantidades suficientes para prevenir las carencias, pero no excesivas para evitar niveles altos de presión osmótica a vencer por la raíz.

- Temperatura: deberá ser la apropiada para asegurar una óptima actividad biológica en la raíz. Si es excesivamente baja, se ralentizará y, si es demasiado alta, el exceso de actividad acarreará un despilfarro de energía. Si se sobrepasan ciertos valores extremos, la raíz puede morir. La temperatura influye directamente en la nutrición y el crecimiento vegetal, en el proceso de compostaje y en el cálculo energético de la desinfección al vapor.

7.8.1 Curva característica de retención de agua

La retención de agua en el sustrato generalmente se determina mediante embudos de succión, obteniendo la curva de liberación (o retención de agua) del sustrato o curva característica de humedad, generalmente tensiones entre 0 y 100 cm de columna de agua (0 a 10 kPa de potencial) y en secado, es decir, ejerciendo una presión o fuerza para que el agua fluya hacia afuera del sustrato. Las curvas de retención de agua relacionan el potencial matricial (presión hidrostática debida a la columna de agua existente por encima del punto en cuestión, Ψ_m) con el contenido de agua (relación entre volumen de agua y volumen aparente del sustrato, θ) del sustrato.

La relación entre el potencial matricial y el contenido de agua es una relación no lineal que depende del sustrato. Para conocer el contenido relativo de agua del sustrato, es necesario determinar el contenido de agua a saturación (θ_s), lo que suele hacerse en los mismos embudos de succión por inmersión de la muestra en agua. Sin embargo, en los sustratos, debido a la dificultad de determinar el punto de saturación por inmersión en agua, se suele partir de la porosidad total o efectiva como punto de saturación, que se calcula generalmente a partir de la densidad aparente y de la densidad real del sustrato.

Este cálculo puede implicar un error importante porque el aire suele quedar atrapado entre las partículas del sustrato, además de que puede haber porosidad cerrada en la determinación de la porosidad total. El contenido de agua a saturación suele variar en los sustratos entre el 80 y 100 % de la porosidad efectiva, dependiendo del material.

7.8.1.1 Conductividad hidráulica

La conductividad hidráulica es la capacidad del sustrato para conducir el agua. Es importante que el flujo de agua hacia las raíces de las plantas sea elevado con el fin de reponer el agua perdida por la transpiración. La conducción del agua en un medio poroso depende de la configuración especial de los poros y la continuidad de los mismos (percolación) y de su geometría, así como del material que forma la matriz del sustrato.

De manera similar, los sustratos y el suelo están constituidos por dos elementos principales, los materiales sólidos y los espacios porosos por los que circulan líquidos y gases alternativamente. Conocer estas propiedades resulta fundamental para el sistema de producción en invernaderos y en general para todas las plantas.

7.8.1.2 La fase sólida

La fracción sólida de los sustratos varía del 75 % del volumen en algunas arenas a menos del 10 % en materiales como lana de roca y turba de pantano, conocida como *peat moss*. El porcentaje de la fracción sólida depende del tamaño de las partículas y del grado de compactación de los materiales. Mientras más compactado está un material mayor será la fracción sólida; por el contrario, los sustratos con una alta porosidad tienen una consistencia esponjosa y menor porcentaje de su volumen ocupado por partículas. Dependiendo del tamaño y cantidad de poros los materiales pueden retener gran cantidad de agua o drenarla rápidamente, lo primero ocurre si los poros son pequeños y lo segundo cuando los poros son grandes.

7.8.1.3 La fase líquida

La fase líquida está determinada por la cantidad de agua que puede retener un material dependiendo de la porosidad y la facilidad o dificultad de adhesión del agua a las partículas de cada uno de los materiales. La solución acuosa dentro de los sustratos es muy importante, ya que de ella depende el suministro de agua y nutrientes a las plantas.

La porosidad o espacios vacíos de los sustratos se dividen en dos tipos, porosidad de aireación y porosidad capilar. La primera está integrada por poros grandes y la segunda por poros pequeños llamados capilares. La capacidad de retención de agua de un material depende de la cantidad de poros capilares que contenga, y su capacidad de aireación está determinada por los poros grandes.

Un material no siempre contiene la misma cantidad de agua, sino que hay varía con el transcurso del tiempo, las condiciones ambientales y el desarrollo de los cultivos. Durante su empleo, el agua dentro de un sustrato pasa por varias etapas en las que su disposición para las plantas varía de un estado de máxima disponibilidad después de un riego a un estado de escasez total si se deja de regar.

7.8.2 Los tipos de agua en los sustratos

De Boodt *et al.* (1974) desarrollaron un método para medir la liberación de agua en los sustratos orgánicos. Este método se usa en muchos laboratorios para determinar los tipos de agua en los sustratos, y se conoce como “Curva de liberación de agua para

sustratos” (**Figura 7.21**). En este método los límites de las curvas fueron establecidos entre 0 y 100 centímetros de tensión, con lo que se definió el sistema para clasificar el agua presente en los sustratos en diferentes rangos o niveles, según la disponibilidad del mismo para las plantas. Estos niveles son:

1. Agua fácilmente disponible (AFD)
2. Agua de reserva (AR)
3. Agua disponible (AD)
4. Agua difícilmente disponible (ADD)
5. Agua fácilmente disponible

El agua fácilmente disponible (AFD) constituye la humedad aprovechable para las plantas; es el agua retenida en los poros, que puede ser extraída fácilmente por las raíces. Esta agua se libera entre los 10 y 50 cm de tensión y se encuentra entre capacidad de contenedor o capacidad de sustrato y agua de reserva.

El agua contenida a capacidad de sustrato es la que se encuentra retenida a tensiones de 10 cm o menos, después de que el agua de gravedad drenó libremente. Se considera que el rango óptimo del agua fácilmente disponible está entre el 20 y el 30 % del volumen del sustrato.

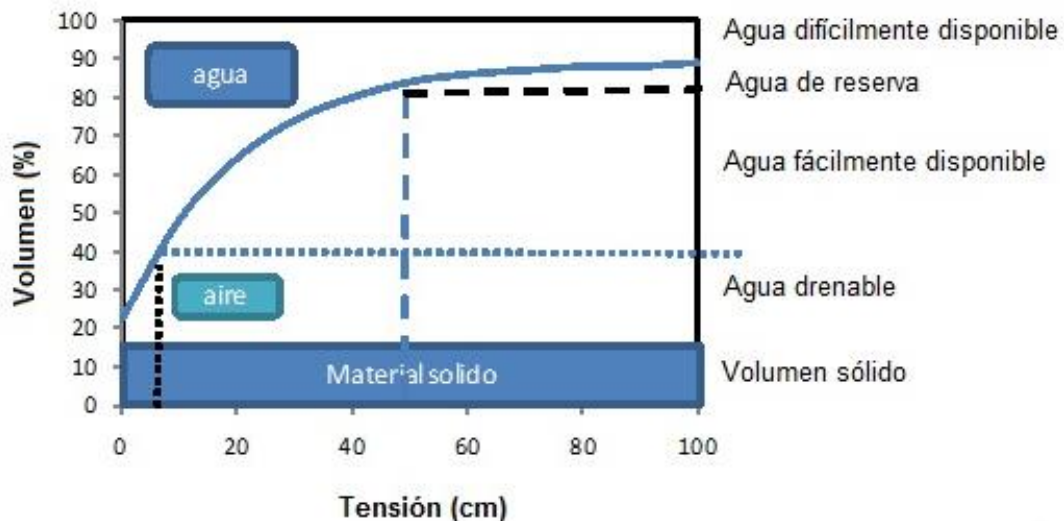


Figura 7.21 Curva característica de retención de agua de un sustrato (De Boodt *et al.*, 1974; Handreck y Black, 1991)

El agua de reserva (AR) representa el porcentaje, en volumen de agua, que se libera entre los 50 y 100 cm de tensión sobre el sustrato. Es el agua que las plantas llegan a

aprovechar extrayéndola con mayor grado de dificultad que la anterior. El valor óptimo de este tipo de agua se encuentra en un rango del 4 % al 10 % del volumen que ocupa un sustrato.

El agua disponible (AD) constituye el agua fácilmente disponible para las plantas y el agua de reserva, esto es, el total de agua que se encuentra entre los 10 y 100 cm de tensión. Su rango óptimo se establece entre el 24 % y 40 % del volumen que ocupa el sustrato en un contenedor.

El agua difícilmente disponible (ADD) constituye el agua retenida dentro de los microporos de un sustrato tras aplicar una tensión de 100 cm. Esta fuerza es superior a la que pueden utilizar las raíces de las plantas para extraer el agua, por lo tanto, no puede ser aprovechada por los cultivos.

Por último, el agua de gravedad o saturación es aquel porcentaje de agua que ocupa los poros grandes de un material en estado de inundación, y que drena rápidamente por la acción de la gravedad.

7.9 Tezontle como sustrato

El tezontle es una arena volcánica formada por fragmentos y partículas de lava porosa y poco pesada con alto contenido de silicatos de aluminio. Es un material económico que se encuentra en grandes depósitos presentes en todos aquellos lugares donde existen volcanes; en México abunda principalmente en el eje neovolcánico. El tezontle puede ser de color rojo, negro o amarillo; los tres son buenos para emplearse como sustrato en la hidroponía.



Figura 7.22 Cultivo de tomate en sustrato de tezontle

En la **Figura 7.23** se muestra la curva de retención de humedad, la cual define las tensiones de retención del agua en el suelo y, en consecuencia, la cantidad de energía necesaria para que la raíz pueda absorber el agua (y nutrientes) del sustrato.

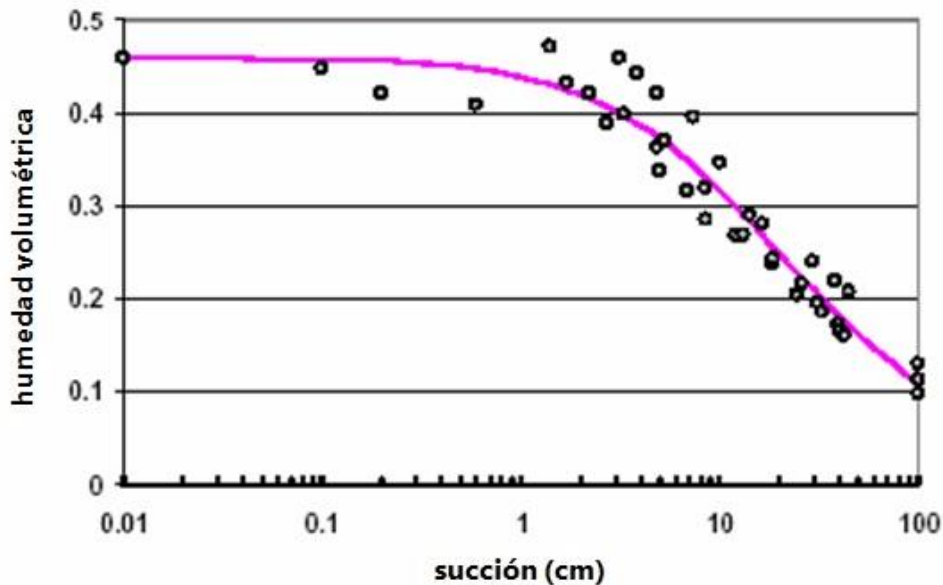


Figura 7.23 Curva de retención de humedad para sustrato de tezontle (Ojeda-Bustamante, 2004)

En general, el tezontle en su estado natural presenta partículas de tamaño variable, tiene buena aireación, la retención de humedad está en función del tamaño de partículas; los tezontles de partículas pequeñas presentan alta retención de humedad, y los de partículas grandes, baja retención. La curva indica que, a una succión de 50 cm, el sustrato de tezontle ha perdido la mayor parte de la humedad (**Figura 7.23**), lo que explica la necesidad de aplicar riegos más frecuentes con un menor volumen para evitar que la planta invierta grandes cantidades de energía, misma que puede utilizar para otros procesos.

En general, el tezontle presenta buen drenaje, su densidad aparente va de media a alta, aporta pocos nutrientes, tiene baja capacidad amortiguadora de cambios de pH, su contenido de sales es variable, tiene baja capacidad de intercambio catiónico, su porosidad va del 65 al 70 % con alta porosidad interna. Su pH va de neutro a alcalino (de 7.5 a 8.6), y aunque también existe con pH ácido, generalmente está libre de sustancias tóxicas. También presenta buena estabilidad física, variaciones considerables de temperatura, y puede mezclarse con otros materiales con diferentes proporciones (**Tabla 7.3**).

Tabla 7.3 Principales características físicas y químicas del tezontle (Burés, 1997)

Parámetro y unidad de medida	Valor (b)
Densidad aparente (g/cm ³)	0.77
Densidad real (g/cm ³)	2.65
Espacio poroso total (Volumen en %)	70.94
Capacidad de absorción de agua (g de agua/100g de materia seca)	---
Material sólido (Volumen en %)	---
Aire (Volumen en %)	48.45
Agua fácilmente asimilable (Volumen en %)	6.55
Agua de reserva (Volumen en %)	1.63
Agua difícilmente asimilable (Volumen en %)	14.31
pH	4.6
Conductividad eléctrica	0.02
Contenido de elementos extractables (mg/l)	---
Nitrógeno	6
Fósforo	9
Potasio	52
Calcio	330
Magnesio	25

La estructura interna de un material determina la porosidad, así como la densidad real y aparente, mientras que el tamaño de partículas o granulometría y el tipo de empaquetamiento determinan la distribución y tamaño de los poros. La densidad aparente está en función de la distribución espacial y de la estructura interna del material. La porosidad es la suma de los poros internos y externos; de ella dependen propiedades como la retención de agua y la permeabilidad o drenaje (Burés, 1997).

“No se aprecia el valor del agua hasta que se seca el pozo”

Proverbio inglés

**La calendarización del riego del
cultivo de maíz**



8

Capítulo 8

LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO DEL CULTIVO DE MAÍZ

Ernesto Sifuentes Ibarra, Waldo Ojeda Bustamante y Jaime Macías Cervantes

8.1 Introducción

La agricultura consume la mayoría del agua en las áreas de desarrollo y por consiguiente resulta un reto utilizar este recurso eficientemente. La agricultura bajo riego en nuestro país se encuentra en transición, pues está pasando de la fase de expansión a la fase de maduración, y la optimización de recursos como el agua es de suma importancia debido a su limitada, costosa e incierta disponibilidad.

El maíz es por mucho el cultivo más importante de México desde el punto de vista alimentario, industrial, político y social. La superficie sembrada promedio anual es de 8.4 millones de hectáreas, de las cuales el 85.5 % es de temporal (7.2 millones de hectáreas), mientras que 1 millón 217 mil hectáreas se siembran bajo condiciones de riego (14.5 %); de estas, Sinaloa es el principal productor al establecer anualmente alrededor de 400 000 ha con una producción de más de 4 millones de toneladas (CONAGUA, 2008).

Aunque México es uno de los principales productores de maíz a nivel mundial, su demanda es superior a su producción, por lo que es uno de los principales países importadores con más de 7 millones de toneladas anuales (SIAP-SAGARPA, 2009). El cultivo de maíz ha mostrado un incremento consistente en su rendimiento y superficie cosechada, como se muestra en la **Figura 8.1**.

En los últimos años se ha observado una alta variabilidad climática en las principales zonas productoras de México, lo que ha provocado alteraciones considerables en los ciclos fenológicos de los cultivos y un incremento en la presencia de eventos extremos como sequías y heladas. Ante tal situación cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos, principalmente en cuanto al riego y la nutrición, lo que ha hecho necesario incorporar tecnologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos. Es el caso del desarrollo de aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para riego, plagas, enfermedades y otros.

Desafortunadamente la agricultura tradicional está ligada a la cultura del uso excesivo de insumos y recursos como el agua, así como a la práctica de monocultivos como maíz en Sinaloa y trigo en Sonora, lo que ha ocasionado que esta actividad sea cada vez menos rentable y más riesgosa.

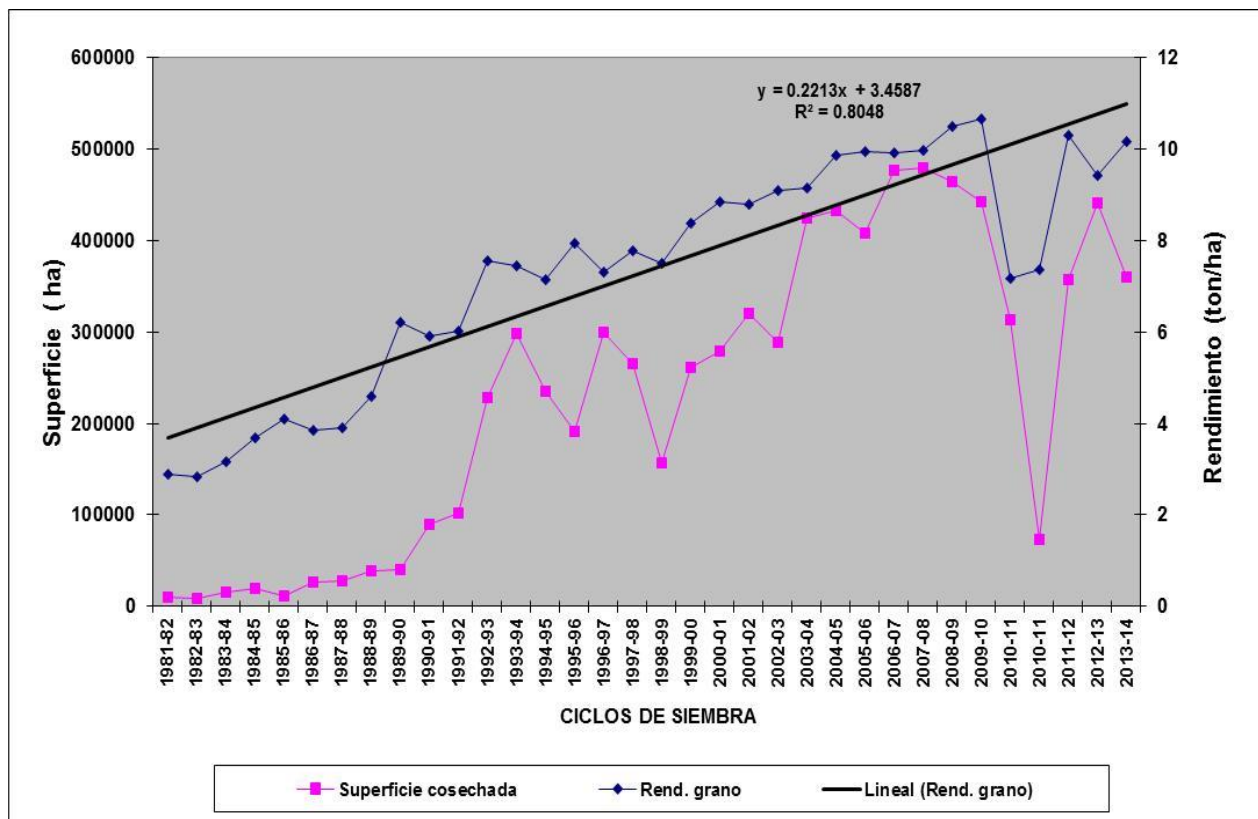


Figura 8.1 Evolución de la superficie sembrada y rendimiento de maíz en Sinaloa de 1981 a 2014

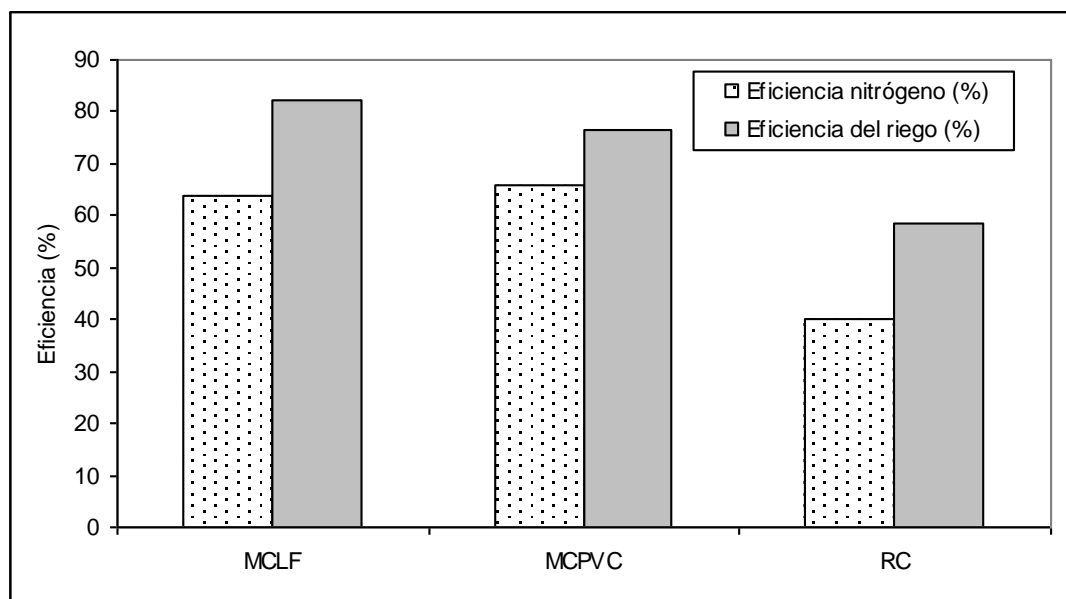


Figura 8.2 Eficiencia del riego y nitrógeno en dos sistemas de riego de baja presión (Multicompuertas) con PVC (MCPVC) y manguera Lay Flat (MCLF)

En los últimos años el precio del maíz ha mantenido una tendencia a la baja, con el registro más crítico durante el ciclo otoño-invierno 2014-2015. En cambio, los costos de producción se han incrementado, disminuyendo la rentabilidad del cultivo y con ello el margen de utilidad que el productor percibe. Debido a lo anterior, una de las alternativas es encontrar la combinación ideal de prácticas que permitan mejorar la eficiencia de producción, es decir, producir el máximo rendimiento al menor costo posible por unidad de superficie, sin menoscabo de la calidad ambiental. La eficiencia del nitrógeno está asociada a la eficiencia del riego (**Figura 8.2**).

8.2 La importancia del riego en la producción de maíz

8.2.1 Factores limitantes de la producción

La producción de los cultivos es afectada por una gran diversidad de factores relacionados con el cultivo, el suelo, el clima, así como con diferentes prácticas agronómicas y el uso variable de insumos en cantidad y oportunidad. Todo esto constituye la tecnología utilizada en cada condición o parcela, por lo que las diferencias tecnológicas resultan de las diferencias en el manejo agronómico del cultivo, a juicio del productor (**Figura 8.3**).

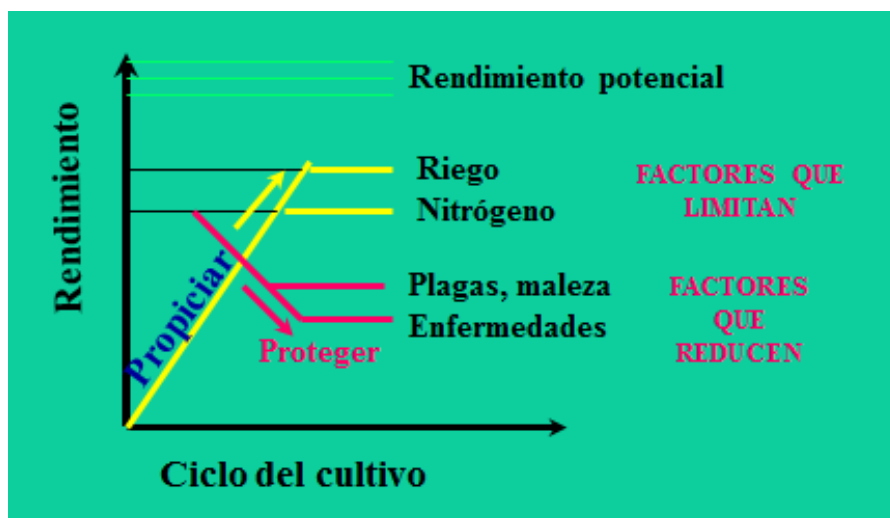


Figura 8.3 Factores limitantes de la producción

8.2.2 Factores asociados a la calendarización del riego

El clima, el suelo y la fenología del cultivo son probablemente los factores más importantes relacionados con la calendarización del riego porque determinan los requerimientos hídricos de los cultivos. De las condiciones del clima dependen la mayoría de las funciones fisiológicas de las plantas, tales como la fotosíntesis, la respiración, la transpiración y la absorción de nutrimentos. Las principales variables climáticas que se han asociado a los requerimientos de agua de las plantas son la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento.

En las zonas de riego más importantes de México, como los valles de los distritos del noroeste, la temporada de siembras para un ciclo otoño-invierno (donde se establece principalmente el cultivo de maíz) es muy amplia pues comprende desde octubre hasta diciembre. Debido a las drásticas variaciones climáticas presentes en este periodo, no es posible generalizar la programación del riego.

Aunque existen muchas propiedades físicas, químicas y biológicas en el suelo, las que tienen una relación más directa con la calendarización del riego son la textura, la densidad aparente y la materia orgánica. Sin embargo, no se debe descartar la influencia de sales en los programas de riego, por lo que es importante monitorear la conductividad eléctrica y el pH.

La fenología de los cultivos es quizá el factor biológico más importante en la calendarización de los riegos. Aunque es común definir las etapas en días calendario, este concepto carece de precisión al cambiar las condiciones climáticas de las existentes cuando fueron definidas. Por ejemplo, ciclos más fríos retardan el desarrollo fenológico,

mientras que ciclos más calientes los aceleran. Ante esta variación se desfazaría la duración pronosticada y observada para cada una de las etapas fenológicas.

Para superar esta limitante se ha introducido el concepto de tiempo térmico o grados día desarrollo ($^{\circ}$ D) que asume que se requiere una cantidad de energía térmica para el desarrollo y crecimiento de muchos organismos. El tiempo requerido para acumular esa cantidad de calor varía temporal y espacialmente. Si los $^{\circ}$ D son usados como un estimador de las etapas de desarrollo de la planta, el rango de temperaturas (mínima y máxima) es definido como el rango en el cual la planta crece; fuera de este rango la planta deja de crecer o muere. En la **Figura 8.4** se presentan los valores de $^{\circ}$ D acumulados en los cuales aparecen las diferentes etapas fenológicas de las principales variedades de maíz de ciclo intermedio sembradas en el norte de Sinaloa.

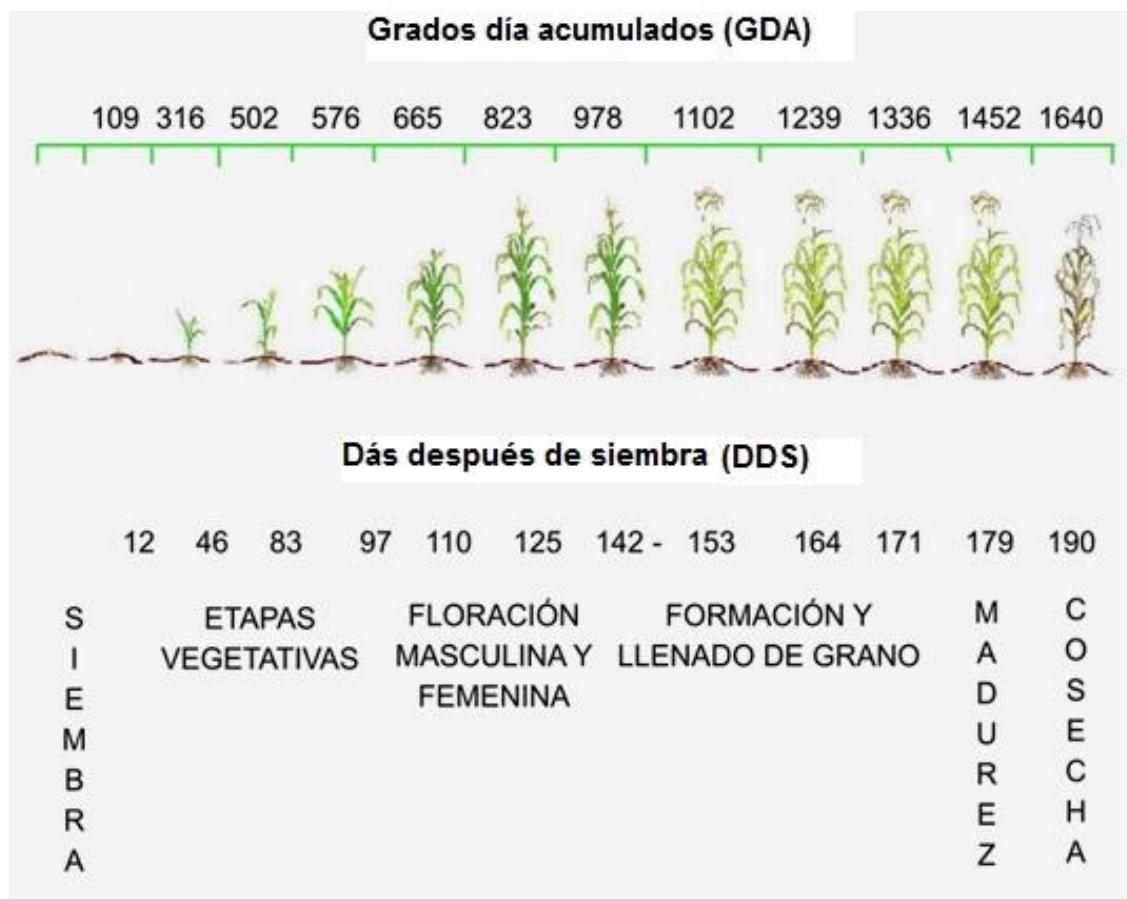


Figura 8.4 Fenología del cultivo de maíz y su relación con el tiempo térmico o grados día desarrollo ($^{\circ}$ D) (Ojeda y Sifuentes, 2006)

De acuerdo con Doorenbos y Kassam (1986), el requerimiento potencial total de agua del maíz es de 500-800 mm distribuida de acuerdo con sus fases fenológicas. Las fases de floración y llenado de grano son las más críticas para obtener la máxima producción. Aceves *et al.* (2008) mencionan que la disponibilidad de agua en el momento oportuno en el cultivo de maíz es el factor más crítico para determinar el rendimiento. El periodo con mayor exigencia de agua es el que va desde 15 días antes de la floración hasta 30 días después.

El estrés causado por deficiencia de agua en el periodo de floración puede ocasionar una merma del 6 al 13 % por día en el rendimiento final. El maíz es uno de los cultivos con mayor requerimiento de riego en el norte de Sinaloa, México (**Tabla 8.1**). El riego por gravedad es el principal sistema de aplicación del riego. El uso eficiente del riego es un reto actual ante la alta variabilidad en la disponibilidad del agua.

Tabla 8.1 Requerimientos hídricos totales (netos y brutos) de los principales cultivos en el norte de Sinaloa en función del tipo de sistema de riego

Cultivo	Lámina neta	Lámina bruta (cm)		
	(cm)	Gravedad	Aspersión	Goteo
Maíz	45	75	56.3	50
Frijol	28	46.7	35	31.1
Trigo	31.9	53.2	39.9	35.4
Garbanzo	25.4	42.3	31.8	28.2
Algodón	65.7	109.5	82.1	73
Cártamo	25	41.7	31.3	27.8
Papa	36	60	45	40
Tomate	28.8	48	36	32
Chile jalapeño	36.3	60.5	45.4	40.3
Calabaza	10.5	17.5	13.1	11.7
Maíz dulce	21.8	36.3	27.3	24.2
Sorgo	31.6	52.7	39.5	35.1
Soya	33.7	56.2	42.1	37.4
Caña de azúcar (planta)	150	250	187.5	166.7
Caña de azúcar (soca)	110.1	183.5	137.6	122.3
Mango	92.7	154.5	115.9	103

8.3 Métodos de calendarización del riego

8.3.1 La planta como indicador

Se han utilizado diversos métodos para programar el riego del maíz, tales como determinar la humedad del suelo, medir el estado energético del agua en el suelo, estimar la demanda atmosférica y determinar el potencial hídrico de las plantas (Buchner *et al.*, 1994). Otros métodos se basan en comparaciones visuales del crecimiento de la planta referentes a su etapa fenológica y las características que la planta debe presentar en dicha etapa (**Figura 8.5**).



Figura 8.5 Plantas de maíz con efectos contrastantes de estrés hídrico visual

8.3.2 El suelo como indicador

Para la programación de riegos el suelo actúa como un reservorio de agua. El agua se aplica en la frecuencia y cantidad necesarias para mantener la humedad adecuada del suelo que permita obtener altos rendimientos sin lavar fertilizantes. El nivel recomendado es la capacidad de campo (CC), como se muestra en la **Figura 8.6**, donde R es arcilla, L es limo, A es arena y M franco.

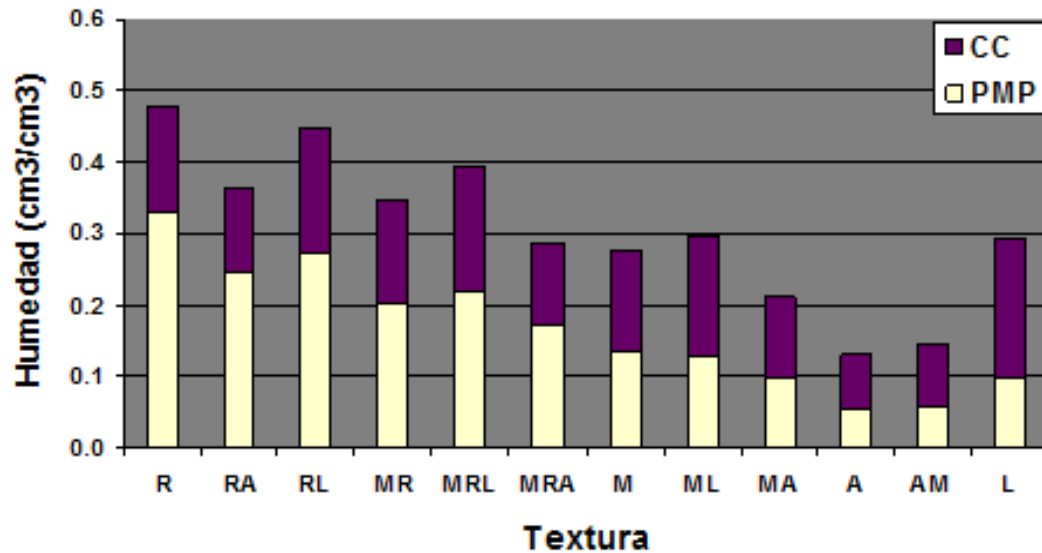


Figura 8.6 Constantes hídricas por textura del suelo (Sifuentes *et al.*, 2013), adaptado de Rawls y Brakensiek (1983)

La limitante de este método es que se requiere monitorear la humedad del suelo en forma constante y asociarla a un criterio de riego (CR), el momento de riego (MR) entonces se calcula:

$$MR = CC - (HA \times CR)$$

donde CC es la capacidad de campo del suelo y HA es la humedad aprovechable del suelo ($CC - PMP$) y CR es el criterio de riego. Este varía dependiendo de la etapa y sistema de riego.

El monitoreo de la humedad del suelo se puede realizar con el método convencional, usando bloques de yeso, tensiómetros, o con dispositivos electrónicos, como reflectómetros (TDR). El monitoreo de la humedad usando sondas de TDR es una práctica cada vez más común en varios módulos de los distritos de riego del norte de Sinaloa (**Figura 8.7**).



Figura 8.7 Monitoreo de la humedad del suelo con TDR y uso de sistemas de información geográfica como herramienta de apoyo para seguimiento del riego en parcelas

8.4 Calendarización del riego y tiempo térmico

La incorporación del concepto grados día desarrollo ($^{\circ}\text{D}$) para calendarizar los riegos ha demostrado ser una excelente herramienta que se puede aplicar tanto en parcelas como en grandes zonas de riego, incluso en condiciones variables de clima y de disponibilidad de agua. Esta metodología ha sido denominada programación integral del riego por Ojeda *et al.* (2006).

El objetivo de la programación integral del riego es generar automáticamente y en tiempo real programas de riego de acuerdo con la fenología del cultivo y del suelo, aun en condiciones variables de clima, usando el concepto días grado de crecimiento. Para el cultivo de maíz, Ojeda *et al.* (2006) generaron en el Valle del Fuerte los parámetros de programación integral que incluyen el coeficiente de cultivo (K_c), la profundidad dinámica de la raíz (R_d) y el factor de abatimiento (F) expresados mediante modelos matemáticos, los cuales pueden ser programados en sistemas computacionales. La **Tabla 8.2** muestra los requerimientos hídricos y tiempo térmico por etapa de una variedad de maíz ciclo intermedio en Sinaloa.

Tabla 8.2 Consumo de agua promedio (ET_r) por etapa fenológica para una variedad típica sembrada en el Valle del Fuerte, Sinaloa con requerimientos a madurez de 1 451 $^{\circ}\text{D}$

Etapa	Clave	Consumo de agua promedio (mm)			Duración etapa			
		diario	etapa	acumulado	Días	DDS	°D	Σ °D
Emergencia	Ve	0.59	7.07	7.07	12	12	109.42	109.42
4-hojas	V4	0.63	21.57	28.64	34	46	207.01	316.43
8-hojas	V8	1.41	52.23	80.87	37	83	185.54	501.97
12-hojas	V10	2.50	35.01	115.88	14	97	74.11	576.08
Flor masculina	VT	3.03	39.33	155.21	13	110	89.11	665.19
Jiloteo	R1	4.47	66.98	222.19	15	125	158.27	823.46
Grano acuoso	R2	4.87	82.85	305.04	17	142	155.09	978.55
Grano lechoso	R3	4.32	47.54	352.58	11	153	123.70	1102.25
Grano masoso	R4	4.34	47.75	400.33	11	164	137.50	1239.75
Grano abollado	R5	2.97	20.79	421.12	7	171	95.78	1335.53
Madurez	R6	1.85	14.82	435.94	8	179	115.59	1451.12
Cosecha	-	0.81	8.89	444.83	11	190	189.64	1640.76

El sistema de riego y la capacidad de almacenamiento definen la frecuencia del riego. En el caso de suelos arcillosos y francos arcillosos, estableciendo el cultivo en la última decena de noviembre, los calendarios de riego recomendados para riego por gravedad y aspersion son los de las **Tablas 8.3 y 8.4**.

En riego por goteo el requerimiento de riego acumulado es de 55 cm aplicando alrededor de 20 riegos con un intervalo máximo de 25 a 30 días (primer auxilio), y con un intervalo medio de 5 a 6 días y un mínimo de 3 a 4 días.

Tabla 8.3 Calendario de riego en maíz con riego por gravedad

Riego (número)	Intervalo (días)	Días después de siembra	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	235.0
2	84	64	424.72	44.5	74.2
3	34	98	580.13	73.7	122.8
4	23	121	778.48	86.1	143.4
5	30	141	980.00	96.9	161.5
Total				442.2	736.9

Nota: 1 mm representa 10 m³/ha (diez mil litros por hectárea)

Tabla 8.4 Calendario de riego en maíz con riego por aspersión móvil (avance frontal)

Riego (número)	Intervalo (días)	Días después de siembra	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.0	165.1
2	50	30	225.5	15.6	18.3
3	38	68	442.8	36.4	42.8
4	20	88	527.5	42.9	50.4
5	19	107	635.4	49.8	58.5
6	13	120	766.1	52.6	61.9
7	12	132	890.2	56.9	66.9
8	13	145	1011.9	61.1	71.9
Total				456.2	535.8

**Figura 8.8** Sistemas de riego para la producción de maíz

La fecha de siembra también influye en la calendarización del riego. Con el uso de sistemas computacionales basados en el concepto de grados día (°D) es posible analizar diferentes fechas de siembra para definir la mejor temporada según los requerimientos de riego para una región determinada. En la **Tabla 8.5** se puede observar la variación de los requerimientos de riego de maíz en el Valle del Fuerte, Sinaloa. Las siembras de octubre requieren 50 mm menos agua que las de diciembre y su ciclo fenológico se reduce 25 días.

Tabla 8.5 Requerimientos de riego de siembra a madurez fisiológica del maíz en diferentes fechas de siembra en el Valle del Fuerte

Fecha de	Duración del	ET _o	ET _r	Número
----------	--------------	-----------------	-----------------	--------

siembra	ciclo (días)	(mm)	(mm)	de riegos
Sep-15	123	405	277	3
Oct-01	165	505	360	4
Oct-15	176	558	375	4
Nov-01	183	605	435	5
Nov-15	182	633	419	5
Dic-01	176	641	421	5
Dic-15	168	636	433	6
Ene-01	157	622	425	6
Ene-15	148	626	410	5

Desde el punto de vista hídrico, es preferible compactar el periodo de siembras que minimice el consumo de agua sin mermas significativas en los rendimientos convencionales. Considerando rendimiento, disponibilidad del agua y requerimientos de riego del maíz, el mejor periodo de siembras en el norte de Sinaloa se presenta durante la primera mitad del mes de octubre. Siembras anteriores a ese periodo no son recomendables por la incertidumbre en la disponibilidad de agua, mientras que siembras tardías tienen mayores consumos de agua y acortan el intervalo de riegos sin un incremento sustancial en los rendimientos.

8.4.1 Programación integral bajo condiciones de escasez

En los distritos de riego del noroeste de México es común que se presenten escenarios de baja disponibilidad hídrica, ya que esta depende de la presencia de lluvias ciclónicas que se presentan durante los meses de julio a octubre, y el programa de siembras se define en junio asumiendo un nivel probabilístico de disponibilidad. Cuando la presencia de lluvias es baja en la cuenca de captación de los sistemas de presas de almacenamiento y se tiene una operación deficiente, el escenario se agrava, lo cual puede provocar la cancelación de segundos cultivos y el ciclo primavera-verano. Por ejemplo, en el módulo Batequis del distrito de riego 075 en promedio se asigna una lámina bruta al nivel de toma granja de aproximadamente 90 cm, con una lámina neta de 44 cm para años normales. Sin embargo, para años secos como el ciclo otoño-invierno 2002-2003 la disponibilidad de agua del módulo era casi 20 % menor que la lámina normal, por lo que la lámina bruta asignada fue de 72 cm.

Para evitar una reducción en la superficie del maíz se generan programas de riego en condiciones de sequía, lo que reduce en un riego el total de los aplicados en condiciones normales. En la **Tabla 8.6** se presentan los programas óptimos en dos condiciones de disponibilidad de agua (normal y escasez) para suelos arcillosos y franco-arcillosos típicos en el distrito de riego 075.

Tabla 8.6 Distribución de riegos por gravedad recomendados para maíz para suelos franco-arcillosos en el Valle del Fuerte, con dos escenarios de disponibilidad de agua

Número de riegos	Normal				Escasez			
	Ln* (mm)	Lb** (mm)	(Σ °D)***	Etapas	Ln (mm)	Lb (mm)	(Σ °D)	Etapas
1	141	235	-80	Presiembra	141	235	-80	Presiembra
2	54	160	436	V6	72	160	500	V8-V10
3	74	160	616	VT	98	160	747	R1
4	86	160	819	R1	109	160	996	R3
5	91	160	1006	R3				
Total	446	875			420	715		

* Ln = lámina neta (requerimiento del cultivo); **Lb = lámina bruta (lámina aplicada); *** Σ °D = grados día acumulados a partir de siembra

8.4.2 Manejo del último riego

La predicción óptima y manejo del último riego tienen como objetivo principal asegurar la disponibilidad de humedad aprovechable en la zona radical que permita la maduración del cultivo para producir los rendimientos potenciales y finalizar el ciclo con un contenido de humedad tan bajo como lo permitan las condiciones de manejo del cultivo al momento de la cosecha. Klocke *et al.* (1991) definen la madurez fisiológica como el momento en que los granos o semillas han dejado de crecer. En algunos granos como el maíz y el sorgo se forma una capa negra en la punta del grano; en otros como la soya, la vaina muestra un color de madurez característico.

Si se presentan escenarios de disponibilidad alta de agua, en los distritos de riego se aplica el último riego a cerca del 50 % de la superficie sembrada de maíz (R6) o en la fase anterior (R5), cuando el cultivo se encuentra en madurez fisiológica (**Figura 8.9**)



Figura 8.9 Aplicación innecesaria del último riego en etapa R5 (grano dentado)

Esta situación representa un desperdicio potencial de 8 millones de m^3 por cada 10 000 ha sembradas, con los cuales sería posible establecer cerca de 1 000 ha de maíz adicionales si se controlara el último riego. Mediante la programación integral del riego es posible conocer anticipadamente si la humedad de una parcela en determinado momento será suficiente para que el cultivo llegue a su madurez fisiológica. En suelos arcillosos (barrial) y franco-arcillosos, característicos del norte de Sinaloa, el último riego se debe aplicar en la etapa R3 (1 100 °D). En la **Figura 8.10** se presenta gráficamente una simulación de la predicción del último riego mediante programación integral.

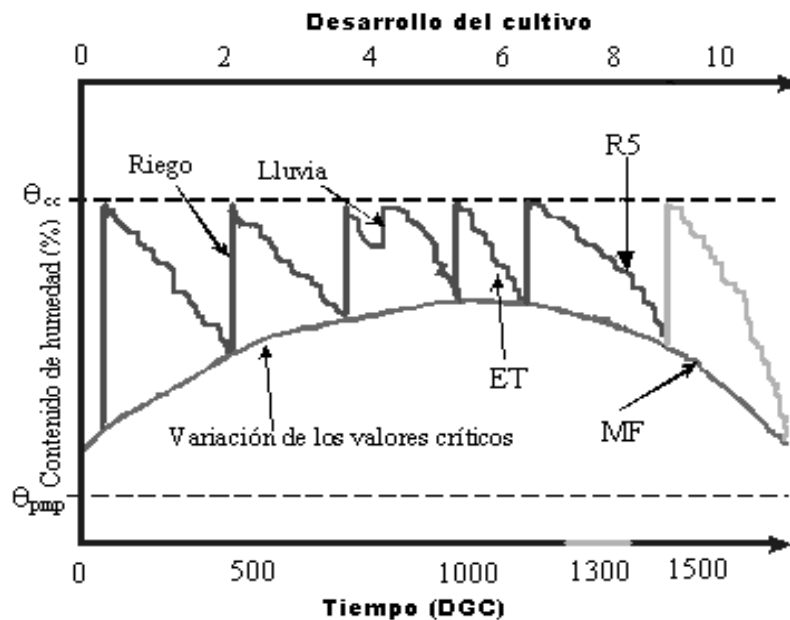


Figura 8.10 Predicción del último riego mediante programación integral

8.4.3 Tecnologías de información y comunicación (TIC'S)

Con el desarrollo de las comunicaciones y la informática, actualmente es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos para programar el riego, prevenir plagas, enfermedades y otros. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda *et al.*, 2006).

