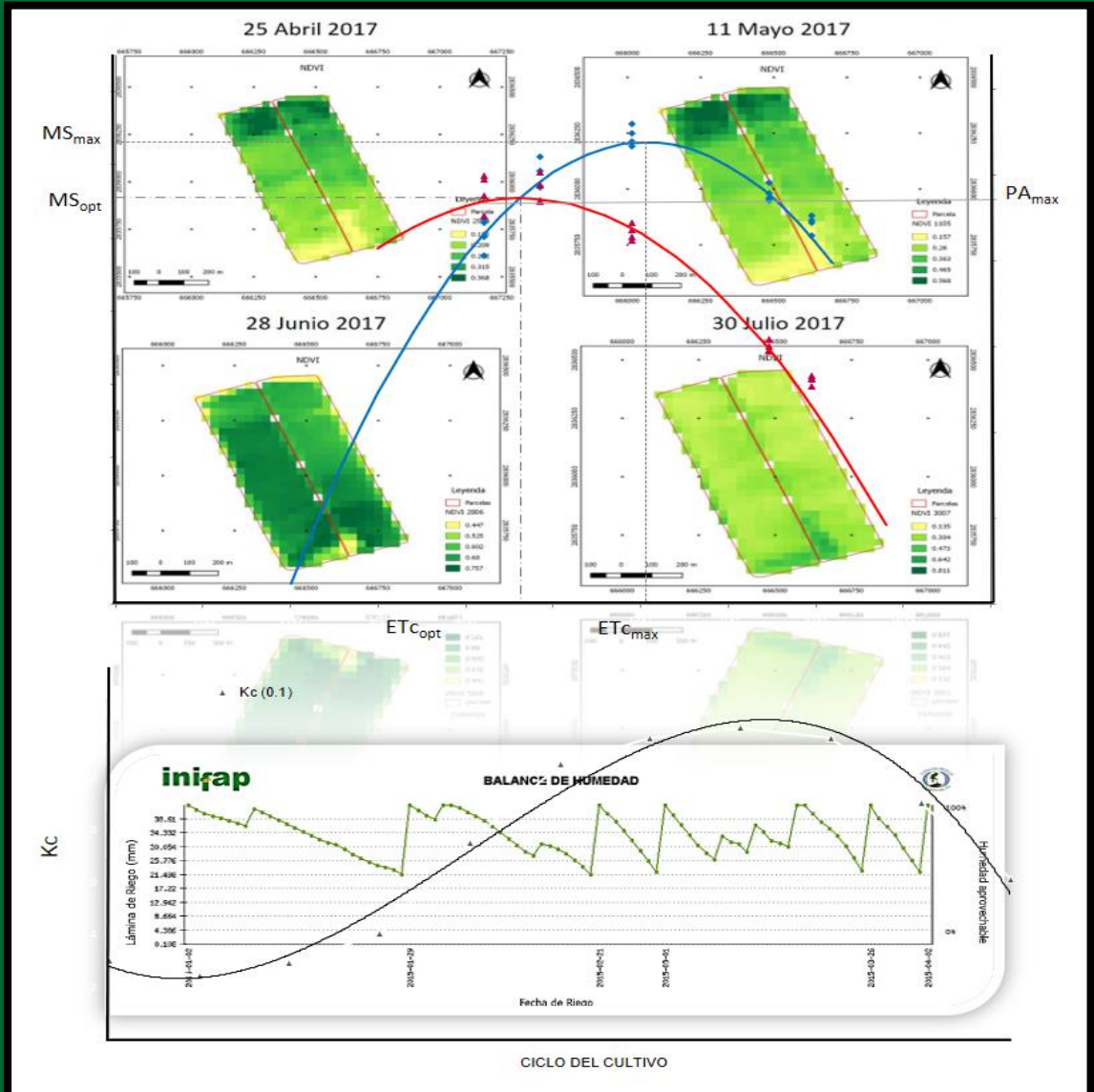


TÉCNICAS PARA ESTIMAR Y MONITOREAR LA DEMANDA DE AGUA EN LOS CULTIVOS

Miguel Servín-Palestina, José Israel Casas-Flores, Orlando Ramírez-Valle, Noé Chávez-Sánchez



SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL

DR. VÍCTOR MANUEL VILLALOBOS ARÁMBULA
Secretario

DR. MIGUEL GARCÍA WINDER
Subsecretario de Agricultura

LIC. RAÚL ENRIQUE GALINDO FAVELA
Subsecretario de Desarrollo Rural

ING. VÍCTOR SUÁREZ CARRERA
Subsecretario de Autosuficiencia Alimentaria

LIC. DAVID MONREAL ÁVILA
Coordinador General de Ganadería

DR. SALVADOR FERNÁNDEZ RIVERA
Coordinador General de Desarrollo Rural

LIC. IGNACIO OVALLE FERNÁNDEZ
Titular del organismo Seguridad Alimentaria Mexicana

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES, AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

DR. JOSÉ FERNANDO DE LA TORRE SÁNCHEZ
Encargado del Despacho de los Asuntos de la Dirección General

DR. RAÚL G. OBANDO RODRÍGUEZ
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M. C. JORGE FAJARDO GUEL
Coordinador de Planeación y Desarrollo

MTRO. EDUARDO FRANCISCO BERTERAME BARQUÍN
Coordinador de Administración y Sistemas

CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL NORTE CENTRO

DR. ARTURO DANIEL TIJERINA CHÁVEZ
Director Regional

DR. FRANCISCO JAVIER PASTOR LÓPEZ
Director de Investigación

ING. RICARDO CARRILLO MONSIVÁIS
Director de Administración

MC. RICARDO ALONSO SÁNCHEZ GUTIERREZ
Director de Coordinación y Vinculación en Zacateca

**TÉCNICAS PARA ESTIMAR Y MONITOREAR LA DEMANDA DE AGUA
EN LOS CULTIVOS**

Miguel Servin-Palestina

MC., Investigador del Programa de Ingeniería de riego
Campo Experimental Zacatecas, INIFAP

José Israel Casas Flores

ISC., Investigador del Programa de Agrometeorología y Modelaje
Campo Experimental Zacatecas, INIFAP

Orlando Ramírez-Valle

MC., Investigador del Programa de Ingeniería de riego
Campo Experimental Sierra de Chihuahua, INIFAP

Noé Chavez-Sánchez

Dr., Investigador del Programa de Ingeniería de riego
Campo Experimental Delicias, INIFAP

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias.

Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina, Delegación Coyoacán México, D.F.

C.P. 04010 México, D.F. Teléfono (55) 3871-8700.

TÉCNICAS PARA ESTIMAR Y MONITOREAR LA DEMANDA DE AGUA EN LOS CULTIVOS

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias
Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina
Delegación Coyoacán
México, D.F.
C.P. 04010 México, D.F. Teléfono (55) 3871-8700

ISBN: 978-607-37-1039-8

Primera Edición: Diciembre 2018

No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia o por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito a la institución.

Cita correcta:

Servín-Palestina M., Casas-Flores JI., Ramírez-Valle O. y Chávez-Sánchez N. 2018. Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos. Libro técnico No. 17. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP, 341 páginas.

CONTENIDO

Capítulo 1.	1
Conceptos Básicos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Concepto de riego	3
1.3. Evapotranspiración del cultivo (Etc)	8
1.4. Componentes del riego por goteo	11
1.5. Diseño agronómico de un sistema de riego por goteo	12
1.6. Bibliografía	45
Capítulo 2	47
Evaluación de un Sistema de Riego.....	47
2.1. Introducción	47
2.2. Riego	50
2.3. Métodos y sistemas de riego	51
2.3.1. Clasificación de los sistemas de aspersión.	52
2.3.2. Sistema de riego por pivote central	53
2.3.3. Evaluación hidráulica del pivote central.	56
2.3.4.-Procedimiento para evaluar un sistema de riego por aspersión portátil.	73
2.3.5. Procedimiento para la evaluación hidráulica de riego por goteo.	89
2.4. Bibliografía	99
Capítulo 3	102
Mantenimiento y operación	102
3.1. Introducción	102
3.2. Consideraciones generales para la operación de los sistemas de riego	103
3.2.1. Cuanto y Cuando Regar	103
3.2.2. Encendido y apagado del Sistema	104
3.2.3. Rendimiento del Equipo.....	105
3.2.4. Equipo Necesario para las evaluaciones	105
3.2.5. Equipo de Bombeo	109
3.2.6. Mantenimiento	111

3.2.6.1.	Del Sistema.....	111
3.2.6.2.	Planta de bombeo.....	113
3.2.6.2.1.	Mantenimiento del equipo cuando no se usa	113
3.2.6.2.2.	Preparación del equipo para la temporada de riegos	115
3.3.	Riego localizado	116
3.3.1.	Objetivo del riego por goteo.....	116
3.3.2.	Ventajas del riego por goteo.....	117
3.3.3.	Operación del sistema de riego por goteo	119
3.3.3.	Mantenimiento del sistema de riego por goteo.....	121
3.3.4.1.	Reparación de fugas.....	121
3.3.4.2.	Inyección de productos químicos para el tratamiento del agua ...	122
3.3.4.3.	Prevención del taponamiento de los goteros	126
3.3.4.4.	Aplicación de cloro.....	127
3.4.	Control de pH.....	130
3.5.	Precipitación de Carbonatos de Calcio y Magnesio	130
3.6	Bibliografía	145
Capítulo 4	148
Programación de riego con sensores de humedad.....		148
4.1.	Introducción	148
4.2.	Conceptos básicos	150
4.3.	Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.	154
4.4.	Déficit permitido en el manejo del riego (DPM)	155
4.5.	La profundidad de la raíz	157
4.6.	Medición del agua del suelo	159
4.6.1.	Sensores granulares de la matriz y bloques de yeso	160
4.6.1.1	Funcionamiento	160
4.6.1.2	Instalación y lectura	162
4.6.2.	Sensores que miden la constante dieléctrica del suelo	166
4.6.2.1	Funcionamiento	167

4.6.2.2 Instalación y lectura	168
4.6.3. Tensiómetro	171
4.6.3.1 Funcionamiento	172
4.6.3.2 Instalación y lectura	174
4.6.4. Sondas de neutrones	175
4.6.4.1 Funcionamiento	176
4.7. Ventajas y desventajas de los sensores seleccionados para medir la humedad del suelo	178
4.8. Manejo de riego con sensores de humedad.	180
4.8.1 Calibración de sensores de humedad	180
4.8.2. Programación de riego.....	185
4.9. Bibliografía.....	189
Capítulo 5.	193
Metodología de ajuste del coeficiente de cultivo para programación de riego	193
5.1.- Introducción	193
5.2.- Modelo de coeficiente de cultivo ajustado	195
5.2.1.- Relación Evapotranspiración - Rendimiento	195
5.2.2.- Análisis de datos experimentales	200
5.2.3.- Modelo de coeficiente del cultivo de referencia.....	206
5.2.4.- Coeficiente del cultivo ajustado	210
5.3.- Grados días de desarrollo	214
5.3.1.- Calculo de grados días de desarrollo (GDD).....	215
5.3.2.- Metodología del Seno Simple.....	216
5.4.- Método de balance hídrico climático	221
5.5. Bibliografía.....	232
Capítulo 6	237
Pronóstico del riego en maíz (<i>Zea mays</i> , L.) con un modelo integral basado en el concepto grados día (°D).....	237
6.1- Introducción	237
6.1.1- Antecedentes	240
6.2- Materiales y métodos	242
6.2.1- Descripción del área de estudio	242