En este contexto, en los últimos años el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) han desarrollado aplicaciones computacionales con tecnologías de información y comunicaciones para productores, módulos de riego y empresas agrícolas. De una manera sencilla, con estas herramientas el usuario aplica modelos de programación integral y gestión del riego en tiempo real que le permiten programar sus riegos anticipadamente. Otra ventaja es que la eficiencia de los riegos y fertilizantes se incrementa, ya que es posible mantener niveles óptimos de humedad y existe la posibilidad de reducir las cantidades de fertilizantes nitrogenados (Sifuentes, 2007).

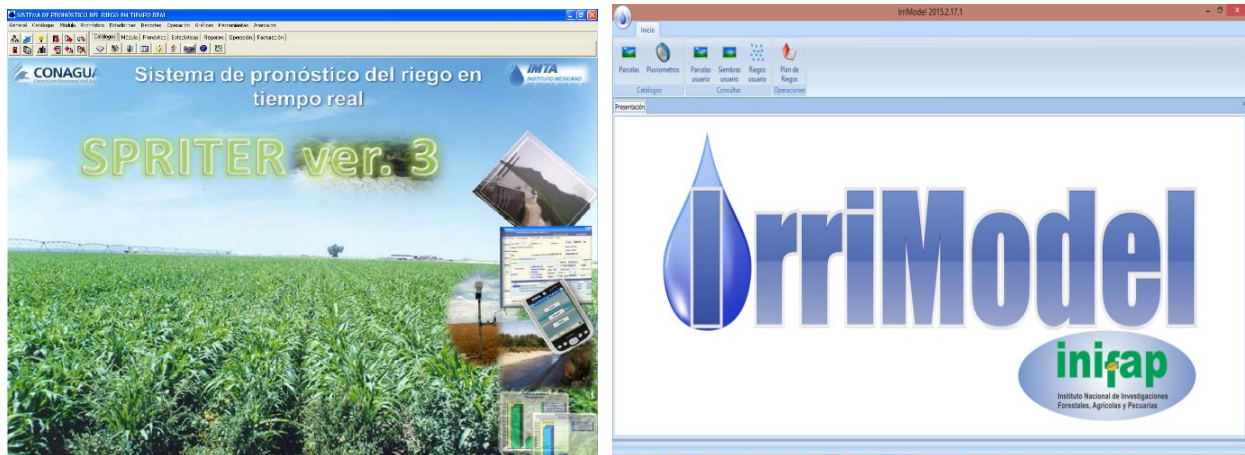


Figura 8.11 Aplicaciones computacionales para la programación integral del riego

“Agua de mayo, pan para todo el año”

Anónimo

**La calendarización del riego en
cultivos hortícolas**

9

Capítulo 9

LA CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO EN CULTIVOS HORTÍCOLAS

Rutilo López López

9.1 Introducción

La producción de hortalizas en México es de suma importancia por su contribución al consumo de alimentos de alta calidad y los ingresos económicos que se generan en su comercialización, principalmente por los productos de exportación como los tomates, chiles, sandías y otros. En el año 2011, la superficie sembrada de chiles verdes y jitomates en nuestro país fue de 152 742 y 53 780 hectáreas, respectivamente (SIAP, 2012). La mayor parte de la producción proviene de la siembra a cielo abierto, aunque en los últimos años existe una tendencia al incremento de la superficie con agricultura protegida.

En el Sureste de México, la producción de hortalizas, principalmente de chile habanero, tomate de cáscara y sandía, se caracteriza por cultivarse a cielo abierto, con la práctica de producción de plántulas en contenedores, cubierta plástica y sistema de riego por goteo con fertirrigación. Sin embargo, en los últimos años la producción hortícola ha disminuido la superficie debido en gran medida al manejo irracional de recursos como el agua y el suelo, que originan problemas de altos costos de producción. A esto se suma el bajo precio de los productos en el mercado y los problemas de plagas y enfermedades, sobre todo de mosca blanca (*Bemisia tabaci*) y ácaro blanco (*Polyphagotarsonemus latus*) que ocasionan una reducción del rendimiento y la calidad de los frutos. En la actualidad hay una superficie de aproximadamente 1 000 hectáreas de chile habanero y otras hortalizas como el melón y sandía que se cultivan de temporal (ciclo primavera-verano) y humedad residual (otoño-invierno) con rendimientos bajos y productos que no poseen la calidad para el mercado de exportación.

La importancia de la programación del riego y el uso eficiente del agua de riego (UEAR) se ha incrementado en los últimos años y el método de riego por goteo es una alternativa que contribuye en forma sustentable al aprovechamiento racional del agua al mejorar las eficiencias de riego para la agricultura. El riego por goteo mejora el UEAR mediante la aplicación eficiente del volumen de agua (Stanghellini *et al.* 2003; Jones 2004; Kirnak y Demirtas 2006). Con los sistemas de riego por goteo, el agua y los nutrientes pueden ser aplicados directamente a la zona radical de los cultivos con efectos positivos en el rendimiento, ahorro de agua e incremento en las eficiencias de riego (Phene y Howell, 1984).

Para obtener altos rendimientos de cultivos, es necesario suministrar de manera óptima el agua y la humedad del suelo cercana a capacidad de campo (-10 a -30 kPa) durante el periodo vegetativo. El rendimiento de los frutos se reduce significativamente cuando hay limitaciones en la cantidad de agua aplicada durante los periodos de crecimiento vegetativo, floración y fructificación (Doorenbos y Kassam, 1986).

Della Costa y Gianquinto (2002) mencionan que el riego deficitario (RD) continuo reduce significativamente el peso fresco total del fruto de chiles. El mayor rendimiento comercial fue encontrado con el riego de 120 % de la evapotranspiración; no se encontraron diferencias significativas de la producción comercial con el 40, 60, 80 y el 100 % de la evapotranspiración. Antony y Singandhupe (2004) reportaron que la producción total de chile fue menor en los niveles más bajos de riego (40 % de la ET). Dorji *et al.* (2005) compararon el riego tradicional contra el sistema de goteo con déficit riego (DR) para el cultivo de chile y encontraron que el ahorro de agua mediante el RD fue aproximadamente del 50 % con respecto del riego tradicional.

Los métodos utilizados en la programación del riego se basan en el conocimiento de las condiciones atmosféricas (estimación de la evapotranspiración), en el control de la humedad del suelo y en el seguimiento del estado hídrico de la planta. En general, estos se dividen en dos tipos:

- Aquellos que consideran como punto de partida para dosificar el riego el balance hídrico del suelo calculado a partir de la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_0) y la aplicación de coeficientes de cultivo, al utilizar los estimadores de contenido de humedad del suelo y de estrés hídrico de la planta como ayuda para la toma de decisiones (Myburgh, 1996).
- Las estrategias basadas en el seguimiento del contenido de agua del suelo, manteniendo la tensión matricial del suelo por encima de un determinado valor que varía según el estado fenológico del cultivo y los objetivos de producción y calidad deseados (McCarthy, 1998).

En este capítulo se presentan experiencias de la programación del riego basadas en el cálculo de la evapotranspiración de referencia por el método de tanque evaporímetro y coeficientes de cultivos en función de la etapa fenológica, generados y evaluados por otros investigadores en los cultivos de chiles y tomates. Asimismo, se monitorea el potencial mátrico del suelo por medio de tensiómetros y sensores *Watermark* para complementar la información del momento de riego. El objetivo del presente capítulo es dar a conocer las aplicaciones de la programación del riego a partir de las necesidades hídricas y manejo agronómico de los cultivos hortícolas para el uso eficiente del agua de riego e incremento de la productividad en la región sur-sureste del país.

9.2 Factores asociados con la programación del riego en las hortalizas

9.2.1 Clima

Los factores meteorológicos del clima determinan la evapotranspiración del cultivo. Las principales variables climáticas a considerar son la radiación solar, la temperatura, la velocidad del viento, la evaporación y la precipitación. Asimismo, se deben considerar algunos parámetros atmosféricos como la presión atmosférica, el calor latente de vaporización, la temperatura del aire, la humedad del aire, la presión de vapor, la temperatura del punto de rocío. Estas variables climáticas se pueden obtener de una estación meteorológica automatizada con registros continuos de cada 10 minutos o diarios (acumulación de 24 horas) para estimar la evapotranspiración del cultivo. Existen una diversidad de métodos, el más práctico y sencillo, no por ello impreciso, es la evaporación de tanque tipo "A". En la **Figura 9.1** se presenta un ejemplo de la variación de las temperaturas máximas y mínimas y su relación con las láminas de riego y precipitación.

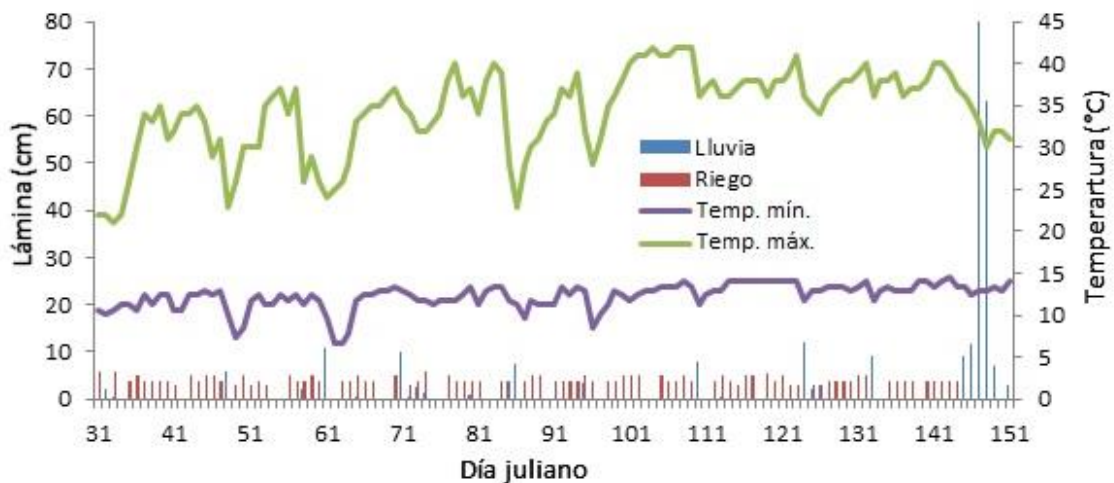


Figura 9.1 Variación de los elementos del clima (temperaturas máxima y mínima y precipitación) y láminas de riego durante el ciclo del cultivo de chile habanero, O-I/2012-2013. Huimanguillo, Tabasco, México

9.2.2 Calidad del agua de riego

El agua usada para riego proveniente de fuentes de abastecimiento con contenidos altos de carbonatos y bicarbonatos pueden ocasionar riesgos de taponamientos de emisores

si no se maneja eficientemente mediante tratamientos químicos (cloración, acidificación) para el mantenimiento del sistema de riego. Esto influye directamente en la programación del riego al considerarse una lámina para el lavado y limpieza de las tuberías y emisores en el sistema. Por ello, también es importante tomar en cuenta el sistema de filtrado según las fuentes contaminantes del agua de riego (**Figura 9.2**).



Figura 9.2 Fuente de abastecimiento de agua superficial para riego y sistema de filtrado de grava y arena

9.2.3 Especie de cultivo

Las necesidades hídricas y la programación de riegos en los cultivos hortícolas varían según la especie, variedad o híbrido, etapas fenológicas. Por lo general, se requieren 5 mm por día en la etapa de floración y maduración, que es la más crítica debido a que una deficiencia hídrica en el cultivo ocasiona una reducción muy significativa en el rendimiento y la calidad de los frutos.

9.2.4 Suelo

Las propiedades físicas del suelo como la textura, el espacio poroso y la densidad aparente influyen en la capacidad de retención de humedad o en la relación entre el contenido de humedad y el potencial mátrico del suelo. Un suelo de textura arenosa o franco arenosa retiene menos humedad que un suelo de textura arcillosa, lo que determina la frecuencia y la lámina de riego en los cultivos. Generalmente las hortalizas son susceptibles a los excesos de humedad (suelos saturados o sobresaturados) por lo que es importante construir un drenaje en los terrenos cultivados, especialmente en la

región del sureste de México. En la sección 9.4 se presentan algunos resultados del efecto de la lámina de riego y la precipitación en la variación de la tensión de humedad del suelo durante el ciclo de los cultivos.

9.2.5 Sistema de producción

El cultivo de hortalizas se practica en diversas condiciones de sistemas de producción con sistemas de riego: cielo abierto, invernaderos, malla sombra y micro túneles. Cada uno de estos sistemas requiere un manejo eficiente de los componentes de la tecnología de producción que incluyen siembra en charolas, cubierta plástica y fertirrigación. A continuación se describe cada uno de ellos y su relación con la programación y necesidades de riego.

9.2.5.1 Producción de plántulas en charolas y trasplante

La siembra de semillas se puede realizar en charolas de plástico o poliestireno de 50 a 200 cavidades (**Figura 9.3**). Una vez que las semillas emergen en estos contenedores se distribuyen en el vivero protegido con malla sombra. Las plántulas se riegan diariamente, y en épocas de altas temperaturas se recomienda regar hasta 3 veces en el día para evitar el estrés hídrico. El trasplante se puede realizar desde los 22 hasta los 50 días después de la emergencia, y depende de la especie del cultivo; por ejemplo, la sandía se trasplanta a los 22 días, el tomate verde entre los 25 y 28 días, y el chile habanero desde los 35 hasta los 45 días después de la emergencia. El desarrollo y crecimiento de las plantas en el vivero depende del manejo de la nutrición y la prevención de plagas y enfermedades. Una planta vigorosa y sana obtenida en el vivero se favorece ante las condiciones adversas de humedad en el suelo cultivado.



Figura 9.3 Producción de plántulas de chile habanero en charolas de 50 y 200 cavidades en vivero

9.2.5.2 Cubierta plástica

Poner una cubierta plástica en la superficie del suelo es una práctica frecuente en la producción de hortalizas para reducir las pérdidas por evaporación en la superficie del suelo, acelerar el desarrollo del cultivo al incrementar la temperatura del suelo, reducir la erosión, o ayudar en el control de malezas. Una vez construida la cama de siembra y colocada la cinta o manguera del riego, se instala la cubierta plástica; la más usual es de color plateado - negro, con un ancho de 1.2 m para una cama de 0.6 m y calibre de 80 a 90 milésimas de pulgadas (**Figura 9.4**). El efecto de la cubierta plástica en la productividad del cultivo del tomate de cáscara (**Figura 9.5**) es muy significativo, como se podrá notar en la sección 9.4, pues aumenta la transpiración de los cultivos y reduce los coeficientes de cultivos y la evaporación de la superficie del suelo.



Figura 9.4 Cultivo de chile habanero con cubierta plástica de color plateado-negro en Huimanguillo, Tabasco, México



Figura 9.5 Cultivo de tomate de cáscara con cubierta plástica y espalderas en Huimanguillo, Tabasco, México

9.2.5.3 Fertirrigación

Un buen programa de fertilización no consiste solamente en aplicar los nutrientes faltantes, sino en mantener el balance adecuado de los nutrimentos en la planta y el suelo. Para generar un buen programa de fertilización en el cultivo, es preciso conocer el tipo de suelo, su contenido de nutrientes disponibles (N, P, K, Ca, Mg, B, Zn, Fe, Cu, Mn), qué cantidad de nutrientes se va a extraer por cada tonelada de fruto fresco, cuánto se tiene que aplicar en función del rendimiento esperado, cómo se va a aplicar, qué fuentes de fertilizantes se van a aplicar, la eficiencia de la fertilización y la frecuencia de aplicación. La aplicación de las dosis de fertilización por sección de riego se debe distribuir de la manera más uniforme posible; los fertilizantes solubles se aplican cada tercer día o cada semana, según el programa y el calendario de riego.

9.3 El riego por goteo

El método de riego por goteo es el más sencillo y usual en los sistemas de producción hortícola. Consiste en aplicar el agua al suelo en la zona radical de las plantas y se basa en el uso de emisores o goteros de baja presión y caudal medio de un litro por hora por punto de emisión, conectados a un lateral (tubería que lleva el emisor o gotero) de polietileno (**Figura 9.6**). La aplicación se hace en pequeñas dosis y de manera frecuente, consiguiendo un mejor control de la aplicación del agua y algunos otros beneficios agronómicos.



Figura 9.6 Sistema de riego por goteo para el cultivo de sandía en el municipio de Balancán, Tabasco

El método de riego por goteo alcanza eficiencias de uniformidad de 90 %. El requerimiento de mano de obra es bajo y también se utiliza para regar cultivos como

frutales y flores. Además, permite aplicar eficientemente fertilizantes y otros pesticidas a través del agua de riego.

En la **Figura 9.7** se observa la instalación de la cinta de riego en la tubería de distribución y la cubierta plástica para realizar el trasplante del cultivo de chile habanero a una distancia de 1.5 m entre camas y 0.45 m entre plantas. Las características nominales de la lateral para hortalizas son: diámetro interno de 16 mm, calibres de 4 a 6 milésimas de pulgadas, flujo de 0.8 a 1.02 L h⁻¹, espacio entre emisores de 0.2 m y presión de operación de 0.55 kg cm⁻² (8 PSI).



Figura 9.7 Instalación de sistema de riego por goteo con cintas y cubierta plástica

9.3.1 Evapotranspiración del cultivo

El cálculo de la evapotranspiración del cultivo se puede realizar por el método de tanque evaporímetro tipo A. Se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de la ecuación (9.1).

$$ET_0 = E_v K_t \quad (9.1)$$

donde E_v es la evaporación diaria obtenida en tanque de la estación meteorológica, K_t es el coeficiente de tanque asumido igual a 0.8 (Doorenbos y Pruitt, 1977; Allen *et al.*, 2006).

9.3.2 Coeficientes de cultivos (Kc)

En la **Tabla 9.1** se presentan valores de Kc para los cultivos de chile habanero y tomate de cáscara de acuerdo con la etapa fenológica y sistema de producción. Cuando no están disponibles, los valores de Kc para chiles verdes y tomates verdes sin plástico en las etapas inicial, intermedia y final de desarrollo del cultivo se pueden obtener de Allen *et al.* (2006). Los Kc's evaluados para tomate verde con cubierta plástica fueron tomados de López-López *et al.* (2010).

Tabla 9.1 Coeficientes de cultivos utilizados para la aplicación de láminas de riego en chile habanero y tomate de cáscara

Cultivo/sistema	Inicial	Intermedia	Final
Chile habanero con plástico	0.4	0.8	0.7
Chile habanero sin plástico (Allen et al., 2006)	0.6	1.05	0.9
Tomate verde con plástico (López et al., 2010)	0.25	0.71	0.56
Tomate verde sin plástico (Allen et al., 2006)	0.6	1.15	0.8

Con los Kc's se estima la evapotranspiración real del cultivo (ET_c) de acuerdo con la Ecuación 9.2:

$$ET_c = ET_0 K_c \quad (9.2)$$

De acuerdo con la **Tabla 9.2**, la programación de riegos en tiempos medios y las necesidades de riego se presentan en los meses de diciembre a agosto, y varían desde 0.2 a 5.1 mm por día. Se aplican láminas de riego en tiempo real durante los meses de septiembre a noviembre como se podrá notar en la sección 9.4.

Tabla 9.2 Requerimientos de riego (RR) mensual y diario para cultivos hortícolas sin cubierta plástica y datos climáticos de una estación climatológica en Cárdenas, Tabasco (a partir de datos basados en coeficientes de cultivos (Kc) propuestos por la FAO)

Mes	Prec. Tot mm/mes	Prec. Efect mm/mes	ET ₀ mm/mes	Kc	ETr mm/mes	RR mm/mes	RR mm/día
Ene	121.1	71.9	118.5	1.15	136.3	64.4	2.1
Feb	105.9	59.7	130.0	0.90	117.0	57.3	2.1
Mar	43.8	16.3	163.2	1.00	163.3	147.0	4.7

Mes	Prec. Tot mm/mes	Prec. Efect mm/mes	ET ₀ mm/mes	Kc	ETr mm/mes	RR mm/mes	RR mm/día
Abr	39.6	13.8	168.2	1.00	168.2	154.5	5.1
May	65.4	29.2	184.6	0.60	110.7	81.5	2.6
Jun	182	120.6	157.8	0.80	126.2	5.6	0.2
Jul	158.9	102.1	162.5	1.00	162.5	60.4	2.0
Ago	197.4	132.9	162.5	1.15	186.8	53.9	1.7
Sep	303.9	218.1	138.3	0.90	124.5	0.0	0.0
Oct	315.1	227.1	114.7	0.60	68.8	0.0	0.0
Nov	173.8	114.0	120.0	0.80	96.0	0.0	0.0
Dic	132.5	81	122.1	1.00	122.1	41.1	1.3

Nota: Prec. Tot= precipitación total; Prec. Ef.= precipitación efectiva (aproximadamente igual al 80 % de la precipitación total, depende de la intensidad de la precipitación).

9.3.3 Monitoreo de la tensión de humedad del suelo

Para el monitoreo de la humedad del suelo se pueden instalar tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad en el terreno (**Figura 9.8**). Los valores de tensión de humedad del suelo son indicadores de que las láminas de riego aplicadas al cultivo son suficientes para satisfacer sus requerimientos hídricos, es decir, el esfuerzo que la planta realiza para absorber el agua a través de sus raíces. Estos valores no deben ser menores que los niveles críticos de tensión de humedad, o menores que la capacidad de campo (< -33 kPa).

La tensión de humedad del suelo en la primera capa del suelo (15 cm) puede variar de 0 a -25 kPa durante todo el ciclo de los cultivos, mientras que en la capa de 30 cm del suelo, la tensión de humedad puede variar entre -10 y -25 kPa.



Figura 9.8 Tensiómetros instalados a 15 y 30 cm de profundidad en el cultivo de chile habanero

9.4 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego (UEAR) en chile habanero y tomate de cáscara

9.4.1 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de chile habanero

El uso eficiente del agua de riego se define como el rendimiento de fruto verde (R_f) en Kg ha^{-1} obtenido por el volumen total de riego (V_t) en $\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$ aplicado desde el trasplante hasta la cosecha; no se incluye la lámina de agua de lluvia.

$$UEAR = \frac{R_f}{V_t} \quad (9.3)$$

En el ciclo O-I/2012-2013, a partir de los rendimientos de fruto obtenidos y la lámina de riego aplicada, la eficiencia en el uso del agua para el cultivo de chile habanero fue de 8.7 y 6.5 kg m^{-3} con y sin cubierta plástica, respectivamente. Nagaz *et al.* (2012) encontraron valores más bajos de productividad del agua en el cultivo de chile (*Capisicum annum* L.), entre 2.3 y 5.5 kg m^{-3} , los cuales variaron en función de las láminas de riego aplicadas con diferentes déficits de riego (394 a 750 mm).

En el ciclo O-I/2013-2014 se obtuvieron 19 cortes de frutos con una periodicidad semanal. Para la fecha de trasplante del 13 de septiembre, con la variedad Jaguar se obtuvo un rendimiento promedio de frutos de 34.1 t ha^{-1} y un UEAR de 5.7 kg m^{-3} , y con la variedad Orange un rendimiento de 37.3 t ha^{-1} y un UEAR de 6.9 kg m^{-3} . En la fecha de trasplante del 30 de septiembre con la variedad Orange se obtuvo un rendimiento promedio de frutos de 24 t ha^{-1} y un UEAR de 4.4 kg m^{-3} , los cuales disminuyeron significativamente ($P < 0.01$) con respecto a la primera fecha de trasplante.

La cantidad de agua lluvia durante el ciclo experimental del cultivo para la fecha de trasplante del 13 de septiembre de 2013 al 5 de mayo de 2014 fue de 1 471.2 mm, y la lámina de riego aplicada fue de 593.5 mm. Para la fecha de trasplante del 30 de septiembre al 5 de mayo (ciclo del cultivo), la lámina de riego aplicada fue de 543.4 mm y ocurrió una precipitación de 1 400.5 mm durante el ciclo de (**Tabla 9.3**). Las láminas de riego corresponden a la evapotranspiración del cultivo estimada previamente de acuerdo con la evaporación de tanque y los coeficientes de cultivo evaluados para las distintas etapas fenológicas del chile habanero.

Tabla 9.3 Efecto de la fecha de trasplante, variedad y ciclo en el rendimiento de frutos y la productividad de agua de riego para chile habanero con riego por goteo y cubierta plástica en suelos fluvisoles de Huimanguillo, Tabasco

Fecha de trasplante/variedad/ciclo	Precipitación total ocurrida (mm)	Lámina de riego (mm)	Rendimiento de frutos (t ha ⁻¹)	UEAR (kg m ⁻³)
30 ene/Jaguar CP O-I/2012-13	262.5	363.5	27.4 a	8.7 a
30 ene/Jaguar SP O-I/2012-13	262.5	415.0	20.5 a	6.5 a
15 feb/Jaguar CP O-I/2012-13	439.5	315.0	11.5 b	3.6 b
13 sept/Orange CP O-I/2013-14	1471.2	593.5	37.3 a	6.9 a
13 sept/Jaguar CP O-I/2013-14	1471.2	593.5	34.1 a	5.7 a
30 sept/Orange CP O-I/2013-14	1 400.5	543.4	24.0 b	4.4 b
15 nov/Orange CP O-I/2013-14	710.7	245.6	15.6 c	6.3 a

Nota: CP: con plástico; SP: sin plástico; UEAR: Uso eficiente del agua de riego. Valores con la misma letra dentro de columna son iguales, según la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$

El uso eficiente del agua de riego cuando se utiliza la cubierta plástica es mayor que cuando no se utiliza. Aunque la cubierta plástica aumenta significativamente el UEAR, la gran mayoría de investigadores reporta la productividad del agua en función de la lámina aplicada y no con base en la evapotranspiración del cultivo (ETc). Klar y Jadoski (2004) reportaron que el UEAR en chile verde fue de 69 L kg⁻¹ en los tratamientos con cubierta plástica, en comparación con los tratamientos sin cubierta en los que fue de 140 L kg⁻¹ de fruto en una región de clima húmedo en condiciones protegidas.

El análisis de varianza en el rendimiento de frutos demostró que existen diferencias significativas en el cultivo de chile habanero con y sin cubierta plástica ($P < 0.052$). Sin embargo, la comparación de medias por el método de Tukey ($P \leq 0.05$) indica que son estadísticamente iguales (**Tabla 9.2**). Utilizando la cubierta plástica en el cultivo de chile habanero se obtuvo en promedio 27.4 t ha⁻¹ y sin plástico 20.5 t ha⁻¹, lo que representa un incremento del 25.2 % en el rendimiento de frutos. Este valor supera el rendimiento promedio experimental obtenido por López y Mirafuentes (2004) que fue de 22 t ha⁻¹, similar al potencial productivo de variedades mejoradas que es de 30 t ha⁻¹ para los ciclos primavera-verano y otoño-invierno, de acuerdo con Aceves et al. (2009).

En la **Figura 9.9** se presenta el rendimiento de frutos de chile habanero por corte; se observa que el corte número 2 alcanza los valores máximos de 9.3 t ha⁻¹ con plástico y de 4.7 t ha⁻¹ sin plástico, con un total de 27.4 t ha⁻¹ y 20.5 t ha⁻¹, respectivamente, en los 8 cortes realizados durante el ciclo del cultivo.

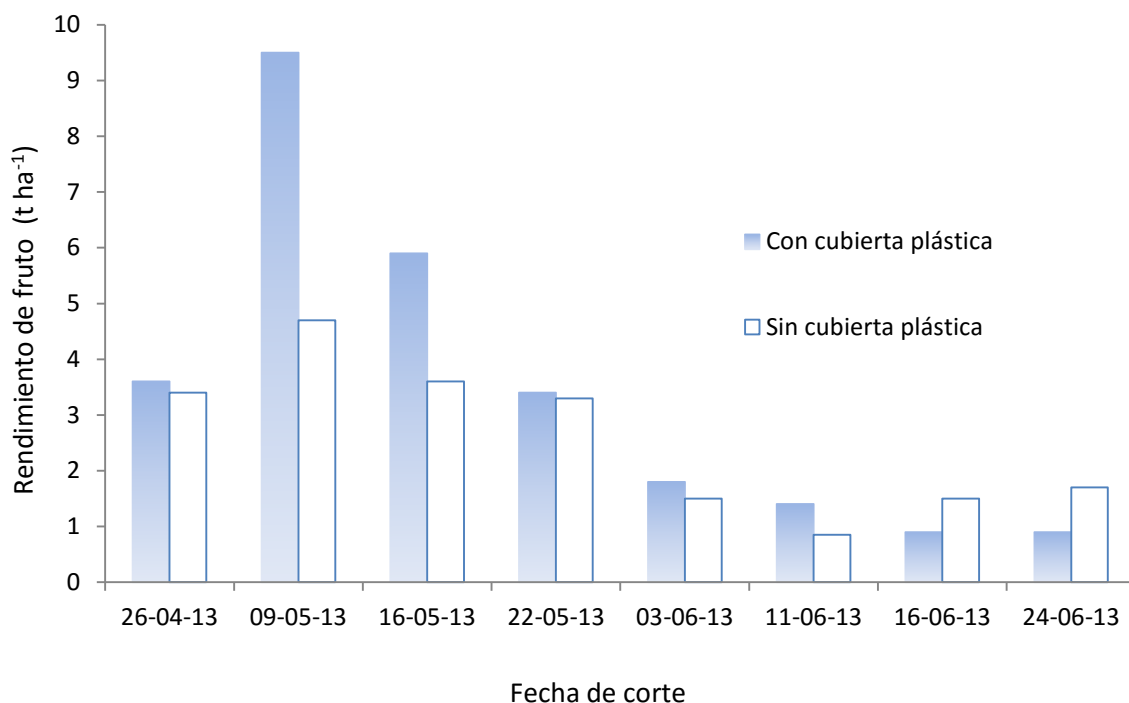


Figura 9.9 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento de frutos en kg ha⁻¹ por corte del cultivo de chile habanero con riego por goteo en el ciclo O-I/2012-2013

Estas diferencias en el rendimiento de los frutos se debieron a que en la cubierta plástica existe un incremento de la temperatura y un aumento general de la transpiración del cultivo, debido a la transferencia de calor sensible y radiactivo desde la superficie de la cubierta de plástico hacia las adyacencias de la vegetación.

9.4.2.1 Tensión de humedad del suelo

Respecto del potencial mátrico del suelo en la primera capa de 15 cm, la tensión de humedad fue de -2 a -42 kPa durante el ciclo del cultivo, mientras que en la capa de 30 cm del suelo, la tensión de humedad varió entre -4 a -52 kPa (**Figura 9.10**). Los valores de tensión de humedad del suelo y las láminas de riego aplicadas al cultivo, complementadas con la precipitación, indican el esfuerzo que la planta realiza para absorber el agua a través de sus raíces. Estos valores alcanzaron en algunos días sus niveles críticos, menores que la capacidad de campo (< -33 kPa), pero su duración fue menor que dos días, lo que evitó que el cultivo no presentara síntomas de estrés hídrico.

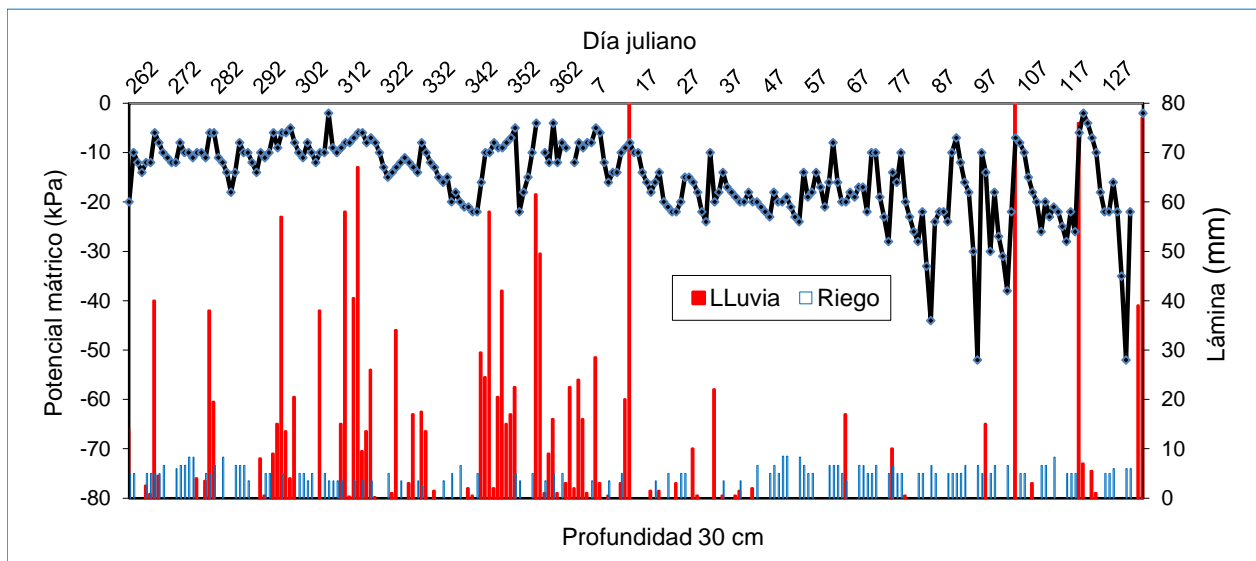
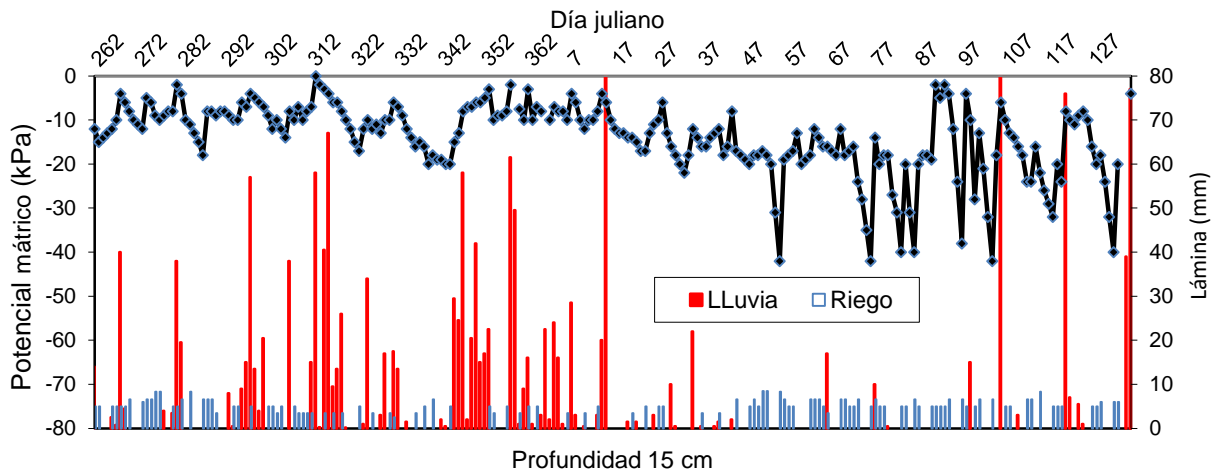


Figura 9.10 Efecto de la lámina de riego y la precipitación en el potencial mátrico del suelo a la profundidad de 15 y 30 cm en el cultivo de chile habanero con cubierta plástica

Las aplicaciones de las láminas de riego variaron entre 2.5 y 8.5 mm por día, de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo tomando en cuenta la cubierta plástica fueron 0.5, 0.9 y 0.7 en las etapas inicial, intermedia y final del cultivo, respectivamente, lo que permite aumentar la eficiencia de aplicación del agua de riego. Como consecuencia, se ahorró aproximadamente 18 % de

agua, comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.* (2006) en el boletín 56 de la FAO para el cultivo de chile verde (0.6, 1.15 y 0.8).

9.4.2 Rendimiento de frutos y uso eficiente del agua de riego en el cultivo de tomate de cáscara

En el cultivo del tomate de cáscara se observan diferencias altamente significativas ($P=0.004$) debidas al efecto de la cubierta plástica (**Tabla 9.4**), e incluso se puede observar el efecto del aumento de la precocidad en el primer corte (**Figura 9.11**), donde la población sin plástico no presentó rendimiento de frutos. El rendimiento de frutos de tomate de cáscara con cubierta plástica fue de $32.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en promedio contra $14.1 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ obtenido con la población sin cubierta plástica, lo que representa un incremento del 56.2 %.

Tabla 9.4 Láminas de riego, precipitación y eficiencia del agua de riego en el cultivo de chile habanero y tomate verde con riego por goteo con y sin cubierta plástica

Cultivo/sistema	Precipitación (mm)	Lámina de riego (mm)	Uso eficiente del agua de riego (kg m^{-3})
Tomate verde con cubierta plástica	288.0	255.0	21.4 a
Tomate verde sin cubierta plástica	288.0	366.0	11.5 b

* Valores con la misma letra dentro de columna son iguales según la prueba de Tukey con $P \leq 0.05$

Las aplicaciones de las láminas de riego variaron entre 2.5 y 7 mm por día, de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo tomando en cuenta la cubierta plástica permiten aumentar la eficiencia de aplicación del agua de riego y como consecuencia se ahorró 19 % de agua, comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.* (2006) para el cultivo de jitomate sin cubierta plástica.

La tasa de transpiración de cultivos en el plástico se incrementa en un promedio de 10 a 30 % a lo largo del ciclo del cultivo. Comparado con la ausencia de la cubierta plástica, el valor de K_c disminuye en un promedio de 10 a 30 % debido a la reducción de la evaporación en el suelo, estimada en un 50 a 80 %. En las figuras **9.12** y **9.13** se presenta el rendimiento de frutos de tomate de cáscara por fecha de corte obtenidos en el ciclo O-I/2012-2013, en el sitio Ejido Huimanguillo (EH) y en el Campo Experimental Huimanguillo (C.E.H). Se observa que el número total de cortes fue de 8 y 11 con rendimientos que varían entre 0.5 y $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ durante el ciclo del cultivo, respectivamente. Los rendimientos totales fueron de 46.1 en el EH y $54.6 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$ en el C.E.H.

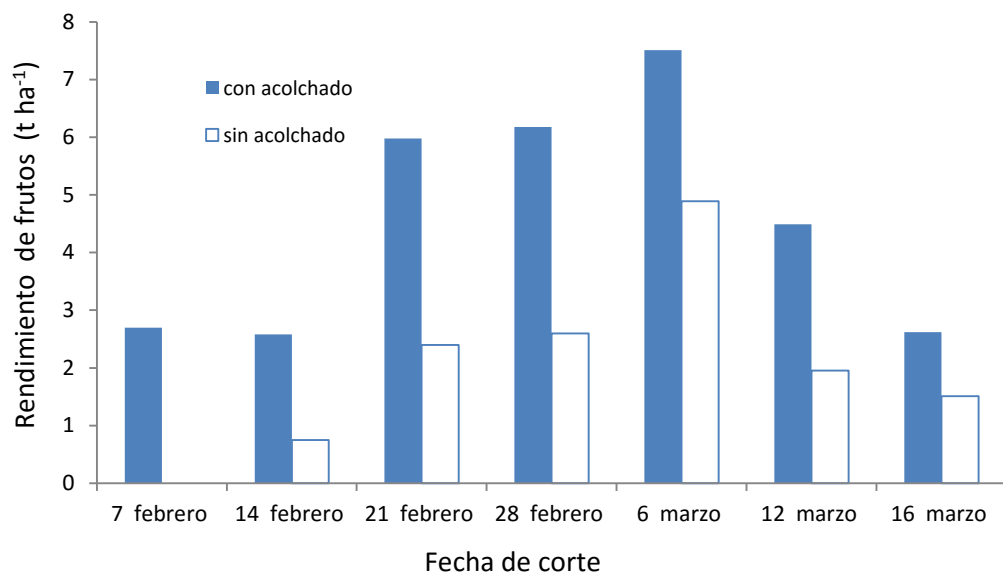


Figura 9.11 Efecto de la cubierta plástica en el rendimiento por corte de frutos de tomate verde con riego por goteo en el ciclo OO-I/2011-2012

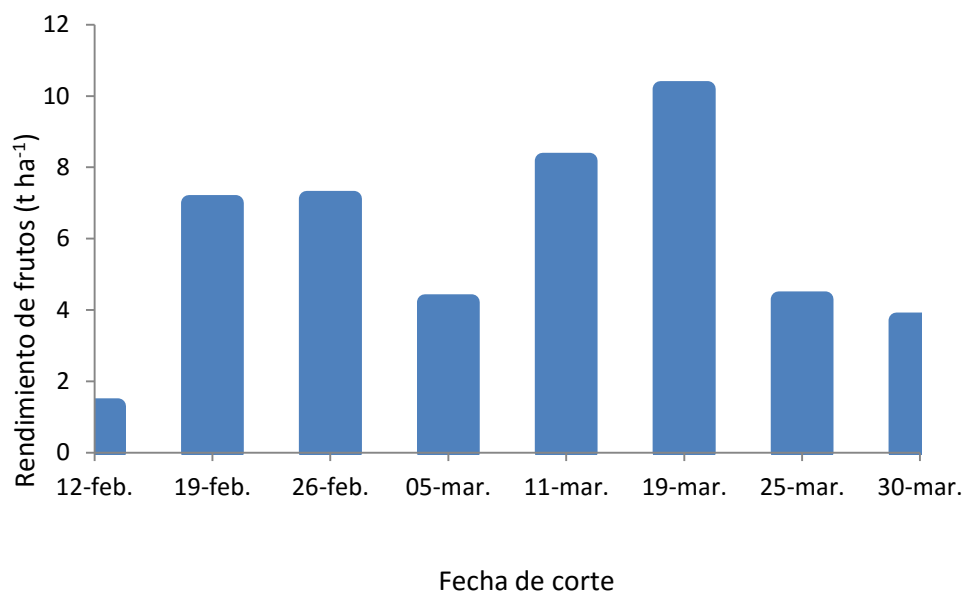


Figura 9.12 Rendimiento de frutos en t ha⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un fluvisol de Huimanguillo, Tabasco

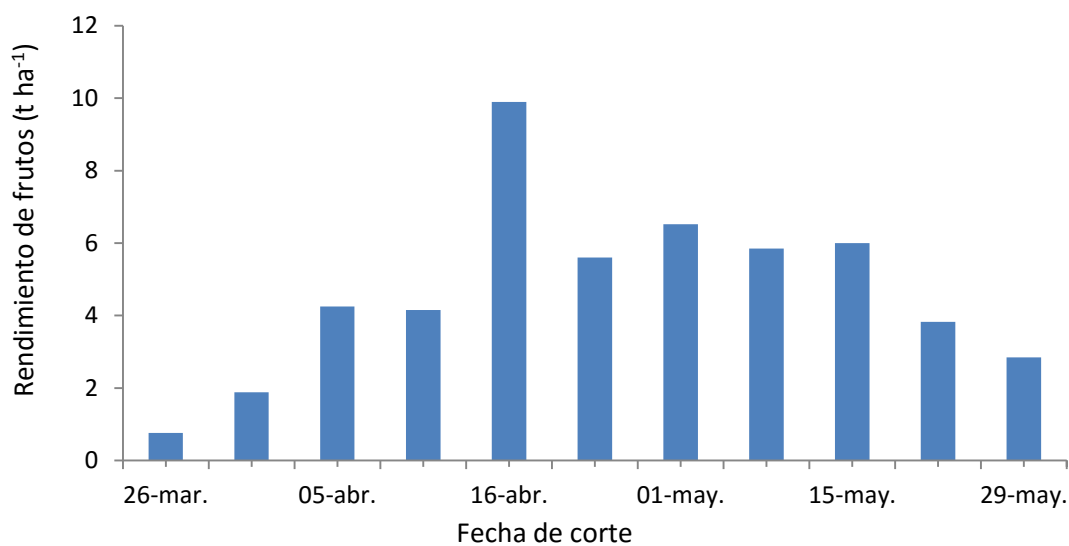


Figura 9.13 Rendimiento de frutos en t ha⁻¹ por corte del cultivo de tomate verde con riego por goteo y cubierta plástica, ciclo O-I/2012-2013 en un suelo Fluvisol del Campo Experimental Huimanguillo

En contraste con la producción media nacional de 14 t ha⁻¹ y uso eficiente de agua de 2.54 kg m⁻³, aunada a la mala calidad de frutos en sistemas tradicionales (riego por gravedad) o temporal, la tecnología de producción con cubierta plástica en condiciones de riego por goteo incrementó el rendimiento de frutos en 69.6 y 74.3 % en los sitios de estudio Ejido Huimanguillo (suelo arenoso) y C.E. Huimanguillo (suelo franco arcilloso), respectivamente. La eficiencia en el uso del agua de riego se incrementó en 63.5 %, con un UEAR de 16.1 y 19.1 kg m⁻³, respectivamente.

9.4.2.1 Tensión de humedad del suelo

En la **Figura 9.14** se observa el efecto de la lluvia y el riego en el potencial mátrico medido con los tensiómetros a 15 y 30 cm de profundidad. La cantidad total del agua de lluvia del ciclo del cultivo (O-I/2012-2013) fue de 288.5 mm. La lámina de riego acumulada y aplicada al cultivo fue de 366 mm, basada en la evapotranspiración del cultivo. En la primera capa del suelo (15 cm) la tensión de humedad varió de 0 a -20 kPa durante el ciclo del cultivo, mientras que en la capa de 30 cm, la tensión de humedad osciló entre -10 t -30 kPa, es decir, cercano a capacidad de campo (-33 kPa). Los valores indican el esfuerzo que la planta debe ejercer para absorber el agua a través de sus raíces.

La aplicación de las láminas de riego varió entre 3 y 6 mm por día, de acuerdo con el cálculo de la evapotranspiración del cultivo. El uso de los coeficientes de cultivo basados en la cubierta plástica: 0.25, 0.71 y 0.56 en las etapas inicial, intermedia y final

del cultivo, respectivamente (López *et al.* 2010), aumentó la eficiencia de aplicación del agua de riego. Se ahorró aproximadamente 25 % de agua, comparado con los coeficientes de cultivos que proponen Allen *et al.* (2006) para el cultivo de tomate (0.6, 1.15 y 0.8).

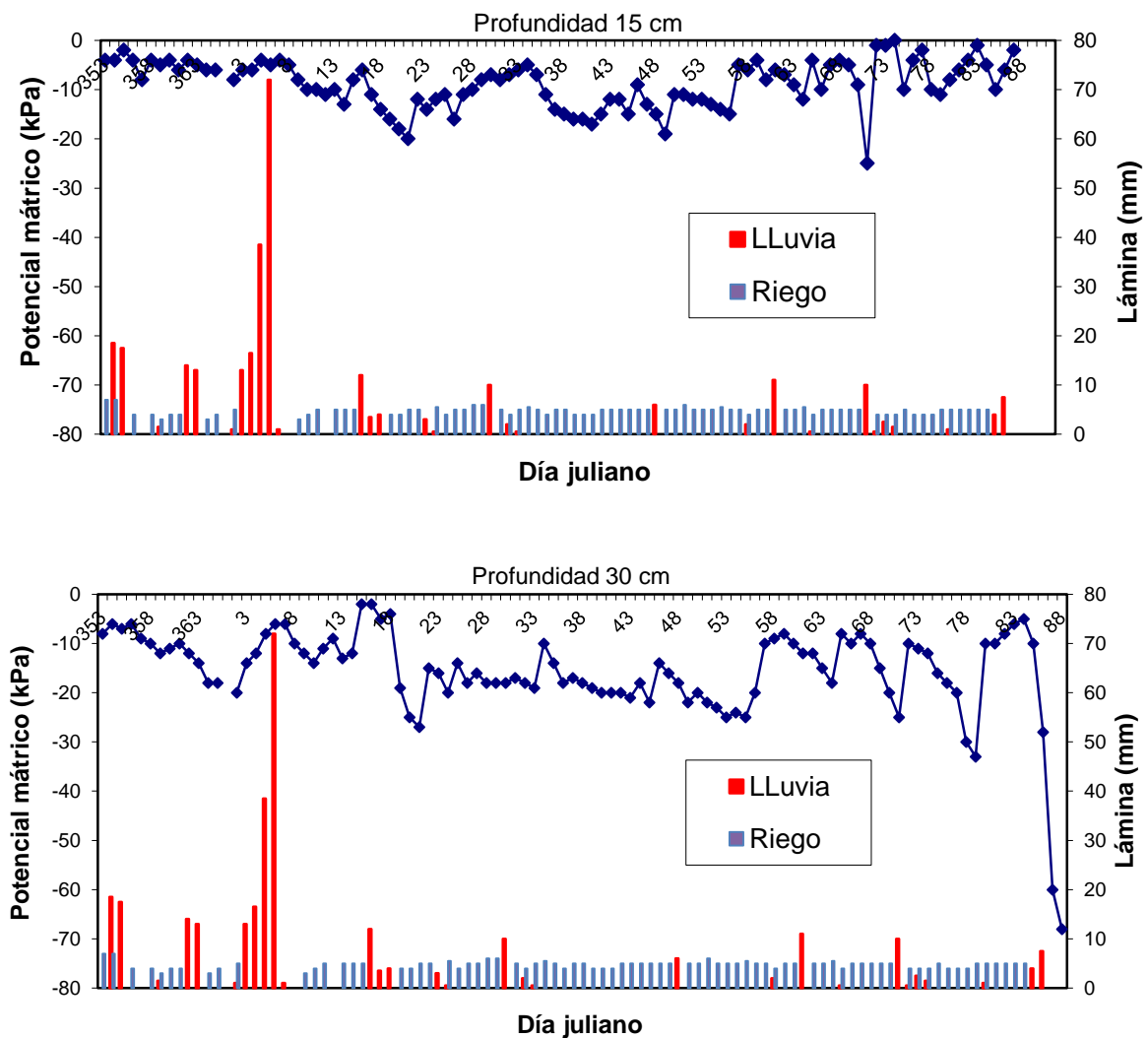


Figura 9.14 Efecto de la lámina de riego y lluvia en el potencial mátrico del suelo a dos profundidades (15 y 30 cm) en el cultivo de tomate de cáscara con riego por goteo y cubierta plástica en el ciclo 2012-13

9.5 Conclusiones

La programación del riego en los cultivos hortícolas (chile habanero y tomate de cáscara) basada en la evapotranspiración real y el potencial de presión del agua en el

suelo incrementa la productividad de los cultivos hasta en un 50 % y el uso eficiente del agua de riego hasta en 64 %. Existe un ahorro del 18 % del costo de operación del riego comparado con los sistemas tradicionales.

La fecha de trasplante y la cubierta plástica son los dos factores más importantes que determinan los requerimientos hídricos de los cultivos y tienen un efecto muy significativo en el rendimiento de frutos y en el uso eficiente del agua de riego. La tensión de humedad del suelo es un buen indicador del momento de riego y complementa la información confiable en la programación del riego. Los cultivos de chile habanero y tomate de cáscara requieren de una humedad cercana a la capacidad de campo (-33 kPa).

*“La tierra tiene suficiente para las necesidades de todos,
pero no para la avaricia de unos cuantos”*

Gandhi

Referencias



10

CAPÍTULO 10

REFERENCIAS

- Abad, M., Martínez, P. F., Martínez, M. D., y Martínez, J. (1993) *Evaluación agronómica de los sustratos de cultivo*. Actas de horticultura.
- Abad, M., Noguera, P. (1998) Sustratos Para el cultivo sin suelo y fertirrigación. En: *Fertirrigación. Cultivos Hortícolas Y Ornamentales*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Aceves, L.A., Juárez, J.F., Palma, J.D., López, L.R., Rivera, H.B., Rincón Ramírez, J.A., Morales, C.R., Hernández, A.R. (2009) *Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de chile habanero (Capsicum chinense Jacq.) en el estado de Tabasco*. Tabasco: SEDAFOP
- Allen, R.G., Brockway, C.E. y Wright, J. L. (1983) *Weather station siting and consumptive use estimates*. *Journal of Water Resources. Planning and Management Division*. Amer. Soc. Civil Eng.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998) *Crop evapotranspiration. Irrigation and Drainage*. Roma: FAO.
- Allen, R.G. y Pruitt, W.O. (1986) Rational use of the FAO Blaney-Criddle formula. *Journal of American Society of Civil Engineers*, 112, pp. 139-156.
- Allen, G.R., Pereira, S.L., Raes, D. y Smith, M. (2006) Crop Evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage*, 56, pp. 300.
- Allen, R.G., Jensen, M.E., Wrishty, J. L. y Burman, R.D (1989) Operational Estimates of Reference Evapotranspiration. *Agronomy Journal*, 81(4), pp. 652-662.
- Amoozegar-Fard, A., Warrick, A.W. y Lomen, D. O. (1984) Design monographs for trickle irrigation systems. *Irrigation and Drainage* 110, pp. 107-120.
- Antony, E. y Singandhupe, R.B. (2004) Impact of drip and surface irrigation on growth, yield and WUE of capsicum (*Capsicum annum L.*). *Agricultural Water Management Journal*, 65 (2), pp. 121-132.
- Ayars, J. & Hutmacher, R. 1994, 'Crop coefficients for irrigating cotton in the presence of groundwater', *Irrigation Science*, 15, 1, 45-52.

- Ayers, R.S., & Westcot, D.W. 1976, *Water quality for agricultura*, Irrigation and Drainage paper 29, Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Baker, J.M. y van Babel, C.H.M. (1987) Measurement of mass flow of water in stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, 10(9), pp. 777-782.
- Bakker, J.C., Bot, G.P.A, Challa, H. y Von de Braak, N.J. (1995) *Greenhouse climate control, an integrated approach*. Wageningen: Wageningen Pers.
- Benoit, E. y Ceustermans, N. (1990) The use of recycled polyurethane (PUR) as an ecological growing medium. *Plasticulture*, 88, pp. 41-48.
- Borg, H.Y. y Grimes, D.W. (1986) Depth development of roots with time: An empirical description. *Transactions of the ASAE*, 29(1), pp. 194-197.
- Bosland, P.W. y Votava, E.J., (1999) *Peppers: vegetable and spice capsicums*. New York: CABI Publishing
- Bowen, I.S. (1926) The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water. *Physical Review* 27, pp. 779-787.
- Burés, S. (1997) *Sustratos*. Madrid, España: Ediciones Agrotécnicas
- Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A. y Howell, T.A. (1997). Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 123(6), pp. 423-442.
- Cahoon, J., Ferguson, J., Edwards, D. y Tacker, P. (1990) A microcomputer based irrigation scheduler for the humid mid-south region. *Applied Engineering in Agriculture*, 6(3), pp. 289-295.
- Campbell, G.S. (1977) *An introduction to environmental biophysics*. New York, USA: Springer Verlag.
- Castilla, P.N. y Montalvo, L.T. (1998). Programación del riego. En: Cadahia, C. ed. *Fertigación*. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- Castilla, N. (1994) Greenhouse in the mediterranean area: Technological level and strategic management. *Acta Horticulturae*, 361, pp. 44-56.
- Castilla, N. y Fereres, E. (1990) The climate and water requirements of tomato in unheated plastic greenhouses. *Agricultura Mediterránea*, 120, pp. 268-274.
- Castilla, N. y López Gálvez, J. (1993) Programación del riego localizado en invernadero. *HF. Hortofruticultura*, 4(2), pp. 44-46
- Choisnel, E., de Villele, O., y Lacrose, F. (1992) *Une approche uniformisée du calcul de l'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble des pays de la Communauté Européenne*. Luxemburgo: Commission de Communautés Européennes.

- Choudhury, B.J. y Monteih, J.L. (1988) A four-layer model for the heat budget of homogenous land surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 114, pp. 373-398.
- Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S. y Burt, C.M. (1995) Defining Efficiency and Uniformity: Problems and Perspective. *Proceedings of the First International Conference on Water Resources*. 14-18, agosto, 1995, San Antonio, Texas, EE.UU. New York, NY: American Society of Civil Engineers, pp. 1521-1525.
- Comisión Nacional del Agua (1994) *Transferencia de los Distritos de Riego en México*. Mexico, D.F.
- saCook, R.L. y Calvin, L. (2005) *Greenhouse tomatoes change the dynamics of the North American fresh tomato industry*. Disponible en: www.ers.usda.gov.
- Cuenca, R.H. (1989) *Irrigation System Design: An engineering Approach*. Englewood Cliffs, New Jersey, EEUU: Prentice Hall.
- Willits, D.H. (2003) The Penman-Monteith Equation as a Predictor of Transpiration in a Greenhouse Tomato Crop. *2003 ASAE Annual International Meeting*. Paper 034095. 29, Julio, 2003, Las Vegas, Nevada, EE.UU.
- Daamen, C.C. (1997) Application of a two source energy balance model to a sparse millet field and the use of soil surface resistance. *Agricultural and Forest Meteorology* 83, pp. 205-230.
- Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S. y Rhoades, J.D. (1984) Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224, pp. 989-990.
- De Boodt, M., Verdonck, O. y Cappaert, I. (1974) Method for measuring the water release curve of organic substrates. *Acta Horticulturae*, 37, pp. 2054-2062.
- De Juan Valero, J.A. y Martín de Santa Olalla, F. (1992b) "El cálculo y la estimación de la evapotranspiración", En: Martín de Santa Olalla, F. y De Juan Valero, J.A eds. *Agronomía de riego*. Madrid: Mundi-Prensa.
- Della Costa, L., y Gianquinto, G., (2002) Water stress and watertable depth influence yield, water use efficiency, and nitrogen recovery in Bell Pepper: Lysimeter Studies. *Australian Journal of Agricultural Research*, 53(2), pp. 201-210.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1977) Crop water requirements. *FAO Irrigation and Drainage Paper*, 24(rev), 144 pp.
- Doorenbos, J. y Kassam, A.H. (1986) Yield response to water. *FAO Irrigation and Drainage*, 33, pp. 193.
- Doorenbos, J. y Pruitt, W.O. (1976) Las necesidades de agua de los cultivos. *FAO Irrigation and Drainage*, 24, pp. 190

- Dorji, K., Behboudian, M.H. y Zegbe-Dominguez, J.A., (2005) Water relations, growth, yield, and fruit quality of hot pepper under deficit irrigation and partial root zone drying. *Scientia Horticulturae*, 104, pp. 137-149.
- Ehrler, W.L., Idso, S.B., Jackson, R.D. y Reginato, R.J. (1978) Diurnal Changes in Plant Water Potential and Canopy Temperature of Wheat as Affected by Drought. *Agronomy Journal*, 70(6), pp. 999-1004.
- FAO (1979) Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. *Serie FAO N° 33 Estudios del agua sobre riego y drenaje*, pp. 212.
- FAO (1976) Las necesidades de agua de los cultivos. *Serie FAO N° 24. Estudios del agua sobre riego y drenaje*, pp. 194.
- FAO (1980) Drainage design factors. *FAO Irrigation and Drainage*, 38.
- FAO (1990) Programación del riego. Manual de campo No. 24. Roma.
- Fernández, M.D., Orgaz, F., Fereres, E., López, J.C., Céspedes, A., Pérez, J., Bonachela, S. y Gallardo, M. (2001) *Programación del riego de cultivos hortícola bajo invernadero en el sudeste español*. Almería, España: CAJAMAR
- Fereres, E., Goldfien, R.E., Pruitt, W.O., Henderson, and D.W. y Hagan, R.M. (1981). The irrigation management program: A new approach to computer assisted irrigation scheduling. *Proceedings of the ASCE Congress of Irrigation Scheduling for Water and Energy Conservation in the 80's*. St. Joseph, Michigan, USA. pp. 202-207.
- Fernández, G. (2000) *Manual de riego para agricultores: módulo 1. Fundamentos del riego*. España: Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- Fernández, M^a D., Orgaz, F., Fereres, E., López, J.C., Céspedes, A., Pérez, J., Bonachela, S. y Gallardo, M. 2001, *Programación del riego de cultivos hortícolas bajo invernadero en el sudeste español*, CAJAMAR (Caja Rural de Almería y Málaga), Almería.
- Fernández, F.M.D. (2000). *Necesidades hídricas y programación de riegos en los cultivos hortícolas en invernadero y suelo anarenado de Almería*. Tesis doctoral. Escuela Politécnica Superior, Universidad de Almería.
- Frevert, D. K., Hill, R. W. & Braaten, B. C. 1983, 'Estimation of FAO Evapotranspiration Coefficients', *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 109,2, 265-269.
- Gardner, W.R. (1958) Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85(4), pp. 228-232

- Gislerod, H.R. y Kempton, R.J. (1983) The oxygen content of flowing nutrient solutions used for cucumber and tomato cultura. *Scientia Horticulturae*, 20, pp. 23-33.
- Haman, D.Z., Smajstrla, A.G. y Zazueta, F.S. (1990) Chemical Injection Methods for Irrigation. *Gainesville: Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences*. University of Florida. Circular 864.
- Handreck, K.A. y Black, N.D. (1991) *Geowing Media for Ornamental Plants and Turf*. Kensington: New South Wales University Press.
- Hanks, R.J y Hill, R.W. (1980) *Modelling Crop Responses to Irrigation in Relation to Soils, Climate and Salinity (IIIC publication)*. Pergamon Press
- Hanson, B., Schwankl, L. y Fulton, A. (1999) Scheduling irrigation; when and how much water to apply. Division of Agriculture and Natural Resources. Publication 3396. University of California. Irrigation Program.
- Hargreaves, H.G. y Samani Z.A. (1992) *Irrigation Scheduling*. New Mexico State University. Las Cruces, EE.UU.
- Harrington, G.J. y Heerman, D.F. (1981) State of the art irrigation scheduling computer program. *Proceedings of the ASCE Congress of Irrigation Scheduling for Water and Energy Conservation in the 80's*. Chicago, Illinois, EE.UU. 14-15, diciembre, 1981
- Hart, W.E. y Reynolds W.N. (1965) Analytical design of sprinkler systems. *Transactions of the ASAE*, 8(1), pp. 83-85.
- Hernández, R.J. (2001). *Calibración del método de reflectometría (TDR) para estimar el contenido de humedad del suelo en el distrito de riego 076, Valle del Carrizo, Sin.* Tesis profesional. Universidad A. Chapingo
- Hill, R.W., Johns E.L. y Frevert, D.K. (1983) *Comparison of equations used for estimating agricultural crop evapotranspiration with field research*. Denver, Colorado, U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering and Research Center.
- Hillel, D. (1991) *Introduction to soil physics*. San Diego, California, EE.UU. Academic Press.
- Ho, L.C. y Adams, P. (1995) Nutrient uptake and distribution in relation to crop quality. *Acta Horticulturae*, 396, pp. 33-44.
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J.Jr. y Hatfield, J.L. (1981) Normalizing the stres-dregree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, pp. 45-55.

- Jensen, M.E., Robb, D.C.N. y Frazoy, C.E. (1970) Scheduling Irrigation using climate-crop-soil data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 96, pp. 25–28.
- Jensen, M.E., Burman, R.D. y Allen, R.G. (1990) Evapotranspiration and irrigation water requirements. *ASCE Man. and Rep. on Engineering Pract.* Núm. 70, NYork, pp. 332.
- Jones, H.G. (2004) Irrigation Scheduling: advantages and pitfalls of plant-based methods. *Journal of Experimental Botany*, 55(407), pp. 2427–2436.
- Keller, J. y Karmeli, D. (1975) *Trickle irrigation design*. California: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation.
- Kirnak H. y Demirtas M.N. (2006) Effects of different irrigation regimes and mulches on yield and macronutrition levels of drip-irrigated cucumber under open field conditions. *Journal of Plant Nutrition*, 29(9), pp. 1675–1690.
- Klar, A.E. y Jadoski, S.O. (2004) Irrigation and mulching management for sweet pepper crop in protected environment. *Irriga Botucatu 2004*, 9(3), pp. 217–224.
- Lomas, J. y Levin, J. (1979) Irrigation. En Seemann, J., Chirvkov, Y.I., Lomas, J. y Primault, B. eds. *Agrometeorology*. Springer-Verlag.
- López, J.C., Lorenzo, P., Castilla, N., Pérez-Parra, J., Montero, J.I., Baeza, E., Antón, A., Fernández, M.D., Baille, A. y González-Real, M. (2001) *Incorporación de tecnología al invernadero mediterráneo*. Almería, España: CAJAMAR.
- López, J.C., Lorenzo, P., Medrano, E., Sánchez-Guerrero, M.C., Pérez, J., Puerto, H.M. y Arco, M. (2000) *Calefacción de invernaderos en el sudeste español: resultados experimentales para cultivos de pepino y judía*. Almería, España: CAJAMAR
- López, L.R., Sánchez, C.I., Inzunza, I.M.A. y Fierro, A.A. (2013) Desarrollo tecnológico para la producción de tomate verde (*Physalis ixocarpa* Brot) en Tabasco, México. *II Simposium Internacional en Producción Agroalimentaria y XXV Reunión Científica y Tecnológica Forestal y Agropecuaria de Tabasco*. Tabasco, 6-7 septiembre, 2013. pp. 85-96.
- López, L.R. y Mirafuentes, H.F. (2004) Sistema de fertirrigación y acolchado plástico en la producción de chile habanero (*Capsicum chinense* Jacq). *Primera Convención Mundial del Chile*. León, Guanajuato, México, 27-29 junio, 2004. Pp. 223-229.
- López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M.A., López-Cruz, I.L., Sánchez-Cohen, I. (2010) Evapotranspiración del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot). Mediante el potencial mátrico del suelo. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(2), pp. 157-168.
- Lorenzo, P., Maroto, C. y Castilla, N. (1990) CO₂ in plastic greenhouse in Almeria (Spain). *Acta Horticulturae*, 268, pp. 165-169.

- Lynch, D.R., Foroud, N., Kozub, G.C. y Farries, B. C. (1995) The effect of moisture stress at three growth stages on the yield, components of yield and processing quality of eight potato varieties. *American Journal of Potato*, 72(6), pp. 375-385.
- Magán, J.J., Romera, M.P., Cánovas, F. y Fernández, E. (1999) Ahorro de agua y nutrientes mediante un sistema de cultivo sin suelo con reúso del drenaje en tomate larga vida. *XVII Congreso Nacional de Riegos*. Murcia, 11-13 mayo, 1999. Actas: pp. 186-193.
- Marshall, T.J. y Holmes, J.W. (1988) *Soil Physics*. New York, EE.UU.: Cambridge University Press.
- Martin, D.L., Stegman, E.C. y Fereres, E. (1990) Irrigation scheduling principles. En Hoffman, G.J., Howell, T.A. y Solomon, K.H. eds. *Management of farm irrigation systems*. St. Joseph, MI, EE.UU.: American Society of Agricultural Engineers. pp. 155-203.
- Mccarthy, M.G. (1998) Irrigation management to improve winegrape quality – nearly 10 years on. *The Australian grapegrower and Winemaker Annual Technical Issue*, 414a, pp. 65-71.
- Merriam, J.L. y Séller, J. (1978) *Farm irrigation system evaluation: A guide for management*. Utah, EE.UU.: Utah State University. Agricultural and Irrigation Engineering.
- Merva, E.G. (1995) *Plant Biosystem*. ASAE Textbook No. 9. Joseph, MI, EE.UU.: American Society of Agriculture Engineers. Pp. 272.
- Millar, A. (1993) *Manejo de agua y producción agrícola*. IICA, Universidad de Concepción.
- Monteith, J.L. y Unsworth, M. (1990) *Principles of environmental physics*. Academic Press.
- Montero, M., Acosta, D., Fernández, G. y Cadena, C. (2002) Deterioro del EVA de paneles fotovoltaicos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 6(1), pp. 43-48.
- Myburgh, P.A. (1996) Response of *Vitis vinifera* L. cv. Barlinka/Ramsey to soil water depletion levels with particular reference to trunk growth parameters. *South African Journal for Enology and Viticulture*, 17(1), pp. 3-14.
- Nagaz, K., Moncef, M.M. y Ben, M.N. (2012) Effects of deficit drip-irrigation scheduling regimes with saline water on pepper yield, water productivity and soil salinity under arid conditions of Tunisia. *Journal of Agriculture and Environment for International Development*, 106(2), pp. 85-103.
- Nederhoff, E. 2001. <http://www.redpathaghort.com/bulletins/LightandRadiation>.

- html.Ogrosky, H.O. y Mockus, V. (1964) Hydrology of agricultural lands. En: Ven Te Chow ed. *Handbook of Applied Hidrology*. New York: McGraw Hill.
- Ojeda, B.W., Sifuentes, E.I. y Unland, W.H. (2006) Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa. *Agrociencia*, 40, 13-25.
- Ojeda, W., Angeles, J.M., y Rojano, A. (2003) Programación automática del riego bajo condiciones de invernadero. *XII Congreso Nacional de Irrigación*. Zacatecas, Zacatecas, 13-15 agosto, 2003. ANEI 2003 M7 T41.
- Ojeda, W., Martínez, P., y Hernández, L. (2008) Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. En: Aguilar, A. y Martínez, P. eds. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México*. Vol. II. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W. (2004) Programación del riego bajo condiciones de invernadero. *III Curso internacional de invernaderos*. Universidad A. Chapingo. Chapingo, México.
- Ojeda-Bustamante, W., Carrillo, G.M. y Martinez, E.R. (2004) *Calendarización de riego: teoría y práctica*. México, D.F.: IMTA.
- Ojeda-Bustamante, W.E., Sifuentes, Slack, D.C. y Carrillo, M. (2004) Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53, pp. 251-261.
- Ortega, S. y Acevedo, C. (1999) Programación de Riego. Cartilla técnica Comisión Nacional de Riego y Universidad de Talca. 16 p.
- Ortega-Farias S., Oliosio, A., Antonioletti, R. y Brisson, N. (2004) Evaluation of the Penman-Monteith model for estimating soybean evapotranspiration. *Irrigation Science*. 23(1), pp. 1-9.
- Ortega-Farías, S. (1998) Demanda hídrica y programación del riego. En: Varas, E. ed. *Recursos Hídricos. Una visión moderna y sustentable*. Chillán: INIA-Quilamapu.
- Ortega-Farias, S.R. y Fuentes, S. (1999) Validación de un modelo para estimar resistencia de la cobertura vegetal de tomate a la transferencia de vapor de agua caliente. *Ciencia e investigación agraria*, 25, pp. 151-155.
- Ortiz, S.C.A. (1987) *Elementos de agrometeorología cuantitativa: con aplicaciones en la República Mexicana*. 3ª ed. Chapingo, México: Departamento de suelos, UACH.
- Palacios, V.E., y Martínez, A. (1978) *Respuesta en el rendimiento de los cultivos a diferentes niveles de humedad del suelo: un enfoque metodológico de investigación*. Chapingo, México: Colegio de Postgraduados.
- Palacios, V.E. (1998) *¿Porqué, Cuándo, Cuánto y Cómo Regar? Para lograr las mejores cosechas*. Montecillo, México: Colegio de Postgraduados.

- Penman, H. L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil, and grass, *Proceedings of the Royal Society*, A193, pp. 120-145.
- Phene, C.J. y Howell, T.A. (1984) Soil sensor control of high frequency irrigation. *Transactions of the ASAE*, 27(2), pp. 392-396.
- Phene, C. (1998) Riego por goteo subsuperficial. *IV curso internacional de sistemas de riego*. Universidad Autónoma de Chapingo. Departamento de Irrigación. 22 pp.
- Pizarro, F. (1996) *Riego localizado de alta frecuencia*. España: Mundi-Prensa.
- PPI. Potash & Phosphate Institute (1994) *Soil Fertility Manual*. Georgia, EE.UU.: Norcross.
- Puustjärvi, V. (1994) *La turba y su manejo en horticultura*. España: Ediciones de Horticultura.
- Raviv, M., Chen, Y. y Inbar, Y. (1986) Peat and peat substitutes as growth media for container grown plants. En: Chen, Y. y Avnimelech, Y. eds. *The role of organic matter in modern agriculture*. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers.
- Richie, J.T. (1973) Influence of the soil water status and meteorological conditions on evaporation from a corn canopy. *Agronomy Journal*, 65, pp. 893-897.
- Rijtema, P. E. (1969). Soil moisture forecasting (No. 513, p. 18). ICW.
- Rosenberg, N.J., Blad, B.I. y Verma, S.B. (1983) *Microclimate. The Biological Environment*. 2ª ed. John Wilcy & Sons.
- Sakuratani, T. (1981) A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology*, 37, pp. 9-17.
- Salazar, L.J. & Thompson, K.R., 1996. Computerized irrigation scheduling in the San Luis Valley of Colorado. p 75-80. *Evapotranspiration and irrigation scheduling*. ASAE San Antonio, Texas, USA.
- Salazar, L., Hargreaves, G.H. y Stutler, R.K. (1987) *Irrigation Scheduling Manual*. Logan Utah. EE.UU. International Irrigation Center. Utah State University. Pp 223.
- Saxton, K.E. (1986) Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4), pp. 1031-1036.
- SCS (1972) *National Engineering Handbook, Hydrology*. EE.UU.: Section 4. U.S. Soil Conservation Service.
- SCS (1991) *Scheduling irrigation: a guide for improving irrigation water management through proper timing and amount of water application*. SCS-USDA and ARS-USDA.
- <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-estado/>

- Shani, U., Xue, S., Gordin-Katz, R. y Warrick, A.W. (1996) Soil-Limiting Flow from Subsurface Emitters. I: Pressure Measurements. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 122(5), pp. 291-295.
- Sherry, W.J. y Goldsberry, K.L. (1980) Carnation production responses to solar radiation transmitted through plastic greenhouse covers. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 105(4), pp. 579-582.
- Shuttleworth, W.J. (1993) Evaporation. En: Maidment, D.R. ed. *Handbook of Hidrology*. McGraw Hill.
- Shuttleworth, W.J. y Gurney, R.J. (1990) The theoretical relationships between foliage temperature and canopy resistance in sparse crops. 116, pp. 497-519.
- Shuttleworth, W.J. y Wallace, J.S. (1985) Evaporation from sparse crops-an energy combination theory. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111, pp. 839-855.
- Sifuentes, I.E., Ojeda, B.W., Guerrero, E.M., y Valdez, C.J. (1988) El uso de parcelas de validación como herramienta de apoyo en la transferencia del sistema de calendarización del riego en tiempo real (SPRITER) en el Distrito de riego. *VIII Congreso Nacional de Irrigación*. Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación. Comarca Lagunera.
- Sifuentes, I.E., Ruelas, I.J.R., Talamantes, C.I., Palacios, M.C.A. y López, V.B.E. (2013) Agro folleto: El papel de la nutrición vegetal en el rendimiento de los cultivos. UAS-ESAVF. 4ª Edición. Guasave, Sinaloa, México. Pp 18.
- Smith Allen, M.R. y Pereira, L. 1996. Revised FAO methodology for crop water requirements. *Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation scheduling*. San Antonio, Texas, EE.UU., 3-6 noviembre, 1996.
- Stanghellini, C., Kempkes, F.L.K., Knies P., (2003) Enhancing environmental quality in agricultural systems. *Acta Horticulturae*, 609, pp. 277-283.
- Stanghellini, C. (1998) Balance hídrico en invernaderos: su efecto sobre el microclima y las necesidades hídricas del cultivo. En: Pérez, P. y Cuadrado, G. eds. *Tecnología de invernaderos II. Curso superior de especialización*. España: Caja Rural de Almería.
- Subbaiah, R. y Rao, K.A. (1994) Root growth simulation model under specified environment. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 119, pp.898-904.
- Tarjuelo, M-B. J. M. (2005) *El riego por aspersion y su tecnología*. 3ª ed. S.A. MUNDI-PRENSA LIBROS.

- Thompson, A.L., Martin, D.L., Norman, J.M. y Howell, T.A. (1996) Scheduling effect on evapotranspiration with overhead and below canopy application. *Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation scheduling*. San Antonio, Texas, EE.UU., 3-6 noviembre, 1996. pp. 182-188.
- Thornthwaite, C.W. (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38, pp. 55-94.
- Tijerina, C.L. (1992) *Uso eficiente del agua en unidades de riego para el desarrollo rural*. Diplomado. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Annan, A.P. (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, 16, pp. 574-582.
- Tosso, J. y Ferreyra, R. (1988) II Programación a través de bandeja. *IPA La Platina* N° 46.
- Uchida-Frausto, H., Pieters, J.G. y Deltour, J.M. (2003) Modelling Greenhouse Temperature By Means Of Autoregressive Models. *Biosystem Engineering*, 84, pp. 147-157.
- Van Hoorn, J.W. y van Alphen, J.G. (1994) Salinity control. En: *Drainage principles and applications*. ILRI publication 16. Wageningen, Holanda : H.P. Ritzema.
- Waller, P. (2004) Microirrigación en invernaderos y sistemas de fertigación. *Curso Internacional de Invernaderos*. Universidad A. Chapingo. Tomo II. Chapingo, México.
- Ward, R.C. (1967) *Principles of hydrology*. New York, EE.UU.: McGraw-Hill.
- Warrick, A. W (2003), *Soil water dynamics*, Oxford University Press, USA.
- Whright, J.L. (1982) New evapotranspiration crop coefficients. *Journal of the Irrigation and Drainage Division of the ASCE*, 108, pp. 57-74.
- Wild, A. (1993) *Soils and the environment: an introduction*. Cambridge, Gran Bretaña: Cambridge University Press.
- Wright, J.L. (1996) Derivation of alfalfa and grass reference evapotranspiration. *Proceedings of the ASAE International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. San Antonio, Texas, EE.UU. 3-6 noviembre, 1996. pp. 133-140.
- Zazueta, F.S. (1992) *Microirrigación*. Guadalajara, México: ICFA International

*“Sed como la fuente que se derrama y no como el tanque
que siempre contiene la misma agua”*

Paulo Coelho

Anexo
Estaciones agrometeorológicas



ANEXO A

ESTACIONES AGROMETEOROLÓGICAS

Helene K. Unland Weiss, Waldo Ojeda Bustamante y Jorge Flores Velázquez

A.1 Introducción

El ambiente en el cual los cultivos se desarrollan no siempre es el deseable para obtener rendimientos máximos. Los agricultores siempre han buscado proteger los cultivos de las inclemencias del clima. El uso de cortinas rompevientos alrededor de una parcela es una de las técnicas más antiguas para modificar el microclima de un cultivo.

El estudio de los efectos meteorológicos en los cultivos es muy complejo debido a la interrelación de un gran número de factores. El grado de influencia de los factores depende en gran medida de la etapa fenológica del cultivo y del microclima imperante alrededor de la planta.

Tradicionalmente, las necesidades de riego de los cultivos se habían calculado con base en tablas de uso consuntivo obtenidas de promedios diarios meteorológicos, usualmente restringidos a la temperatura y humedad ambiental, provenientes de estaciones meteorológicas muchas veces ubicadas a decenas de kilómetros de distancia del sitio de interés. Por fortuna, los adelantos tecnológicos recientes en sensores y controles han promovido mejores sistemas para verificar en forma más precisa y casi continua el tiempo atmosférico, de vital importancia en varios procesos de interés agrícola como la evapotranspiración. Se ha propiciado el resurgimiento de ecuaciones más precisas, como las ecuaciones tipo Penman, para estimar los requerimientos hídricos de los cultivos, que ante la gran cantidad de datos meteorológicos que necesitan, permanecían olvidadas.

A.2 Redes de estaciones agrometeorológicas

En los últimos años se han establecido redes de estaciones para monitorear las variables meteorológicas en varias partes de las regiones agrícolas del mundo. Por ejemplo, la red CIMIS (California Irrigation Management Information System) consta de 85 estaciones climatológicas automatizadas operadas desde 1982 por la

Universidad de California. El acceso a la información está disponible vía telefónica en la computadora central del sistema CIMIS o vía Internet.

La información se procesa de la siguiente forma: a las 12 de la noche la computadora central se comunica con todas las estaciones de la red por medio de llamadas telefónicas para obtener la información meteorológica de las últimas 24 horas. Una vez que se ha colectado la información meteorológica, se revisa la calidad de los datos y se calcula la evapotranspiración de referencia (ET_o) en forma horaria y diaria usando una ecuación tipo Penman.

Existen otras redes como la red agrometeorológica AZMET (Arizona Meteorological Network) operada por la Universidad de Arizona o la red MESONET operada por la Universidad de Oklahoma que tiene características similares a la red CIMIS. En México, el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) instalaron una Red Agrometeorológica Nacional (RAN) conformada por 45 estaciones distribuidas en los principales distritos de riego del país (1997). El éxito de la operación de una estación agrometeorológica automatizada depende de su aplicación. Una estación puede ser una excelente herramienta para:

- Estimar las variables meteorológicas de interés agrícola
- Calendarizar el riego
- Pronosticar la aparición de plagas y enfermedades
- Enviar señales de condiciones meteorológicas adversas en detrimento de la eficiencia de aplicación de insumos agrícola
- Pronosticar y dar seguimiento en tiempo real a heladas
- Estimar la duración de las fases fenológicas usando el concepto de los días grado de crecimiento
- Generar mapas de riesgos de sanidad vegetal en los niveles espacial y temporal

Las estaciones por sí solas no resuelven los problemas, pero sí proporcionan una serie de datos que son de gran utilidad en la medida en que sean usadas por expertos en riego, agrometeorología, fitopatología y agronomía para la toma de decisiones relacionadas con su campo de especialización.

A.3 Descripción de una estación meteorológica

Las estaciones agroclimáticas automatizadas están equipadas con una serie de sensores conectados a un microprocesador (*datalogger*) que monitorea y almacena los valores de las variables meteorológicas a intervalos predefinidos de acuerdo con un programa residente en su memoria, y se ejecuta indefinidamente. Las estaciones cuentan con un sistema de telecomunicación por radio, teléfono o celular para enviar

los datos meteorológicos a una computadora que los procesa y calcula las demandas hídricas de los cultivos en forma casi continua en las parcelas del distrito de riego.

El juego de sensores de una estación agrometeorológica típica incluye:

- Piranómetro sensor para medir la radiación
- Psicrómetro sensor de humedad del aire
- Termómetro sensor de temperatura del aire
- Anemómetro para medir la velocidad del aire
- Veleta para medir la dirección del aire
- Pluviómetro para medir la lluvia
- Sensor de temperatura del suelo (opcional)

Los sensores electrónicos constan principalmente de dos componentes, un dispositivo que mide la variable de interés, y un transductor que convierte la variable medida en una cantidad eléctrica (voltaje, corriente, resistencia, frecuencia o amplitud). La **Figura A.1** muestra los componentes básicos de una estación meteorológica con fines de estimación de la evapotranspiración de referencia.

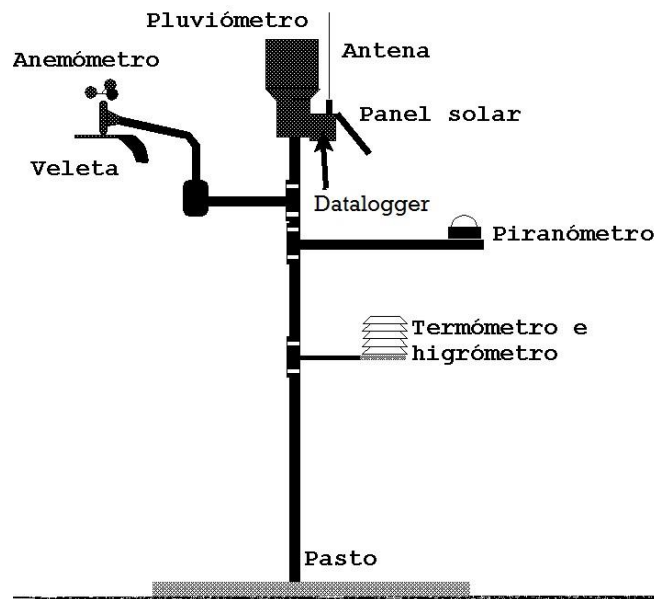


Figura A.1 Estación agrometeorológica automatizada

Las estaciones agrometeorológicas típicas instaladas como parte de la RAN deben tener la capacidad de medir los siguientes parámetros meteorológicos, que a su vez son

necesarios para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_o) usando el método de Penman-Monteith:

- Radiación solar (R_s)
- Temperatura del aire (T_a)
- Humedad relativa
- Velocidad y dirección del viento
- Precipitación

Para mejorar la precisión de los valores de ET_o calculados, se pueden añadir sensores de radiación neta (R_n), de humedad y temperatura del suelo en dos profundidades, y un sensor del flujo de calor en el suelo (G). Si la estación no cuenta con sensores de radiación neta y de flujo de calor en el suelo, estos valores se estiman usando las medidas de la radiación solar, la humedad relativa, y la temperatura del aire.

Por otro lado, es importante tomar en cuenta la variación espacial de la radiación neta, la temperatura y humedad del suelo, sobre todo si el área de influencia de la estación no es homogénea. Por ejemplo, si existe variación en el tipo de cultivo y la estructura del suelo (textura y tipo del suelo) se deben instalar los sensores que midan R_n , G y la humedad del suelo en lugares representativos del área de influencia. Este último proceso implica una fuerte inversión en la compra de sensores adicionales, además de que es bastante difícil a mantener un sensor de radiación neta funcionando adecuadamente por largos periodos (Snyder *et al.*, 1985).

Para estimar la ET_o normalmente se usa solamente un sensor de radiación solar en combinación con los otros sensores estándares de la estación. En áreas con poca nubosidad y presión de vapor relativamente constante, para las horas de luz diaria la radiación neta R_n se estima con bastante precisión usando solamente R_s (Fritschen, 1967), debido a que el balance de radiación terrestre es insignificante en relación con el balance de radiación solar, y casi no cambia con el tiempo. En regiones con nubosidad se deben usar métodos más complicados, incluyendo mediciones de R_s , y T_a , el cálculo de la presión de vapor actual e , así como estimaciones del albedo de la superficie y de la nubosidad (Dong *et al.*, 1992).

Las estimaciones de la ET_o se verifican con mediciones representativas de la humedad del suelo. Estas mediciones del suelo se efectúan mediante sensores portátiles del tipo TDR (Time Domain Reflectometer), que se pueden mover fácilmente de un lugar al otro, y así alcanzar una buena cobertura del área de influencia de cada estación. Normalmente es suficiente que, por cada red regional, una de las estaciones esté equipada con un sensor de presión atmosférica, ya que dicha presión no varía mucho y puede estimarse para las otras estaciones (tomando en cuenta la elevación sobre el nivel del mar).

Finalmente, si el usuario quiere usar una estación para fines de pronóstico de enfermedades y plagas específicas para ciertos cultivos, se deben instalar sensores adicionales de temperatura del aire, humedad relativa y humedad en las hojas. Nótese que no es posible utilizar el mismo sensor de temperatura del aire y humedad relativa para el cálculo de ET_0 y para el pronóstico de plagas y enfermedades, porque para calcular la ET_0 se requiere una altura de referencia por arriba de la superficie promedio del cultivo (definido en la sección intitulada “Alturas estándar de los sensores”) mientras que el pronóstico de plagas y enfermedades necesita medidas de la temperatura del aire, humedad relativa y humedad en las hojas dentro del follaje del cultivo, lo cual implica que la altura de estos sensores debe cambiar periódicamente a medida que crecen las plantas.

A.4 Estándares para alturas y exposición de los sensores meteorológicos

A.4.1 Estándares internacionales

Los datos recolectados de las estaciones climatológicas automatizadas (ECA) tienen una multitud de aplicaciones. Con frecuencia las aplicaciones particulares pueden tener requerimientos específicos, los cuales imponen la altura o la exposición de los sensores. Por lo tanto, no se puede definir un estándar con aplicación universal para las alturas de los sensores y las prácticas de instalación. La **Tabla A.1** muestra las alturas estándares de los siete sensores meteorológicos más comunes en las ECA, que fueron publicados por cuatro organismos nacionales e internacionales, y la **Tabla A.2** el uso de cinco de las grandes redes nacionales de estaciones automatizadas en los EUA (Meyer y Hubbard, 1992).

Tabla A.1 Alturas estándares de instalación de sensores usados por cuatro organismos internacionales y nacionales, y en cinco de las “grandes” redes nacionales de estaciones automatizadas en los EUA

Estándares nacionales/internacionales para alturas de instalación de sensores meteorológicos						
Organismo	Temperatura del aire	Temperatura del suelo	Humedad relativa	Velocidad/dirección del viento	Precipitación	Radiación solar
WMO ⁶	125-200 cm	5, 10, 20, 50, 100 cm	125-200 cm	1 000 cm	30 cm ⁷	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor

⁶ Organismo Meteorológico Mundial (World Meteorological Organization, 1969)

⁷ hacia mas arriba donde condiciones no permiten instalación en esta altura

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo A. Estaciones agrometeorológicas
--	--

Estándares nacionales/internacionales para alturas de instalación de sensores meteorológicos						
FAO ⁸	150-200 cm	5, 10, 20, 50, 100 cm	150 cm	200 cm	30 cm ⁹	200 cm
UKMO ¹⁰	125-150 cm	?	125-150 cm	1 000 cm	30 cm ²	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
NWS/NOAA ¹¹	150 cm	10 cm	150 cm	900-1 000 cm	lo más cerca posible a la superficie	

Nota: También incluye las alturas de referencia recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) para ECA usadas para el monitoreo general del clima y del medio ambiente y en agrometeorología (traducción de la versión original en inglés. Según Meyer y Hubbard (1992), con datos adicionales para la FAO de Doorenbos (1976).

Tabla A.2 Alturas de instalación de sensores meteorológicos para grandes redes seleccionadas de estaciones climatológicas automatizadas (ECA) en los EUA

Red de ECA	Temperatura del aire	Temperatura del suelo	Humedad relativa	Velocidad/dirección del viento	Precipitación	Radiación solar
RAWS ¹²	200 cm	10-50 cm	200 cm	600 cm	150-200 cm	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
MESONET ¹³	150 cm	10 cm	150 cm	1000 cm	lo más cerca posible a la superficie	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
AWDN ¹⁴	150 cm	10 cm	150 cm	300 cm	100 cm	200 cm o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
ICN ¹⁵	200 cm	10, 20 cm	200 cm	1 000 cm	100 cm	200 cm o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor

⁸ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (United Nations Food and Agriculture Organization; Doorenbos, 1976)

⁹ Niveles más altos aceptables en regiones con nieve significativa.

¹⁰ Oficina Meteorológica del Reino Unido (United Kingdom Meteorological Office, 1956)

¹¹ Servicio Meteorológico Nacional/Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (National Weather Service/National Oceanic and Atmospheric Administration, 1987)

¹² Estación Meteorológica Automatizada Remota (Remote Automated Weather Station; Finklin y Fischer, 1990)

¹³ Red de Meso-Escala (Mesoscale Network; Crawford, 1991)

¹⁴ Red Automatizada de Datos Meteorológicos (Automated Weather Data Network; Hubbard et al., 1983)

¹⁵ Red Climatológica de Illinois (Illinois Climate Network; Hollinger y Reinke, 1990)

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo A. Estaciones agrometeorológicas
--	--

Red de ECA	Temperatura del aire	Temperatura del suelo	Humedad relativa	Velocidad/dirección del viento	Precipitación	Radiación solar
CIMIS16	150 cm	15 cm	150 cm	200 cm	100 cm	200 cm o libre de cualquier obstrucción arriba del sensor

Tabla A.3 Alturas de instalación de sensores meteorológicos recomendadas por la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC)

Organismo	Temperatura del aire	Temperatura del suelo	Humedad relativa	Velocidad/dirección del viento	Precipitación	Radiación solar
AASC	150 cm	10 cm	150 cm	300 cm	100 cm ⁴	libre de cualquier obstrucción arriba del sensor

Se puede apreciar fácilmente que las alturas de instalación de los sensores varían mucho, dependiendo del objetivo de la red de ECA instalada. La diferencia principal entre las recomendaciones de los diferentes organismos es la altura del anemómetro y del pluviómetro. La recomendación de la FAO para la altura del anemómetro es resultado de su uso frecuente en el algoritmo de Penman (1948) para la estimación de la evaporación potencial E_p , la cual requiere mediciones de la velocidad del viento promedio diaria a una altura de 2 metros.

La recomendación de la Asociación Americana de Climatólogos Estatales (AASC) en los EUA para la altura del anemómetro es de 3 metros; sin embargo, no tiene una precedencia histórica (Snyder et al, 1996). Según la AASC, la altura de 3 metros representa “un balance razonable entre el gasto de construir una torre alta y el problema de la exposición que se incrementa a alturas más bajas” (AASC, 1985). Sin embargo, el estándar de exposición para anemómetros puede tener poca influencia en aplicaciones como la ecuación de Penman. En 1990, Bausch descubrió que la velocidad del viento (U) medida en alturas de 3 y 2 metros era diferente en aproximadamente 9 %, y que se pueden ajustar las medidas de U en 3 metros al equivalente para 2 metros usando

¹⁶ Sistema de Manejo de Riego e Información de California (California Irrigation Management and Information System, Snyder, en comunicación personal con los autores originales de la Tabla, 1991)

la función estándar de potencia con un error de 5 por ciento o menos (Snyder et al., 1996).