6.2.2- Descripción del trabajo agronómico	244
6.2.3- Descripción del modelo integral basado en el concepto grados día (D.)	245
6.3- Resultados y discusión	250
6.3.1- Fenología en función de los grados día (D.)	250
6.3.2- Pronóstico del riego en maíz	253
6.3.3- Rendimiento de grano en maíz	254
6.4- Conclusiones	255
6.5.- Bibliografía	257
Capítulo 7	260
Estimación de la demanda hídrica en los cultivos utilizando el modelo METRIC	260
7.1 Introducción	260
7.2 Materiales y Métodos	263
7.2.1 Área de estudio	263
7.2.2 Selección de imágenes	264
7.2.3 Selección de píxeles	265
7.2.4. Datos meteorológicos	270
7.3 Resultados y Discusión	273
7.4. Conclusiones	284
7.5. Bibliografía	285
Capítulo 8	289
Estimación de demanda hídrica en los cultivos mediante imágenes de satélite y modelo SEBAL	289
8.1.- Introducción	289
8.2. Principio de la percepción remota o teledetección.	291
8.3.- Imagen de satélite Landas 8.	296
8.4.- Componentes del Balance de Energía en el Modelo SEBAL.	297
8.4.1.- Radiación Neta.	298
8.4.2.- Flujo de Calor del Suelo.	299
8.4.3.- Flujo de Calor Sensible.	299
8.4.4.- Temperatura del Aire.	300
8.5.- Metodología para estimar consumo de agua de los cultivos.	300
8.5.1.- Descarga de la imagen de satélite.	300

8.5.2.- Obtención de datos meteorológicos.	301
8.5.3.- Procesamiento y calibración de las imágenes.	302
8.5.4.- Estimación de la evapotranspiración (<i>ET</i>) mediante el modelo SEBAL.....	303
8.5.5.- Generación de mapas en el software “QGIS”.	322
8.6.- Caso de estudio: Estimación de consumo de agua en maíz forrajero mediante imágenes de satélite Landsat 8.0 y modelo SEBAL.	323
8.7.- Conclusiones.	336
8.8 Bibliografía.....	337

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Capítulo 1. Conceptos Básicos

Fabiel Vázquez Cruz¹
Miguel Servín Palestina^{2*}
Orlando Ramírez Valle³
Noé Chávez Sánchez⁴

1.1. Introducción

La escasa disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas de muchos países constituye una particular limitante para garantizar la producción o para expandir la frontera agrícola. Por otro lado, la explosión demográfica y la demanda creciente de sectores económicos, agrava la competencia por el agua. Lo anterior hace necesario impulsar programas para promover la conservación y el uso eficiente del agua en el sector agropecuario, que es uno de los mayores consumidores de dicho recurso, mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos, tanto para conducir, distribuir y aplicar el agua de riego, como para diseñar, revisar y evaluar los sistemas de riego, con la finalidad de asegurar un funcionamiento óptimo.

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

² Campo Experimental Zacatecas, Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5 Calera Zacatecas, México CP: 98500 *servin.miguel@inifap.gob.mx.

³ Campo Experimental Sierra de Chihuahua

⁴ Campo Experimental Delicias

En la actualidad, el sistema más eficiente de riego es el goteo, por lo que su uso se ha extendido ampliamente a diferentes cultivos, incluyendo los frutales. El ahorro de agua es significativo, ya que solo se humedece alrededor de 33 a 50 % de la superficie de la parcela, es decir, solo en hileras donde se encuentran establecidas las plantas.

Hoy en día el uso de esta técnica de riego en los cultivos ha comenzado a tomar gran impulso por su alta eficiencia, además de que permite una inyección rápida, eficiente y uniforme de fertilizantes y agroquímicos mediante la técnica de la fertirrigación y quimigación, respectivamente.

El requerimiento de agua de los cultivos está influenciado por las condiciones climáticas (temperatura, humedad, radiación y velocidad del viento) y características de la planta (área foliar, características aerodinámicas y regulación estomática de las hojas). Generalmente las necesidades hídricas de los cultivos son estimadas a partir de la suma de la evaporación del suelo y la transpiración de la planta, proceso conocido como evapotranspiración.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

1.2. Concepto de riego

El aportar agua a cualquier superficie dedicada al cultivo de plantas se denomina riego. Algunas definiciones clásicas, como la de que, riego es aplicar agua artificialmente a los cultivos para complementar la acción de lluvia, llevaron a la conclusión de que esta definición era muy general, pues había, además que poner el agua a disposición de la planta para que ésta pudiera aprovecharla de manera eficiente.

El riego puede ser definido como la aplicación oportuna y uniforme de agua a la zona de raíces, para reponer el agua consumida por los cultivos entre dos aplicaciones sucesivas.

Por definición, el agua se aplica al suelo y no a la planta, reponiendo lo gastado. Esta agua es consumida por las plantas en un tiempo comprendido entre dos aplicaciones sucesivas. Es por ello, que es importante el estudio de suelo desde el punto de vista físico. Igualmente, se aplica agua a la zona de raíces y no se riega la superficie del suelo.

Relación suelo-agua-planta en sistema de riego por goteo

Las relaciones más importantes son:

- **Capacidad de retención de humedad:**

La retención de humedad se refiere a la capacidad que tienen los suelos de retener humedad. Esta propiedad de los suelos depende de varios factores entre los cuales se destacan: la textura, la densidad aparente, los coloides del suelo y la materia orgánica.

- **Infiltración:**

La infiltración se refiere al paso del agua desde a superficie del terreno hacia el perfil del suelo. La tasa de infiltración depende de varios factores fijos tales como: textura y estratificación del suelo y materia orgánica.

- **Ascenso capilar:**

El ascenso capilar es el movimiento del agua desde el nivel freático por efecto de la capilaridad de los suelos. El ascenso capilar depende de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

la textura y composición de los suelos y de los gradientes de humedad existentes. El ascenso capilar puede alcanzar alturas mayores de 1 m.

- **Conductividad hidráulica**

La conductividad hidráulica se puede definir como la capacidad de transmisión de agua de los suelos, esta puede ser saturada o no saturada. En la práctica solo se usa la conductividad hidráulica saturada, comúnmente denominada permeabilidad. Esta propiedad de los suelos depende en gran parte de la textura de los suelos.