La altura del pluviómetro afecta el volumen total de precipitación (PPT) medido, ya que los pluviómetros instalados a mayores alturas estarán expuestos a velocidades del viento más altas, produciendo una deformación más grande del flujo del aire cerca del orificio. La forma del terreno (plano o irregular) y las características del paisaje también afectan el flujo del aire. La altura más recomendada por los organismos internacionales y nacionales es de 30 cm (WMO, UKMO, FAO, incluyendo la NWS/NOAA que recomienda instalar el pluviómetro lo más cerca posible a la superficie posible). De cualquier modo, el estándar más usado en la práctica es de 100 cm de altura (usado en las redes de AWDN, ICN, CIMIS entre otros; ver **Tabla 1** y **Figura 1**). Esta altura minimiza los problemas de chapoteo de precipitación líquida de las áreas cercanas al pluviómetro; por otro lado, en zonas más frías, los efectos de la acumulación de nieve pueden enmascarar la medición real. Por esta razón la AASC recomienda 100 cm como altura estándar (1985). WMO y UKMO permiten modificaciones de su altura estándar de 30 cm para instalaciones donde esta altura puede causar problemas de salpicaduras, mientras la FAO únicamente hace excepciones para evitar ventiscas (acumulaciones de nieve).

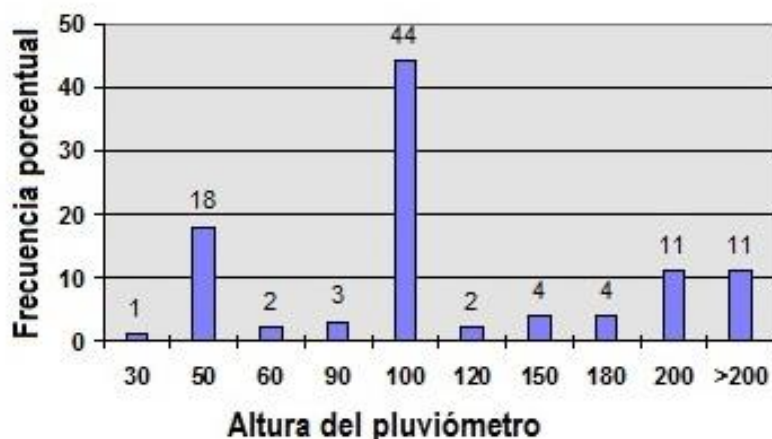


Figura A.2 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de pluviómetros en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)

En todo caso, no es probable que las diferencias en alturas recomendadas para el pluviómetro puedan causar diferencias mayores al 10 % en la precipitación medida, por lo tanto, el criterio más importante puede ser que todos los pluviómetros en una red de

estaciones tengan la misma altura. Los resultados del estudio de Bausch (1990) muestran que la temperatura del aire (T_a) medida en alturas de 1.5 y 2.0 metros puede presentar una variación significativa, de manera que las T_a máximas y mínimas diarias en los dos niveles difirieron 1.8 y 2.4 °C, respectivamente. Diferencias en este orden de magnitud son significativas para fines climatológicos, así como para ciertos fines agrícolas, como modelos de heladas y días grado de crecimiento (DGC). Por lo tanto, se debe tomar en cuenta el objetivo de la estación para decidir la altura del termómetro (Snyder *et al.*, 1996).

A.4.2 Estándares para alturas y exposición de sensores en las EAA de la Red Agroclimatológica Nacional

Para definir los estándares de las alturas y exposiciones de sensores que se recomienda utilizar en todas las redes de EAA en la república mexicana y específicamente en las zonas agrícolas más importantes se deben tomar en cuenta los siguientes criterios:

1. La aplicación más amplia posible de la misma serie de estándares en las zonas agrícolas de otros países, para facilitar comparaciones sencillas entre los datos agroclimatológicos generados en las diferentes regiones.
2. Alturas convenientes para facilitar el mantenimiento frecuente de los sensores; sin embargo, mantener la posibilidad del uso de las medidas para el cálculo de variables derivadas como la evapotranspiración de referencia (ET_o).

La serie de estándares definida por la AASC (1985) cumple con mayor fidelidad los criterios anteriores y por lo tanto es la más recomendable, con algunas modificaciones, para el estándar establecido por la RAN. La magnitud de muchas variables meteorológicas se relaciona con la altura de medición de estas mismas variables. Por esta razón, la AASC recomienda una serie de estándares para aplicaciones donde no hay requerimientos específicos de alturas y exposiciones de sensores, “para proveer alguna medida de uniformidad entre las diferentes redes en proceso de instalación” (1985). Estos estándares son dirigidos a las necesidades de monitoreo rutinario del clima, la agrometeorología y aplicaciones relacionadas.

La serie de estándares de la AASC y los de la RAN se diferencian en que se permite usar una altura alternativa para el pluviómetro y los sensores de temperatura del aire y humedad relativa, que estaban normalmente instalados a una altura de 3 metros en la mayoría de las estaciones de la RAN ya existentes, con la finalidad de facilitar la continuidad de las medidas históricas tomadas en estas estaciones, especialmente en aquellas donde no se puede hacer un ajuste fácil en la altura de los sensores. En las secciones siguientes se explica detalladamente la serie de estándares de la RAN.

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo A. Estaciones agrometeorológicas
--	--

Tabla A.4 Alturas estándares de instalación de sensores usadas por la RAN

Sensor	Altura estándar	Comentario
Termómetro ambiental y Hygrómetro	1.5 m	Altura de 3m aceptable en estaciones ya establecidas para facilitar la continuidad de los datos históricos
Piranómetro	En la parte más alta de la estación, evitando sombras	Libre de cualquier obstrucción arriba del sensor
Anemómetro y veleta	3 m	Altura de 2 m aceptable
Pluviómetro	1 m	Altura de 3m aceptable en estaciones ya establecidas para facilitar la continuidad de los datos históricos

A.4.2.1 Velocidad y dirección del viento

Altura de los sensores

Normalmente, los sensores de velocidad y dirección del viento se instalan juntos. La altura estándar del anemómetro y de la veleta es de 3 ± 0.1 metros.

Exposición de los sensores

Los sensores se deben ubicar lo más alejado posible de cualquier objeto. Se recomienda que la distancia al objeto más cercano sea de al menos diez veces la altura de dicho objeto.

Comentarios

De acuerdo con un estudio realizado por Meyer y Hubbard (1992), la altura de 3 metros se utilizó en 31 % de las ECA ubicadas en las redes de EUA, mientras que las alturas de 2 y 10 metros se usaron en 25 y 31 % de las estaciones, respectivamente (**Figura A.3**). En el caso de la RAN no se recomiendan alturas mayores a los 3 metros para los sensores del viento, porque dificultarían su mantenimiento. Además, no se recomiendan alturas más bajas (por ejemplo, los 2 metros recomendados por la FAO), porque la aplicación más común de los datos derivados de estaciones de la RAN es el cálculo de la ETo basado en la ecuación de Penman-Monteith, la cual es insensible a errores en la velocidad del viento.

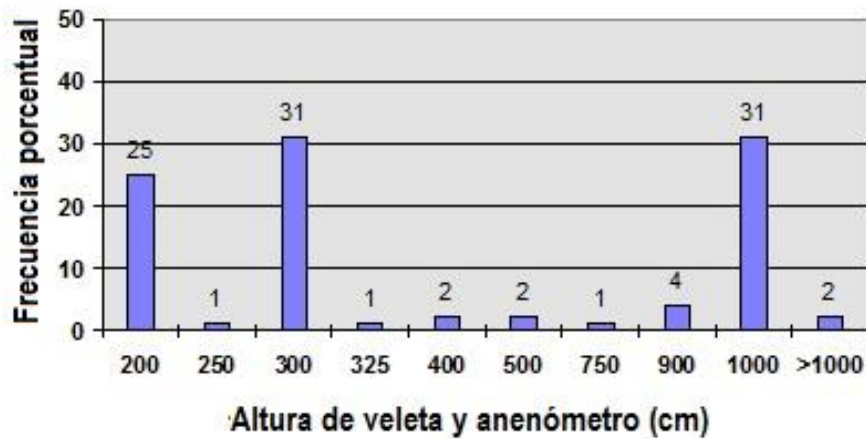


Figura A.3 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de anemómetros y veletas en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)

A.4.2.2 Temperatura y humedad relativa

Altura de los sensores

La humedad relativa es una función de la temperatura del aire, por lo tanto, estos sensores deben estar colocados a una altura estándar de 1.5 ± 0.1 m. Se puede usar la altura opcional de $3 \text{ m} \pm 0.1$ m para estaciones de redes ya existentes.

Exposición de los sensores

Los sensores deben ser protegidos de la radiación solar directa, así como de la radiación de onda larga emitida por la tierra, edificios y otros objetos. La protección debe permitir el flujo libre del aire por encima del sensor.

Comentarios

Los sensores de la temperatura del aire y de la humedad relativa deben estar instalados juntos para facilitar las medidas simultáneas requeridas para el cálculo de la presión de vapor actual y de la temperatura del punto de rocío, parámetros importantes para la ETo. Opcionalmente, se permite dejar los sensores de temperatura del aire y humedad relativa ya instaladas a una altura de 3 metros, para facilitar la continuidad de las medidas históricas tomadas en estas estaciones, especialmente donde el diseño de la estación no permite un ajuste fácil en la altura de los sensores.

Entre todas las estaciones instaladas en las redes de EUA, en 55 % se instalaron los sensores a una altura de 1.5 m, mientras que en el 28% se instalaron a 2.0 m (**Figura A.4**). Los sensores instalados a alturas mayores de 5 metros se usan en proyectos con objetivos específicos o se encuentran en estaciones ubicadas en terrenos accidentados o con vegetación alta (árboles).

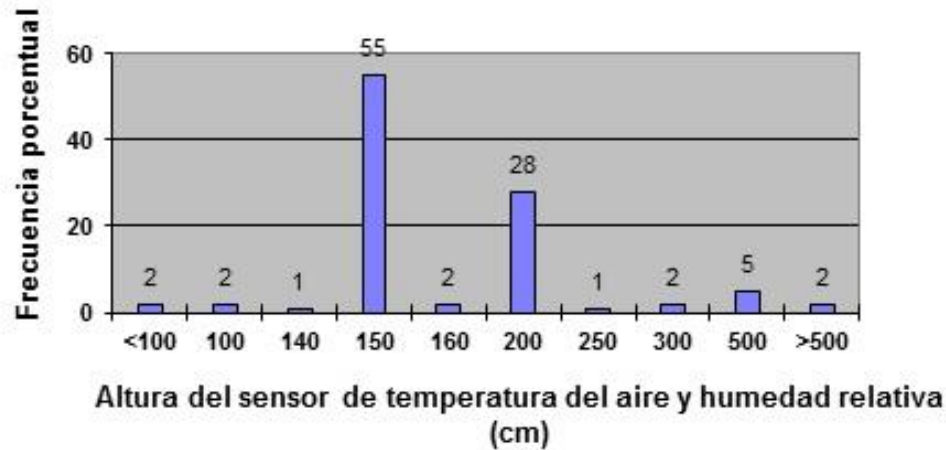


Figura A.4 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación de los sensores de temperatura del aire y humedad relativa en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)

A.4.2.3 Precipitación

Altura del sensor

La altura estándar del pluviómetro es de 1.0 ± 0.1 m. La altura opcional de $3 \text{ m} \pm 0.1$ m se puede usar en estaciones en redes ya existentes.

Exposición del sensor

La distancia entre el pluviómetro y cualquier obstrucción debe ser cuatro veces la altura del objeto. El orificio del sensor debe estar instalado en una posición horizontal.

Comentarios

Casi todos los pluviómetros instalados en las redes de EUA se encuentran a alturas de 2 metros o menos. Las alturas más comunes son 0.5, 1.0, y 2.0 metros, que representan 18, 44 y 11 %, respectivamente, de las estaciones que miden la

precipitación (**Figura A.2**). Los pluviómetros instalados a alturas de más de 2 metros usualmente se encuentran en terreno especial o en clima frío.

Opcionalmente, se permite dejar los sensores de precipitación ya instalados en una altura de 3 metros, para facilitar la continuidad de las medidas históricas tomadas en estas estaciones, especialmente donde el diseño de la estación no permite un ajuste fácil en la altura de los sensores.

A.4.2.4 Radiación Solar

Altura del sensor

El piranómetro se debe instalar a cualquier altura, especialmente donde no se encuentre ninguna obstrucción que pueda dar sombra al sensor.

Exposición del sensor

Según la recomendación de la AASC (1985), cualquier obstáculo debe estar a más de 10° arriba del horizonte con respecto al sensor (Snyder *et al.*, 1996).

Comentarios

En la mayoría de las instalaciones (72 %), el piranómetro se encuentra a una altura de 2 metros. En 88 % de las estaciones equipadas con sensores de radiación solar, la altura varía de 2 a 3 metros (**Figura A.5**).

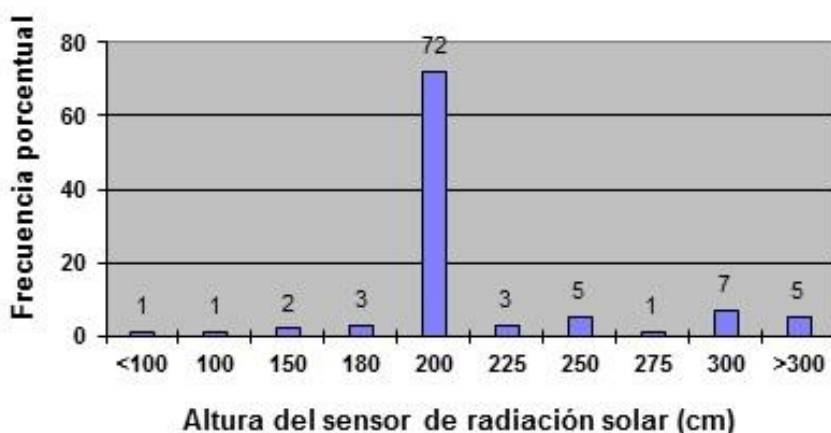


Figura A.5 Distribución discreta de la frecuencia de alturas de instalación del sensor de radiación solar en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)

A.4.2.5 Temperatura del suelo (sensor opcional)

Profundidad del sensor

La profundidad estándar para medir la temperatura del suelo es de 10 ± 1 cm debajo de la superficie del suelo.

Exposición del sensor

Se debe mantener una superficie plana y no perturbada de un metro cuadrado arriba del sensor. Se debe dejar esta área en un estado consistente con el tipo de superficie de interés (normalmente una superficie desnuda o con cubierta de pasto).

Comentarios

El estándar de 10 cm de profundidad es consistente con las recomendaciones de la AASC y NWS/NOAA. Para estudios específicos se pueden seguir las profundidades adicionales recomendadas por la FAO y la WMO (**Tabla A.1, Figura A.6**).

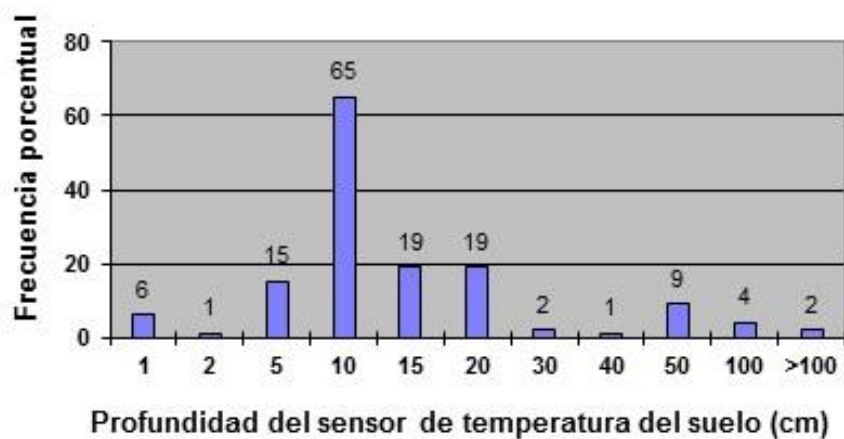


Figura A.6 Distribución discreta de la frecuencia de profundidades de instalación del sensor de temperatura del suelo en estaciones climatológicas automatizadas en los EUA y Canadá (traducción de la versión original en inglés de Meyer y Hubbard, 1992)

A.4.2.6 Humedad del suelo (sensor opcional)

Profundidad del sensor

La profundidad recomendada para el sensor es de 10 ± 1 cm.

Exposición del sensor

En las instalaciones fijas se debe mantener una superficie plana y no perturbada de un metro cuadrado arriba del sensor. Se debe dejar esta área en un estado consistente con el tipo de superficie de interés (normalmente una superficie desnuda o con cubierta de pasto). Si el sensor es portátil, se deben seleccionar los lugares más representativos para la región e insertar el sensor en el suelo con un mínimo de perturbación para que mantenga contacto con el suelo sin crear baches.

Comentarios

La profundidad puede variar de acuerdo con el tipo del sensor usado, dependiendo de si mide en un solo punto (bloque de yeso) o si integra a través de la longitud del sensor (TDR).

A.4.3 Criterios de precisión

La precisión requerida para medir variables meteorológicas varía dependiendo del objetivo específico. En la mayoría de los casos, la precisión declarada debe asegurar la compatibilidad de los datos en tiempo y espacio. La **Tabla A.5** muestra las recomendaciones de la comisión técnica para sistemas básicos de la WMO respecto a la precisión requerida por los sensores en medidas superficiales tomadas para fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas (Jarraud, 2008).

En las estaciones de la RAN se adoptan los criterios establecidos por la WMO para las ECA como criterios mínimos, pero se reconoce que sería preferible alcanzar los criterios establecidos con fines de agrometeorología, siempre que sea posible y cuando no haya criterios definidos para las ECA (como para la radiación solar y la presión atmosférica).

Tabla A.5 Resumen de precisiones requeridas para medidas superficiales con fines de agrometeorología, y para estaciones climatológicas automatizadas

Precisión requerida		
Sensor	a) Agrometeorología	b) ECA
Presión atmosférica	---	± 0.1 kPa
Velocidad del viento	± 10 % para velocidades >1 m s ⁻¹	± 2 m s ⁻¹ para velocidades <20 m/s ⁻¹ ; ± 10 % para velocidades >20 m s ⁻¹
Dirección del viento	± 10 °	± 20 °

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo A. Estaciones agrometeorológicas
--	--

Precisión requerida		
Sensor	a) Agrometeorología	b) ECA
Temperatura del aire	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Temperatura del punto de rocío	$\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para déficit de temp. rocío $< 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$; $\pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ para déficit de temp. rocío $> 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Humedad relativa	$\pm 1 \%$	suficiente para resultar en las precisiones requeridas para la presión de vapor
Presión de vapor	equivalente a $\pm 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura del punto de rocío	equivalente a ± 1 o $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura del punto de rocío para déficit de temp. rocío de < 4 o $> 4 \text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente
Radiación solar	$\pm 1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	
Precipitación acumulada (ppt)	0.1 mm para ppt ≤ 10 mm; 2% para ppt > 10 mm	± 0.5 mm para ppt ≤ 5 mm; $\pm 10\%$ para ppt > 5 mm

Nota: Adaptado y traducido de la versión original en inglés de partes seleccionadas de las Tablas del anexo 1.B en Jarraud, 2008.

A.4.4 Criterios de ubicación

A.4.4.1 Representatividad espacial de las mediciones de las ECA

Las mediciones de las ECA se utilizan para estimar los flujos de energía superficiales, así como para determinar las condiciones de las coberturas vegetales, generalmente sobre superficies más extensas. La amplitud de la escala de representatividad de las mediciones depende de varios factores, entre los que se pueden mencionar la uniformidad del tipo de superficie, la topografía, la humedad del suelo, y la variabilidad de la misma. Por ejemplo, se ha observado que la radiación solar es más uniforme espacialmente que la precipitación.

Una herramienta para analizar la uniformidad de las superficies a gran escala son las imágenes de satélite, sin embargo, se requiere verificar los datos mediante una comparación con las mediciones independientes efectuadas a partir de las ECA. A escala local, la influencia de las superficies vientos arriba sobre la temperatura y humedad del aire determina directamente el área representada por tales mediciones. La superficie de influencia vientos arriba depende principalmente de la altura de la medición, de la rugosidad de la superficie y de la estabilidad atmosférica. Dicha área de influencia es

muy difícil de estimar, aun cuando la superficie local sea razonablemente uniforme (Tanner, 1990). Los trabajos de Leclerc y Thurtell (1990), de Schuepp *et al.* (1990) y más recientemente, de Desjardins *et al.* (1992), proporcionan comparaciones útiles entre la amplitud y la importancia relativa de las superficies vientos arriba en las mediciones de flujos a diferentes alturas vientos abajo.

La **Tabla A.6** muestra la huella de la superficie vientos arriba que contribuye al 50 y el 80 % del flujo, a diferentes alturas de medición y a diferentes factores de rugosidad, bajo una estabilidad atmosférica neutral. Este trabajo muestra que la relación frecuentemente utilizada de la distancia de influencia vientos arriba, a una altura de medición de 100 a 1, puede ser errónea en superficies planas o en condiciones atmosféricas estables. El área de influencia es mucho mayor durante las inversiones nocturnas estables que durante las condiciones inestables diurnas. Recíprocamente, la reducción del efecto sobre superficies rugosas indica que, para parcelas boscosas, es posible obtener una representatividad aceptable en mediciones, con una relación inferior de 100 a 1 (Tanner, 1990).

Tabla A.6 Distancia de influencia vientos arriba (m) que contribuye al 50 o el 80 % del flujo para diferentes alturas de medición (m) y factores de rugosidad z_0 (m) bajo condiciones de estabilidad neutral

Altura (m)	Distancia de influencia vientos arriba (m) para 50 % del flujo			Distancia de influencia vientos arriba (m) para 80 % del flujo		
	$z_0=0.006$	$z_0=0.06$	$z_0=0.65$	$z_0=0.006$	$z_0=0.06$	$z_0=0.65$
3	95	50	-	330	140	-
9	400	110	-	1135	715	-
20	800	550	215	2470	1590	680

Nota: Los factores de rugosidad son 0.13 veces la altura de la cubierta vegetal (Leclerc y Thurtell, 1990)

A.4.4.2 Recomendaciones para la ubicación de ECA

La representatividad de los datos provenientes de una estación meteorológica ha sido estudiada por Allen *et al.* (1983) que encontraron que la temperatura del aire en áreas irrigadas puede estar entre 2 °C y 6 °C abajo de las encontradas en parcelas no cultivadas. Se deben seguir diferentes recomendaciones en la localización de las estaciones para calendarizar el riego:

- Localizar la estación dentro de una zona de riego.
- Evitar obstrucciones que restrinjan el movimiento natural del viento en un radio de 100 m.

- Localizarla en una zona que tenga la menor variación en la altura y tipo de cultivos alrededor de la estación (poca rotación de cultivos).
- Localizarla a una distancia mayor de 200 m de corrientes de agua y a 1 000 m de grandes cuerpos de agua superficiales.
- Evitar la aplicación de agroquímicos cerca de los sensores ya que se pueden degradar y reducir su vida útil.
- Mantener una cobertura vegetal alrededor de la estación para reproducir las condiciones del cultivo de referencia que se quiere estimar. La **Figura A.7** presenta una estación meteorológica con una cobertura vegetal permanente.



Figura A.7 Estación meteorológica en una zona de riego

Tomando en cuenta los problemas de derivar exactamente la superficie vientos arriba, que debe considerarse como la fuente de las mediciones tomadas en los sensores de una estación, es bastante difícil definir los criterios necesarios para ubicar las ECA en el campo en la posición más representativa para las condiciones locales. La altura estándar máxima recomendada para las estaciones de la RAN es de 3 metros (sensores del viento).

Por lo tanto, para una altura de 3 metros, con una superficie de baja rugosidad ($z_0 = 0.006$) y condiciones atmosféricas estables (como las nocturnas normales), la distancia de influencia vientos arriba para el 80 % del flujo es de 330 m (Tabla 3). Es decir, la estación debe estar instalada en un lugar donde no se encuentre ningún obstáculo, especialmente en la dirección de los vientos prevalecientes, por lo menos de

350 a 400 m de distancia (tomando en cuenta que el 20 % de los flujos se origina a una distancia mayor de 330 m).

En la práctica casi nunca se encuentra este lugar ideal, aunque se deben satisfacer los otros requisitos descritos en esta sección. Afortunadamente, la superficie de la cubierta vegetal en la dirección vientos arriba de la estación suele presentar una rugosidad mayor, y durante el día, cuando la evapotranspiración es máxima, la atmósfera es inestable por lo general. En la mayoría de los casos, para calcular la ET_0 se espera que será suficiente una superficie vientos arriba ininterrumpida más pequeña.

En resumen, se recomienda ubicar la estación en una superficie plana y representativa de la agricultura local (Newman *et al.*, 1959; Doorenbos, 1976), con cubierta de pasto o de alfalfa corto y bien regado, con una extensión de al menos 10 x 10 metros, pero de preferencia de 50 x 50 m (Doorenbos, 1976). Se deben evitar lugares bajos y obstáculos tales como edificios, árboles o maquinaria, porque pueden dar sombra a los sensores e interrumpir el flujo libre del viento.

La estación se debe ubicar a una distancia de por lo menos siete a diez veces la altura de cualquier obstáculo grande, y de dos a tres veces para obstáculos menores, como arbustos (Newman *et al.*, 1959). La superficie vientos arriba deberá ser cultivada durante la temporada de crecimiento, de preferencia con un cultivo de cobertura completa y altura corta, como pasto o alfalfa. De cualquier modo, se debe considerar el cambio en las propiedades de la superficie vientos arriba con el ciclo del cultivo, desde el crecimiento hasta la cosecha, además de la rotación de los cultivos (Brown *et al.*, 1990).

La estación no se debe ubicar cerca de cultivos con gran variabilidad de altura, tales como el maíz y el sorgo. Tampoco se recomiendan sitios con niveles altos de radiación electromagnética, por ejemplo, torres de microondas, de ondas de radio, de televisión o de alto voltaje, porque pueden afectar el funcionamiento de los sensores y los otros instrumentos electrónicos (Snyder *et al.* 1996). Finalmente, se debe instalar la estación lejos de carreteras, debido a que éstas pueden causar cambios en el microclima y generar depósitos excesivos de polvo en los sensores. Por otro lado, es necesario que la estación se ubique en lugares con baja probabilidad de vandalismo, o donde no pueda ser dañada por animales. Lo anterior se puede prevenir si se instala una protección alrededor la estación, con la condición de que no interfiera con el flujo libre del viento. De ser posible, se recomienda la contratación de vigilancia continua.

A.4.5 Mantenimiento de las ECA

Para que el sistema de medición funcione de manera óptima, se debe definir un plan de mantenimiento de las ECA. De esta manera se previene el deterioro de los sensores y

de los otros equipos instalados en el campo, y se mantiene la precisión de los sensores y la calidad alta de los datos recolectados en las ECA. En su estudio de 1992, Meyer y Hubbard muestran que la mayoría de los operadores de ECA en EUA dan mantenimiento a sus estaciones de manera regular.

Los intervalos de mantenimiento más frecuentes son semanales y mensuales (**Figura A.8**). Muchos otros operadores dan mantenimiento todos los días, o de manera quincenal, bimestral, trimestral o semestral. Usualmente, en las redes con pocas estaciones se programa un mantenimiento con mayor frecuencia, aunque hay casos comunes de operadores con tres o menos estaciones que no les dan mantenimiento más de una o dos veces al año. Las siguientes secciones explican en detalle las recomendaciones de mantenimiento no-técnico y técnico de la RAN.

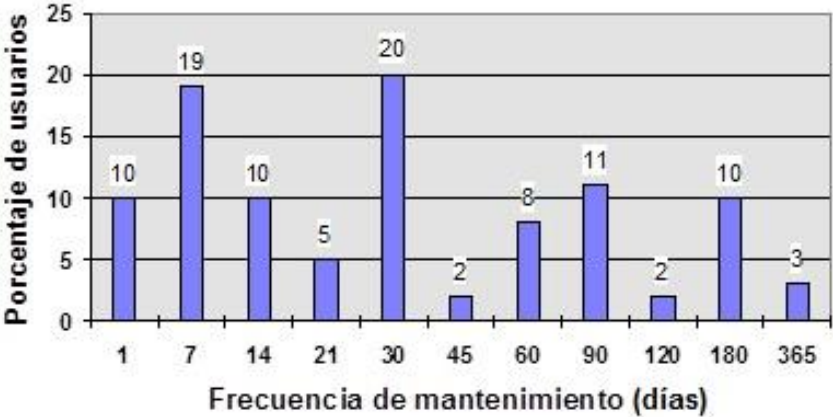


Figura A.8 Distribución discreta de la frecuencia de mantenimiento de redes de las ECA

A.4.5.1 Recomendaciones de mantenimiento no-técnico

Se recomienda revisar y limpiar bien todos los sensores y otras partes de la estación en intervalos que van desde semanas hasta cada tres meses; el intervalo exacto depende en las condiciones locales, y puede variar con el tiempo. Por ejemplo, durante la temporada de cosecha se puede acumular más polvo en los sensores y en el panel solar. El operador debe ajustar su plan de mantenimiento de acuerdo con las condiciones actuales y esperadas para las semanas siguientes.

Normalmente, cuando se instala una estación nueva, el operador debe empezar con intervalos de mantenimiento de cada dos semanas. Si se encuentra demasiado polvo en los sensores después de dos semanas, debe acortar el periodo a una semana. Por otro lado, si no se encuentra mucho polvo en los sensores cuando se da el

mantenimiento a la estación, se puede alargar el intervalo hasta un mes. No se puede definir un estándar que aplique para todas las redes del país, pero se pueden seguir las recomendaciones anteriores. En cada visita de mantenimiento no-técnico, se deben revisar los siguientes sensores y partes de la estación:

- Limpiar la protección de radiación y el filtro del sensor de temperatura y humedad relativa
- Nivelar y limpiar el piranómetro
- Nivelar y limpiar el orificio y las cucharillas del pluviómetro
- Alinear verticalmente los sensores del viento
- Limpiar la caja del datalogger; revisar el desecante en la caja y recargar si es necesario
- Limpiar el área del suelo arriba del sensor de temperatura del suelo (si está instalado); remover la basura o vegetación alta
- Revisar que los cables y alambres no estén dañados o cortados
- Revisar que los cables expuestos a la intemperie no estén degradados por la luz UV
- Cortar el pasto y vegetación tanto abajo como alrededor de la estación

A.4.5.2 Recomendaciones de mantenimiento técnico

Se debe dar mantenimiento técnico preventivo con el objeto de reparar o reemplazar los sensores periódicamente para evitar fallas. El periodo de mantenimiento técnico preventivo varía con el tipo de sensor, como se explica en la **Tabla A.7**, y consiste en cambiar los sensores por sensores nuevos o sensores de respaldo ya calibrados o reparados. Este tipo de mantenimiento técnico requiere de especialistas bien capacitados, por lo que se recomienda establecer un laboratorio de calibración y reparación para toda la RAN que cuente con un inventario de sensores calibrados por su propio personal técnico. Con este plan se pueden minimizar las fallas de sensores y el mantenimiento de emergencia resultante, con sus altos costos.

Tabla A.7 Plan de mantenimiento técnico para las ECA de la RAN

Sensor	Periodo de mantenimiento técnico
Temperatura del aire	Cada 1-2 años
Humedad relativa	Cada 6 meses - 1 año
Piranómetro	Cada año
Anemómetro	Cada año

Sensor	Periodo de mantenimiento técnico
Veleta del viento	Cada 2 años
Pluviómetro	Cada año
Temperatura del suelo	Cada 2 años
Cables expuestos a la intemperie	Cada 5-7 años
Datalogger	Cada 5-10 años

A.4.5.3 Archivos y reportes de mantenimiento de sensores

En cada estación se debe establecer un archivo de reportes que incluyan las fechas y el tipo de mantenimiento efectuado. Este archivo es muy importante para validar la calidad de los datos climatológicos recolectados en las ECA, y para establecer el plan de mantenimiento y calibración de los sensores para el futuro.

A.5 Referencias

- American Association of State Climatologists, (1985) Standards for instrumentation at automated stations. U.S. Dept. of Commerce, National Climatic Data Center, Asheville, North Carolina. *The State Climatologist*, 9(4), 53 pp.
- Bausch, W.C. (1990) Sensor height effect on calculated reference evapotranspiration. *Transactions of the ASAE*, 33(3), pp. 791-798.
- Bonhomme, R. (2000) "Bases and limits to using 'degree.day' units", *European Journal of Agronomy*, 12, pp. 1-10.
- Brown, P.W., Owen-Joyce, S.J., Daughtry, C.S.T. y Kustas, W.P. (1990) Effect of underlying surface on ground-based environmental data collected in arid region. Poster: *ASA Annual Meeting*. 21-26 Oct 1990, San Antonio.
- Crawford, K. (1991) *Mesonet Update, The Newsletter of the Oklahoma Mesonet*, University of Oklahoma.
- Desjardins, R.L., Schuepp, P.H., MacPherson, J.I. y Buckley, D.J. (1992) Spatial and temporal variations of the fluxes of carbon dioxide and sensible and latent heat over the FIFE site. *Journal of Geophysical Research*, 97(D17), pp. 18467-18475.
- Dong, A., Gattan, S.R., Carroll, J.J. y Prashar, C.R.K. (1992) "Estimation of daytime net radiation over well-watered grass", *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 118(3), pp. 466-479.
- Doorenbos, J. (1976) Agro-meteorological field stations. *FAO Irrigation and Drainage*, 27.
- Finklin, A.I. y Fischer, W.C. (1990) *Weather Station Handbook - An Interagency Guide for Wildland Managers*. Boise, Idaho: National Wildfire Coordinating Group.
- Fritschen, L.J. (1967) Net and solar radiation relations over irrigated fields. *Agricultural Meteorology*, 4, pp. 55-62.
- Hollinger, S.E. y Reinke, B.C. (1990) *Illinois Climate Network*. Illinois State Water Survey.
- Hubbard, K.G., Rosenberg, N.J. y Nielsen, D.C. (1983) Automated weather station network for agriculture. *Water Resources Management*, 109, pp. 213-222.
- Jarraud, M. 2008, *Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8)*, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland.
- Leclerc, M.J. y Thurtell, G.W. (1990) Footprint prediction of scalar fluxes using a Markovian analysis. *Boundary-Layer Meteorology*, 52, pp. 247-258.

- Meyer, S.J. & Hubbard, K.G. 1992, 'Nonfederated automatic weather stations and networks in the United States and Canada: a preliminary survey', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 73, 4, 449-457.
- Newman, J.E., Shaw, R.H. y Suomi, V.E. (1959) The agricultural weather station: its instruments, observations, and site requirements. University of Wisconsin Agricultural Experiment Station bulletin 537.
- Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (1987) Federal standard for siting meteorological sensors at airports. Washington, D.C.: U.S. Dept. of Commerce.
- Ojeda, W., Unland, H., Lemus, O., Fitz, E., Espinoza, T. y Verdugo, L. (1997) La red agrometeorológica nacional, *VII Congreso Nacional de Irrigación*. ANEI, 22-24 octubre 1997, Hermosillo, Sonora.
- Penman, H.L. (1948) Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings of the Royal Society of London*. A193, pp. 120-145.
- Schuepp, P.H., Leclerc, M.Y., MacPherson, J.I. y Desjardins, R.L. (1990) Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation. *Boundary-Layer Meteorology*, 50, pp. 355-373.
- Snyder, R.L., Brown, P.W., Hubbard, K.G. y Meyer, S.J. (1996) A guide to automated weather stations in North America. En: Stanhill, G. ed. *Advances in Bioclimatology: 4*. Berlin: Springer Verlag.
- Snyder, R.L., Pruitt, D.W., Henderson, W.O. y Dong, A. (1985) California irrigation management information system final report, vol. 3. *Land air and water resources paper 10013C*, University of California, Davis.
- Tanner, B.D. (1990) Automated Weather Stations. *Remote Sensing Reviews*, 5(1), 73-98.
- United Kingdom Meteorological Office (1956) *Handbook of Meteorological Instruments. Part I: Instruments for Surface Observations*. Her Majesty's Stationary Office.

“Agua que no has de beber, déjala correr”

Refrán

Anexo
Tiempo térmico y fenología de los
cultivos



B

ANEXO B

TIEMPO TÉRMICO Y FENOLOGÍA DE LOS CULTIVOS

Waldo Ojeda Bustamante y Ernesto Sifuentes Ibarra

B.1 Introducción

Varios procesos biológicos, como el desarrollo de las plantas y organismos, se aceleran cuando la temperatura se incrementa y se retrasan cuando esta disminuye. Este hecho es registrado anualmente por los agricultores cuando la duración del ciclo de los cultivos se acorta en años calientes y se alarga en años fríos. Para explicar este fenómeno, se usa el tiempo térmico que combina el tiempo transcurrido con la temperatura y se ha usado implícitamente por muchos años, principalmente para predecir la duración del ciclo fenológico de los cultivos. El tiempo térmico se ha expresado históricamente a través de diferentes términos: constante térmica, unidades térmicas, unidades calor, grados día desarrollo, y días grado de crecimiento. El origen del concepto de los grados día se atribuye a Réaumur (1735) quien propuso comparar la suma de grados calor para completar el ciclo fenológico de la misma gramínea bajo climas contrastantes.

Aunque existen diversos nombres con un mismo significado, el término de *unidades calor* es inconveniente ya que el tiempo térmico usa la temperatura, y no el calor, como base de cálculo. El crecimiento (cambio en tamaño) y el desarrollo (cambio de fase) de un cultivo u organismo requieren de acumular tiempo, pero ambos procesos son afectados por varios factores, principalmente ambientales, como la temperatura y las horas luz. Aunque la temperatura tiene más relación con el desarrollo que con el crecimiento de un cultivo, la separación de ambos procesos (desarrollo y crecimiento) es artificial ya que ambos están conectados (Bonhomme, 2000).

El crecimiento implica la aparición de nuevos tejidos (desarrollo). La floración del maíz es controlada principalmente por la temperatura, sin embargo, el desarrollo también puede ser afectado por el fotoperiodo, como sucede con el cultivo de soya. En este trabajo se usará el concepto de grados día desarrollo ($^{\circ}\text{D}$), o simplemente grados día, para expresar cuantitativamente el tiempo térmico, algunas veces llamado también tiempo fisiológico.

La fenología y el desarrollo de la mayoría de los cultivos están relacionados con el tiempo transcurrido desde la fecha de transplante o siembra. Cada especie tiene un número definido de días grado de crecimiento (DGC) requeridos para alcanzar su madurez fisiológica. Se ha aplicado el concepto de DGC para seleccionar variedades de

cultivos en zonas agrícolas, definir estrategias en el control de plagas y enfermedades, calendarizar prácticas de manejo del cultivo, pronosticar el desarrollo fenológico de los cultivos y sobretodo, para calendarizar el riego (Shayya *et al.*, 1991; Fox *et al.*, 1992).

Se han publicado diferentes métodos para integrar la temperatura en función del tiempo. Wang (1960) presentó una revisión muy completa de los métodos reportados hasta esa fecha. La premisa general es que la tasa de desarrollo (D) está en función (g) de la temperatura (T):

$$\frac{dD}{dt} = g(T(t)) \quad (\text{B.1})$$

donde D es el desarrollo o edad del cultivo y $T(t)$ es la temperatura al tiempo t . La cantidad de desarrollo o edad (ΔD) es la integral desde $t=0$ a $t=\tau$.

$$\Delta D = \int_0^{\tau} g(T(t))dt, \quad g(T(t)) \geq 0 \quad (\text{B.2})$$

La ecuación anterior establece que cada especie integra los efectos de la temperatura de acuerdo con una función g particular para cada especie con la restricción de que la tasa de desarrollo no puede ser negativa.

La importancia de la acumulación de los días grado de crecimiento en la estimación del desarrollo fenológico de los cultivos radica en la generalidad de los resultados al hacer uso de ese concepto. Todo trabajo experimental aspira a generar datos que puedan extrapolarse a condiciones distintas de las que fueron obtenidos. A partir del concepto de grados día se han desarrollado las siguientes aplicaciones prácticas (Bonhomme, 2000):

- Clasificación de los cultivos a sus necesidades de tiempo térmico para completar su ciclo
- Estimación de la fecha de maduración de utilidad para definir el último riego
- Pronóstico de la época de cosecha para un padrón de siembras definido
- Predicción de la duración del ciclo de vida en condiciones naturales de plagas agrícolas para control biológico
- Anticipación del desarrollo de organismos dañinos con fines de control fitosanitario
- Estimación de la intensidad de esporulación de hongos dañinos para los cultivos

Para un mejor manejo de los cultivos es necesario conocer sus necesidades térmicas. Cada especie cultivada presenta diferentes respuestas a la temperatura; entre estas destacan las siguientes, conocidas como temperaturas cardinales:

- Temperaturas letales
- Temperaturas biológicas
- Temperaturas óptimas

Las temperaturas letales son las temperaturas máximas o mínimas ($T_{Lmáx}$ y $T_{Lmín}$) a las cuales se producen daños fisiológicos letales en la planta. Las temperaturas biológicas máximas o mínimas (T_b y T_x) definen el intervalo en el que la planta presenta actividad para desarrollar las fases fenológicas deseables (floración, fructificación y maduración). A las temperaturas biológicas también se les conoce como temperaturas umbrales o temperaturas base. Las temperaturas óptimas (T_{op}), también expresadas como un valor único en lugar de un intervalo, definen el rango de las temperaturas en las que el cultivo desarrolla su máximo potencial.

B.2 Grados día desarrollo (°D)

El tiempo térmico expresado en la forma del concepto de grados día desarrollo (°D) es una medida indirecta del desarrollo de plantas y organismos. Se estima como la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes de actividad biológica, T_b y T_x , que definen el rango en el cual un organismo se encuentra activo. La temperatura basal (T_b) también se conoce como umbral mínimo, cero vital o cero biológico. Fuera de este rango térmico el organismo no presenta un desarrollo apreciable o incluso puede morir (**Figura B.1**).

Las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental es menor que la temperatura basal (T_b) o mayor a una temperatura máxima. La tasa de desarrollo aumenta cuando la temperatura ambiental es mayor que la temperatura basal hasta alcanzar un valor máximo a la temperatura óptima (T_{op}). A partir de ese punto, la tasa de desarrollo empieza a disminuir hasta volverse nula a una temperatura crítica o umbral máximo (T_x). Las altas temperaturas ($>T_x$) inducen el cierre de los estomas y restringen el intercambio gaseoso reduciendo la actividad fotosintética.

Uno de los trabajos pioneros sobre el efecto de la temperatura en el desarrollo de los cultivos se debe a Lehenbauer (1914), quien presentó datos experimentales sobre la elongación de las hojas de maíz recién emergidas en función de la temperatura, de una forma similar a la mostrada en la curva de la **Figura B.1**.

Asumiendo que los cultivos presentan actividad biológica en un rango definido de temperatura, se ha definido el concepto de grados día desarrollo (°D) como el periodo de 24 horas donde la temperatura del aire se encuentra un grado por arriba de la temperatura basal (T_b) y por debajo de la temperatura máxima crítica (T_x).

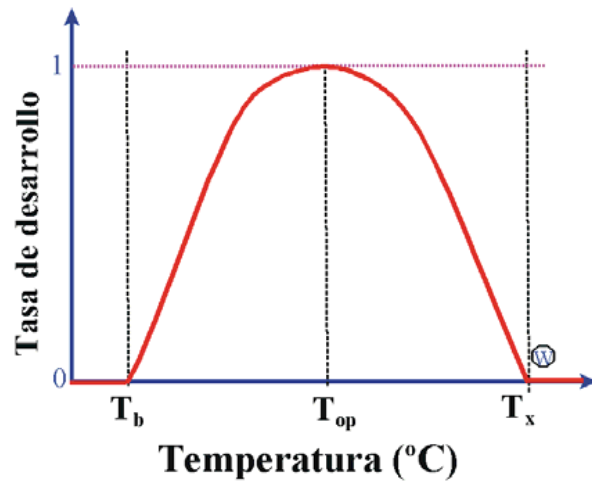


Figura B.1 Tasa de desarrollo en un organismo en función de la temperatura

La **Figura B.2** se usará para explicar el concepto de grados día desarrollo. Supongamos que la temperatura de la noche es T_n y la del día T_d , esto es, el día se divide en dos mitades, una mitad de día y la otra de noche. El valor de $^{\circ}D$ para ese día es definido por el área del rectángulo que se forma cuando las temperaturas se encuentran por arriba de la temperatura basal (T_b), rectángulo con altura $(T_d - T_b)$ y base $(0.5d)$. Para la curva de la temperatura del día mostrado en la **Figura B.2** los días grado se estiman con la relación $^{\circ}D = 0.5(T_d - T_b)$.

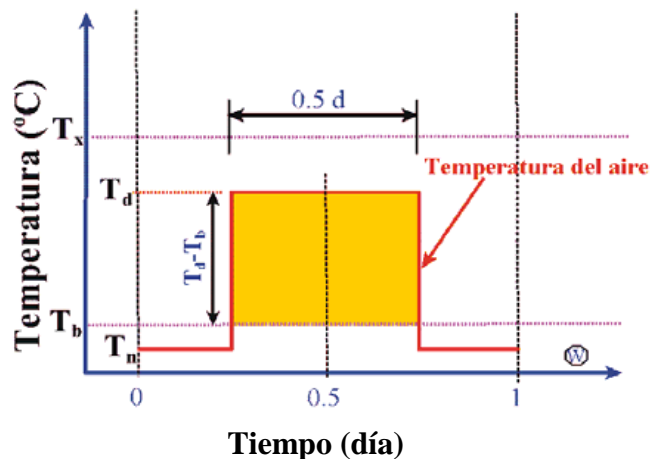


Figura B.2 Concepto de días grado desarrollo asumiendo una temperatura diurna constante

De esta manera, si la temperatura del día fuera uniforme (T_d) en las 24 horas, los $^{\circ}D$ serían calculados simplemente como $T_d - T_b$, siempre y cuando $T_d > T_b > T_n$.

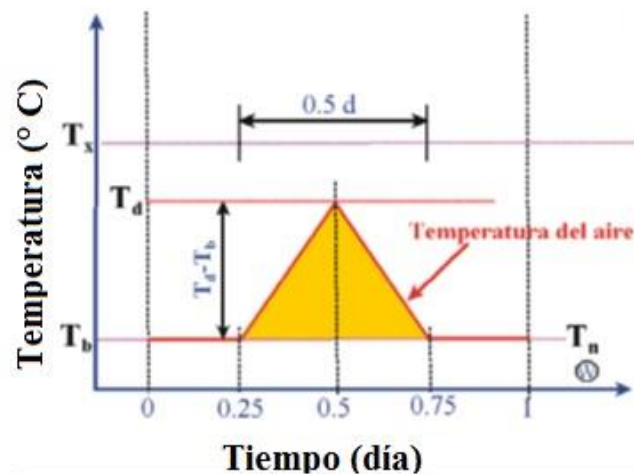


Figura B.3 Modelo triangular de la variación horaria de la temperatura

Desafortunadamente la variación horaria de la temperatura no es constante, por lo que un modelo más realista tendría una forma triangular (**Figura B.4**). Al salir el sol, la temperatura se incrementa hasta alcanzar un máximo, para luego disminuir al ocultarse el sol. Los días grado para la variación de la temperatura de acuerdo con la **Figura B.4** se estimarían con la siguiente ecuación basada en el área de un triángulo:

$$^{\circ}D = \frac{1}{2}(\text{base})(\text{altura}) = \frac{1}{2}(1 \text{ día})(T_d - T_b) = \frac{(T_d - T_b)}{2} =$$

El ajuste de la variación de la temperatura a lo largo de un día con modelos lineales, senoidales o polinomiales es aproximado y con gran incertidumbre si solo se dispone de dos temperaturas por día, la máxima y mínima. Tal como se muestra en la **Figura B.4**, se puede ajustar un triángulo a la curva de la temperatura horaria. Gracias a que los costos de las estaciones meteorológicas automatizadas se han reducido, es posible tener una gran cantidad de puntos a lo largo del día que permiten tener una mayor precisión en la estimación de los grados día desarrollo.

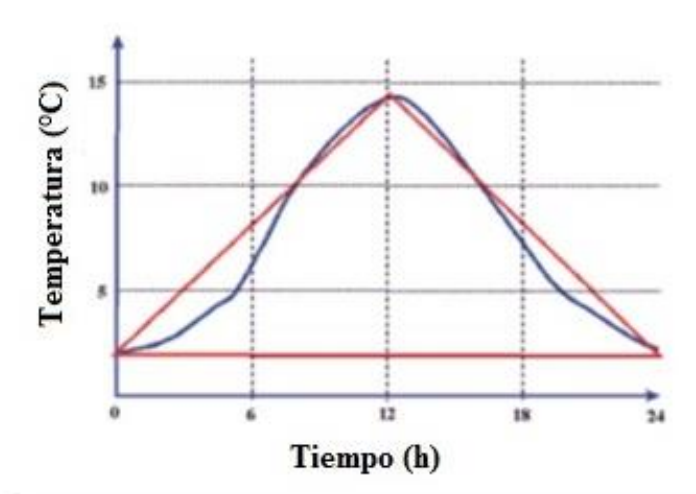


Figura B.4 Ajuste de un modelo triangular a la variación de la temperatura horaria de un día

Se ha comprobado experimentalmente que los cultivos requieren de diferentes valores acumulados de grados día desarrollo (Σ °D) a partir de la emergencia o trasplante. Los valores acumulados para n días transcurridos se expresa con la siguiente relación:

$$\Sigma^{\circ}D = \sum_{i=1}^n {}^{\circ}D_i$$

donde i es el día transcurrido a partir de la emergencia o siembra ($i=1$) hasta la senescencia ($i=n$).

Los valores de los días grado dependen de la escala usada. Un día grado centígrado (°Dc) es diferente de un día grado Fahrenheit (°Df), por lo que se debe tener cuidado en la escala que se usa. Se requieren 9 °Df para generar 5 °Dc, por lo tanto $1^{\circ}Dc = 9/5^{\circ}Df$. En este documento solo se usarán días grado centígrado, por lo que $^{\circ}Dc = ^{\circ}D$.

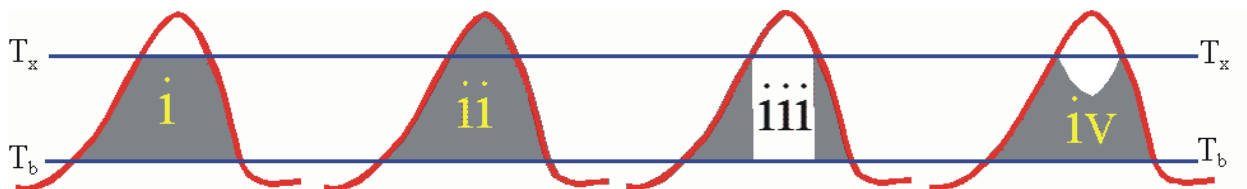


Figura B.5 Caso de corte superior para el cálculo de los grados día

Las altas temperaturas tienen un impacto severo en los organismos. Se han propuesto cuatro variantes de los métodos para el cálculo de los grados día ($^{\circ}\text{D}$) dependiendo de la forma en que se considera la integración de las temperaturas mayores a la temperatura T_x :

- **Corte horizontal.** Las temperaturas mayores a T_x se igualan a T_x , esto es, se consideran como $T=T_x$ (ver caso *i* de la **Figura B.5**).
- **Sin corte.** No existe una temperatura de corte (T_x) para la estimación en el cálculo de los $^{\circ}\text{D}$ (ver caso *ii* de la **Figura B.5**).
- **Corte vertical.** Las temperaturas mayores a T_x no se consideran en los cálculos (ver caso *iii* de la **Figura B.5**).
- **Corte intermedio.** Se recalcula la temperatura como $T=2T_x-T$ si $T>T_x$ y $T=T_b$ si $T<T_b$ (ver caso *iv* de la **Figura B.5**).

Actualmente el caso *i* es el más usado en la práctica, aunque el caso *ii* también ha sido usado al no considerar la temperatura crítica T_x , ya que existen varios estudios basado en este caso. Los modelos *iii* y *iv* han sido usados principalmente en estudios sobre desarrollo de insectos.

Al calcular los $^{\circ}\text{D}$ se pueden presentar seis casos en relación con la ubicación de la curva de temperatura respecto a las temperaturas de corte que definen la actividad biológica de los cultivos u organismos (T_b y T_x), tal como se presenta en la **Figura B.6**. Se observa que la curva puede quedar totalmente entre el intervalo de dichas temperaturas (caso *a* de la **Figura B.6**). Parte de curva está fuera del intervalo de actividad biológica (caso *b*). Solo una temperatura corta la curva, caso *c* para T_b y caso *d* para T_x . La curva puede estar por arriba (caso *e*) o por abajo del intervalo de actividad biológica (caso *f*).

En el siguiente apartado se presentan los métodos más usados para el cálculo de los grados día. El mejor método depende del tipo de datos disponible, del cultivo u organismo de interés, y de la información experimental disponible. Se pueden tener los mejores sensores para estimar la temperatura a intervalos menores de una hora, sin embargo, la mayoría de los estudios han usado dos datos diarios de temperaturas, la máxima y la mínima. Aumentar la complejidad del método de cálculo a menudo resulta en pequeñas mejoras en los resultados (Bonhomme, 2000). Se recomienda realizar cálculos simples sin olvidarse de la no linealidad entre la temperatura y la tasa de desarrollo de los cultivos. Al usar datos experimentales de Σ $^{\circ}\text{D}$, es necesario saber cuáles fueron las temperaturas umbrales y el método de cálculo usados.

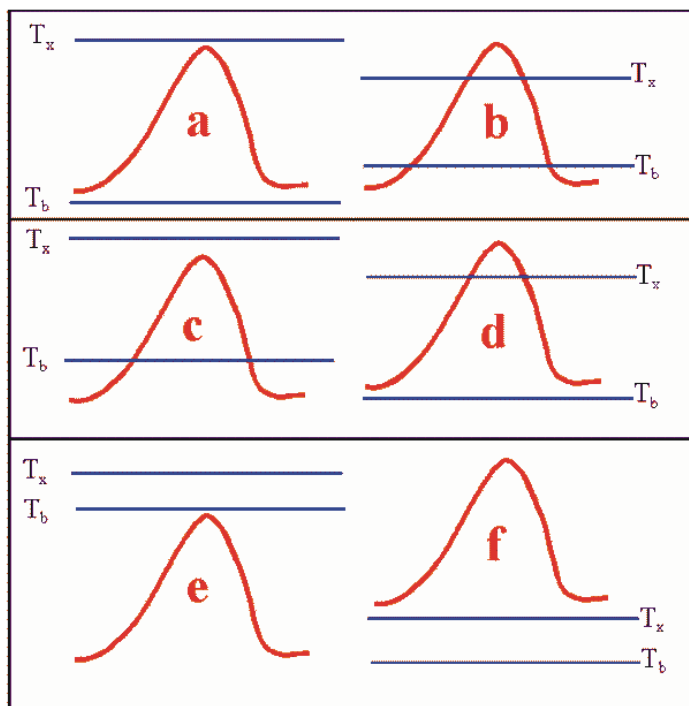


Figura B.6 Casos de localización de la curva de la temperatura con respecto a las temperaturas biológicas (T_b y T_x) para el cálculo de los °D

B.2.1 Método del promedio diario

Por lo general se tenía acceso a estaciones meteorológicas convencionales que registraban únicamente las dos temperaturas diarias extremas, la mínima y la máxima, así que el método más usado para obtener el promedio diario se basaba en dichas temperaturas.

$$(\bar{T} = ((Tmax + Tmin))/2)$$

Uno de los métodos más antiguos para calcular los días grado se puede estimar con las siguientes ecuaciones que corresponden al caso ii de la **Figura B.5**.

$$\begin{aligned} \text{°D} &= \bar{T} - T_b, \bar{T} > T_b \\ \text{°D} &= 0, \bar{T} \leq T_b \end{aligned}$$

En el cálculo de los días grado usualmente se establece una restricción para obtener valores positivos (corresponde al caso i de la **Figura B.5**), el promedio diario se iguala a T_b si $\bar{T} < T_b$, y se iguala a T_x si $\bar{T} > T_x$. Lo anterior indica que el proceso de

desarrollo se retrasa en días fríos pero no se anula. De esta manera el modelo general para calcular los grados día desarrollo ($^{\circ}\text{D}$) está dado por:

$$^{\circ}\text{D} = \bar{T} - T_b, \bar{T} < T_x$$

$$^{\circ}\text{D} = T_x - T_b, \bar{T} \geq T_x$$

$$^{\circ}\text{D} = 0, \bar{T} \leq T_b$$

Por ejemplo, si las temperaturas biológicas del maíz son $T_b=10^{\circ}\text{C}$ y $T_x=30^{\circ}\text{C}$, y si las temperaturas máxima y mínima del día son 18°C y 8°C , el promedio del día es de 13°C , y por lo tanto los grados día son $13^{\circ}\text{C}-10^{\circ}\text{C} = 3^{\circ}\text{DD}$. Si el promedio del día es de $8^{\circ}\text{C} < T_b$, los grados días son cero. En cambio, si el promedio del día es mayor que $T_x=30^{\circ}\text{C}$, los grados días se calculan como la diferencia de las temperaturas umbrales. $30^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C} = 20^{\circ}\text{DD}$.

B.2.2 Método de curvas de ajuste

Durante muchos años el comportamiento de la curva de la temperatura horaria se predijo con base en las únicas temperaturas usualmente disponibles, la mínima y la máxima del día. Una vez que se obtienen los parámetros de la curva de ajuste se calculan los grados día ($^{\circ}\text{D}$) por medio de ecuaciones algebraicas obtenidas de acuerdo con las reglas de integración matemática. Uno de los métodos más usados para estimar los $^{\circ}\text{D}$ es conocido como el método del seno simple. El método ajusta una curva senoidal para cada día (24 h) usando como parámetros las temperaturas máxima y mínima del día (**Figura B.7**) El área bajo la curva de ajuste por encima de la temperatura basal define el valor de los $^{\circ}\text{D}$ para cada día.

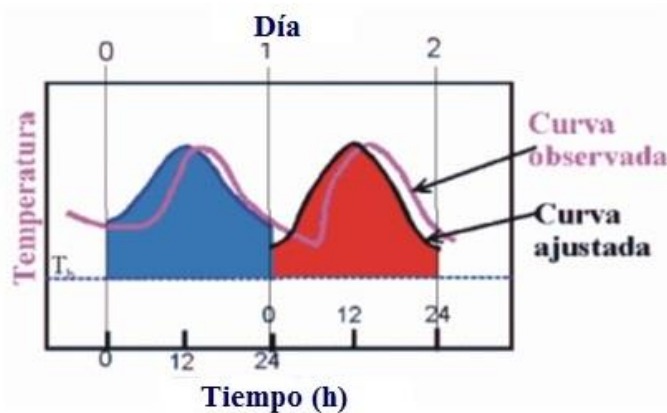


Figura B.7 Curvas de ajuste a la curva diaria observada para estimar $^{\circ}\text{D}$

B.2.3 Método de la integración numérica de la curva observada

El método de la integración se basa en las técnicas de integración numérica que aproxima el área bajo la curva de la temperatura observada por medio de una serie de rectángulos. Por ejemplo, se puede dividir un día en 24 rectángulos, uno para cada hora. De esta forma se genera el concepto de horas grado ($^{\circ}\text{H}$), que se define como una unidad de tiempo de una hora donde la temperatura del aire se encuentra un grado por arriba de la temperatura basal. De acuerdo con la **Figura B.8**, en el periodo de 11-12 horas se acumularon 12 $^{\circ}\text{H}$, que se obtienen al restar la temperatura media horaria de la temperatura basal ($14-2$), mientras que en el periodo de 17-18 horas se acumularon 6.2 $^{\circ}\text{H}$.

Para convertir de $^{\circ}\text{H}$ a $^{\circ}\text{D}$ se usa la equivalencia $^{\circ}\text{D}=(\sum ^{\circ}\text{H})/24$. Aunque el concepto de hora grado es más eficaz, la mayor parte de la información publicada se ha estimado con base en los grados día desarrollo usando solamente las temperaturas máxima y mínima del día.

La tasa de desarrollo se relaciona directamente con las temperaturas basal y óptima. Por debajo de la temperatura basal en el cultivo no se desarrolla, y por arriba de la óptima la tasa de desarrollo empieza a disminuir (Summerfield *et al.*, 1991; Krause *et al.*, 2005). A pesar de los desarrollos tecnológicos para monitorear en tiempo casi real las variables meteorológicas, la mayoría de los métodos de estimación de tiempo térmico han sido desarrollados para valores promedios diarios (Villordon *et al.*, 2009). Si bien el método estándar basado en la temperatura promedio es el más utilizado para estimar los $^{\circ}\text{D}$ (Dufault, 1997), se han reportado métodos que utilizan más parámetros, como el de los P-Days (Sands *et al.*, 1979).

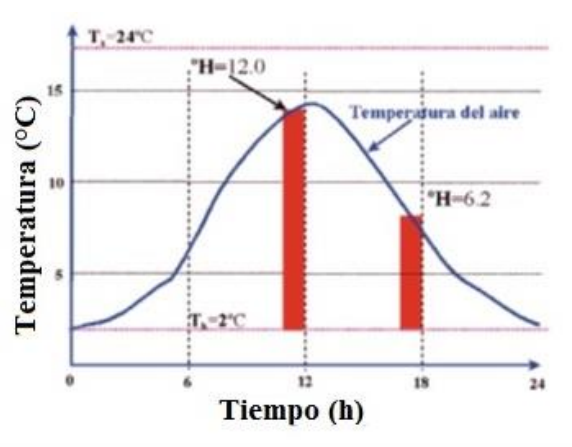


Figura B.8 Concepto de horas grado desarrollo ($^{\circ}\text{H}$)

B.3 Fenología

El concepto de grados día se ha aplicado ampliamente para predecir la fenología de los cultivos. Un cultivo cambia de etapa fenológica cuando el tiempo térmico alcanza el valor requerido para dicha etapa. Se han utilizado diversos modelos, principalmente lineales, para predecir los cambios en la fenología de los cultivos en función del tiempo térmico (Lallukka *et al.*, 1978). Otros trabajos realizados en la comparación de métodos para estimar la fenología con base en °D han sido reportados por Villordon *et al.* (2009). Para el caso del Maíz, Ojeda *et al.* (2006) reportaron el tiempo requerido por etapa fenológica para las variedades de ciclo intermedio más usadas en el norte de Sinaloa, México (**Tabla B.1**).

Tabla B.1 Grados día (°D) requeridos por etapa para maíz de ciclo intermedio en el norte de Sinaloa, México

Etapa	Clave	Duración etapa		Duración acumulada	
		Días n	Σ °D	Días n	Σ °D
Emergencia	Ve	12	109.4	12	109.4
4-hojas	V4	34	207.0	46	316.4
8-hojas	V8	37	185.5	83	502.0
12-hojas	V10	14	74.1	97	576.1
Flor masculina	VT	13	89.1	110	665.2
Jiloteo	R1	15	158.3	125	823.5
Grano acuoso	R2	17	155.1	142	978.6
Grano lechoso	R3	11	123.7	153	1102.3
Grano masoso	R4	11	137.5	164	1239.8
Grano abollado	R5	7	95.8	171	1335.5
Madurez	R6	8	115.6	179	1451.1
Cosecha	-	11	189.6	190	1640.8

Se han presentado las bases teóricas del concepto de grados día para estimar la aparición de las etapas fenológicas de los cultivos. Ya que la fenología está asociada al

manejo del cultivo como el riego, se han propuesto diversos modelos para estimar el coeficiente de cultivo en función de los grados día acumulados (Ojeda *et al.*, 2006). Algunos cultivos, como el trigo de invierno, requieren un proceso de vernalización; en estos casos es necesario realizar un ajuste del tiempo térmico que incluya dicho proceso.

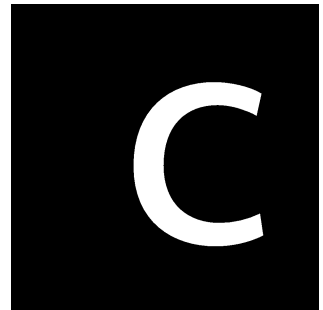
B.4 Referencias

- Bonhomme, R. (2000) Bases and limits to using 'degree.day' units. *European Journal of Agronomy*, 12, pp. 1-10.
- Dufault, R.J. (1997) Determining heat unit requirements for broccoli harvest in coastal South Carolina. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 122, pp. 169-174.
- Fox, F.A., Scherer, T., Slack, D. y Clark, L.J. (1992) *Arizona Irrigation Scheduling (AZSCHED software Version 1.01): Users Manual*. Cooperative Extension. University of Arizona. Tuxon, Arizona.
- Krause, P., Boyle, D.P. y Base, F. (2005) Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, pp. 89-97.
- Lallukka, L.J., Rantanen, O. y Mukula, J. (1978) The temperature sum requirement of barley varieties in Finland. *Annales Agriculturae Fenniae*, 17, pp. 185-191.
- Lehenbauer, P.A. (1914) Growth of maize seedling in relation to temperature. *Physiological Research*, 1, pp. 247-288.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland, H. (2006) Programación integral del riego en maíz, *Agrociencia*, 40, pp. 13-25.
- Réaumur, R.A.F.d. (1735) Observations du thermometre, faites a Paris pendant l'annee 1735, compares avec celles qui ont ete faites sous la ligne, a l'Isle de France, a Alger et en quelques-unes de nos isles de l'Amerique. *Mem. Acad. des Sci.*, Paris 545-576.
- Sands, P.J., Hackett, C. y Nix, H.A. (1979) A model of the development and bulking of potatoes (*Solanum tuberosum* L.). *Field Crops Research*, 2, pp. 309-331.
- Shayya, W.H., Bralts, V.F. y Olmsted, T.R. (1991) *Irrigation scheduling based on growing degree days*. ASAE Paper No. 91-2643. St. Joseph, Michigan, EE.UU.
- Summerfield, R.J., Roberts, E.H., Ellis, R.H. y Lawn, R.J. (1991) Towards the reliable prediction of time to flowering in six annual crops. I. The development of simple models for fluctuating field environments. *Experimental Agriculture*, 27, pp. 11-31.
- Villordon, A., Clark, C., Ferrin, D. y LaBonte, D. (2009) Using Growing Degree Days, Agrometeorological Variables, Linear Regression, and Data Mining Methods to Help Improve Prediction of Sweetpotato Harvest Date in Louisiana. *HortTechnology*, 19, pp. 133-144.

*"No pretendas apagar con fuego un incendio,
ni remediar con agua una inundación"*

Confucio

Anexo
Calendarización del riego usando el
concepto de tiempo térmico



ANEXO C

CALENDARIZACIÓN DEL RIEGO USANDO EL CONCEPTO DE TIEMPO TÉRMICO

Waldo Ojeda Bustamante, Jorge Flores Velázquez y Ernesto Sifuentes Ibarra

C.1 Introducción

Para optimizar los recursos hídricos de un área de riego es de vital importancia conocer los requerimientos hídricos de los cultivos a lo largo de sus diferentes fases fenológicas. Así, se puede suministrar el riego de una manera calendarizada que permita al suelo reponer continuamente el agua perdida, tanto por la transpiración del cultivo como por la evaporación del suelo. El objetivo principal del riego es aplicarlo en la zona de raíces a la tasa que es demandada por los cultivos.

La calendarización del riego se ha definido como el procedimiento para determinar la cantidad y tiempo de aplicación del riego a un cultivo a lo largo de su desarrollo fenológico, con el fin de suministrar no solo los requerimientos hídricos de los cultivos sino para mantenerlos con un ambiente favorable de desarrollo. Con este propósito se pueden necesitar cantidades adicionales de agua para control de sales, heladas, plagas y enfermedades. Para calendarizar el riego de manera científica se requiere conocer las tres variables dinámicas de calendarización a lo largo del ciclo fenológico de los cultivos: coeficiente de cultivo (K_c), profundidad radical (P_r) y factor de abatimiento hídrico (f).

En el anexo B se presentó la importancia de la acumulación del tiempo térmico en la estimación del desarrollo fenológico de los cultivos. En este anexo se presenta una metodología para aplicar el concepto de tiempo térmico a través de la estimación de los grados día ($^{\circ}D$) acumulados. El concepto de tiempo térmico permite aplicar resultados experimentales a condiciones climáticas distintas de las cuales fueron obtenidos.

El término grados día acumulados ($\sum ^{\circ}D$) permite definir la duración del ciclo fisiológico relativo a las condiciones acumuladas de la temperatura ambiental a partir de la fecha de siembra, emergencia o de trasplante. En este enfoque cualquier variable relacionada con el desarrollo fenológico, como el coeficiente de cultivo (K_c), la profundidad radical (P_r) y el factor de abatimiento hídrico (f), es expresada en función de los $\sum ^{\circ}D$ y no sobre la base de unidades de tiempo civiles como días después de siembra o emergencia.

Desde esta perspectiva los coeficientes o parámetros se ajustan automáticamente a las condiciones meteorológicas imperantes en el sitio bajo estudio para obtener curvas normalizadas de los coeficientes basados en DGC. Por ejemplo, los valores de K_c son de uso limitado cuando se definen en función de los días después de la siembra o emergencia o alguna otra unidad de tiempo. Su uso se restringe a localidades con clima similar al del sitio donde las curvas fueron obtenidas, ya que no toma en cuenta los efectos de la variabilidad climática temporal en el crecimiento y desarrollo de los cultivos.

Uno de los retos actuales de la agricultura es generar herramientas que permitan practicar una agricultura climáticamente inteligente ante la intensificación del cambio climático. Ante tal situación, cada vez es menos preciso el manejo tradicional de los cultivos, principalmente el riego y nutrición, lo que hace necesario incorporar tecnologías y metodologías que permitan adaptar el manejo de los cultivos a los nuevos escenarios climáticos (Ojeda *et al.*, 2008).

Con el desarrollo de las comunicaciones y la informática, actualmente es posible generar aplicaciones agrícolas prácticas para los productores a través de modelos agroclimáticos apoyados en el concepto de tiempo térmico para riego, plagas, enfermedades y otros. A través de Internet es posible tener acceso a datos climáticos en tiempo real de cualquier parte del mundo, desarrollar sistemas computacionales operados vía Internet e interactuar con varios tipos de usuarios en forma simultánea (Ojeda *et al.*, 2006).

C.2 Ecuaciones para la calendarización integral del riego

El concepto de días grado de crecimiento (DGC) resultó de observaciones que indicaban: i) que las plantas no se desarrollan cuando la temperatura ambiental era menor que una temperatura basal (Neild y Smith, 1997); ii) que la tasa de desarrollo aumentaba cuando la temperatura ambiental era mayor que la temperatura basal; y iii) que las variedades de maíz requieren diferentes valores acumulados (Σ °D) de los grados día desarrollo (°D). Para mayor información sobre el concepto de grados día revisar el Anexo B.

Usando valores de evapotranspiración real (ET_c) medidos con lisímetros, y valores de evapotranspiración de referencia (ET_o) estimados con la ecuación de Penman, Sammis *et al.* (1985) desarrollaron los coeficientes de cultivo basados en DGC para varios cultivos. Sus resultados mostraron diferencias no significativas en las curvas obtenidas para K_c entre diferentes localidades de Nuevo México, EUA. Encontraron que las curvas basadas en DGC tenían menor variabilidad que las basadas en días julianos para maíz y sorgo. En el caso del algodón, la diferencia entre ambas curvas no fue

significativa. Diferentes estudios han demostrado que es posible generar experimentalmente curvas de K_c basadas en DGC y aplicarlas en otras localidades con características climáticas contrastantes.

El concepto de grados día ha sido muy útil en el pronóstico del desarrollo fenológico de los cultivos, por lo que ha sido utilizado para estimar el coeficiente de cultivo (Sammis *et al.*, 1985; Stegman, 1988; Slack *et al.*, 1996). Fox *et al.* (1992) propusieron una serie senoidal para estimar el coeficiente de cultivo que tiene la inconveniencia de generar valores negativos o cercanos a cero en la primera fase fenológica del cultivo, subestimando los valores reales. Con el propósito de evitar estas discrepancias Ojeda *et al.* (2004, 2006) introdujeron el siguiente modelo para estimar el coeficiente de cultivo (K_c):

$$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2 \quad (\text{C.1})$$

$$\text{Si } K_c < K_1, \text{ entonces } K_c = K_1$$

donde K_1 es el coeficiente de cultivo para la primera etapa fenológica que depende principalmente de la evaporación del suelo, K_{\max} es el máximo valor de K_c durante el ciclo del cultivo, $x_{K_{\max}}$ es el valor de los días grado de crecimiento acumulado donde se presenta en valor de K_{\max} , α_1 es el parámetro de regresión obtenido por ajuste de datos experimentales al modelo y erfc es la función error complementario.

Para facilitar la expresión matemática del desarrollo de un cultivo se utiliza una variable auxiliar x que expresa los días grado de crecimiento acumulado ($\Sigma \text{ } ^\circ\text{D}$) normalizado con respecto al total de $^\circ\text{D}$ requeridos para terminar su ciclo fenológico normal, expresado por la constante α_0 , a partir de la siembra o emergencia del cultivo.

$$x = \frac{\Sigma \text{ } ^\circ\text{D}}{\alpha_0} \quad (\text{C.2})$$

donde α_0 representa los días grado requeridos para alcanzar la muerte fenológica del cultivo.

La ventaja del modelo propuesto para estimar el coeficiente de cultivo (ecuación C.1) radica en que considera un valor constante de K_c para la primera etapa fenológica en función de los días grado acumulados (K_1). El siguiente modelo propuesto también por Ojeda *et al.* (2004) permite estimar la profundidad radical (P_r):

$$P_r = P_{r0} + (P_{r\max} - P_{r0}) \left(1 - e^{-\left(\frac{\Sigma \text{ } ^\circ\text{D}}{\alpha_2}\right)^2}\right) \quad (\text{C.3})$$

donde P_{ro} es la profundidad inicial de mojado para germinación óptima (relacionada con la profundidad de siembra), P_{rmax} es la profundidad radical máxima, e es la base de los logaritmos naturales y β es el parámetro de regresión, obtenido al ajustar datos experimentales, que es aproximadamente igual:

$$\alpha_2 \cong \frac{2}{3} \Sigma D_r$$

donde ΣD_r es el valor en días grado acumulado ($\Sigma ^\circ D$) donde se alcanza la máxima profundidad radical.

El modelo propuesto para estimar la profundidad radical en la ecuación C.3 ofrece la versatilidad de reajustarse al cambiar el parámetro de profundidad radical máxima o inicial. El tercer modelo lineal, propuesto por *Ojeda et al.* (2004), estima el factor de abatimiento hídrico (f) a partir del coeficiente de cultivo (K_c) con la siguiente relación:

$$f = \alpha_3 - \alpha_4 K_c \quad (C.4)$$

donde α_3 es la interceptada al origen y α_4 la pendiente de la recta.

El modelo para estimar el factor de abatimiento (ecuación C.4) está relacionado en forma inversa con el coeficiente de cultivo, dado por la pendiente negativa de la recta. Lo anterior esta relacionado con el hecho de que cuanto mayores son los requerimientos hídricos de los cultivos, más sensibles son al estrés de humedad. Por ende, cuando K_c incrementa, el factor f disminuye. El manejo del riego esta relacionado con el factor f . El riego por goteo presenta valores menores de f que el riego por aspersión y este último tiene valores menores que los de riego por gravedad.

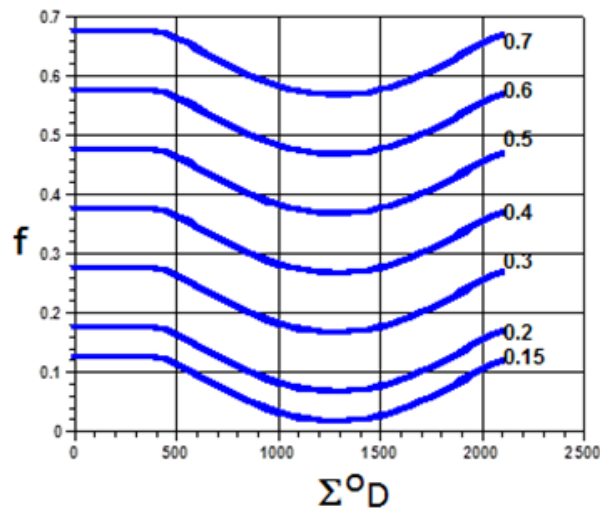


Figura C.1 Variación del factor de abatimiento (f) en función del parámetro α_3 definido por el sistema de riego

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo C. Calendarización del riego usando el concepto de tiempo térmico
--	---

En la **Tabla C.1** se presenta un resumen de las ecuaciones para estimar las variables de la calendarización de riego propuestos por Ojeda-Bustamante *et al.* (2004). Además del parámetro común α_0 de la ecuación C.2, se requieren cuatro parámetros para estimar el coeficiente de cultivo, tres para la profundidad radical y dos para el factor de abatimiento hídrico.

Tabla C.1 Descripción de los modelos con parámetros para expresar las variables de calendarización del riego

Variable	Modelo	Parámetros
Coeficiente de cultivo	$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left(\frac{x - x_{K_{\max}}}{\alpha_1}\right)^2$ <p>Si $K_c < K_{c0}$, entonces $K_c = K_{c0}$</p>	K_{\max} , $x_{K_{\max}}$, α_1 K_{c0}
Profundidad radical	$R_d = R_{do} + (R_{d\max} - R_{do}) \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{(\sum D)^2}{\alpha_2^2}\right) \right\}$	R_{do} , $R_{d\max}$, α_2
Factor de abatimiento	$f = \alpha_3 - \alpha_4 K_c$	α_3 , α_4

Los parámetros α_1 , α_2 , α_3 , y α_4 se obtienen del ajuste entre los datos experimentales y los modelos de la **Tabla C.1**. K_{\max} es valor máximo del coeficiente de cultivo (K_c) y $x_{K_{\max}}$ es el valor normalizado de x donde se presenta el valor máximo K_{\max} . K_{c0} es el valor inicial de K_c cuando el área foliar del cultivo es mínima, y en la que predomina la evaporación del suelo sobre la transpiración del cultivo. R_{do} es la profundidad de siembra (L) y $R_{d\max}$ es la profundidad máxima efectiva de las raíces (L).

Tabla C.2 Parámetros de calendarización del riego para papa (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004)

Parámetro	K_{\max}	K_{c0}	$x_{K_{\max}}$	α_0	α_1	α_2	α_3	α_4
Valor	1.3	0.20	0.6	2100	0.45	600	0.68 (gravidad) 0.45 (aspersión pivote)	0.1

Como muestra se presenta la forma de las variables de calendarización de riego (Pr, F y K_c) para el cultivo de papa de acuerdo con los parámetros presentados en la **Tabla C.2**.

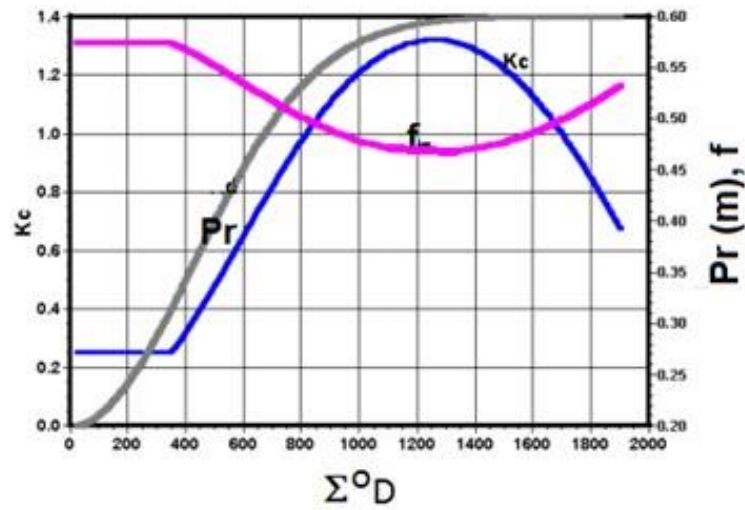


Figura C.2 Curvas generadas por las ecuaciones de la Tabla C.1 para el cultivo de papa (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004)

C.3 Ejemplo de aplicación para maíz

En esta sección se presenta un caso de aplicación para el cultivo del maíz siguiendo los resultados presentados por Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004). Lo primero que se tiene que definir al usar la metodología de los grados día es el método para estimarlos. Se usarán las siguientes ecuaciones:

$$^{\circ}D = T_a - T_b, T_a < T_x \quad (C.5)$$

$$^{\circ}D = T_x - T_b, T_a \geq T_x$$

$$^{\circ}D = 0, T_a \leq T_b$$

donde T_a es la temperatura media ambiental diaria, T_b y T_x son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente. La temperatura media diaria (T_a) es el promedio aritmético de las mediciones de la temperatura ambiental realizadas en el transcurso del día; el caso más simple es el promedio de la temperatura máxima y mínima del día.

Aunque el maíz puede sobrevivir a temperaturas adversas en el rango de 0 a 45°C, las temperaturas de desarrollo del maíz que se suelen usar para estimar los $^{\circ}D$ son 10 °C y 30 °C, para T_b y T_x , respectivamente. Temperaturas mayores a 32 °C producen reducciones significativas en el rendimiento, principalmente durante las fases de llenado de grano y reproducción (Neild y Newman, 1987).

La acumulación diaria de los °D es una variable de gran valor predictivo durante el manejo del riego. La maduración de las variedades comerciales del maíz varía para valores acumulados de 1 150 a 1 760 °D. De acuerdo con Neild y Newman (1987), estas variedades se pueden clasificar por los requerimientos de °D en:

- ciclo corto, con un rango de 1 150 a 1 315 °D
- ciclo intermedio, entre los 1 315 a 1 590 °D
- ciclo largo, de 1590 a 1760 °D

Los parámetros correspondientes de los modelos (**Tabla C.1**) obtenidos por Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) usados para calendarizar el riego en maíz se presentan en la **Tabla C.3**. El parámetro α_3 se asocia al sistema de riego, que para riego por gravedad fue de 0.6 y para aspersión de 0.6.

Tabla C.3 Parámetros de calendarización del riego obtenidos para el cultivo de maíz bajo condiciones óptimas de disponibilidad de agua

Parámetro	Valor
K_{max}	1.25
K_{co}	0.2
X_{Kmax}	0.59
R_{do}	0.07 m
R_{dmax}	1.00 m
$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$	1 641, 0.45, 527
α_3	0.8 (gravedad), 0.6(aspersión)
α_4	0.1

Para mostrar la aplicabilidad de los modelos usados, Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) generaron y aplicaron calendarios de riego a dos parcelas comerciales del Valle del Fuerte, Sinaloa. Se usaron los parámetros de la **Tabla C.3** para generar calendarios de riego en surcos y aspersión móvil para maíz. En ambos calendarios se considera que el primer riego se aplica para mojar la zona de raíces, asumiendo que la humedad inicial del suelo es muy baja. El calendario bajo riego por gravedad se presenta en la **Tabla C.4** con un riego de presiembra de 23.5 cm. Se aplicaron cuatro riegos de auxilio además del riego de presiembra, con un total de lámina neta de 44.2 cm y una lámina bruta de 73.7 cm, y una eficiencia de aplicación del 60 %.

Tabla C.4 Calendario de riego en maíz bajo riego por gravedad

Riego (Número)	Intervalo (días)	Días después de siembra (días)	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.00	235.00
2	84	64	424.72	44.50	74.16
3	34	98	580.13	73.70	122.83
4	23	121	778.48	86.05	143.42
5	30	141	980.00	96.90	161.50
Total				44.22	736.91

El calendario de riego por aspersión móvil se presenta en la **Tabla C.5** con un riego de presiembra de 16.6 cm. Se aplicaron 8 riegos de auxilio además el riego de presiembra, con un total de lámina neta de 52 cm y lámina bruta de 61 cm, y una eficiencia de aplicación del 85 %.

Tabla C.5 Calendario de riego en maíz bajo por aspersión móvil (avance frontal)

Riego (Número)	Intervalo (días)	Días después de siembra (días)	°D acumulados a partir de siembra (Σ °D)	Lámina neta (mm)	Lámina bruta (mm)
1	0	-20	-240	141.00	165.05
2	50	30	225.5	15.59	18.34
3	38	68	442.8	36.35	42.76
4	20	88	527.5	42.85	50.41
5	19	107	635.4	49.76	58.54
6	13	120	766.1	52.63	61.94
7	12	132	890.2	56.87	66.91
8	13	145	1 011.9	61.11	71.89
Total				456.16	535.84

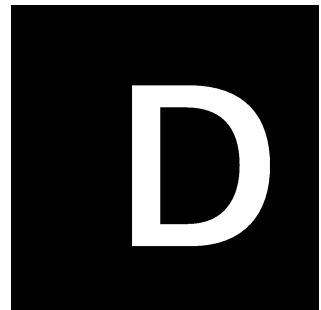
C.4 Referencias

- Fox, F.A., Scherer, T., Slack, D. y Clark, L.J. (1992) *Arizona Irrigation Scheduling (AZSCHED software Version 1.01): Users Manual*. Cooperative Extension. University of Arizona. Tuxon, Arizona.
- Neild, R.E. y Newman, J. E. (1987) *Growing Season Characteristics and Requirements in the Corn Belt*. In. National Corn Handbook. Project leader R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA.
- Neild, R.E. y Smith, D.T. (1997) Maturity dates and freeze risks based on growing degree days. University of Nebraska. G83-673-A.
- Ojeda, W., Martínez, P. y Hernández, L. (2008) Repercusiones del cambio climático en la agricultura de riego. En: Aguilar, A. y Martínez, P. eds. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Vol. II*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Slack, D.C. y Carrillo, M. (2004) Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree days concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*, 53, pp. 251-261.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland, H. (2006) Programación integral del riego en maíz, *Agrociencia*, 40, pp. 13-25.
- Sammis, T.W., Mapel, C.L., Lugg, D.G., Lansford, R.R. y McGuckin, J.T. (1985) Evapotranspiration crop coefficients predicted using growing-degree-days. *Transactions of the ASAE*, 28, pp. 773-780.
- Slack, D.C., Martin, E.C., Sheta, A.E., Fox, F.Jr., Clark, L.J. y Ashley, R.O. (1996) Crop coefficients normalized for climatevariability with growing-degreedays. *International Conference on Evapotranspiration and Irrigation Scheduling*. American Society of Agricultural Engineers, pp892-898.
- Stegman, EC, (1988) Corn crop curve comparisons for the central and northern great plains of the US. *American Society of Agricultural Engineering*, 4(3), pp. 226-233.

*“El agua, una de las sustancias químicas más investigadas,
pero sigue siendo la menos entendida”*

John Emsley

Anexo
Ejemplo del cálculo de los
requerimientos de riego usando CROPWAT



ANEXO D

EJEMPLO DEL CÁLCULO DE LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO USANDO CROPWAT

Helene K. Unland Weiss y Waldo Ojeda Bustamante

D.1 Introducción

El sistema computacional CROPWAT (FAO, 1998), cuyo nombre deriva del inglés *crop* ‘cultivo’ y *wat* (*water*) ‘agua’, es el programa más usado para estimar los requerimientos hídricos y de riego de un cultivo. Usando datos de suelo, clima y cultivo, el programa permite obtener el calendario de riego para diferentes condiciones de manejo y patrones de cultivos, tanto para condiciones de riego como de temporal o seco. El éxito del CROPWAT radica en que contiene una base de datos robusta de los parámetros calibrados para estimar los requerimientos de riego de los cultivos. Además, utiliza la metodología que ha sido tomada como estándar en el medio agronómico y que se encuentra documentada en una serie de manuales publicados por la FAO, en particular el manual FAO 56 (Allen *et. al.*, 1998).

El CROPWAT es compatible con la base de datos CLIMWAT de la FAO, que contiene datos agroclimáticos de más de 5 000 estaciones en todo el mundo. Otra ventaja del CROPWAT es que la última versión del programa se puede descargar sin costo del portal web de la FAO, <http://www.fao.org>. En este anexo se describe el uso del programa CROPWAT versión 8 en el sistema operativo Microsoft Windows usando un ejemplo base que permite dar seguimiento a los cálculos que realiza dicho programa.

D.2 Ejemplo de referencia

Para ilustrar los conceptos presentados en esta sección, usando el ejemplo presentado por Ojeda *et al.* (2008) se presenta un ejemplo detallado para obtener la capacidad de un sistema de riego por gravedad, que suministrará la demanda de riego de una zona de riego de Los Mochis, Sinaloa, México, con una superficie de 300 ha. La **Tabla D.1** presenta el plan anual propuesto con cuatro cultivos anuales (frijol, jitomate, maíz y papa) y un cultivo perenne (caña de azúcar).

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

Tabla D.1 Distribución de las fechas de siembra (FS), cosecha (FC), duración del ciclo (DC), profundidad de raíces (Pr), factor de abatimiento (f) y superficie (A) para el plan de cultivos propuesto

Cultivo	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Duración del ciclo (días)	Profundidad de raíces (cm)		Área	
				inicial	máxima	ha	%
Caña de azúcar	1/01	31/12	365	120	120	100	33
Jitomate	13/10	24/02	135	25	70	10	3
Frijol	21/11	10/03	110	30	80	20	7
Maíz	25/10	17/04	175	30	100	120	40
Papa	27/11	11/03	105	30	70	50	17
						300	100

La **Figura D.1** presenta gráficamente el plan de cultivos durante el periodo de máxima demanda de agua de los cultivos que correspondería a los meses de diciembre a febrero.

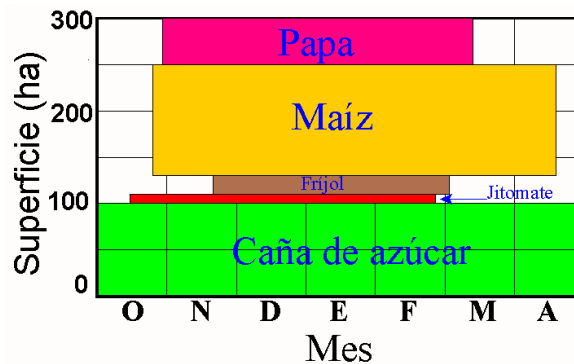


Figura D.1 Plan de cultivos de diseño en los meses de máxima demanda hídrica

D.2.1 Estimación de la evapotranspiración de referencia

Para calcular la ET_0 usando la ecuación de Penman-Monteith se requieren los siguientes datos diarios promedios:

- Temperatura máxima del día
- Temperatura mínima del día
- Humedad relativa promedio del día
- Radiación global acumulada
- Velocidad del viento promedio del día

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

La ecuación de Penman-Monteith usa registros climáticos estándar de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento. Para garantizar los cálculos, las mediciones climáticas se deben realizar a 2 m de altura (o ser convertidas a un valor equivalente) por encima de una superficie extensa de pasto verde, cubriendo el suelo y con suficiente disponibilidad de agua. Los datos geográficos y los promedios diarios históricos de los meses de la estación Los Mochis, Sinaloa, México, usada como referencia para los cálculos del ejemplo que se explicará en este apartado, se presentan en las tablas **D.2** y **D.3**.

Tabla D.2 Datos geográficos de la estación meteorológica Los Mochis

Estación	Los Mochis
Latitud (grados)	24.820 N
Longitud (grados)	109.00 O
Elevación (msnm)	14

Tabla D.3 Datos promedios para un día típico del mes para la estación de los Mochis

Día	Tmax °C	Tmin °C	HR %	R _s		u ₂ m/s
				MJ m ⁻² d ⁻¹	Hr luz	
15/01	27	12.8	74	12.9	6	2.4
15/02	28.4	13.5	70	15.5	6.6	2.4
15/03	30.6	15.1	66	18.7	7.4	2.2
15/04	32.3	15.9	61	19.7	6.9	2.0
15/05	34.1	18.2	62	21.7	7.8	1.8
15/06	35.1	21.3	65	21	7.3	1.8
15/07	36	23.9	74	19.4	6.3	1.9
15/08	35.7	23.8	78	19.0	6.4	1.9
15/09	35.4	23.6	79	17.8	6.4	1.8
15/10	34.5	20.9	76	16.9	7.3	1.7
15/11	30.3	16.5	72	14.3	6.9	1.8
15/12	26.9	13.4	75	12.2	5.9	2.2

Los valores estimados de la evapotranspiración diaria mensual de referencia para un día típico usando la ecuación de Penman-Monteith a partir de datos climáticos de la **Tabla D.3** se presentan en la **Tabla D.4**. Los procedimientos y cálculos usados para estimar la ETo se encuentran en Allen *et al.* (1998). El software CropWat 8.0 para

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

Windows de la FAO realiza dichos cálculos de manera automática a partir de datos climáticos, como los presentados en la **Tabla D.3**. La precipitación acumulada promedio para la zona del ejemplo se presenta en la **Tabla D.5**.