- **Curvas de drenaje de los suelos**

La curva de drenaje de los suelos indica la forma mediante la cual el suelo pierde agua por efecto de la gravedad.

El estudio y análisis de estas relaciones requiere de un conocimiento profundo de física de suelos, en particular de los potenciales de agua en el suelo.

Para la planificación de un sistema de riego debe considerarse algunos factores básicos como: velocidad de infiltración de agua en el

suelo, capacidad de retención de agua en el suelo, características del flujo del agua en el suelo, magnitud en profundidad del sistema de raíces, que es característica de cada especie y cantidad de agua que necesita el cultivo para su crecimiento y desarrollo.

Capacidad de retención de humedad: Los suelos pueden retener humedad de acuerdo a sus características físicas. El agua en el suelo es retenida por los fenómenos de cohesión y adhesión. La fuerza con que las partículas retienen el agua de acuerdo al área de las mismas. La fuerza con que las partículas retienen el agua es conocida como potencial mátrico del agua en el suelo. El término retención de humedad está íntimamente ligado a la disponibilidad de agua para las plantas.

Existen tres puntos característicos de humedad en el suelo: *humedad de saturación, capacidad de campo y punto de marchitez permanente.*

La humedad del suelo: El contenido de agua de un suelo en un momento dado se denomina a la humedad del suelo y puede expresarse de la siguiente manera:

Contenido con base en peso seco. El contenido de humedad con base en peso, es la forma típica de expresar el contenido de agua de un

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

suelo. Para su determinación se toman muestras de suelo, se pesan y luego se secan en una estufa a temperatura de 105 °C durante 24 horas. Las muestras secas se pesan de nuevo para obtener el peso seco. El contenido de humedad será:

$$HS = \frac{(\text{Peso húmedo} - \text{Peso seco})}{\text{Peso seco}} = \frac{Pa}{Ps} \quad \text{Ec.1.1}$$

Dónde:

HS: Humedad del suelo (ad)

Pa y Ps: Pesos del agua (g) y del suelo (g) respectivamente.

El resultado de HS se puede expresar como una fracción o en porcentaje. Esta metodología se denomina el método gravimétrico de determinación de la humedad del suelo. La humedad del suelo se puede determinar por métodos indirectos.

Contenido de humedad expresado en forma de volumen o lámina. Para fines prácticos, la humedad del suelo debe ser expresada en unidades reales. Obteniéndose de la siguiente manera:

$$L = HS \times Da \times P$$

Ec.1.2

Dónde:

L: Lámina de agua en el suelo (cm)

Da: Densidad aparente (g/cm^3)

P: Profundidad del suelo o raíces (cm)

Es importante que las unidades de L se expresen en milímetro (mm), por ser es la misma utilizada para la precipitación y evaporación. La lámina también puede ser expresada como fracción en la forma de cm/cm, o sea centímetros de agua por centímetro de profundidad del suelo. La unidad de milímetros tiene la ventaja adicional por ser equivalente a un litro por metro cuadrado ($1/\text{m}^2$).

1.3. Evapotranspiración del cultivo (Etc)

El efecto combinado de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo recibe el nombre de evapotranspiración, resultado del proceso por el cual, el agua cambia de estado líquido a gaseoso, y directamente, o a través de las plantas, vuelve a la atmosfera en forma de vapor.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La evapotranspiración o necesidad (consumo) de agua por los cultivos se refiere al agua que utilizan las plantas en la transpiración más la evaporada directamente desde la superficie del suelo. Por lo general se mide en mm/día o mm/mes, y depende de la interacción entre factores climáticos, botánicos, edáficos y de manejo del cultivo. En un periodo de 24 horas la evapotranspiración varía de acuerdo a como se comportan los factores que influyen en ella.

La evapotranspiración es baja en los primeros estadios de la etapa de crecimiento de la planta; se incrementa a medida que la planta crece en altura, y en área foliar, hasta alcanzar un máximo en la etapa de fructificación y luego disminuye en forma progresiva hasta la etapa de cosecha.

Evapotranspiración potencial: La evapotranspiración potencial es el efecto combinado de la evaporación del agua, del suelo y de la transpiración de las plantas. La evapotranspiración potencial es el valor máximo de la evapotranspiración que puede ocurrir en un momento dado si no hay limitaciones de suelo y agua.

En la práctica, la evapotranspiración se estima por métodos indirectos basados en el clima y calibrados con información obtenida con lisímetros. La mayoría de estos métodos utilizan un cultivo de referencia o la evapotranspiración de una superficie.

La mayoría de estos métodos utiliza un cultivo de referencia o la evapotranspiración de una superficie con agua libre. La evapotranspiración se calcula:

$$E_t = K_c \cdot E_{tp} \qquad \text{Ec.1.3}$$

Dónde:

E_t: Evapotranspiración (mm)

K_c: Coeficiente de cultivo (ad)

E_{tp}: Evapotranspiración potencial para un cultivo de referencia, generalmente alfalfa o pasto bermuda (mm)

La medida de la evapotranspiración debe ser tomada en cuenta para elegir el mejor sistema de riego para nuestro cultivo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

1.4. Componentes del riego por goteo

El riego por goteo consiste en un sistema de carga y una red de tuberías de distribución. El sistema de carga (cabezal de control) generalmente está constituido por:

- La bomba
- El filtro
- El medidor de gasto
- Manómetros de presión
- Inyector de fertilizante
- Válvula de control
- Regulador de presiones
- Unidad de control automático

La red de distribución consiste de un sistema de tuberías, emisores y un circuito de válvulas. (Figura 1.1).



Figura 1.1 Esquema de los principales componentes del sistema de riego por goteo (Toro®).

La función de los emisores es la de producir una caída de presión de tal forma que solo un pequeño flujo de agua sea descargado.

1.5. Diseño agronómico de un sistema de riego por goteo

Los procedimientos que se siguen para el diseño de un sistema de riego por goteo son semejantes a los que se utilizan para diseñar un sistema de riego por aspersión. Las condiciones que deben guardar el suelo, el suministro de agua, el clima y los aspectos agronómicos deben

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

ser cuidadosamente evaluadas. Existen, sin embargo, un número de condiciones que le son exclusivos al riego por goteo.

En general se requiere de los siguientes datos: Superficie de parcela, tipo de suelo, tipo de cultivo, superficie que ocupa cada planta, caudal total disponible, diferencia de cotas entre la captación y la cabecera de la parcela, desnivel de la parcela, calidad del agua, horas que se puede regar al día y estimación de la Et potencial máxima diaria.

Lamina de riego (Lr).

En primer lugar, se determina el valor de la evapotranspiración real o del cultivo (Etc), a partir de datos climatológicos y el coeficiente de desarrollo. Para el primer riego, la lámina requerida para llevar la humedad del suelo a CC, es: *Ec.1.4.*

$$Lr = \left(\frac{CC - PMP}{100} \right) * DA * PR \quad \text{Ec.1.4}$$

Dónde:

Lr: Lamina de riego (cm)

CC: Capacidad de Campo (%)

PMP: Punto de Marchitez Permanente (%)

DA: Densidad aparente (gr/cm^3)

PR: Profundidad de la raíz (cm)

Déficit permisible de humedad (DPH)

Aunque las plantas pueden extraer agua del suelo hasta un nivel de humedad que corresponde con el límite inferior, existe un nivel de humedad entre el límite superior y el inferior a partir del cual las raíces encuentran mayor dificultad para extraer el agua y se produce una disminución en la transpiración, lo que suele traer consigo pérdidas de producción.

Este se denomina Déficit Permisible de Humedad (DPH) y normalmente se representa como una fracción del Intervalo de Humedad Disponible.

En programación de riegos suele emplearse muy frecuentemente un valor entre 0.6 y 0.8. Un valor de 0.65 se considera muy adecuado y es utilizado

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

con frecuencia, pero en cultivos de alto valor económico, como por ejemplo los hortícolas, no debe usarse un valor de DPH mayor de 0.5 para asegurar que el cultivo no sufrirá en ningún momento falta de agua y ello pueda disminuir la producción. El DPH se obtiene de la siguiente manera:

Ec1.5.

$$DPH = LR * F \qquad \qquad \qquad Ec.1.5$$

Dónde:

DPH: Déficit permisible de humedad (mm)

LR: Lamina de riego (mm)

F: Factor de deflexión de humedad (%)

Intervalo de riego (Días)

El intervalo entre riegos, se obtiene con los datos anteriores, es decir la frecuencia con la cual esa lamina de riego debe aplicarse: *Ec.1.*

6.

$$IR = \frac{DPH}{ETd} \qquad \qquad \qquad Ec.1.6$$

Dónde:

IR: Intervalo de riego (días)

DPH: Déficit Permisible de Humedad (mm)

ETd: Evapotranspiración de diseño (mm/día)

Lamina de riego bruta (mm)

Para calcular el volumen bruto que debe aplicar cada emisor es necesario calcular la lámina bruta. *Ec. 1.7.*

$$LRB = \frac{IR * ETd}{Ue} \qquad Ec.1.7$$

Dónde:

LRB: Lámina de riego bruta (mm)

IR: Intervalo de riego (días)

ETd: Evapotranspiración de diseño (mm/día)

Ue: Uniformidad del emisor (%).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Volumen bruto de la línea regante (VBLR).

Este volumen es el requerido por la planta para satisfacer su demanda evapotranspirativa; este volumen debe ser proporcionado por el emisor, por lo tanto, depende de la LRB y del Ahum: *Ec 1.8.*

$$VBLR = Dmg * LLr * LRB \qquad \qquad \qquad Ec 1.8$$

Dónde:

VBLR: Volumen bruto de la línea regante

Dmg: Diámetro de mojado del gotero (m)

LLr: Longitud de la línea regante

LRB: Lámina de riego bruta (mm)

Tiempo de riego por unidad (Tr)

La unidad de riego está integrada por la superficie que se puede regar en forma simultánea; esta superficie depende del gasto disponible para el sistema de riego y de la intensidad de aplicación del emisor. En la unidad de riego todos los emisores operan en forma simultánea; por lo que, el tiempo de operación de la unidad de riego y el emisor es el mismo. *Ec.1.9.*

$$N_e = \left(\frac{LLR}{S_e} \right) \quad Ec.1.9$$

Dónde:

Ne: Numero de emisores por línea regante

LLR: Longitud de la línea regante (m)

Se: Separación entre emisores (m)

Ecuación 1.10.

$$T_r = \left(\frac{VBLR}{N_e * Q_e} \right) \quad Ec.1.10$$

Dónde:

Tr: Tiempo de riego por unidad

VBLR: Volumen bruto de la línea regante

Ne: Numero de emisores por línea regante

Qe: Gasto del emisor (lph)

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo.

Carga de operación del emisor.

Ecuación característica del emisor: se obtiene en bancos de pruebas y es imprescindible para el diseño de la instalación. Viene dado por la siguiente expresión: *Ec. 1.11*.

$$q = KH^x \qquad \text{Ec. 1.11}$$

Dónde:

q: Caudal del emisor (l/h)

K: Coeficiente de descarga, que es adimensional

H: Presión a la entrada del emisor (mca)

X: exponente de descarga (adimensional), que indica la sensibilidad de los emisores a la variación de presión, de manera tal, que cuanto más se aproxime a la unidad, el régimen hidráulico se acerca al lamiar y para $x= 0.5$, el régimen es turbulento.

En teoría, un emisor autocompensante perfecto tendría un $x= 0$, aunque en la práctica se considera autocompensante el emisor de $x < 0.2$.

Los coeficientes K y X se determinan representando q vs H (Figura 1.2), en un gráfico de escala logarítmica. La pendiente de la recta de ajuste es x y la intersección de esta línea para H= 1 es K: *Ec.1.12*.

$$x = \frac{\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right)}{\log\left(\frac{H_1}{h_2}\right)} \quad K = \frac{q_1}{H_1^x} \quad \text{Ec.1.12}$$

Dónde:

q1/q2: Relación entre el caudal del primer y último emisor.