Tabla D.4 Valores diarios típicos mensuales de ETo (mm/día) para Los Mochis, Sinaloa

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
ETo (mm/día)	2.91	3.57	4.42	4.93	5.34	5.34	5.02	4.79	4.42	4.12	3.34	2.74

Tabla D.5 Precipitación mensual acumulada promedio (mm) y diaria (mm/día) observada para Los Mochis, Sinaloa

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Precip (mm)	13.1	18.6	8.4	1.3	5.9	10.4	43.2	90	90.4	33.7	39.3	36.6
Precip (mm/día)	0.42	0.66	0.27	0.04	0.19	0.35	1.39	2.90	3.01	1.09	1.31	1.18

A continuación se muestran los pasos necesarios para el cálculo de la ETo y de los requerimientos de riego de los cultivos utilizando el software CropWat 8.0.

D.2.2 Parámetros para la programación de riego

D.2.2.1 Cultivos

El siguiente cuadro presenta los parámetros requeridos por etapa fenológica para programar el riego: factor de abatimiento, coeficiente de cultivo y duración. Los datos de la **Tabla D.6** han sido calibrados para riego por gravedad en la región de los Mochis, Sinaloa. Ante la falta de parámetros calibrados en campo, una primera fuente de consulta es el manual 56 de la FAO (Allen *et al.*, 1998) o el software CropWat 8.0 (Smith *et al.* 2008) que contiene una base de datos para varios cultivos. Sin embargo, es necesario realizar un ajuste de dichos parámetros, sobre todo para la duración de cada etapa, para ajustarlos a las condiciones locales de interés.

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

Tabla D.6 Parámetros para la programación del riego en la zona de riego de Los Mochis, Sinaloa

Cultivo	Fases														
	Inicial			Desarrollo			Intermedia			Final			Promedio		
	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)	f	Kc	(días)
Caña de azúcar	0.80	0.3	70	-	-	105	0.60	1	110	0.80	0.9	80	0.70	0.7	365
Jitomate	0.60	0.5	30	-	-	25	0.40	1	55	0.60	0.6	25	0.50	0.6	135
Frijol	0.70	0.4	40	-	-	20	0.40	0.9	20	0.70	0.4	30	0.50	0.7	110
Maíz	0.80	0.4	45	-	-	40	0.60	1	60	0.80	0.4	30	0.70	0.7	175
Papa	0.70	0.3	25	-	-	30	0.40	1.15	30	0.70	0.7	20	0.50	0.9	105

D.2.2.2 Suelos

Las constantes de humedad de los suelos son datos requeridos para estimar la humedad aprovechable y programar el riego de los cultivos. Para el Valle del Fuerte de Los Mochis, Sinaloa los datos del suelo se presentan en la **Tabla D.7**.

Tabla D.7 Parámetros promedio de los suelos del Valle del Fuerte, Sinaloa

Parámetro	Valor
Fracción de arcilla	50 %
Fracción de limo	30 %
Fracción de arena	20 %
Materia orgánica	0.8 %
Densidad aparente (Da)	1.2 g/cm ³
θ _{CC} (capacidad de campo)	0.44 cm ³ /cm ³
θ _{PMP} (Punto marchitamiento)	0.29 cm ³ /cm ³
HA (Humedad aprovechable)	0.15 cm ³ /cm ³
Profundidad máxima del suelo	300 cm

D.2.2.3 Sistema de riego

Para el ejemplo de cálculos se asumirá un sistema de riego por surcos con una eficiencia global del 50 %.

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

D.2.3 Requerimientos y programa de riego de los cultivos

Para fines de diseño los datos climáticos usualmente están dados en la forma de valores promedio por un periodo que puede ser una semana, una decena o un mes. Para poder realizar cálculos se tienen que realizar interpolaciones. Para este ejemplo, los datos están dados para un día típico del mes, por lo que por facilidad se asume para todos los días del mes el mismo valor promedio diario (expresado en mm/día) tanto para ET_0 como precipitación a partir de los datos de las **Tablas D.4 y D.5**.

D.2.3.1 Requerimientos de riego y capacidad del sistema para la papa

A continuación se presentan los requerimientos de riego para el cultivo de papa. La **Tabla D.8** presenta los requerimientos de riego para periodos de 10 días (décadas). Las columnas uno (Mes) y dos (Década) definen el inicio de cada periodo de cálculo. La columna tres define la etapa de desarrollo correspondiente al intervalo. El coeficiente de cultivo promedio (K_c) y la ET_0 acumulada para el periodo de 10 días se muestran en las columnas cuatro y cinco, respectivamente. La columna seis calcula la ET_c (evapotranspiración real del cultivo) como producto de ET_0 y K_c . La columna siete (Pe) es la precipitación efectiva acumulada en el periodo. La columna ocho representa el requerimiento de riego en el periodo ($ET_c - Pe$). El RR se toma como cero cuando la precipitación efectiva correspondiente al periodo es igual o mayor a la ET_c .

Tabla D.8 Requerimientos de riego para el periodo para el cultivo de papa

Mes	Década	Etapa	Kc coef	ET_0 mm/día	ET_c mm/déc	Pe mm/déc	RR mm/déc
Nov	3	Inic	0.3	0.94	3.8	4.9	0
Dic	1	Inic	0.3	0.88	8.8	12.3	0
Dic	2	Inic	0.3	0.82	8.2	12.4	0
Dic	3	Des	0.45	1.24	13.7	9.7	4
Ene	1	Des	0.75	2.14	21.4	5.8	15.5
Ene	2	Des	1.04	3.03	30.3	3	27.2
Ene	3	Med	1.17	3.66	40.3	4	36.3
Feb	1	Med	1.17	3.92	39.2	5.9	33.4
Feb	2	Fin	1.17	4.17	41.7	6.7	35.1
Feb	3	Fin	1.05	4.03	32.3	5.4	26.9
Mar	1	Fin	0.84	3.49	34.9	3.8	31.1
Mar	2	Fin	0.72	3.18	3.2	0.3	3.2
Total					277.8	74.1	212.7

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

D.2.3.2 Programa de riego para la papa

La **Tabla D.9** presenta el programa de riegos para el cultivo de papa de acuerdo con los datos del ejemplo, asumiendo una eficiencia de riego global del 50 %. El coeficiente unitario máximo de riego para el cultivo de papa es de 0.81 lps/ha, que corresponde a la fecha 24 de febrero.

Tabla D.9 Programa de riego para el cultivo de papa con fecha e intervalo de riego, y requerimientos de riegos netos y brutos

Fecha	Días desde inicio de riego	Etapas	RR net mm	RR brut mm	Caudal l/s/ha
06-dic	10	Ini	3.5	7	0.08
16-dic	20	Ini	3.3	6.6	0.08
26-dic	30	Des	5.6	11.3	0.13
05-ene	40	Des	13.9	27.7	0.32
15-ene	50	Des	22.2	44.4	0.51
25-ene	60	Med	29.9	59.8	0.69
04-feb	70	Med	32.6	65.2	0.75
14-feb	80	Med	33.7	67.5	0.78
24-feb	90	Fin	35	69.9	0.81
06-mar	100	Fin	32.4	64.8	0.75
Total			212.1	424.2	

La **Figura D.2** presenta gráficamente la distribución de los riegos del cultivo de papa de la **Tabla D.9**. Se presenta también como referencia la humedad disponible (línea roja), la humedad aprovechable (línea café) y la humedad fácilmente aprovechable en la zona de raíces (línea verde).

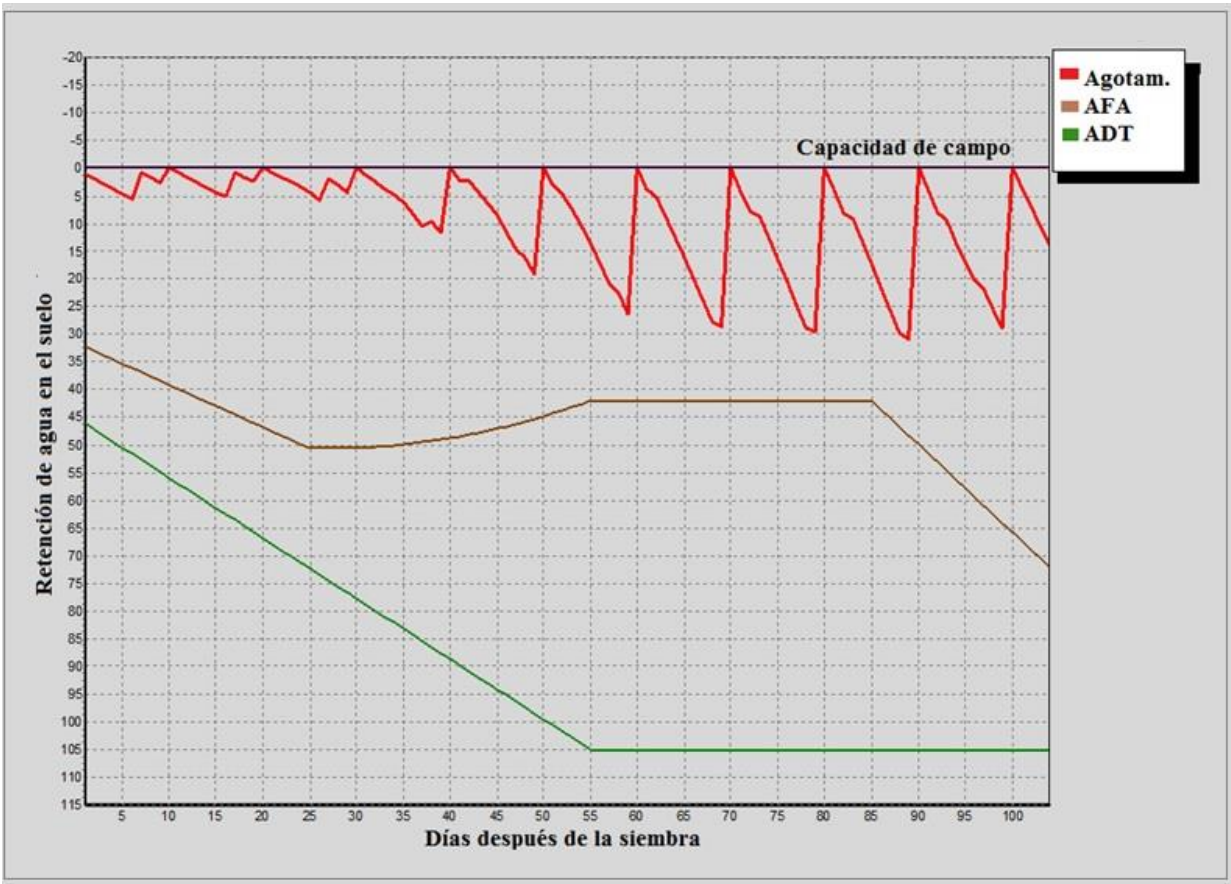


Figura D.2 Variación de la humedad del suelo para el cultivo de papa

D.2.3.2 Requerimientos de riego de la zona de riego

La **Tabla D.10** muestra el resumen para el plan de cultivos propuesto en la **Tabla D.1** y **Figura D.1**, de los requerimientos de riego mensuales por cultivo, requerimientos de riego netos del sistema y del área real cultivada en cada mes.

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

Tabla D.10 Programa de riego para el plan de cultivos propuesto

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Req. de riego (mm/mes)												
Caña de azúcar	14.7	12.1	38.7	77.2	114.1	137	113	68.5	53.4	91	58.2	44.7
Papa	79.1	95.3	34.3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
Jitomate	94.8	67.4	0	0	0	0	0	0	0	19.8	29.9	66.8
Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Req. de riego (mm/mes)												
Frijol	59	60.4	16	0	0	0	0	0	0	0	0.3	2.7
Maíz grano	75.7	85	122.8	45.7	0	0	0	0	0	6	3.6	13.1
Req. de riego Netos sistema												
en mm/día	1.8	2.2	2.2	1.5	1.2	1.5	1.2	0.7	0.6	1.1	0.7	0.7
en mm/mes	55.5	60.4	68.8	43.8	37.7	45.1	37.3	22.6	17.6	33	21.5	22.8
en l/s/ha	0.21	0.25	0.26	0.17	0.14	0.17	0.14	0.08	0.07	0.12	0.08	0.09
Area Irrigada (% del área total)	100	100	97	73	33	33	33	33	33	76	83	100
Req. de riego área real												
(l/s/ha)	0.21	0.25	0.26	0.23	0.43	0.53	0.42	0.26	0.21	0.16	0.1	0.09

D.3 Cálculo de los requerimientos de riego de los cultivos utilizando CropWat

El sistema computacional CropWat desarrollado para el sistema operativo MS Windows por la FAO (Smith, 2008) estima los requerimientos de riego de los cultivos con fines de planeación de zonas de riego. Dicho sistema ha sido referente para el cálculo de requerimientos de riego de zonas de riego. Los cálculos se basan en la estimación de la evapotranspiración potencial de los cultivos a partir de la evapotranspiración de referencia calculada por el método de Penman-Monteith con datos climáticos diarios, decadiarios o mensuales. Esta estimación es utilizada para calcular los requerimientos de riego de los cultivos, que CropWat en su versión en español denomina “Requerimientos de agua de los cultivos”, y para la programación del riego de acuerdo con un plan de cultivos de una zona de riego. Los archivos de instalación del sistema CropWat están disponibles sin costo en la página de la FAO http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_crowpat.html.

El software CropWat en su versión 8.0 para Windows fue desarrollado por Joss Swennenhuis para la Unidad de Fomento y Gestión de las Aguas de la FAO. CROPWAT 8.0 se basa en las versiones DOS CROPWAT 5.7 de 1992 y CROPWAT 7.0 para

Windows de 1999. CROPWAT 8.0 para Windows incluye una serie de características nuevas y actualizadas, que incluyen las siguientes:

- Entrada de datos climáticos en intervalos mensuales, diarios o decadiarios para el cálculo de la ETo
- Compatibilidad con versiones anteriores de tal manera que permite el uso de la información de la base de datos CLIMWAT
- Posibilidad de estimar los datos climáticos en caso de no contar con los valores medidos
- Cálculos diarios y decadiarios de los requerimientos de agua del cultivo basados en algoritmos de cálculo actualizados incluido el ajuste de los valores del coeficiente de cultivos
- Cálculo de las necesidades de agua de cultivos y la programación de riego para los cultivos y para arrozales
- La programación de riego puede ser calculada para cada cultivo o para varios cultivos; además se puede seleccionar entre intervalos diarios y decadiarios de tiempo para los cálculos
- Programaciones de riego ajustables e interactivas con el usuario
- Tablas de balances diarios de agua en el suelo
- CropWatW 8.0 puede calcular los requerimientos de riego para una zona de riego de hasta 20 cultivos
- Fácil guardado y recuperación de sesiones y de las programaciones de riego definidas por el usuario, lo que facilita la generación y comparación de diferentes escenarios bajo diferentes alternativas de manejo del riego, clima, suelo y cultivos
- Presentaciones tabulares y gráficas de los datos de entrada, requerimientos de agua de los cultivos y programaciones de riego
- Sencilla importación/exportación de datos y gráficos a través del portapapeles o de archivos de texto ASCII
- Rutinas de impresión extensivas apropiadas para todas las impresoras basadas en Windows
- Sistema de ayuda sensible al contexto

Todos los procedimientos de cálculo utilizados en CROPWAT 8.0 se basan en las directrices de la FAO, tal como se establece en la publicación Núm. 56 de la serie Riego y Drenaje de la FAO "Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos". A continuación se describe el CropWat para Windows v8.0.

D.3.1 Pantalla principal de sistema

La pantalla principal de CropWat versión 8.0 para Windows se muestra en la **Figura D.3**. El menú principal desplegable, con las opciones del sistema, se muestra en la parte superior izquierda de la ventana. Directamente abajo del menú principal hay una serie de iconos de la barra de herramientas que permiten acceder y activar directamente las opciones del menú principal. En la parte inferior de la ventana se muestra la barra de información con mensajes sobre el estado del sistema y opciones activas, incluyendo los archivos activos de datos de ET_0 , precipitación, configuración de K_c y patrón de cultivo, parámetros del suelo y fecha de siembra.

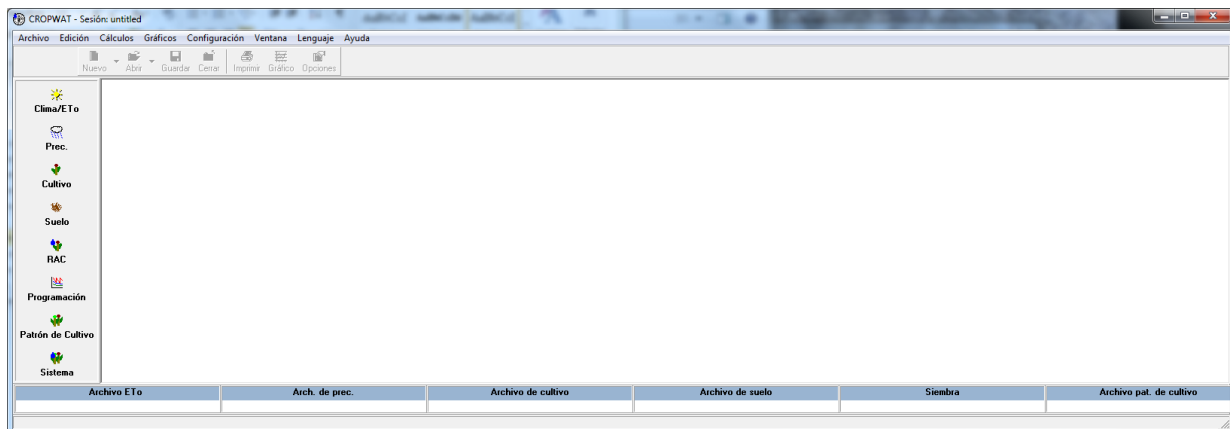


Figura D.3 Pantalla principal de CropWat para Windows v8.0 antes de cargar datos

Siguiendo con el ejemplo para obtener los requerimientos y la programación del riego de los cultivos, se muestra a continuación el proceso secuencial de cada una de las pantallas hasta obtener los resultados de las necesidades de riego de agua de los cultivos. En la versión 8.0 de CropWat para Windows se puede elegir el idioma preferido en la barra de herramientas superior. Es preferible seleccionar el idioma español, escogiendo “Spanish” del menú intitulado “Language”, para que las instrucciones, etiquetas y textos en todos los cuadros y gráficos del software sean generados en español.

Antes de iniciar con la captura de datos, es conveniente darle un nombre a la nueva sesión creada automáticamente cuando se abrió la ventana principal del CropWat por primera vez. De la barra del menú superior se debe escoger al lado izquierdo “**Archivo**” y seleccionar la opción “**Guardar sesión como...**”, lo que abre una nueva ventana donde

se nombrará a la sesión actual; en el caso de nuestro ejemplo, se llamará “**Mochis.ses**” (Figura D.4).

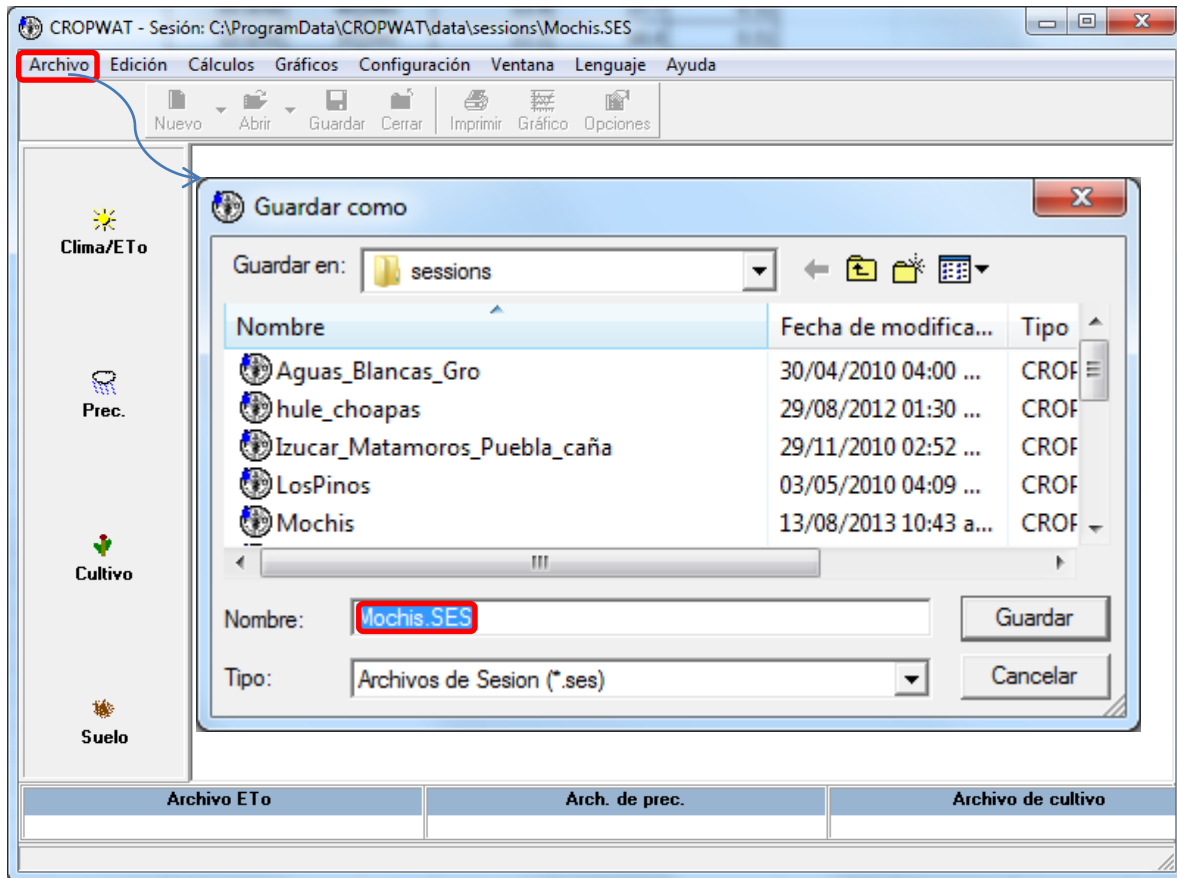


Figura D.4 Guardar la nueva sesión “Mochis.ses”

Aunque se pueden asumir las opciones de programación del riego que el sistema considera por omisión, los diversos criterios disponibles asociados a los cálculos de la ETo, precipitación efectiva y programación del riego se pueden configurar seleccionando “**Opciones**” del menú “**Configuración**” en la barra superior del software (Figura D.5). Primero, en la pestaña “**Clima/ETo**”, bajo “**Configuración de datos**” se consta si la ETo se debe calcular a partir de datos completos de clima o si solamente se utilizarán datos de la temperatura para dicho cálculo (el software generará valores estimados de los demás variables de clima). A continuación se debe constatar si se cuenta con datos de temperatura mínima y máxima, o solamente de temperatura media. En la parte baja de la ventana se deben definir cuáles son las “**Unidades**” de las variables de clima disponibles para el cálculo de la ETo.

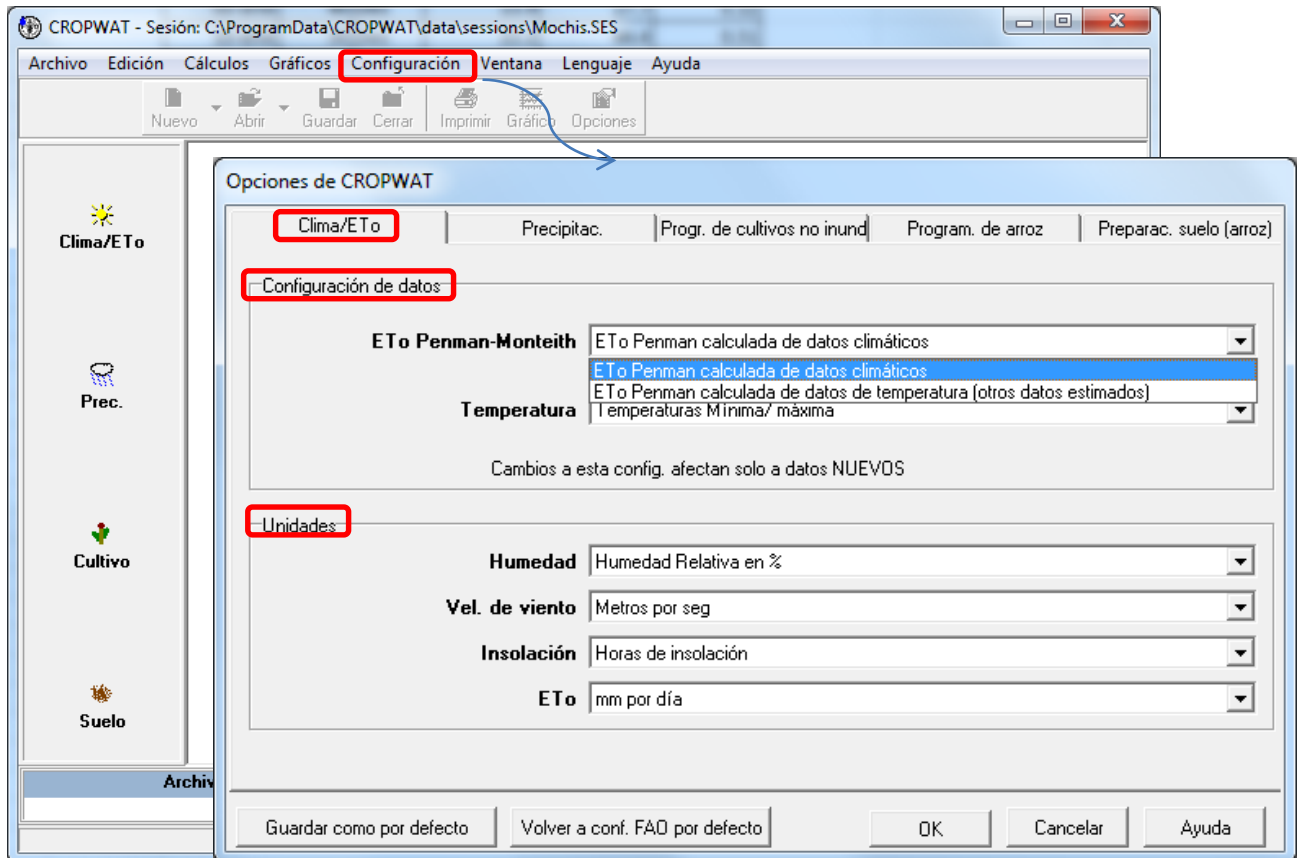


Figura D.5 Configuración de opciones de CropWat

En la pestaña “**Precipitac.**” de la misma ventana de “**Opciones de CROPWAT**” se debe definir el método preferido para el cálculo de la precipitación efectiva en la estimación del requerimiento de riego del cultivo (**Figura D.6**). Usualmente, como es el caso de nuestro ejemplo, se escoge el método del Servicio de Conservación de Suelos de la USDA.

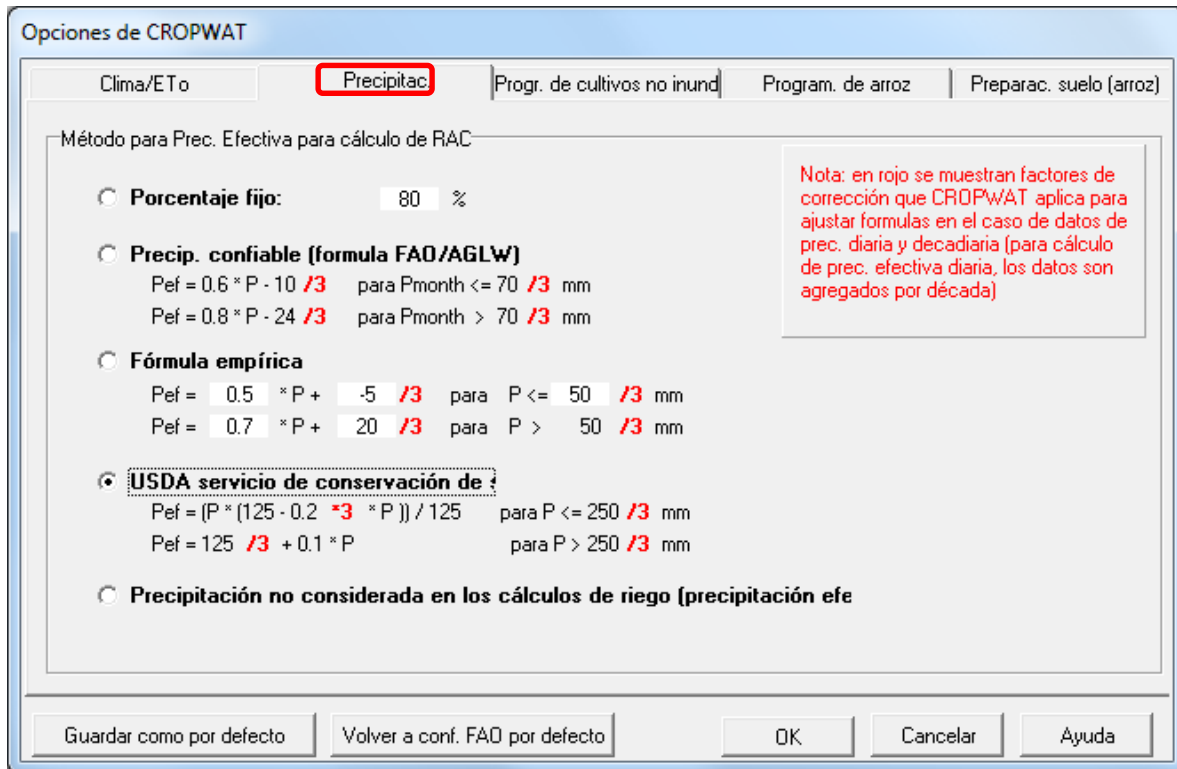


Figura D.6 Configuración de método de para calcular la precipitación efectiva

Finalmente, en la pestaña “**Prog. de cultivos no inund.**” se deben configurar los criterios de programación de riego para cultivos no inundados: método para determinar intervalo de riego, intervalos de riego por etapa, método de aplicación de riego y la eficiencia estimada de riego (Figura D.9). En el caso de nuestro ejemplo, se escogerá “**Regar a intervalo fijo por etapa**”, intervalos de 10 días para todas las etapas, aplicación de riego “**Reponer a capacidad de campo**”, y “**Eficiencia de riego**” 50 %. En caso de configurar para el cultivo de arroz, se utilizará la pestaña “**Program. de arroz**”.

Al final del relleno de las pestañas de esta ventana, es conveniente “**Guardar como por defecto**” la configuración (botón inferior izquierda, Figura D.7), ya que de esta forma se puede reutilizar en sesiones subsecuentes sin tener que reconfigurar las opciones de nuevo.

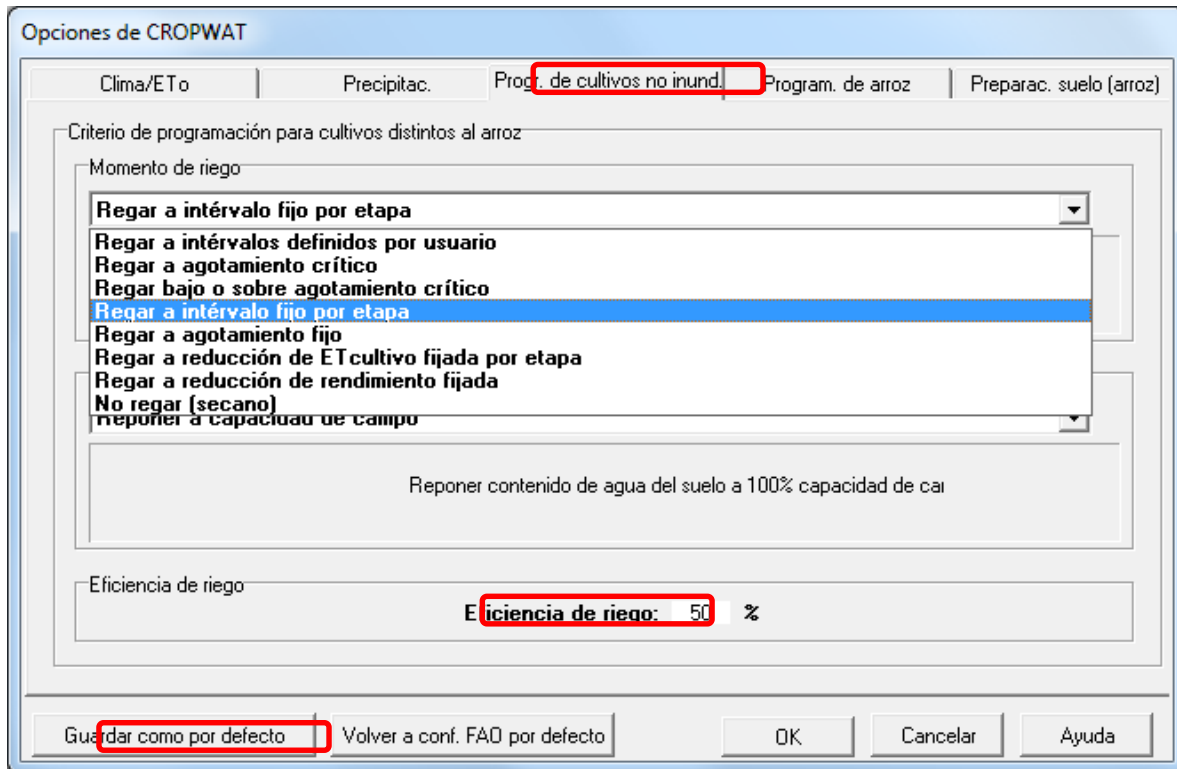


Figura D.7 Configuración de programación de riego para cultivos no inundados

D.3.2 Datos climáticos

Para estimar los requerimientos de riego de los cultivos en el software CropWat es necesario introducir los datos climáticos obtenidos de estaciones meteorológicas. Para capturar e introducir los datos se utiliza el icono “Clima/ETo” que se muestra en la barra de módulos a la izquierda superior en la **Figura D.8**. En nuestro ejemplo, se introducen el nombre de la estación, país, altitud y coordenadas de la estación Los Mochis, así como los datos climáticos.

Los datos que se introducen son promedios diarios mensuales y corresponden a los valores de las temperaturas máximas y mínimas, humedad del aire, velocidad del viento y horas con insolación. Los datos introducidos se pueden guardar en un archivo de datos con la extensión *.PEM. Una vez introducidos todos los datos climáticos de los doce meses, CropWat calcula automáticamente el valor de la ETo para cada mes (última columna de la tabla a la derecha). Los archivos de datos de clima y ETo se guardarán por defecto en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\climate”.

En caso que se desee utilizar datos diarios o decadiarios (cada 10 días) de clima, se pueden ingresar oprimiendo la flecha al lado derecho del botón “Nuevo” después de

activar el icono “Clima/ETo”, y escogiendo la opción correspondiente del menú emergente. El mismo método se puede utilizar para ingresar directamente valores medidas de la ETo diaria, decadiaria o mensual.

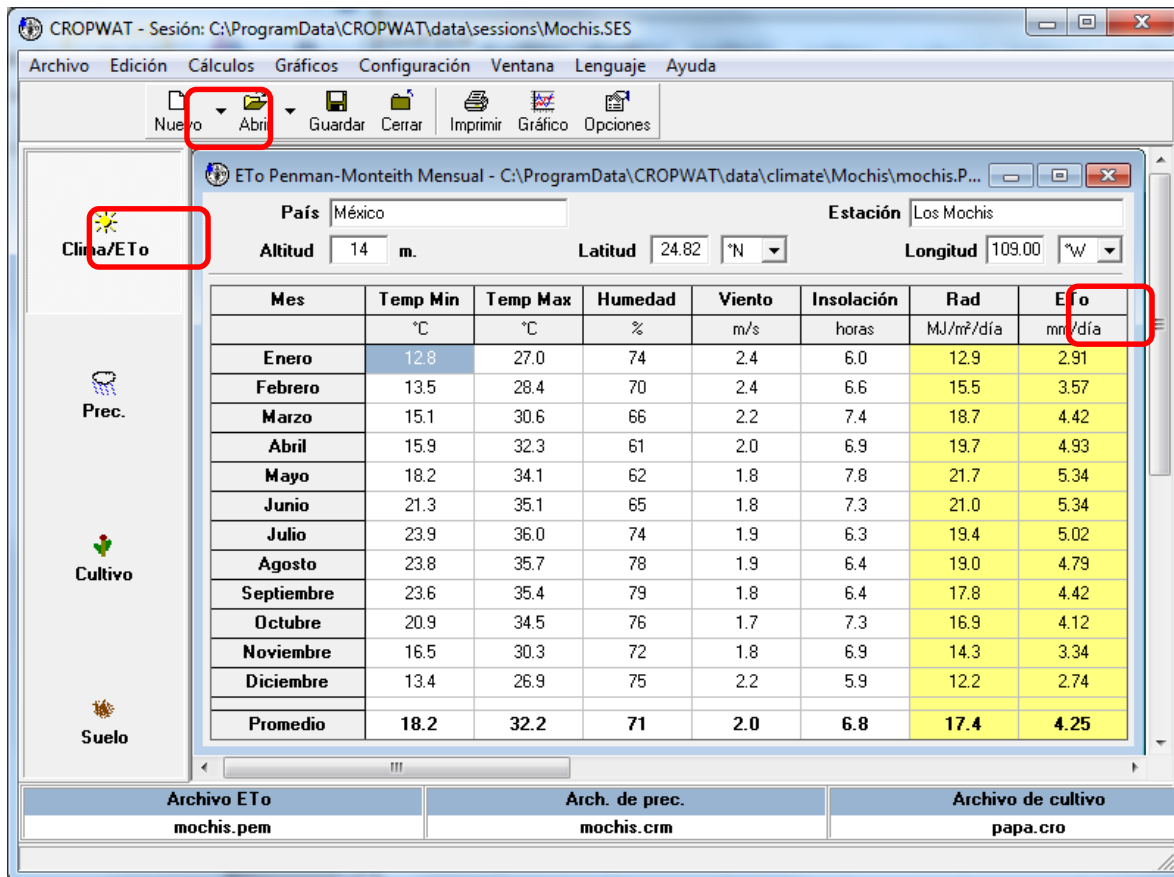


Figura D.8 Introducción de los datos climáticos

En el segundo icono (nube pequeña intitulada “Prec.”) de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (Figura D.9) se introducen los datos de la precipitación y el software CropWat calcula automáticamente la precipitación efectiva, usando el método configurado anteriormente (Figura D.6). Los datos capturados de precipitación se graban por defecto con la extensión “*.CRM”, en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\rain”. En caso de que se cuente con datos diarios o decadiarios (cada 10 días) de precipitación, se puedan ingresar oprimiendo la flecha al lado derecho del botón “Nuevo” después de activar el icono “Prec.”, y escogiendo la opción correspondiente del menú emergente.

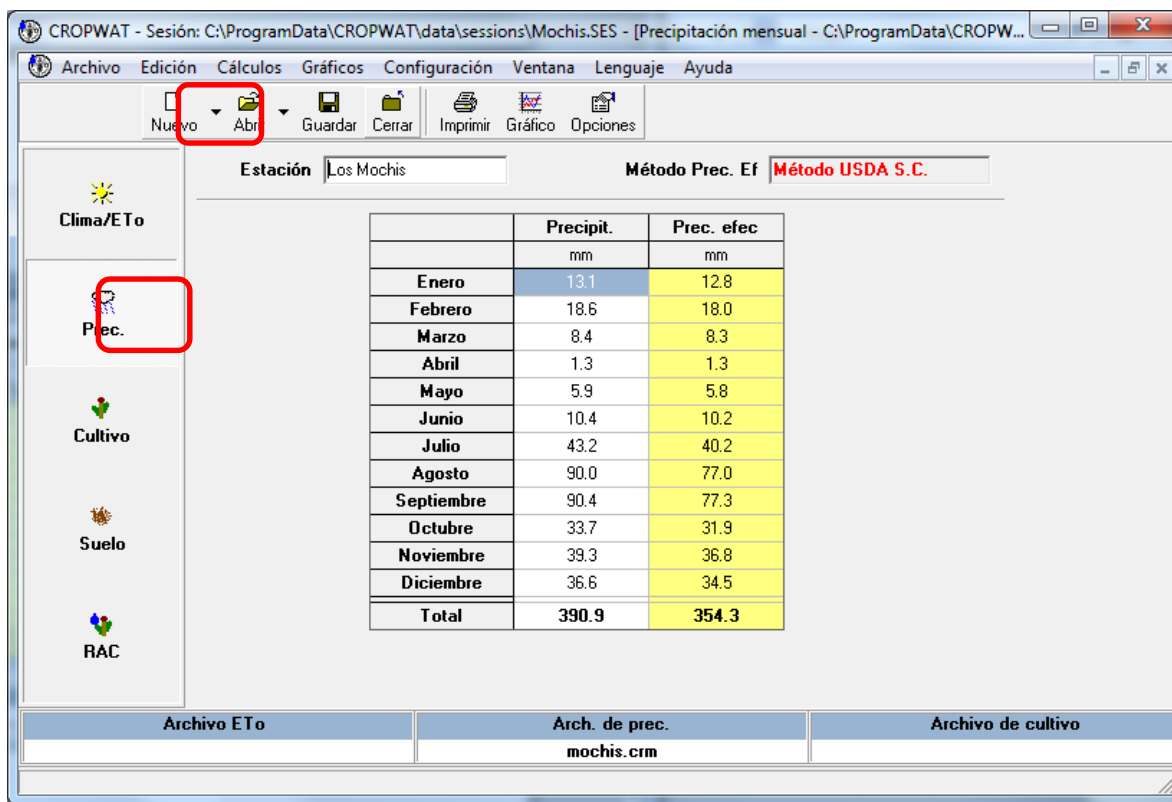


Figura D.9 Introducción de los datos de precipitación

D.3.3 Cultivos

La captura de los parámetros de cultivo se activa con el icono “**Cultivo**” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat. Los datos de cultivo son: nombre del cultivo, fecha de siembra, los coeficientes Kc, la duración de cada etapa fenológica del cultivo, la profundidad de raíz y el factor de abatimiento. Una vez que se han capturado los datos del cultivo se pueden guardar en un archivo del tipo “*.CRO” almacenado por defecto en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\crops”. La **Figura D.10** muestra la ventana de captura de los datos de cultivo para el ejemplo del cultivo de papa, sembrado el 27 de noviembre en Los Mochis (**Tabla D.6**).

Después de capturar y guardar los datos de cultivo para cada cultivo en el padrón de la zona de riego de interés, se utiliza el icono “**Padrón de cultivo**” (**Figura D.11**) de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat para completar el plan de cultivos, seleccionando la fecha de siembra y el porcentaje del área total sembrado en cada uno de los cultivos, con base en los datos de la **Tabla D.1**. Los archivos de datos de cultivo (*.CRO) capturados y guardados anteriormente se cargan seleccionando el icono “...” en cada renglón del plan de cultivos. Se pueden considerar

hasta 20 cultivos para una misma parcela o zona de riego. Finalmente, cuando se hayan seleccionado todos los cultivos de los que se desean obtener las necesidades de agua y la programación del riego, se puede guardar el archivo asignando un nombre con la extensión *.PAT. Este archivo tendrá la información del plan de cultivos para la zona de riego y se guarda por defecto en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\sessions”.