H1/h2: Relación entre la presión a la entrada y de salida de la línea regante.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

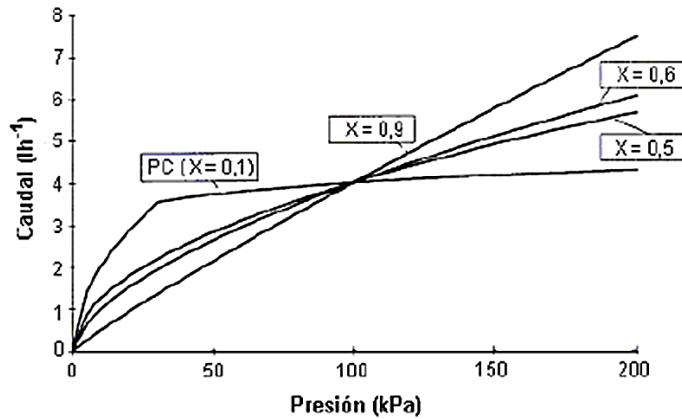


Figura 1.2. Curvas de caudal – presión para condiciones típicas. Fuente: Pereira y Trout (1999).

La de carga hidráulica de operación de la unidad de riego se obtiene de la forma siguiente: *Ec. 1. 13.*

$$H_0 = \left[\frac{q}{k \left(\frac{100 - \%q_e}{100} \right)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{x}} \quad \text{Ec. 1. 13.}$$

Dónde:

H₀: Carga de operación de la unidad de riego (m)

q: gasto medio del emisor

%q_e: variación entre el primer y último emisor (5%)

Ecuación 1.14.

$$\Delta H = H_0 \left[1 - \left(\frac{100 - \%q_e}{100} \right)^{\frac{1}{x}} \right] \quad \text{Ec.1.14}$$

Dónde:

ΔH : Pérdida de carga permisible (m)

H_0 : Carga de operación de la unidad de riego (m)

q : gasto medio del emisor

$\%q_e$: variación entre el primer y último emisor (5%)

Pérdida de carga permisible en la línea regante

Las líneas regantes, distribuidoras o de conducción realmente se diseñan de manera diferente. Las líneas de conducción se diseñan como tuberías que no tienen salidas; en contraste, las líneas laterales sobre las que se localizan los emisores (en los sistemas de riego por aspersión, goteo, microaspersión) y las secundarias de los sistemas de riego localizado, sobre las que se ubican las líneas laterales se diseñan considerando la teoría de tuberías con salidas múltiples.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Lograr que un diseño sea eficiente, significa que independientemente de las dimensiones del sistema, de las condiciones topográficas y del tipo de cultivo, se garantice una diferencia en caudal del 10 % entre los emisores más distantes y consecuentemente, la variación de presión no mayor al 21 % en estos mismos emisores. Las pérdidas de carga permisible se obtienen de la forma siguiente: *Ec.1.15*.

$$\Delta H_{L_r} = \left(\frac{\%Hlr}{100} \right) (\Delta H) \quad \text{Ec.1.15}$$

Dónde:

ΔH_{L_r} : Perdida de carga permisible en la línea regante (m)

$\%Hlr$: Perdida de carga permitida en la línea regante (55%)

ΔH : Perdida de carga permisible (m)

Perdida de carga permisible en el distribuidor: para la perdida de carga del distribuidor Karmen y Karmelli recomiendan el 45%, quedando de la siguiente manera: *Ec.1.16*.

$$\Delta H_d = \left(\frac{\%H_d}{100} \right) (\Delta H)$$

Ec. 1.16

Dónde:

ΔH_d : Perdida de carga permisible en el distribuidor (m)

$\%H_d$: Perdida de carga permitida en el distribuidor (45%)

ΔH : Perdida de carga permisible (m)

Diámetro de la línea regante.

Para obtener el diámetro del regante se hacen tanteos con diferentes diámetros de tubos, seleccionando aquel que de un valor igual o mayor al número de salidas (emisores), limitando la perdida de carga permitida en la línea regante, y se utiliza la siguiente ecuación: *Ec. 1. 17.*

$$N = \left[\frac{hf_{(Total)}}{\left(\frac{10.29n^2sq^2}{d^{16/3}} + \frac{K_Lq^2}{2gA^2} \right) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2N} + \frac{1}{6N^2} \right)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Ec. 1.17

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Dónde:

N: Numero de emisores calculado

n: Coeficiente de rugosidad (0.0079)

s: Separación entre emisores (m)

hf_(Total): Perdidas de cargas permisible en la línea regante (m)

q: Gasto del emisor (m^3/s)

K_L: Constante (0.5)

d: Diámetro propuesto de la línea regante

A: Área de la línea regante propuesta (m^2)

g: Aceleración de la gravedad (m/s)

Los diámetros comerciales para la línea regante se presenta el siguiente cuadro. (Cuadro1.1).

Cuadro 1.1. Diámetros internos y nominales de las tuberías

Diámetro nominal (mm)	Diámetro Interno (mm)	diámetro Interno (m)
12	10.3	0.0103
16	13.2	0.0132
17	13.6	0.0136
19	24.73	0.02473
20	16.73	0.01673
25	31.38	0.03138
32	39	0.039
38	45.31	0.04531
50	55.7	0.0557
60	68.6	0.0686
75	82.1	0.0821
100	105.5	0.1055
160	154.4	0.1544
200	193	0.193
250	241.2	0.2412
315	303.8	0.3038

Un emisor con intensidad de aplicación alta genera unidades pequeñas; mientras que, un emisor con una intensidad de aplicación baja genera

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

unidades grandes. La unidad de riego generada a partir de la intensidad de aplicación debe ser múltiplo de la superficie total del sistema con objeto de que todas las unidades de riego sean de igual tamaño y se simplifique la operación del sistema de riego. *Ec. 1.18.*

$$Nu = \frac{Qd}{Qu} \quad Ec. 1.18$$

Gasto total por unidad. *Ec. 1.19*

$$Q \text{ total por unidad (lps)} = 4000 (Ne) * (qe) * (NLr) \quad Ec. 1.19$$

Dónde:

Nu: número de unidades

Qd: Gasto disponible (lps)

Qu: Gasto de la unidad de riego (lps)

Ne: Numero de emisores por línea regante

qe: Gasto del emisor (lph)

NLr = número de líneas regantes

Numero de emisores totales por unidad. Ec. 1.20.

$$Ne = \text{Número de unidades} * (Ne) * (NLr) \quad Ec. 1.20.$$

Ancho de la unidad de riego. Ec. 1.21

$$\text{Ancho de la unidad (m)} = Se + 2Se + (Ne - 1) \quad Ec.1.21$$

Largo de la unidad. Ec.1.22.

$$\text{Largo de la unidad (m)} = Slr + 2Slr ((Nlr - 1) \quad Ec. 1.22.$$

Superficie de la unidad. Ec. 1.24.

$$\text{Superficie de la unidad (ha)} = (\text{Ancho de la unidad} * \text{largo de la unidad}) \quad Ec.1.24.$$

Dónde:

Ne: Numero de emisores por línea regante

NLr: Número de líneas regantes

Se: Separación entre emisores (m)

Slr: Separación de líneas regantes

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Calculo de las pérdidas de carga en el control general del equipo.

Se deben de considerar las pérdidas de carga nominales para los equipos que se instalen, por ejemplo, decantador, dosificador de agroquímicos y filtros.

Pérdidas de carga localizadas en el sistema.

Todas las pérdidas de carga por accesorios que se presentan en las tuberías y unidades de control autónomo, se pueden calcular con las formulas tradicionales; sin embargo, para simplificar los cálculos se suman las pérdidas de carga del sistema y se considera que el 10%, son las pérdidas de carga localizadas.

Carga potencial de posición.

Los desniveles topográficos entre el equipo de bombeo y los diferentes sitios claves del sistema de riego, deben de considerarse para aumentar la carga necesaria de bombeo cuando es desfavorable el desnivel, o reducirla en el caso de ser aprovechable hidráulicamente.

Carga total de operación del sistema.

Se obtiene sumando todas las pérdidas de carga del sistema, tomando en cuenta la carga potencial de posición y la altura de bombeo. Se requiere que la bomba sea capaz de bombear el gasto de diseño, con la carga total del sistema. Si hay problemas de abatimiento del nivel de bombeo, se debe considerar el incremento de la altura de bombeo, por un lapso de 5 años o los necesarios para evitar la falta de capacidad en un tiempo corto.

Ejemplo diseño agronómico e hidráulico de riego por goteo para cultivos forrajeros.

Datos:

Cultivo: Forrajeros

Suelo: Franco Arcillo-Arenoso CC= 41%, PMP= 22%, Da= 1.5 g/cm³

Clima: Cálido seco

Superficie a regar: 26.6 Ha

Gasto disponible: 30.6 lps

Evapotranspiración de diseño: 8 mm/día

Profundidad de raíces: 40 cm

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Características del terreno:

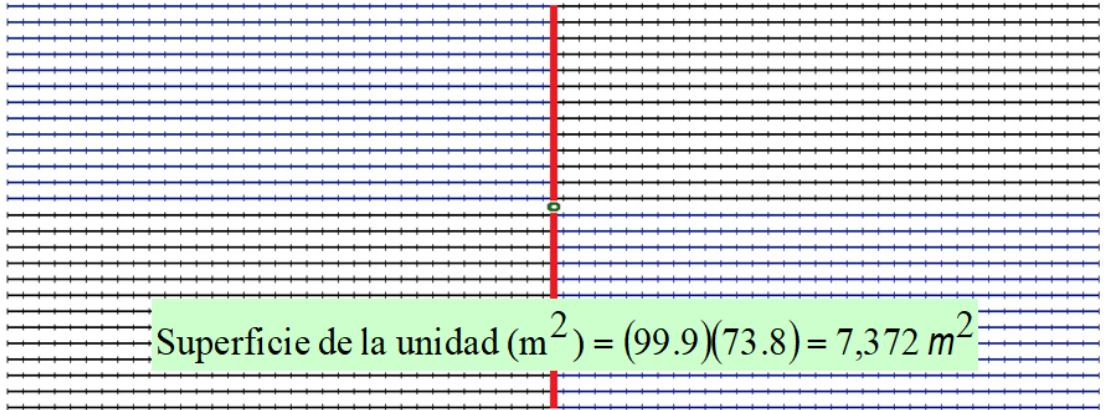


Figura 1.3. Superficie del terreno.

Lamina de riego. (Ec. 1. 4)

$$Lr = \left(\frac{41 - 22}{100} \right) * 1.5 * 40$$

$$Lr = 11.4 \text{ cm} = 114 \text{ mm}$$

Déficit permisible de humedad. (Ec. 1. 5)

Se desea regar todos los días por lo tanto se aplicará el agua de evapotranspiración máxima de los meses más calurosos del año.

$$DPH = 8 \text{ mm/dia}$$

Intervalo de riego en días. (Ec.1. 6)

$$IR = \frac{8 \text{ mm/dia}}{8 \text{ mm/dia}}$$

$$IR = 1 \text{ dia}$$

Lamina de riego bruta. (Ec.1. 7)

$$LRB = \frac{1 \text{ dia} * 8 \text{ mm/dia}}{0.8}$$

$$LRB = 10 \text{ mm}$$

Volumen bruto de la línea regante. (Ec.1. 8)

De acuerdo a la curva de capilaridad de este suelo en 3 días se mojan 75 cm de radio, por lo tanto, la máxima separación entre goteros será de 75 cm para un traslape del 100 por ciento, pero en el mercado las

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

separaciones más comunes son de 10, 20, 30, 40, 50 y 60 cm (cada casa comercial tiene sus separaciones entre goteros).