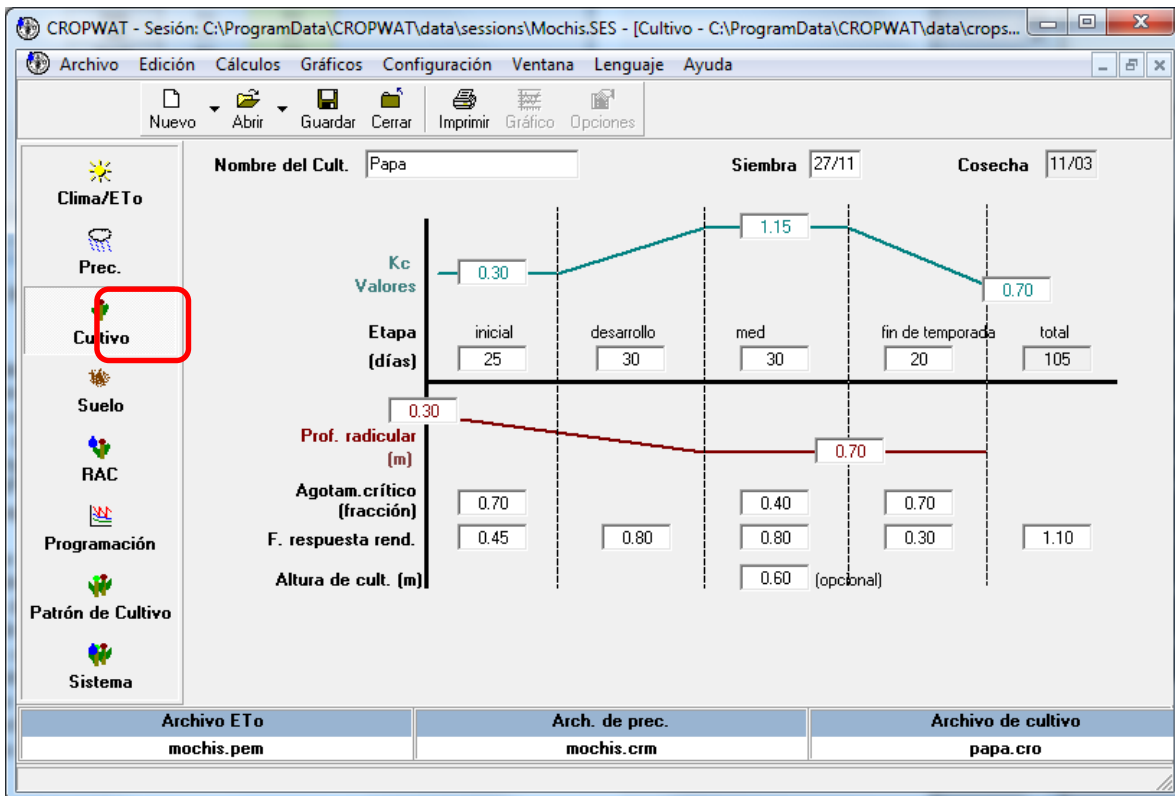


Figura D.10 Captura de parámetros del cultivo (papa)

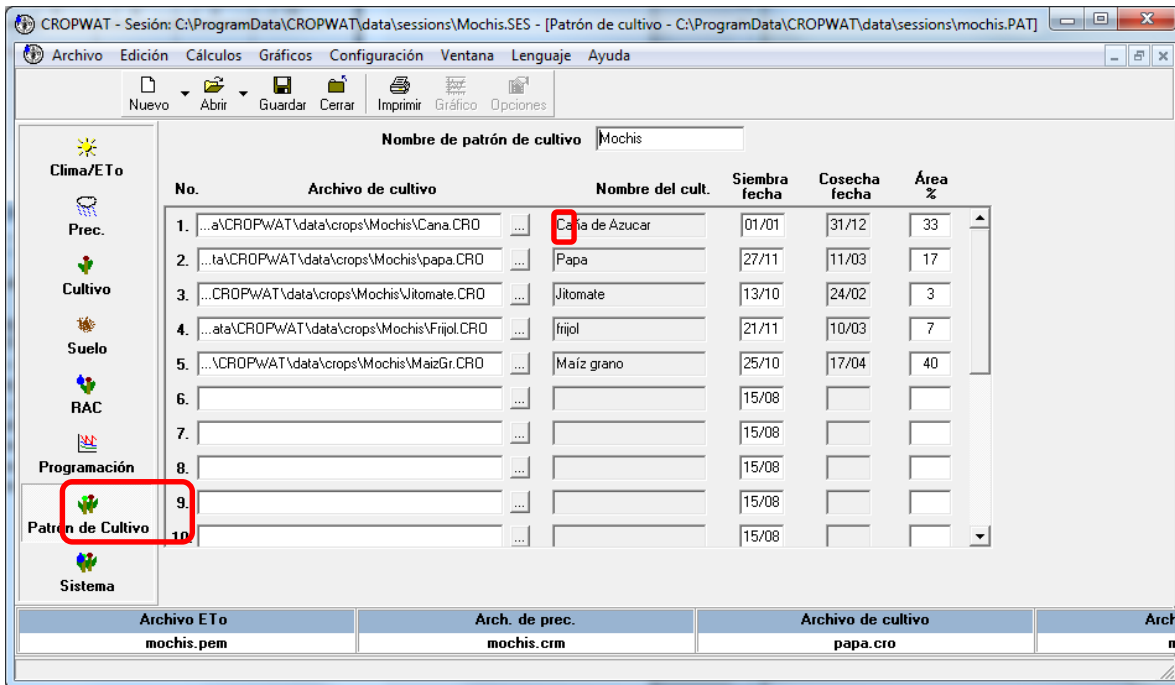


Figura D.11 Captura del padrón de cultivos

D.3.4 Suelos

Los datos del suelo se capturan en la ventana que se activa a través del icono “Suelo” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (**Figura D.12**). Los datos requeridos son: total de la humedad disponible en el suelo, tasa de infiltración máxima de la lluvia, profundidad máxima de raíz, porcentaje de agotamiento inicial de humedad del suelo y valor de la humedad inicial disponible en el suelo. El archivo generado se puede guardar en un archivo con la extensión “*.SOI”, que por defecto se almacenará en el directorio “C:\ProgramData\CROPWAT\data\soils”.

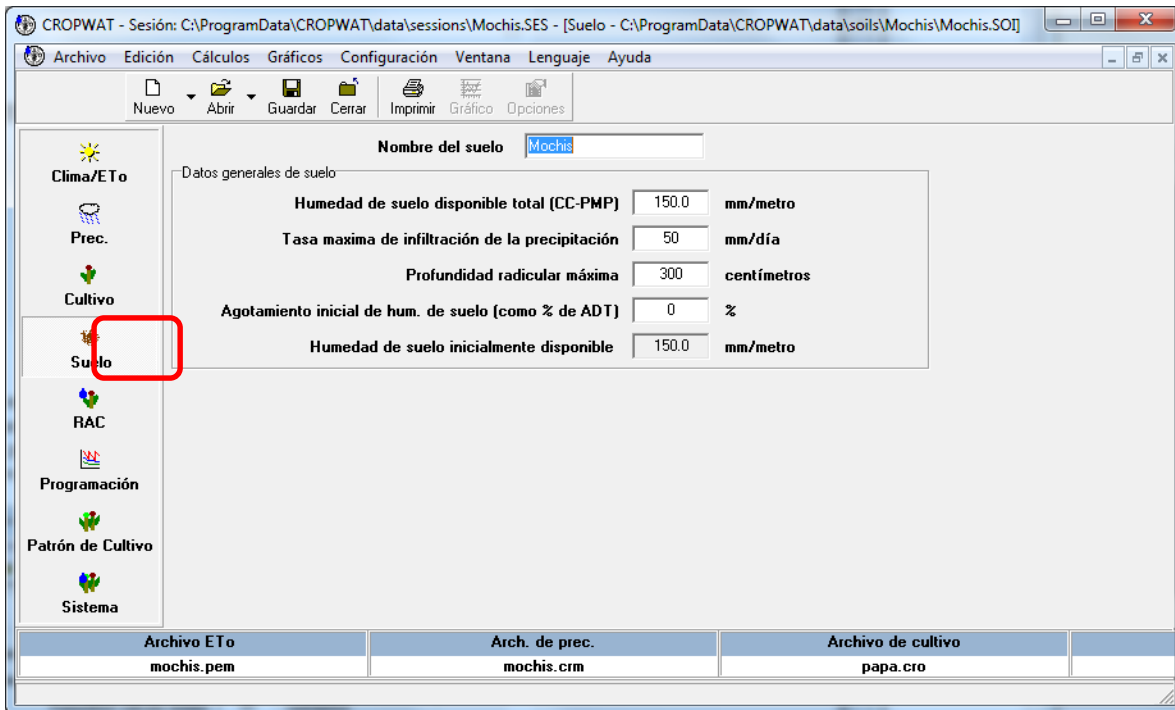


Figura D.12 Captura de los parámetros del suelo en el sistema CropWat

D.3.5 Requerimientos y programación del riego

Cuando se han introducido todos los datos climáticos, de cultivo, suelo y zona de estudio y se han configurado los métodos de cálculo, el sistema CropWat está listo para mostrar los datos activos y los resultados de los cálculos, ya sea por medio de tablas o gráficas. Los resúmenes tabulares de los datos de clima, ETo, precipitación total y efectiva ya se mostraron en las **Figuras D.8 y D.9**. El resumen de los requerimientos de riego del cultivo se muestra usando el icono “**RAC**” de la barra de módulos a la izquierda de la ventana principal de CropWat (**Figura D.13**).

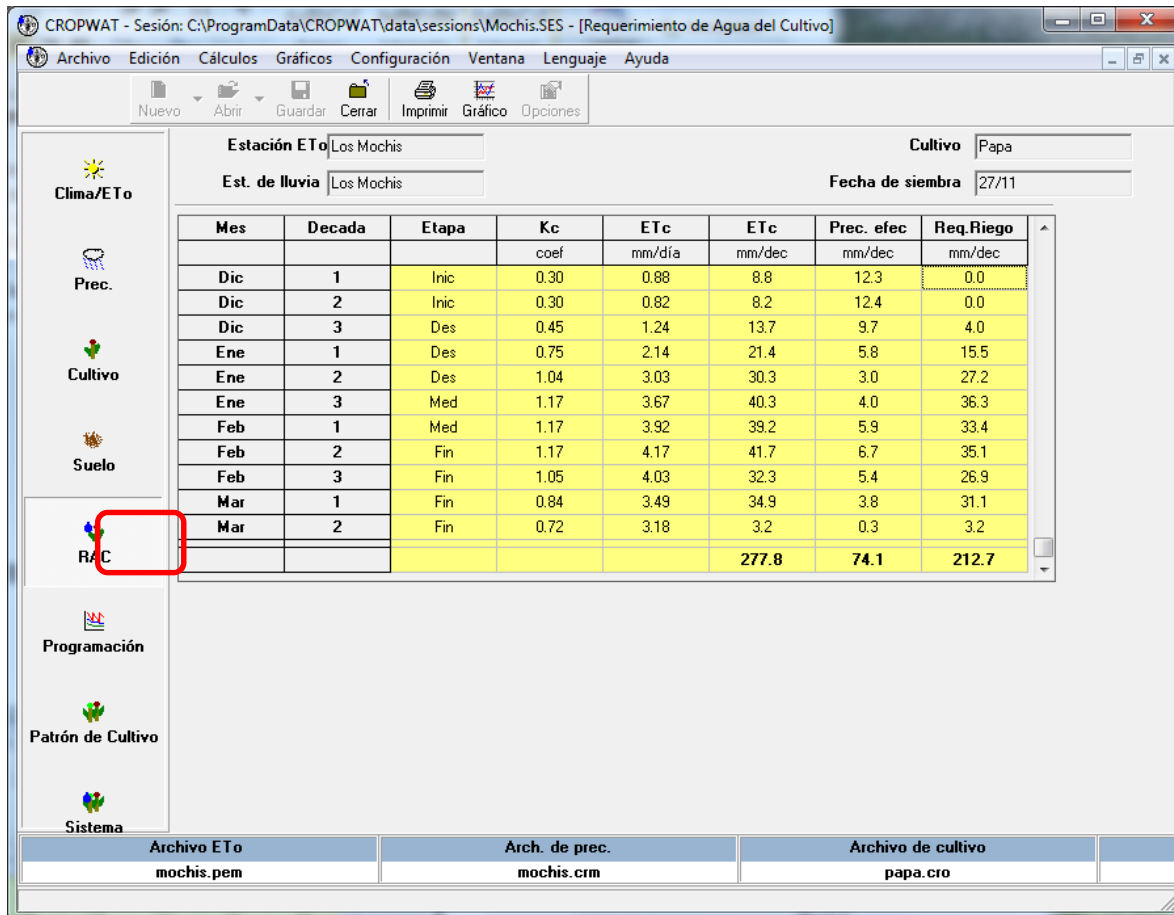


Figura D.13 Resumen del requerimiento de riego para cultivo de papa, Los Mochis

El programa de riegos para el ejemplo del cultivo de papa en la zona de Los Mochis se muestra en la **Figura D.13**, y se activa usando el icono “**Programación**”. El resumen de los requerimientos y del programa de riego para todos los cultivos del plan de la zona de riego se puede visualizar para el año agrícola usando el icono “**Sistema**” (**Figura D.14**).

Los resúmenes antes mencionados se pueden exportar en un formato fácilmente pegado a una hoja de cálculo o documento de Word, usando el botón “**Edición**” y escogiendo “**Copiar Tabla**” y “**Solo datos**” o “**Datos y encabezamientos**” en el menú superior de la ventana principal de CROPWAT (**Figura D.14**).

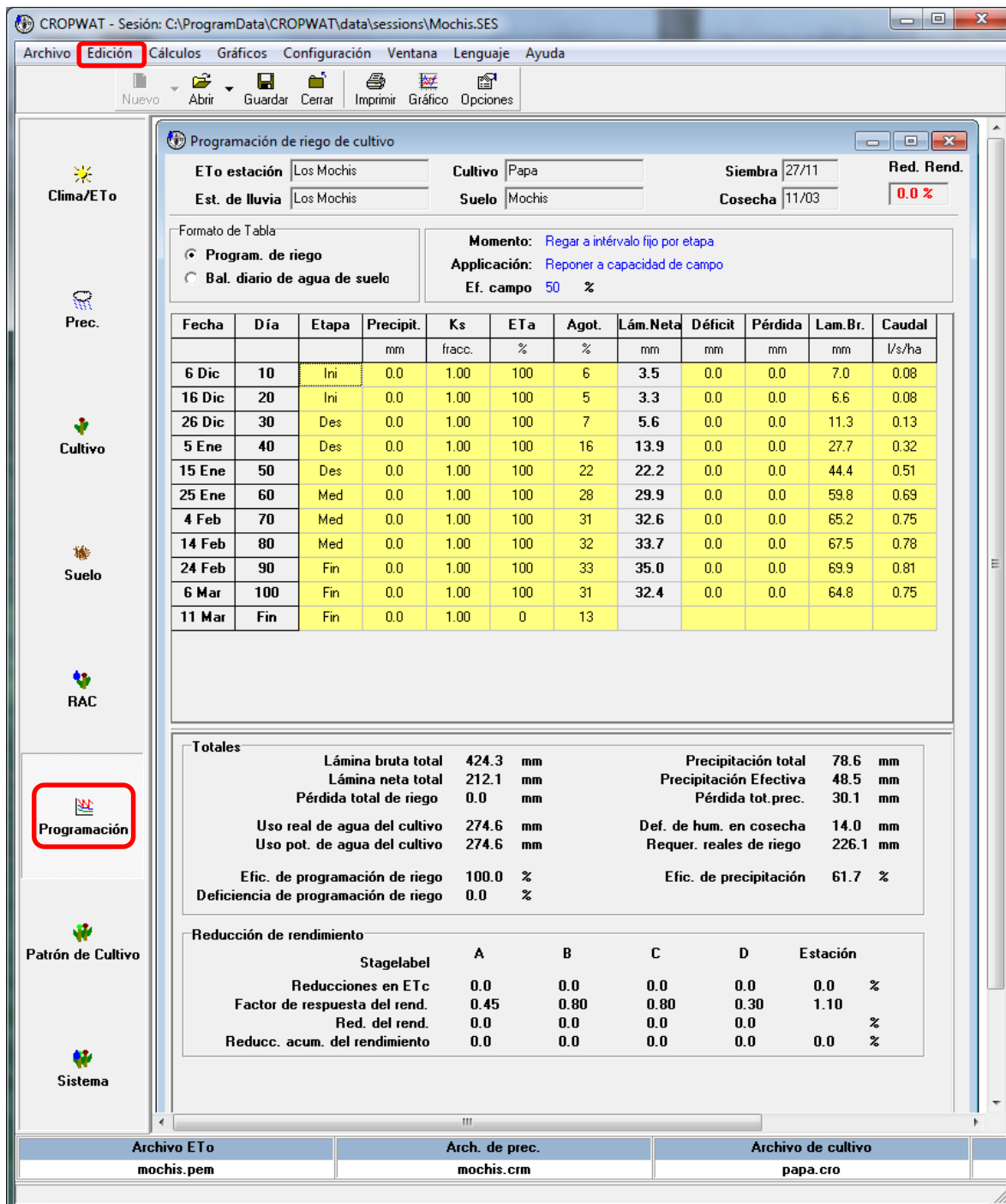


Figura D.14 Resumen de programación del riego para el cultivo de papa, Los Mochis

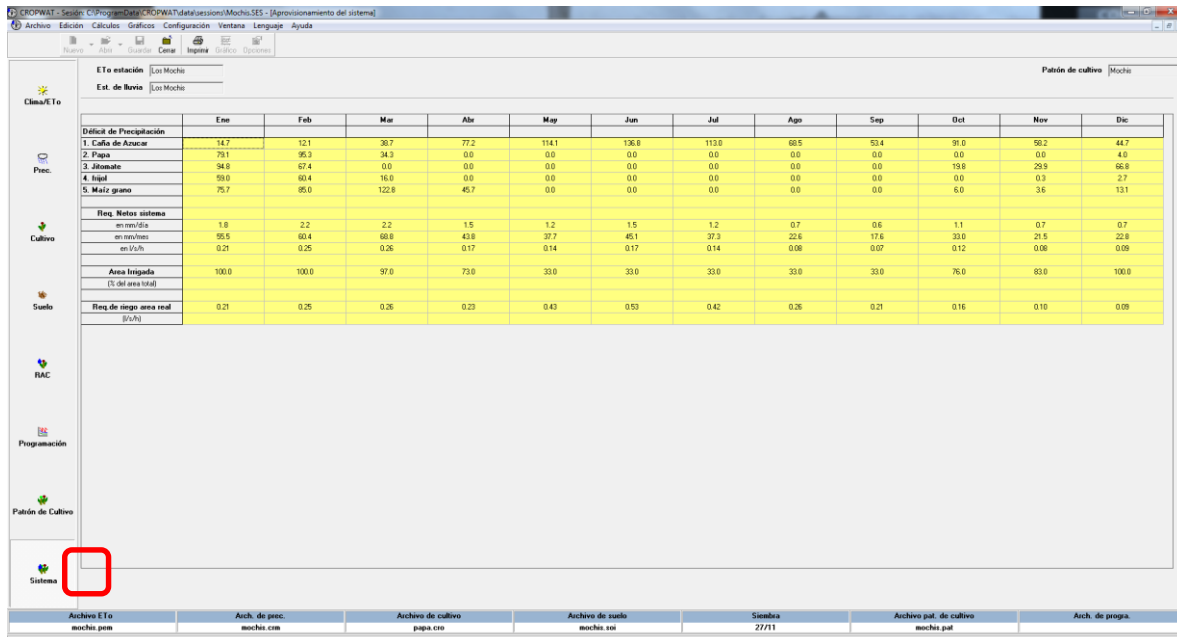


Figura D.15 Resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis

Adicionalmente, con el botón “**Gráficos**” se pueden generar gráficos simples de los datos de clima, ET_o, precipitación, requerimientos y programación de riego para cada cultivo (Figura D.16). Las figuras D.16 a D.19 muestran las gráficas de las variables climáticas y de la evapotranspiración de referencia para la estación meteorológica de la zona de riego de Los Mochis.

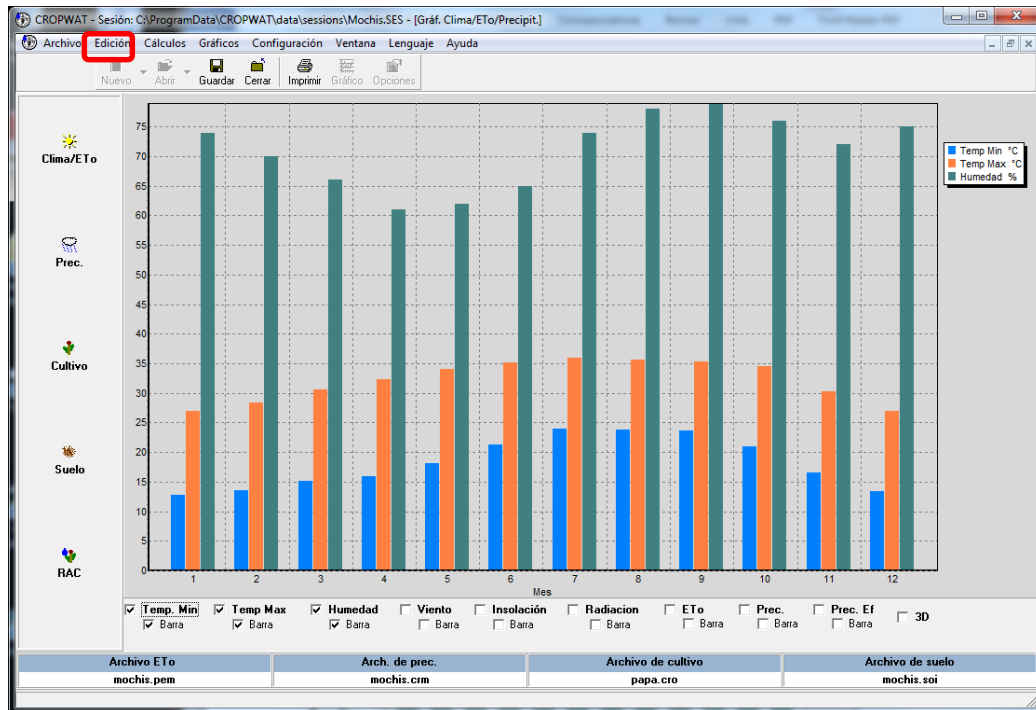


Figura D.16 Gráfica de la temperatura mínima y máxima mensual para la estación de Los Mochis

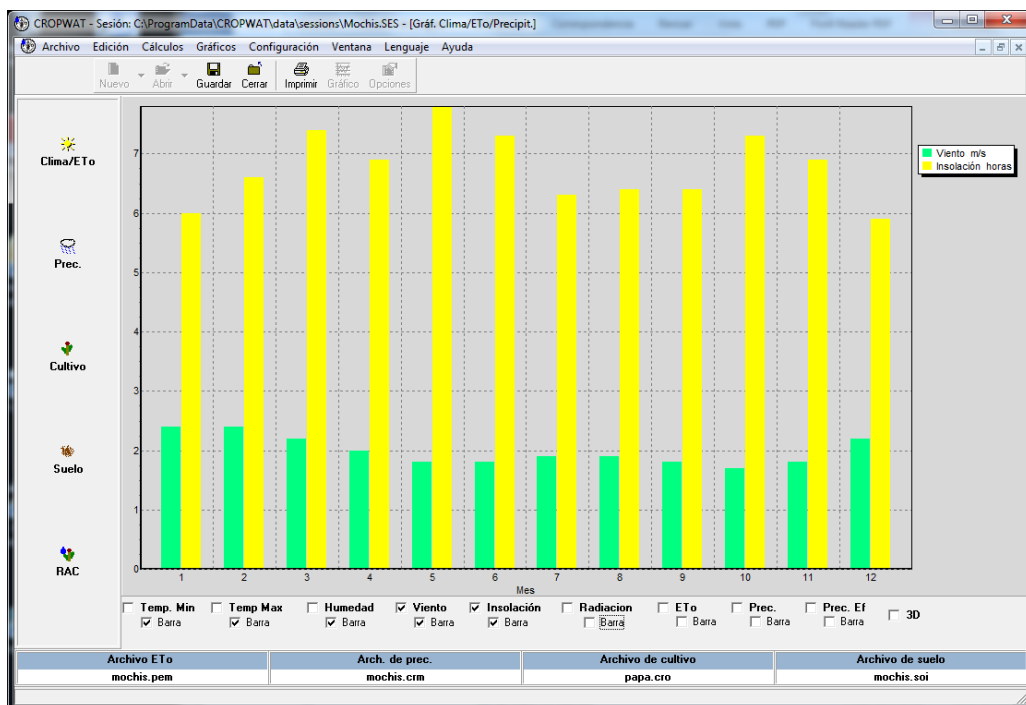


Figura D.17 Gráfica de la velocidad del viento y insolación mensual para la estación de Los Mochis

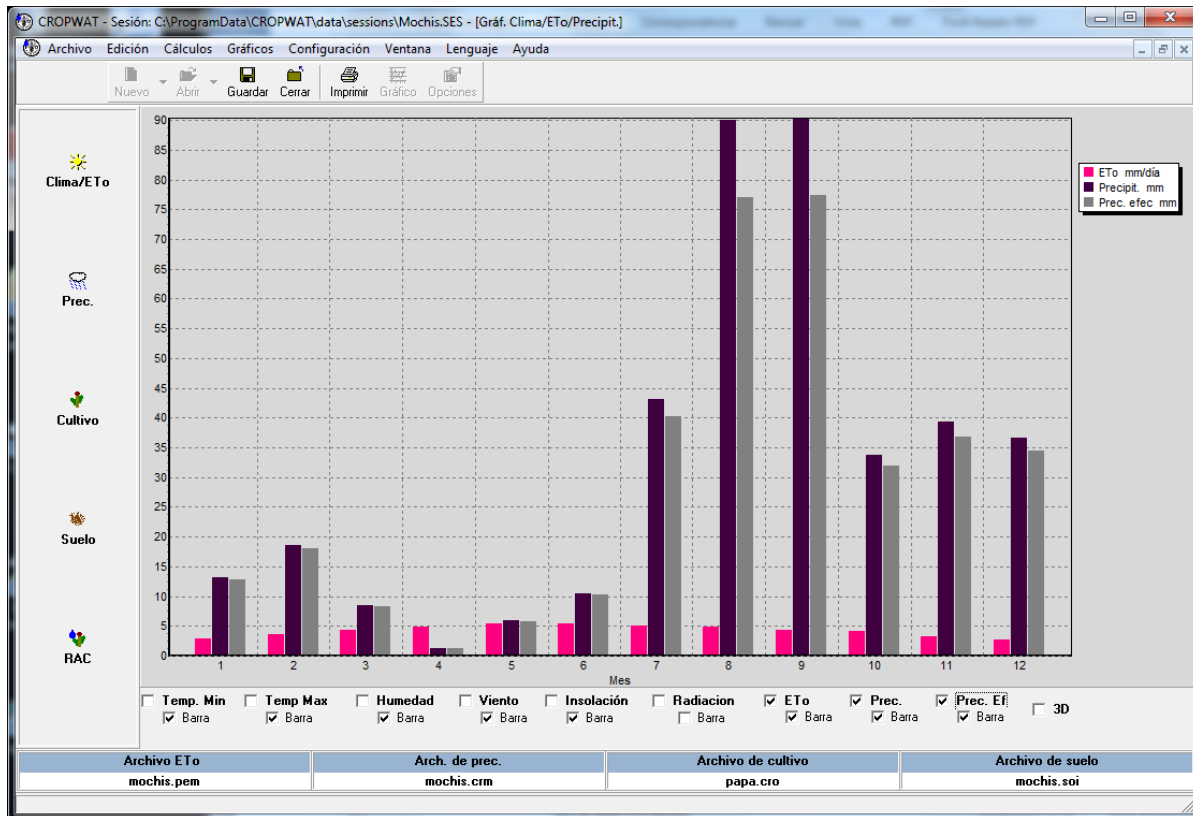


Figura D.18 Gráfica de la evapotranspiración de referencia, precipitación total y efectiva mensual para la estación de Los Mochis

La **Figura D.19** muestra la gráfica de la evapotranspiración real y del requerimiento de riego para el cultivo de papa, mientras que la gráfica de la programación del riego y del déficit de humedad del suelo para el cultivo de papa se muestra en la **Figura D.19**. Las gráficas generadas en CropWat se pueden exportar en un formato que se puede pegar a una hoja de cálculo o documento de Word, de manera similar a la exportación de resúmenes, usando el botón **“Edición”** en el menú superior de la ventana principal de CROPWAT y escogiendo del menú desplegable **“Copiar gráfico”** y **“Como mapa de Bits”** o **“Como metarchivo mejorado”** (Figura D.20).

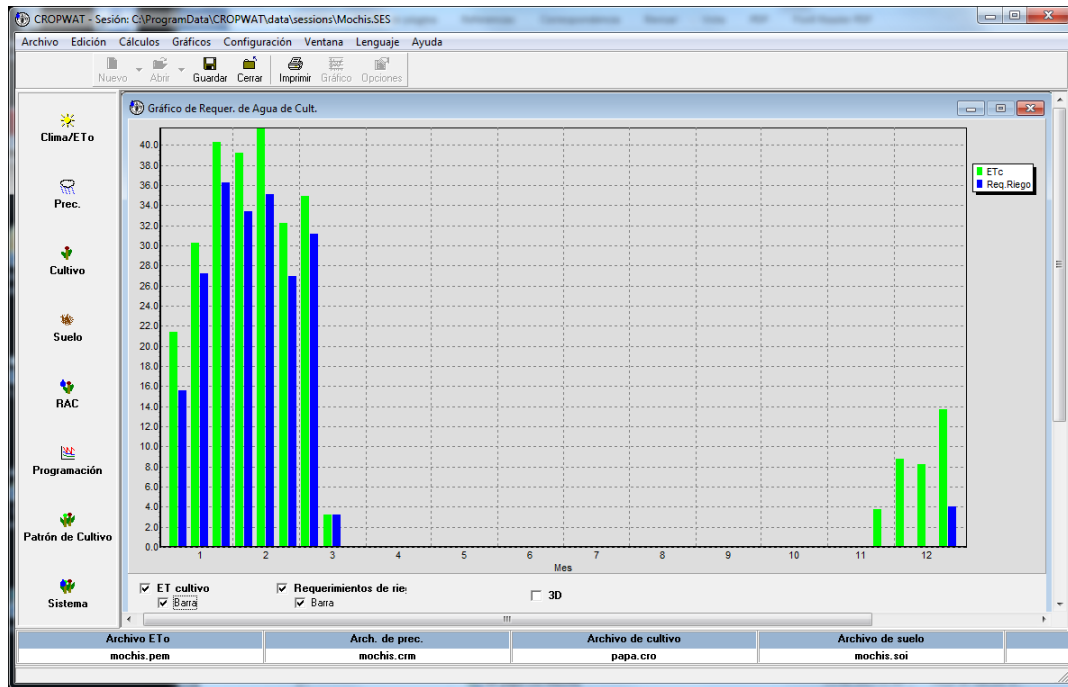


Figura D.19 Gráfica de la evapotranspiración real y requerimiento de riego para papa

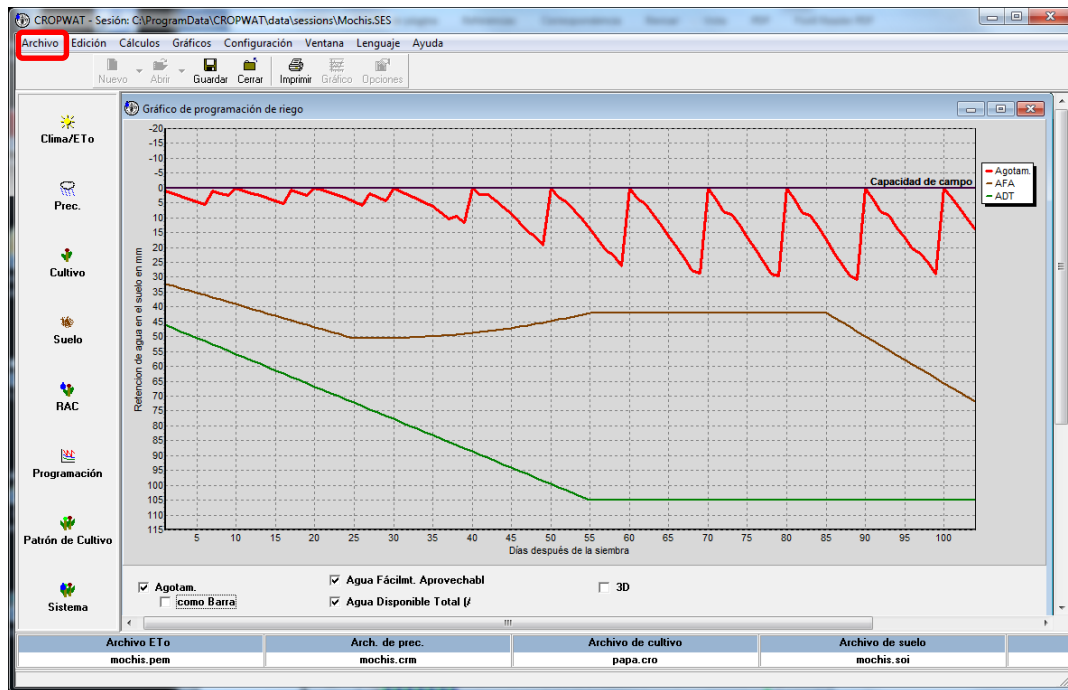


Figura D.20 Gráfica del programa de riegos y el déficit de humedad de agua en el suelo para papa

Calendarización del riego: teoría y práctica	Anexo D. Ejemplo del cálculo de los requerimientos de riego usando CROPWAT
--	--

La **Tabla D.11** muestra la tabla exportada de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis, usando el cuadro desplegado en la **Figura D.15**. Con la información obtenida en este cuadro se pueden tomar decisiones para planificar y diseñar pequeñas zonas de riego. Para planear las zonas de riego es necesario conocer los requerimientos de riego pico de la zona de acuerdo con un plan de cultivos, con la finalidad de diseñar la infraestructura hidráulica de riego

Para el caso de Los Mochis los valores máximos se presentan cuando todos los cultivos se encuentran en desarrollo y ocupan entre 90 y 100 % del área sembrada de la zona de riego, el valor más alto del requerimiento de riego neto de los cultivos se presenta en el mes de marzo con un valor de 68.8 mm/mes, mientras que el coeficiente unitario de riego más alto se presenta en junio con 0.53 lps/ha. Los valores promedio durante el año agrícola para satisfacer los requerimientos de riego son de 466.1 mm/año, con un coeficiente unitario promedio de riego de 0.26 lps/ha, considerando una eficiencia del 50 % para el sistema de riego.

Tabla D.11 Tabla exportada de CropWat con resumen de programación del riego para el padrón de cultivos de la zona de riego de Los Mochis

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Déficit de precipitación												
1. Caña de azúcar	14.7	12.1	38.7	77.2	114.1	136.8	113	68.5	53.4	91	58.2	44.7
2. Papa	79.1	95.3	34.3	0	0	0	0	0	0	0	0	4
3. Jitomate	94.8	67.4	0	0	0	0	0	0	0	19.8	29.9	66.8
4. Frijol	59	60.4	16	0	0	0	0	0	0	0	0.3	2.7
5. Maíz grano	75.7	85	122.8	45.7	0	0	0	0	0	6	3.6	13.1
Requerimientos netos del sistema												
en mm/día	1.8	2.2	2.2	1.5	1.2	1.5	1.2	0.7	0.6	1.1	0.7	0.7
en mm/mes	55.5	60.4	68.8	43.8	37.7	45.1	37.3	22.6	17.6	33	21.5	22.8
en l/s/h	0.21	0.25	0.26	0.17	0.14	0.17	0.14	0.08	0.07	0.12	0.08	0.09
Área irrigada												
(% del área total)	100	100	97	73	33	33	33	33	33	76	83	100
Req. de riego área real (l/s/h)	0.21	0.25	0.26	0.23	0.43	0.53	0.42	0.26	0.21	0.16	0.1	0.09

D.4 Referencias

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. y Smith, M. (1998) Crop evapotranspiration. *FAO Irrigation and Drainage*, 56.

http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html

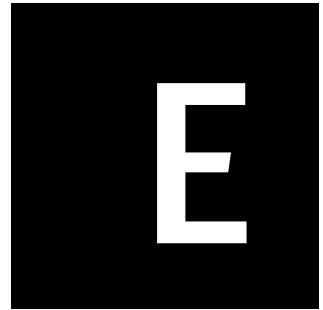
Ojeda, W., Hernández, L. y Sanchez, I. (2008) Requerimientos de riego de los cultivos. En: De León, B. y Robles, B. eds. *Diseño de pequeñas zonas de riego*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Smith, M., Clarke, D. y El-Askari, K. (2008) *Cropwat 8.0 for Windows: User Guide*. Roma: FAO.

“Aguas de abril, vengan mil”

Proverbio

Anexo
**AquaCrop: una herramienta para generar
calendarios de riego**



ANEXO E

AQUACROP: UNA HERRAMIENTA PARA GENERAR CALENDARIOS DE RIEGO

Hilario Flores Gallardo, Waldo Ojeda Bustamante, Agustín Ruiz García y Héctor Flores Magdaleno

E.1 Introducción

La agricultura presenta grandes retos a nivel mundial para satisfacer las demandas alimenticias de la población, así como para convertirse en una actividad sustentable que continúe produciendo rendimientos óptimos. El rendimiento resulta de la interacción entre las plantas cultivadas y el ambiente, además de otros factores que permiten o restringen una adecuada productividad agrícola. Generalmente se requiere añadir insumos de origen químico u orgánico para favorecer el desarrollo de los cultivos, así como un manejo agronómico adecuado para asegurar la sanidad y calidad de la producción.

La producción de los cultivos está relacionada con la tasa de desarrollo de los procesos fisiológicos que ocurren en la planta, los cuales dependen en gran medida de las condiciones ambientales existentes y variables. En este contexto, la agricultura es el sector productivo más dependiente de la variabilidad climática porque la demanda evaporativa de la atmósfera define en gran medida la evapotranspiración de los cultivos.

La implantación de modelos en los sistemas computacionales puede mejorar la toma de decisiones para asignar recursos e insumos en tiempo y forma, pues permite simular el desarrollo y respuesta de los cultivos. El avance y desarrollo de las herramientas computacionales de aplicación agrícola como los modelos de simulación de cultivos son de gran importancia para entender y analizar el funcionamiento de los sistemas de producción agrícola bajo diferentes alternativas de manejo. Este tipo de herramientas puede ayudar a tomar decisiones durante los procesos de planificación, desarrollo y producción agrícola (Flores-Gallardo, 2010).

En México, la seguridad alimentaria representa un reto actual para producir suficiente cantidad de alimentos, con calidad y precio accesibles. La agricultura de riego ha permitido suministrar la demanda de alimentos de una población en continuo crecimiento y en una superficie que se ha mantenido casi estable en las últimas cuatro décadas (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2012). Las grandes zonas de riego se ubican en regiones áridas y semiáridas que requieren de una adecuada regulación y distribución del agua, que es un bien escaso y vital que asegura una producción agrícola económicamente viable (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

Debido a que la competencia por la disponibilidad de agua es cada vez más fuerte, existe la necesidad de generar un reconocimiento económico, social y ambiental al buen uso del agua (Flores-Gallardo *et al.*, 2014). Por tal motivo, para calendarizar y supervisar efectivamente el servicio de riego en grandes zonas, se debe ajustar la frecuencia y cantidad del riego con base en factores del suelo, ambiente, planta y manejo del riego, lo cual demanda modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2006).

La posible intensificación del ciclo hidrológico, con modificaciones en los patrones climáticos actuales por efectos del cambio climático, demandará el uso frecuente de herramientas para conocer con mayor certidumbre la respuesta de los cultivos bajo condiciones climáticas cambiantes (Flores-Gallardo *et al.*, 2013). Como la respuesta de los cultivos a las variaciones en el déficit hídrico es compleja, usualmente se recurre al uso de funciones empíricas para estimar los rendimientos con base en el nivel de déficit hídrico, aplicado durante una parte o en la totalidad del ciclo del cultivo.

Una alternativa son los modelos de simulación biofísica de cultivos que manejan relaciones para predecir el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo utilizando características genéticas, agronómicas y condiciones ambientales durante el desarrollo de los cultivos (Monteith, 1996). En las últimas décadas se han utilizado diferentes modelos para simular la respuesta de los cultivos bajo diferentes condiciones de producción a nivel parcelario. El uso de los modelos de simulación biológica puede utilizarse para estimar la producción potencial y la predicción fenológica de la planta, identificar factores limitantes en la producción de los cultivos mediante la estimación de requerimientos hídricos y nutricionales bajo la interacción climática de la región de interés (Flores-Magdaleno *et al.*, 2014).

El modelo biofísico más usado es el DSSAT, que permite estimar los efectos de las diferentes prácticas de manejo y las condiciones ambientales sobre los cultivos (Jones *et al.*, 2003; Hoogenboom *et al.*, 2012). Otros modelos que permiten simular el desarrollo de un cultivo de gran importancia alimenticia y económica como el maíz (*Zea mays* L.) son el CERES-Maize (Jones *et al.*, 1986), EPICphase (Cavero *et al.*, 2000), CropSyst (Stöckle *et al.*, 2003), APSIM (Keating *et al.*, 2003) y el Hybrid-Maize (Yang *et al.*, 2004). De acuerdo con Heng *et al.* (2009), estos modelos sofisticados demandan ciertas habilidades para su calibración y operación, además de requerir un gran número de parámetros, algunos específicos por variedad o híbrido, lo que finalmente complica que los agricultores o usuarios finales los puedan adoptar.

El modelo AquaCrop liberado por la FAO (Raes *et al.*, 2009a), puede utilizarse como herramienta computacional para analizar escenarios agrícolas en diferentes ciclos y localidades, considerando las condiciones climáticas de la región y parámetros del cultivo de interés (Heng *et al.*, 2009; Hsiao *et al.*, 2009; Steduto *et al.*, 2009). Este modelo determinístico está orientado a usuarios con conocimientos computacionales básicos, es simple sin perder exactitud porque usa un número reducido de parámetros

en comparación con otros modelos biofísicos comerciales (Raes *et al.*, 2009b) y ha sido calibrado con buen ajuste y resultados experimentales en varias regiones agrícolas del mundo. Sin embargo, solamente Flores-Gallardo *et al.* (2013) ha reportado su aplicación para las condiciones de manejo y clima de la agricultura mexicana, por lo cual se aborda en el presente anexo su descripción y utilidad para generar calendarios de riego en el cultivo de maíz.

E.2 Descripción teórica

El modelo AquaCrop (**Figura E.1**) fue creado para simular el desarrollo y rendimiento de varios cultivos, especialmente bajo condiciones hídricas o con respuesta al suministro del riego. A pesar de lo anterior, el modelo puede generar simulaciones bajo condiciones de temporal (sin riego) para los diversos cultivos que están integrados en la base de datos de su sistema informático (software).

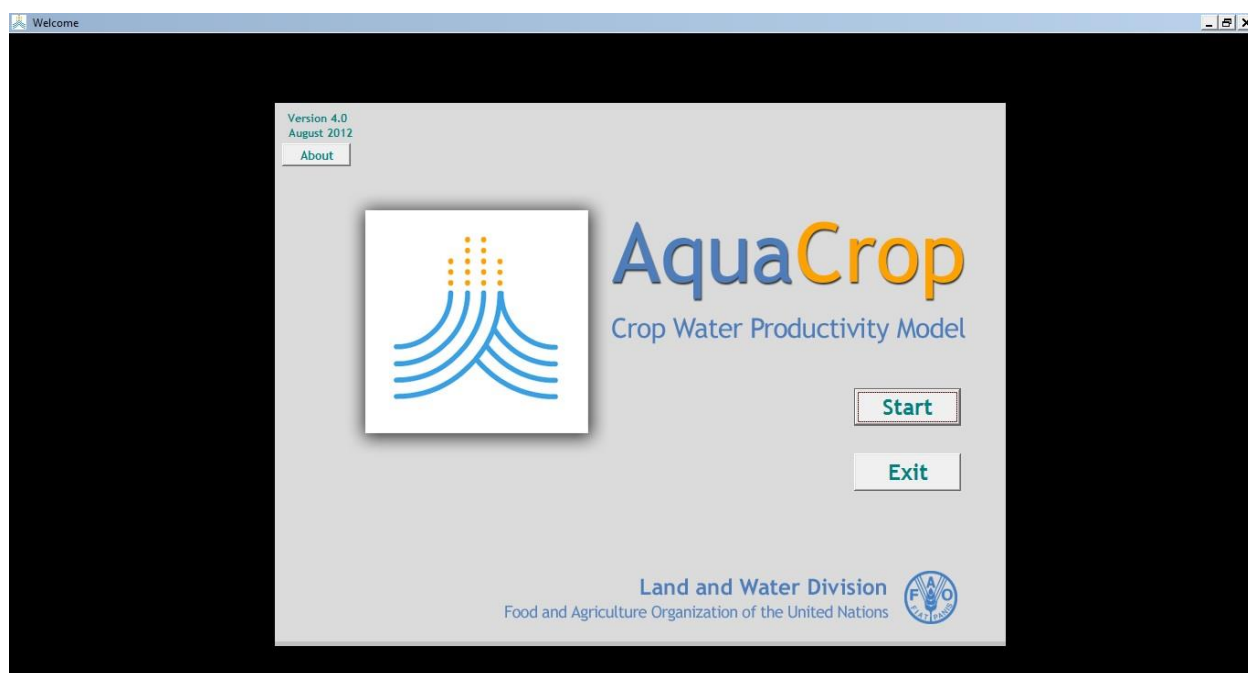


Figura E.1 Pantalla de inicio del software AquaCrop

A partir de su liberación en 2009, el modelo ha sido mejorado constantemente en sus nuevas versiones que incorporan escenarios de cambio climático en el apartado de clima y nuevos cultivos para simular el rendimiento en interacción con las condiciones climáticas, edáficas e hídricas de una región determinada (**Tabla E.1**).

Tabla E.1 Mejoras y adición de nuevos cultivos del modelo AquaCrop a partir de su liberación

Versión 1.0 (2009)	Versión 3.1 (2011)	Versión 4.0 (2012)
Algodón	Algodón	Algodón
Arroz	Arroz con cáscara	Arroz con cáscara
Maíz	Girasol	Caña de azúcar
Papa	Maíz	Cebada
Quinoa	Papa	Girasol
Remolacha	Quinoa	Maíz
Soya	Remolacha	Papa
Trigo	Soya	Quinoa
	Tomate rojo (jitomate)	Remolacha
	Trigo	Soya
		Tomate rojo (jitomate)
		Trigo

Para estimar los resultados de rendimiento (grano y biomasa), requerimientos hídricos, comportamiento del cultivo, entre otros, el modelo AquaCrop está integrado por varias ecuaciones que permiten expresar de manera simple dichos resultados una vez que se simula el cultivo de interés y se cuenta con la información climática, edáfica e hídrica correspondiente. En determinado caso se pueden generar calendarios de riego o actualizar el calendario si la aplicación en campo es diferente a la generada por el modelo. AquaCrop consta de varias ecuaciones que simulan el crecimiento y rendimiento del cultivo con base en datos de clima, densidad de población, características genéticas, tipo de suelo, nivel de fertilización y nivel de déficit hídrico (**Figura E.2**).

El modelo AquaCrop requiere la siguiente información meteorológica diaria, decenal o mensual: temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitación (Pp) y evapotranspiración de referencia (ETo). Además, considera una concentración media anual de CO₂ en la atmósfera de 369.47 ppm para el año 2000, según las mediciones del observatorio en Mauna Loa, Hawai. A partir de la versión 3.1 se incorporaron cuatro escenarios de cambio climático: A1B, A2, B1 y B2. Los valores de la concentración de este gas se pueden sustituir con los de las emisiones actuales (Raes *et al.*, 2009b). La producción de biomasa y de grano depende de los parámetros del cultivo, como conductancia estomatal, senescencia del dosel vegetal, productividad del agua e índice de cosecha.

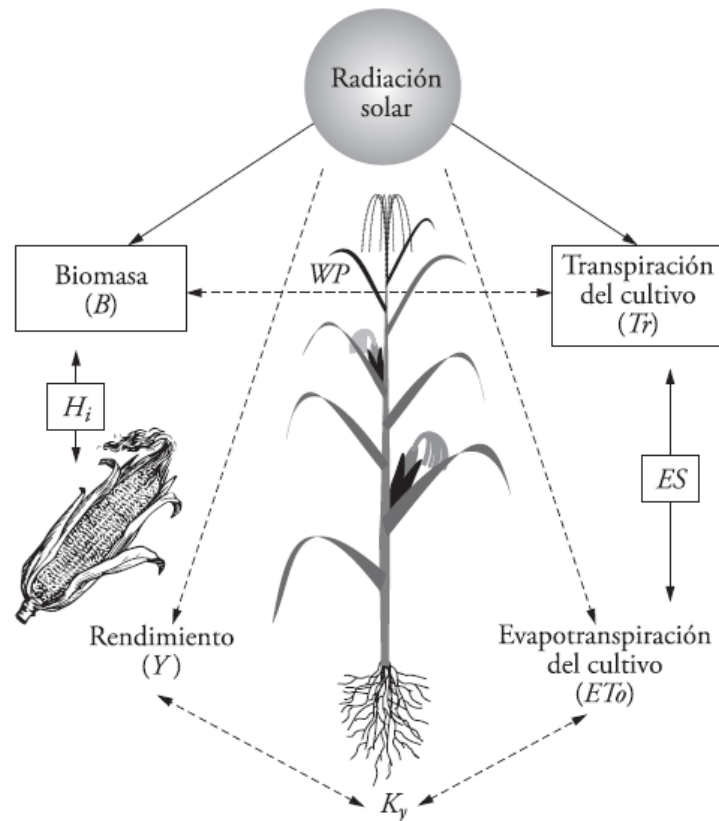


Figura E.2 Operación y lógica en la simulación con el modelo AquaCrop¹⁷

La ecuación general para estimar el rendimiento del cultivo (Y) es la **Ecuación E.1**:

$$Y = B * H_i \quad (E.1)$$

donde B es la biomasa del cultivo y H_i es el índice de cosecha que depende de la variedad o híbrido del cultivo.

En la simulación del desarrollo del cultivo se genera la posible respuesta al estrés térmico que pueda presentarse de acuerdo con las condiciones climáticas durante su ciclo de desarrollo, el cual se estima de acuerdo con las condiciones climáticas a partir de la fecha de siembra y se usa especialmente para el período de polinización. El modelo considera tres tipos de respuesta al estrés hídrico:

¹⁷ Con la separación de la evaporación del suelo (ES), transpiración (Tr), rendimiento (Y), biomasa (B) e índice de cosecha (H_i). WP : productividad del agua y K_p : factor de proporción entre el rendimiento perdido y la reducción en evapotranspiración (adaptado de Raes et al., 2009a)

1. Inhibición de la expansión del dosel vegetal
2. Aceleración de la senescencia del dosel vegetal
3. Cierre estomático

Para cuantificar el impacto del estrés hídrico para cada respuesta, el modelo considera una curva que se activa cuando se alcanzan los límites establecidos para la humedad del suelo. Según Heng *et al.* (2009) y Raes *et al.* (2009b), el modelo AquaCrop es una herramienta viable para evaluar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento de los cultivos durante varias etapas de desarrollo, por lo que es útil para planear y evaluar estrategias bajo diferentes condiciones de disponibilidad de agua, sistema de riego, tipo de suelo y fecha de siembra. El modelo AquaCrop estima el requerimiento hídrico del cultivo mediante un balance de humedad en el suelo con la siguiente ecuación:

$$\theta_{i,j} = \theta_{i,j-1} + D + (R + P) + ES + Tr \quad (E.2)$$

donde θ es la variable dependiente, i es la profundidad a regar (punto inicial del cálculo) y j es el contenido de humedad actualizado al momento del siguiente riego, D es el drenaje por percolación profunda, $R+P$ son el riego más la precipitación, ES es la evaporación del suelo y Tr es la transpiración del cultivo.

El modelo AquaCrop simula el crecimiento del dosel vegetal asumiendo dos casos para el crecimiento tipo exponencial que se presenta para la condición $CC \leq CC_x/2$ utilizando la ecuación E.3 y la senescencia exponencial para la condición $CC > CC_x/2$ utilizando la ecuación E.4:

$$CC = CC_o e^{tCGC} \text{ para } CC \leq \frac{CC_x}{2} \quad (E.3)$$

$$CC = CC_x - 0.25 \frac{(CC_x)^2}{CC_o} e^{-tCGC} \text{ para } CC > \frac{CC_x}{2} \quad (E.4)$$

donde CC es la cobertura del dosel vegetal al tiempo (t) transcurrido (expresado en días o grado día desarrollo), CC_o es la cobertura inicial del dosel ($t=0$), CC_x es la máxima cobertura del dosel vegetal y CGC es el coeficiente de crecimiento del dosel vegetal por unidad de tiempo para el cultivo considerado.

El modelo AquaCrop ajusta el crecimiento del dosel vegetal con respecto a la densidad de población (plantas ha^{-1}). En virtud de que se carece de información experimental de cobertura vegetal requerida por el AquaCrop, es posible estimarla a partir de los datos índice de área foliar (IAF). Para el caso del maíz el AquaCrop tiene implementada la siguiente ecuación:

$$CC = 1.005[1 - \exp(-0.6 * IAF)]^{1.2} \quad (E.5)$$

El cálculo de los grados día (°D) a nivel diario se realiza usando la ecuación E.6.

$$\begin{aligned} \text{°D} &= T_a - T_{c-min}, T_a > T_{c-min} \\ \text{°D} &= 0, T_a \leq T_{c-min} \end{aligned} \quad (E.6)$$

La temperatura promedio T_a se estimó de acuerdo con el método 3 del AquaCrop con base en las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} T_a &= \frac{T_x + T_n}{2}, T_x < T_{c-max} \\ T_a &= \frac{T_{c-max} + T_n}{2}, T_x \geq T_{c-max} \\ T_a &= \frac{T_{c-min} + T_n}{2}, T_x \leq T_{c-min} \end{aligned} \quad (E.7)$$

donde T_{c-min} y T_{c-max} son las temperaturas mínimas y máximas del aire dentro del cual la planta se desarrolla. T_x y T_n son las temperaturas máxima y mínima del día registradas en una estación meteorológica. Una descripción más detallada del concepto de los grados día se presenta en el Anexo B de este libro.

E.3 Descripción del sistema

El modelo AquaCrop fue desarrollado e implantado en un software computacional de libre acceso que se descarga del sitio web <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html> de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).

Una vez instalado el modelo AquaCrop en un sistema computacional, se pueden realizar las simulaciones del cultivo de interés, el cual se puede seleccionar del catálogo del software que contiene una base de datos conformada por experimentos realizados en diferentes regiones del mundo para obtener información de los distintos cultivos (**Figura E.3**).

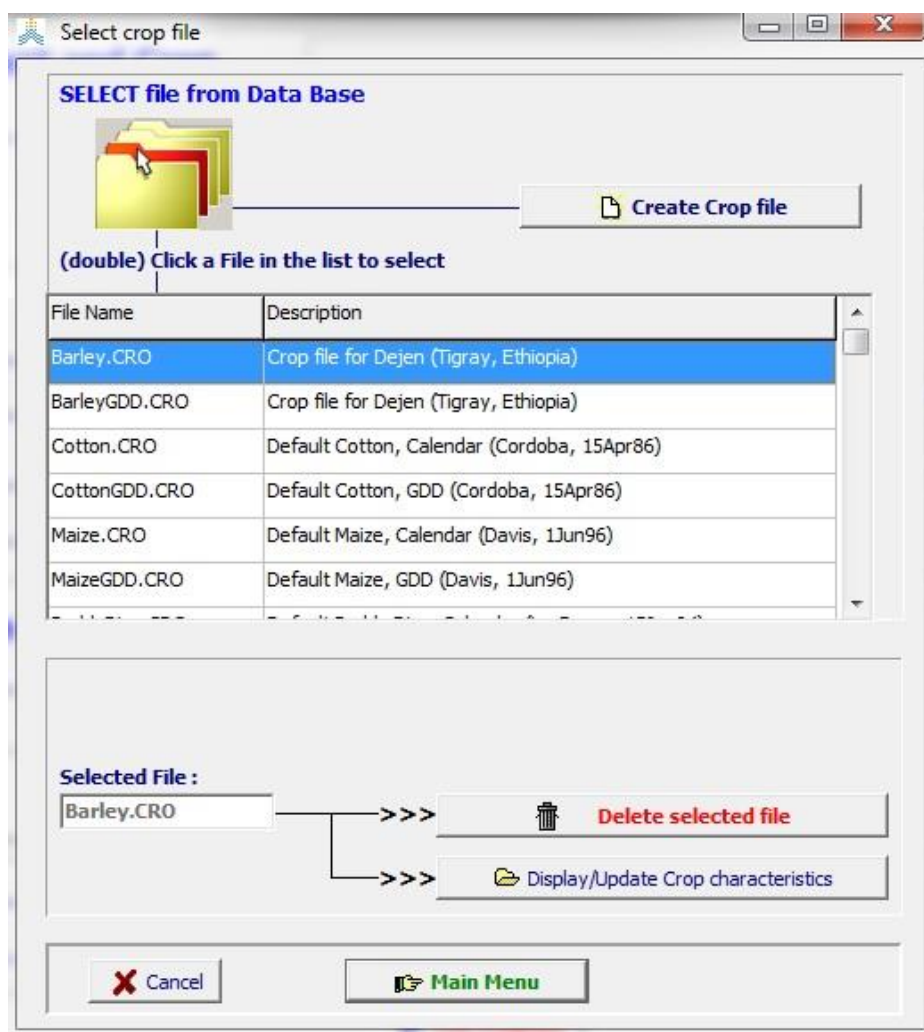


Figura E.3 Catálogo de cultivos integrados en el software del modelo AquaCrop

Aunque se considera que los parámetros pueden utilizarse para cualquier región del mundo, el software facilita su modificación para calibrarlos localmente a la región donde se desea simular el rendimiento del cultivo. El proceso de calibración debe ser un ajuste fino de ciertos parámetros del modelo para obtener una alta correlación entre los valores experimentales y los simulados para la localidad de interés (Hussein *et al.*, 2011). Para simular el rendimiento del cultivo, se debe tener adicionalmente información de clima, riego e información edáfica (**Figura E.4**).

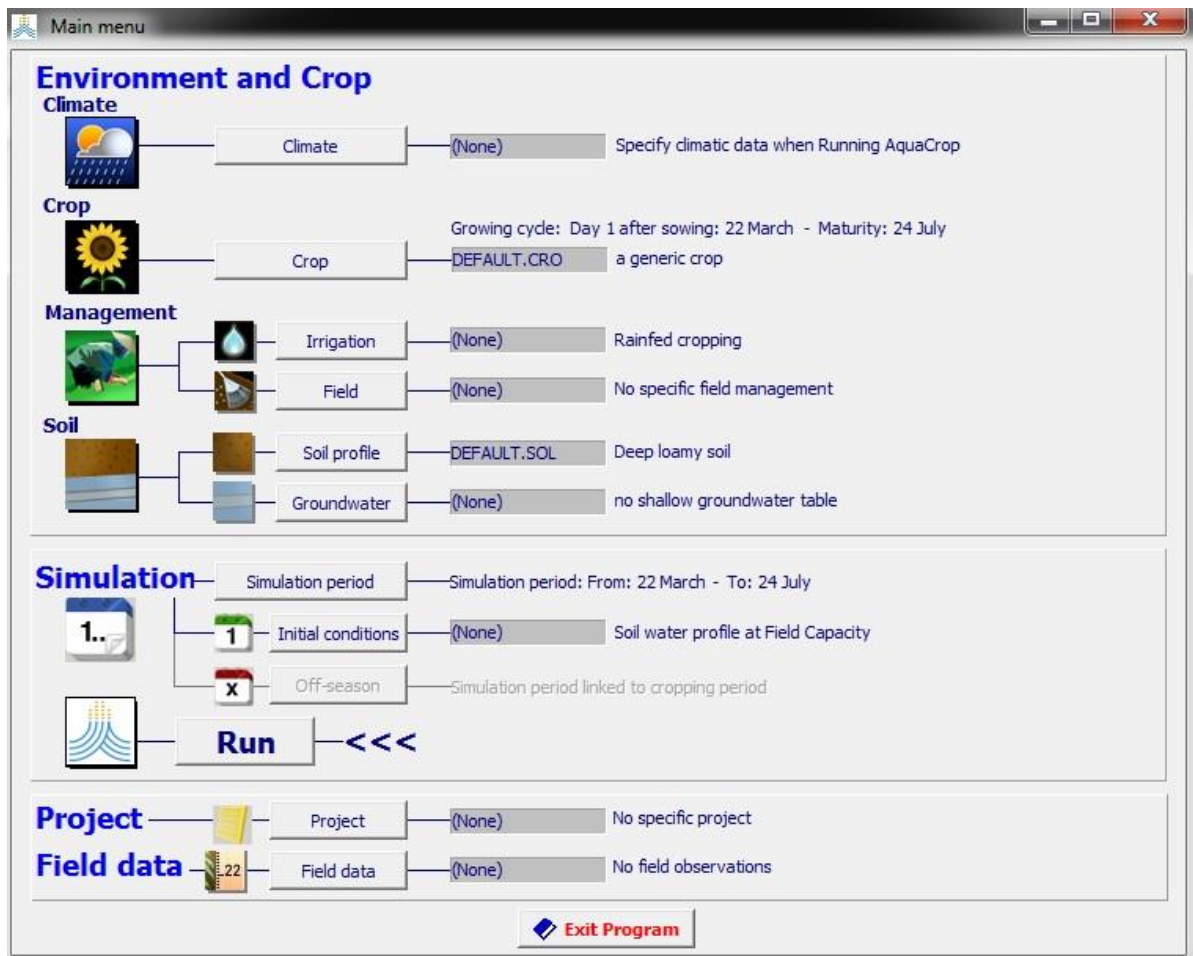


Figura E.4 Interfaz para introducir la información de las diferentes variables requeridas para simular el rendimiento del cultivo en AquaCrop

Para generar calendarios de riego se debe seleccionar la parte de riego en la interfaz para introducir la información de las variables y así simular el rendimiento de determinado cultivo con el modelo AquaCrop. Posteriormente se puede seleccionar la modalidad de agricultura, ya sea temporal o riego; dentro de esta última se pueden seleccionar varias opciones como generar calendarios de riego, establecer un calendario de riego y determinar los requerimientos hídricos según sea el interés de la simulación (**Figura E.5**).

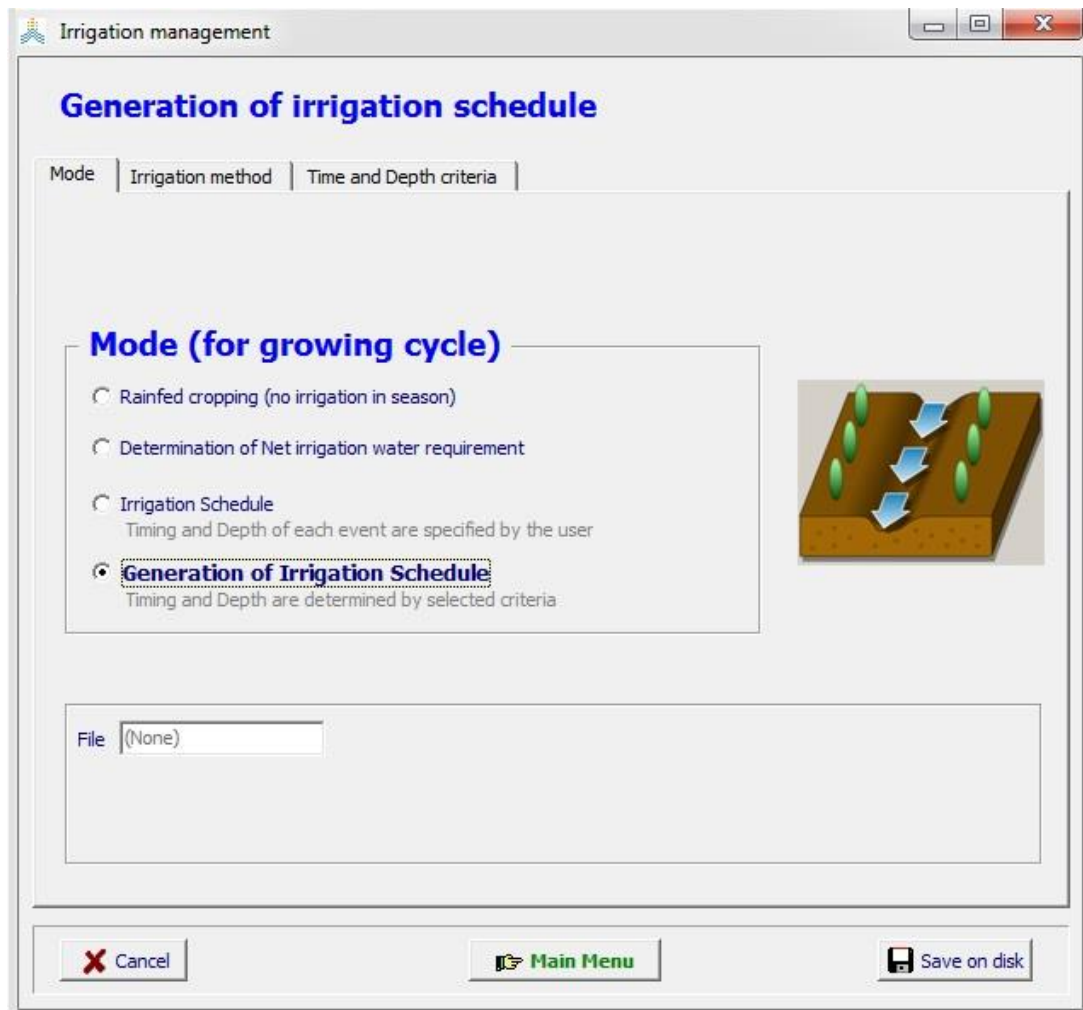


Figura E.5 Selección de la modalidad agrícola: riego o temporal

Dentro de las múltiples opciones y bondades del software está la selección del sistema de riego a utilizar en la simulación (**Figura E.6**):

1. Aspersión
2. Riego por gravedad: melgas, bordos y surcos

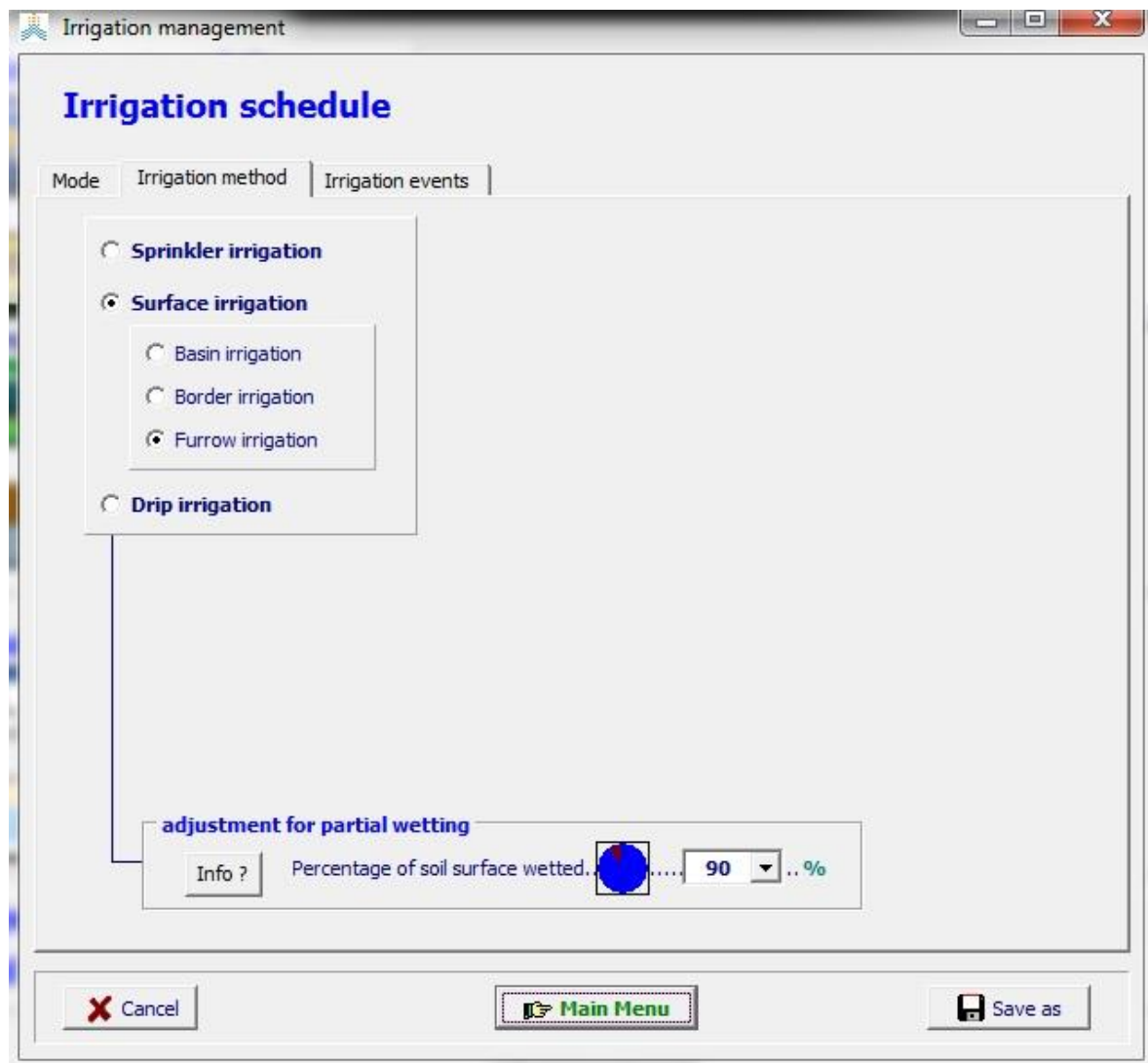


Figura E.6 Selección del sistema de riego a utilizar en la simulación del cultivo

Como parte de la generación de los calendarios de riego, se pueden visualizar los datos generados para ajustar los intervalos entre riegos, lámina de riego neta y aplicada. De esta manera se pueden obtener mejores beneficios en la parcela: eficiencia de aplicación, productividad en el uso del agua. También se pueden ajustar los parámetros del cultivo, así como de las diferentes variables que dependen del manejo agronómico: riego, fertilidad y tipo de suelo, para generar una mejor simulación del rendimiento con respecto al manejo real del cultivo. En la **Figura E.7** se muestra un ejemplo del calendario de riego que se puede generar con el modelo AquaCrop.

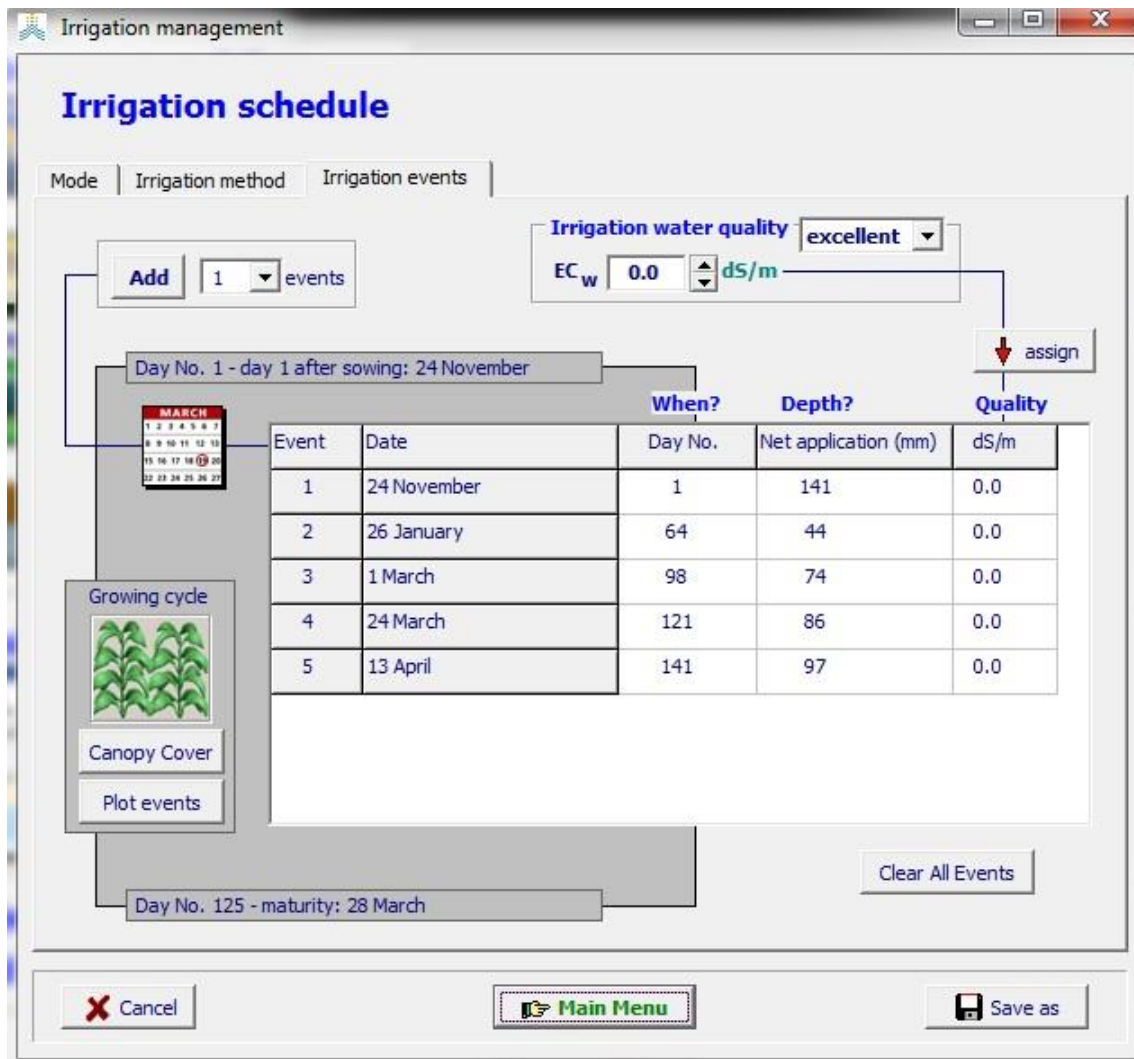


Figura E.7 Visualización del calendario de riego simulado con respecto al cultivo (duración del ciclo del cultivo, clima, suelo, sistema de riego, densidad de población) con el modelo AquaCrop

E.4. Ejemplo de aplicación para maíz

En este apartado se presenta un ejemplo de aplicación para maíz cultivado en el norte de Sinaloa, México. Se describen los parámetros utilizados para simular el crecimiento y rendimiento del cultivo bajo diferentes ciclos agrícolas y variedades de maíz. Aunque el maíz puede sobrevivir a temperaturas adversas en el rango de 0 °C a 45 °C, las temperaturas de su desarrollo que asume el AquaCrop para estimar los °D son de 8 °C y 30 °C, para T_{c-max} y T_{c-min} , respectivamente. Sin embargo, debido a que la zona de estudio es árida, se modificaron a 10 °C y 30 °C, para T_{c-max} y T_{c-min} , respectivamente.

Para simular el crecimiento del cultivo de maíz se utilizaron los parámetros conservativos o constantes del modelo AquaCrop que fueron obtenidos a partir de experimentos de maíz realizados en España y Estados Unidos (**Tabla E.2**). Dichos parámetros son aplicables para un amplio rango de condiciones climáticas y no dependen específicamente de la variedad o híbrido utilizado en los experimentos de Heng *et al.* (2009) y Hsiao *et al.* (2009).

Tabla E.2 Parámetros conservativos del modelo AquaCrop

Descripción	Valor	Unidad o medida
Temperatura base	10	°C
Temperatura máxima	30	°C
Dosel vegetal al 90 % emergido (CCo)	6.5	cm ²
Coefficiente de crecimiento del dosel (CGC)	1.3 %	Incremento relativo del CC por grado día desarrollo (°D)
Máximo dosel vegetal (CCx)	-	En función de la densidad de plantas
Coefficiente del cultivo para transpiración con un dosel vegetal = 100 %	1.03	Transpiración completa del dosel relativo a la ETo
Coefficiente de declinación del cultivo antes de CCx	0.3 %	Declinación por día de las hojas envejecidas
Coefficiente de declinación (CGC) hasta senescencia	1.06 %	Decremento del CC relativo a CCx por °D
Productividad del agua (WP), normalizado al año 2000	33.7	g (biomasa) m ⁻² , en función del CO ₂ atmosférico
Umbral de crecimiento de hoja p-alto	0.14	Como fracción del agua total disponible (TAW), sobre este crecimiento de hoja es inhibido
Umbral de crecimiento de hoja p-bajo	0.72	El crecimiento de la hoja se detiene completamente a este p
Coefficiente de estrés de crecimiento de la hoja para la formación de curva	2.9	Curva moderadamente convexa
Umbral de conductancia estomatal p-alto	0.69	Sobre esto, los estomas empiezan a cerrarse
Coefficiente de estrés de los estomas para la formación de la curva	6.0	Curva altamente convexa
Coefficiente de estrés de senescencia p-alto	0.69	Sobre esto, la senescencia del dosel inicia más rápido
Coefficiente de estrés de senescencia para la formación de la curva	2.7	Curva moderadamente convexa
Índice de cosecha (Hi) como referencia	48 %	Común para buenas condiciones

Descripción	Valor	Unidad o medida
°D desde el 90 % de emergencia al inicio de la antesis	800	Puede ser menor para cultivos de ciclo corto
Duración de la antesis en °D	190	-
Coefficiente de inhibición del crecimiento de las hojas con respecto al Hi	7.0	Hi aumentado por inhibición del crecimiento de las hojas en la antesis
Coefficiente de inhibición de los estomas con respecto al Hi	3.0	Hi reducido por inhibición de los estomas en la antesis
°D totales desde emergencia a maduración	1510-1840	Menos para cultivos de ciclo corto

Los parámetros utilizados en el modelo AquaCrop fueron los parámetros de entrada (densidad de población, productividad del agua, índice de cosecha, temperaturas umbrales, método para calcular los grados día y expansión inicial del dosel vegetal) utilizando datos del experimento de Ojeda-Bustamante *et al.* (2006) y datos de parcelas comerciales de maíz para los ciclos agrícolas O-I y P-V posteriores, así como las variedades, densidades de población y condiciones de manejo hídrico (**Tabla E.3**).

Tabla E.3 Datos de las parcelas comerciales de maíz de los ciclos agrícolas O-I y P-V (2007-2008 y 2008-2009)

Parcela año	Ciclo agrícola	Superficie (ha)	Fecha de siembra	Variedad	Densidad de población (plantas ha ⁻¹)
Exp. 03-04	O-I	40	24-nov	Pionner 30G54	95 000
Parcela 07-08	O-I	10	14-dic	Bisonte	133 333
Parcela 08-09	O-I	20	05-dic	Cebú	106 666
Parcela 2008	P-V	10	25-feb	Bisonte	100 000
Parcela 2009	P-V	10	29-feb	Pantera	93 333

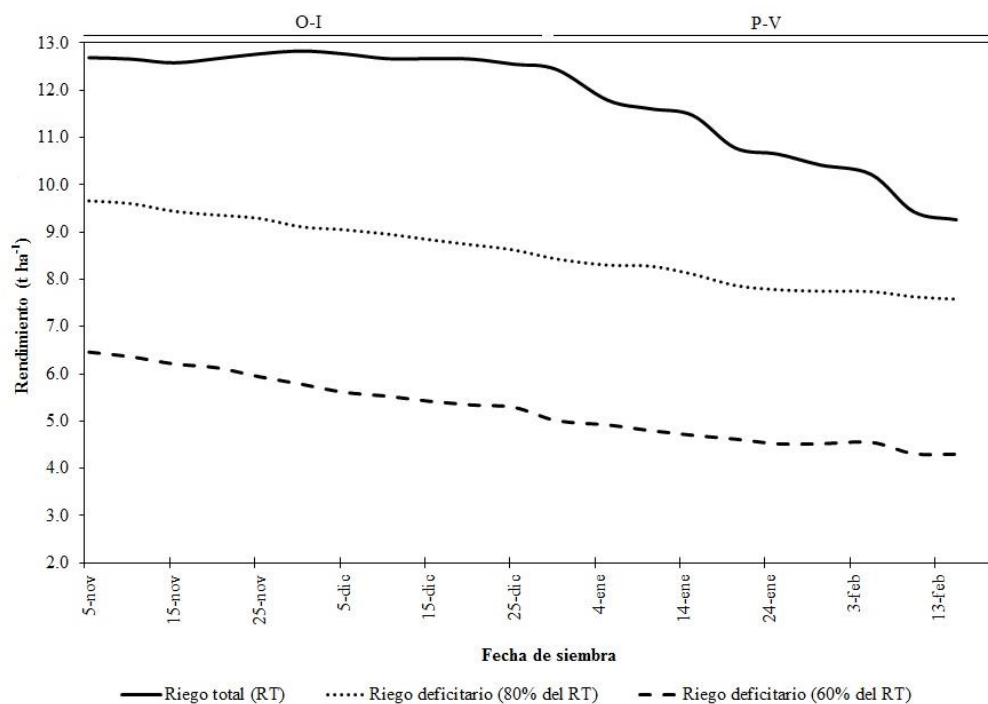
Tal y como se muestra en la **Tabla E.4**, los resultados indican que las predicciones del rendimiento de grano del modelo son buenas con respecto a los datos medidos en campo (rendimiento de grano y biomasa).

Tabla E.4 Resultados medidos en campo y simulados con el modelo AquaCrop

Parcela	Datos observados en campo				Simulación con el modelo AquaCrop			
	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)	Días a madurez	°D a madurez	Biomasa (t ha ⁻¹)	Rend. (t ha ⁻¹)
Exp. 03-04	179	1451.1	26.2	10.7	168	1814	26.6	10.87
07-08	177	1648	20.9	10.0	149	1887	24.2	11.6
08-09	181	1682	25.1	12.0	154	1967	25.3	12.1
2008	135	1199	22.4	9.6	127	1820	23.8	10.2
2009	133	1175	18.8	9.0	117	1648	19.6	9.4

Nota: Rend. = rendimiento; Exp. = experimental

Considerando los datos agronómicos de calibración y validación, se realizaron simulaciones bajo las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica para obtener los rendimientos en el cultivo de maíz con respecto a la densidad de población, fechas de siembra en los ciclos agrícolas O-I y P-V (**Figura E.8**).

**Figura E.8** Rendimientos simulados para maíz en los dos ciclos agrícolas típicos (O-I y P-V)

De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2011), se puede observar que el rendimiento promedio registrado de maíz para la agricultura de riego en el norte de Sinaloa se encuentra dentro del rango simulado por el modelo AquaCrop pero faltan acciones para mejorar la productividad del cultivo y alcanzar un rendimiento superior, como el simulado con la condición de disponibilidad hídrica de riego total (RT).

Una de las características que define la producción del cultivo es la cantidad de biomasa generada durante su ciclo de crecimiento porque esta define el grado de trabajo de la planta para producir su alimento y producción final. El desarrollo del dosel vegetal simulado con el modelo AquaCrop para una misma fecha de siembra (05 de noviembre) considerando las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica propuestas en el presente estudio en el ciclo agrícola O-I y P-V generan respuestas diferentes a las condiciones hídricas (**Figura E.9**).

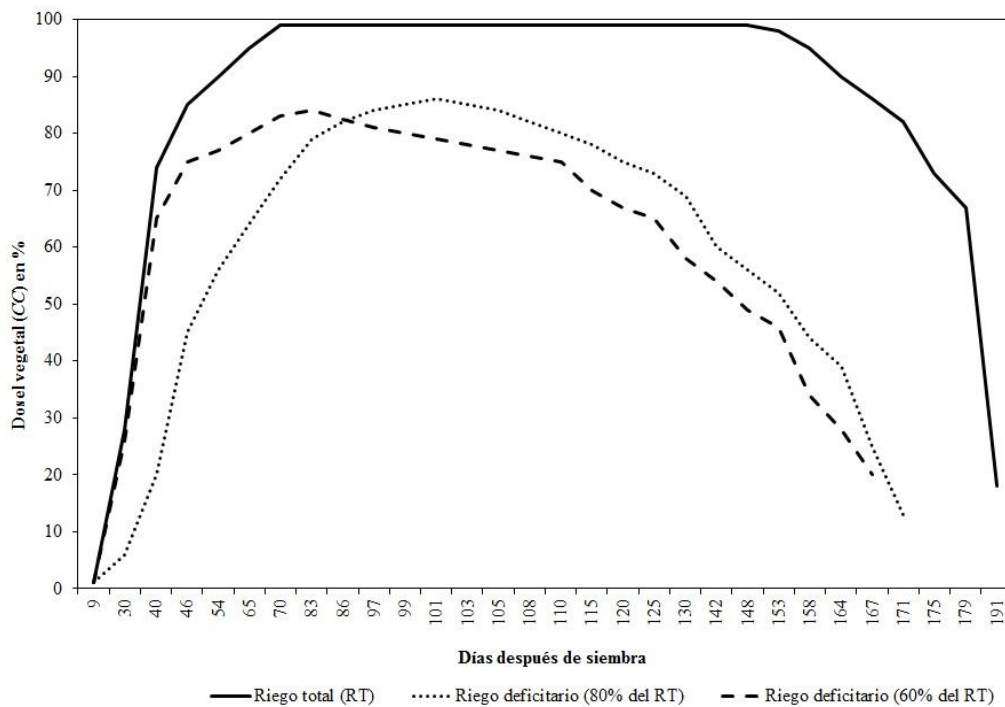
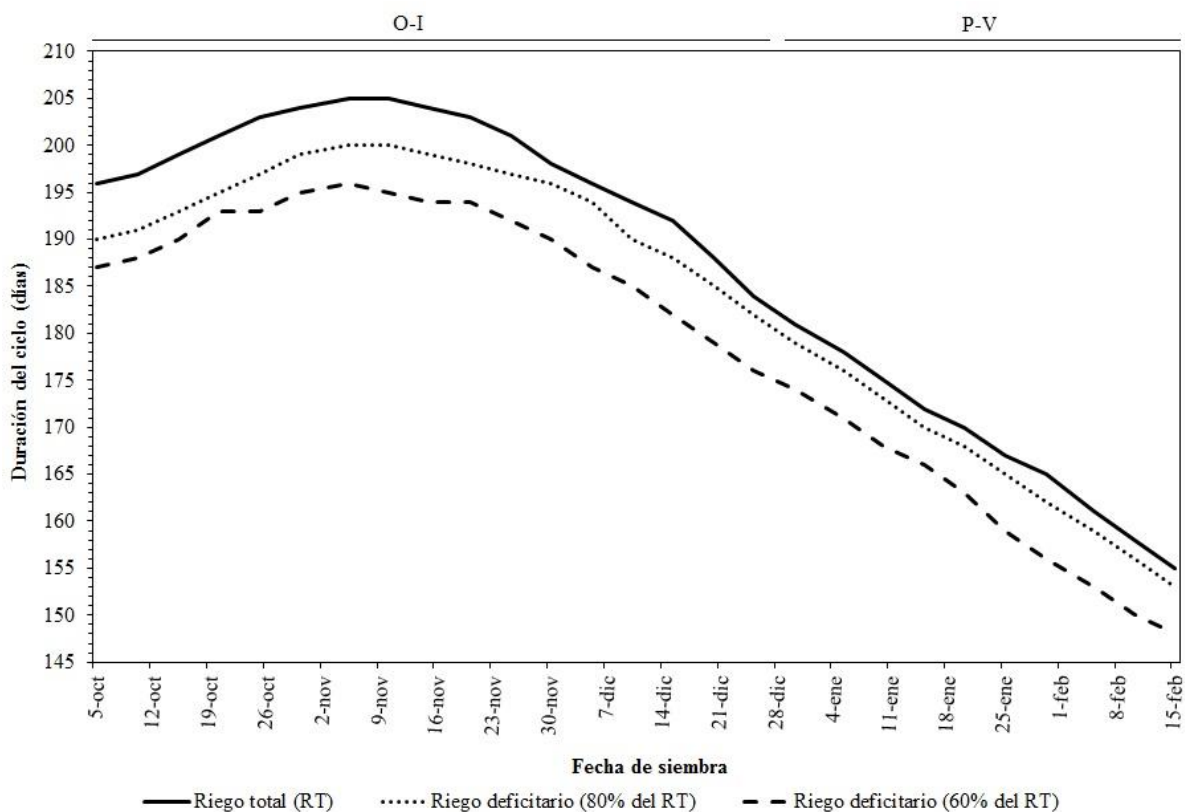


Figura E.9 Simulación del dosel vegetal (CC) en porcentaje para la fecha de siembra del 05 de noviembre (ciclo agrícola O-I) bajo las tres condiciones de disponibilidad hídrica

También se simularon los requerimientos hídricos de maíz para las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica en diferentes fechas de siembra durante los ciclos agrícolas (O-I y P-V) típicos en que se establece el cultivo de maíz (**Tabla E.4**).

Tabla E.5 Requerimientos hídricos de maíz para los ciclos O-I y P-V de acuerdo con las diferentes condiciones de disponibilidad hídrica y fecha de siembra

Fecha de siembra	Riego total (RT)	Riego deficitario (80 % del RT)	Riego deficitario (60 % del RT)
	mm		
05-nov	482.3	436.8	373.3
15-nov	471.1	441.6	379.9
30-nov	473.1	444.7	384.0
05-dic	474.2	432.5	375.1
15-dic	474.4	427.2	371.5
30-dic	463.1	419.4	364.0
05-ene	494.0	449.0	397.4
15-ene	481.2	435.2	378.0
30-ene	474.5	429.7	374.3
05-feb	439.9	390.9	336.5
15-feb	410.3	360.6	318.0

**Figura E.10** Duración del ciclo del cultivo simulado por el modelo AquaCrop con respecto a las tres condiciones de disponibilidad hídrica y fechas de siembra (ciclos O-I y P-V)

Los resultados obtenidos en la duración del ciclo del cultivo de maíz (**Figura E.10**) muestran que el modelo tiene una alta precisión en la simulación del crecimiento del cultivo bajo las diferentes condiciones de disponibilidad de agua y fechas de siembra, lo cual genera una gran certidumbre para las condiciones climáticas contrastantes que se presentan en el norte de Sinaloa. De acuerdo con los resultados obtenidos en campo, la duración del ciclo está por debajo de los simulados debido a que se consideró un clima promedio de la zona y, además, no se consideró un estrés térmico y de fertilización, lo cual genera condiciones más propicias para la duración del cultivo, pero se muestra una reducción del ciclo en las fechas de siembra correspondientes al periodo más caliente de la temporada agrícola.

Para usar el modelo AquaCrop solo se requiere que el usuario calibre los parámetros de entrada, ya que se definieron las T_{c-min} y T_{c-max} de 10 a 30 °C, respectivamente, y solo se utilizaron 4 de las variedades más utilizadas en la zona de estudio para diferentes ciclos agrícolas, por lo cual se requieren los datos del resto de variedades a utilizar. De acuerdo con las simulaciones realizadas por el modelo, el periodo de fechas óptimo está comprendido desde el 05 de noviembre hasta el 15 de enero, según la duración del ciclo del cultivo y rendimientos potenciales. Los análisis estadísticos muestran un gran desempeño del modelo para las condiciones predominantes del norte de Sinaloa, y por lo tanto, se debería aplicar a otras regiones maiceras del estado y del país para ofrecer alternativas de manejo a los productores con la posibilidad de mejorar la toma de decisiones.

E.5 Referencias

- Cavero, J., Farre, I., Debaeke, P. y Faci, J. M. (2000) Simulation of maize yield under water stress with the EPICphase and CROPWAT models. *Agronomy Journal*, 92, pp. 679-690.
- Flores-Gallardo, H. (2010) *Impacto del cambio climático en los distritos de riego de Sinaloa*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados - Programa de Hidrociencias. Montecillo, Texcoco, estado de México.
- Flores-Gallardo, H., Sifuentes-Ibarra, E., Flores-Magdaleno, H., Ojeda-Bustamante, W. y Ramos-García, C.R. (2014) Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(2), pp. 241-252.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Mejía-Sáenz, E. y Sifuentes-Ibarra, E. (2012) Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. *Terra Latinoamericana*, 30(1), pp. 59-67.
- Flores-Gallardo, H., Ojeda-Bustamante, W., Flores-Magdaleno, H., Sifuentes-Ibarra, E. y Mejía-Sáenz, E. (2013) Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. *Agrociencia*, 47(4), pp. 347-359.
- Flores-Magdaleno, H., Flores-Gallardo, H. y Ojeda-Bustamante, W. (2014) Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 37(2), pp. 149-157.
- Heng, L.K., Hsiao, T., Evett, S., Howell, T. y Steduto, P. (2009) Validating the FAO AquaCrop model for irrigated and water deficient field maize. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 488-498.
- Hoogenboom, G., Jones, J.W., Wilkens, P.W., Porter, C.H., Boote, K.J., Hunt, L.A., Singh, U., Lizaso, J.L., White, J.W., Uryasev, O., Royce, F.S., Ogoshi, R., Gijsman, A.J., Tsuji, G.Y. y Koo, J. (2012) *Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Version 4.5 [CD-ROM]*. Honolulu, Hawaii: University of Hawaii.
- Hsiao, T.C., Heng, L.K., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D. y Fereres, E. (2009) AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*. 101(3), pp. 448-459.
- Hussein, F., Janat, M. and Yakoub, A. (2011) Simulating cotton yield response to deficit irrigation with the FAO AquaCrop model. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 9(4), pp. 1319-1330.
- Jones, C.A., Kiniry, J.R., Dyke, P.T, Farmer, D.B. y Godwin, D.C. (1986) *CERES-Maize: A simulation model of maize growth and development*. Texas A&M University Press, College Station.

- Jones, J.W., Hoogenboom, G., Porter, C.H., Boote, K.J., Batchelor, W.D., Hunt, L.A., Wilkens, P.W., Singh, U., Gijsman, A.J. y Ritchie, J.T. (2003) The DSSAT cropping system model. *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 235-265.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M. y Smith, C.J. (2003) An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 267-288.
- Monteith, J.L. (1996) The quest for balance in crop modeling. *Agronomy Journal*, 88(5), pp. 695-697.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E. y Unland-Weiss, H. (2006) Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*, 40(1), pp. 13-25.
- Ojeda-Bustamante, W., Sifuentes-Ibarra, E., Rojano-Aguilar, A. y Íñiguez-Covarrubias, M. (2012) Adaptación de la agricultura de riego ante el cambio climático. En: Martínez-Austria, P.F. y Patiño-Gómez, C. eds. *Efectos del cambio climático en los recursos hídricos en México. Vol. IV*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. (2009a). *AquaCrop. Reference Manual*. Roma: FAO.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. y Fereres, E. (2009b). AquaCrop-The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 438-447.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D. y Fereres, E. (2009) AquaCrop - The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), pp. 426-437.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M. y Nelson, R. (2003) CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy*, 18, pp. 289-307.
- Yang, H.S., Dobermann, A., Lindquist, J.L., Walters, D.T., Arkebauer, T.J. y Cassman, K. G. (2004) Hybrid-Maize - a maize simulation model that combines two crop modeling approaches. *Field Crops Research*, 87, pp. 131-154.