El riego del maíz con riego localizado se realiza utilizando las adecuadas cintas de goteros de duración estacional provistas de goteros de laberinto y de flujo turbulento de diferente caudal y distancia entre los goteros. Generalmente para este cultivo se aconseja usar caudales de 1.0-1.5 l/h y distancias entre goteros entre 30 y 40 cm.

Las cintas de gotero pueden ser instaladas una por fila, pero por varios análisis y experiencias se ha llegado a la conclusión de que la instalación de una cinta de goteo cada dos filas pueden considerarse satisfactoria. Haciendo de este modo y teniendo una distancia entre las filas de maíz de 75 cm, conviene instalar las cintas de goteo cada 150 cm. (Irritec).

$$VBLR = 0.75 \text{ m} * 50 \text{ m} * 0.01 \text{ m}$$

$$VBLR = 0.375 \text{ m}^3 = 375 \text{ lts}$$

Tiempo de riego por unidad. (Ec. 1.9 y 1.10)

$$Ne = \left(\frac{100 \text{ m}}{0.3 \text{ m}} \right)$$

$$Ne = 333$$

$$Tr = \left(\frac{375}{333 * 1.12} \right)$$

$$Tr = 1 \text{ hora}$$

Diseño hidráulico de un sistema de riego por goteo.

Para obtener la carga de operación del emisor y de acuerdo a las características del terreno se utiliza la siguiente ecuación:

$$q = KH^x$$

Sus coeficientes fueron descritos anteriormente en la ecuación 11 y se determinan de la siguiente manera:

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Aqua-TraXX® PBX

Aplicaciones

Aqua-TraXX® PBX es ideal para el riego de:

- **Cultivos extensivos:**
maíz, sorgo, remolacha, tabaco;
- **Hortícolas:**
 - Solanáceas (tomates, patatas, pimientos, berenjenas);
 - Crucíferas (coliflores, brócolis, coles);
 - Compuestas (alcachofa, lechugas y achicoria);
 - Cucurbitáceas (calabacines, melones, sandías, pepinos, calabazas);
 - Liliáceas (espárragos, cebollas, ajo, puerros, chalote)
 - Umbelíferas (hinojo, perejil, apio);
- **Pequeños frutos:** fresas, arándanos, frambuesas, moras, grosellas;
- **Plantas oficiales.**



Código	Separación entre goteros (cm)	Caudal por Gotero (l/h) Ⓞ		Caudal por metro (l/h/m) Ⓞ		Filtración Requerida mesh
		0,55 bar	0,7 bar	0,55 bar	0,7 bar	
Gotero (2,13 l/h)						120-140
RAx04265-yyy	10	2,00	2,13	20,00	21,30	
RAx08133-yyy	20	2,00	2,13	10,00	10,65	
Gotero (1,41 l/h)						120-140
RAx04170-yyy	10	1,29	1,41	12,90	14,10	
RAx06112-yyy	15	1,29	1,41	8,60	9,40	
RAx0884-yyy	20	1,29	1,41	6,45	7,05	
RAx1256-yyy	30	1,29	1,41	4,30	4,70	
RAx1642-yyy	40	1,29	1,41	3,23	3,53	
RAx2428-yyy	60	1,29	1,41	2,15	2,35	
Gotero (1,14 l/h)						120-140
RAx04134-yyy	10	1,02	1,14	10,20	11,40	
RAx0867-yyy	20	1,02	1,14	5,10	5,70	
RAx1245-yyy	30	1,02	1,14	3,40	3,80	
RAx1634-yyy	40	1,02	1,14	2,55	2,85	
RAx2422-yyy	60	1,02	1,14	1,70	1,90	
Gotero (0,87 l/h)						140
RAx04100-yyy	10	0,76	0,87	7,60	8,70	
RAx0667-yyy	15	0,76	0,87	5,07	5,80	
RAx0851-yyy	20	0,76	0,87	3,80	4,35	
RAx1234-yyy	30	0,76	0,87	2,53	2,90	
RAx1625-yyy	40	0,76	0,87	1,90	2,18	
RAx2417-yyy	60	0,76	0,87	1,27	1,45	
Gotero (0,64 l/h)						140
RAx0650-yyy	15	0,57	0,64	3,80	4,27	
RAx1225-yyy	30	0,57	0,64	1,90	2,13	
RAx1817-yyy	45	0,57	0,64	1,27	1,42	
Gotero (0,57 l/h)						140
RAx0467-yyy	10	0,49	0,57	4,90	5,70	
RAx0834-yyy	20	0,49	0,57	2,45	2,85	
RAx1222-yyy	30	0,49	0,57	1,63	1,90	
RAx1617-yyy	40	0,49	0,57	1,23	1,43	
RAx2411-yyy	60	0,49	0,57	0,82	0,95	
Gotero (0,42 l/h)						200
RAx0825-yyy	20	0,38	0,42	1,90	2,10	
RAx1613-yyy	40	0,38	0,42	0,95	1,05	
Gotero (0,38 l/h)						200
RAx0822-yyy	20	0,34	0,38	1,70	1,90	
RAx1611-yyy	40	0,34	0,38	0,85	0,95	
Gotero (0,30 l/h)						200
RAx0817-yyy	20	0,27	0,30	1,35	1,50	
RAx1608-yyy	40	0,27	0,30	0,68	0,75	

LÍNEA DE RIEGO

- Obtención de coeficiente **K** y **x**. (Ec. 1.12)

$$x = \frac{\log\left(\frac{1.02}{1.14}\right)}{\log\left(\frac{5.61}{7.14}\right)}$$

$$x = 0.46$$

$$K = \frac{1.02}{5.61^{0.46}}$$

$$K = 0.46$$

Carga hidráulica de la unidad de riego

La carga hidráulica de la unidad de riego se obtiene con la Ec.1.

13.

$$H_0 = \left[\frac{q}{k \left(\frac{100 - \%q_e}{100} \right)^{0.5}} \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$H_0 = 10.08 \text{ m}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Pérdida de carga permisible.

La pérdida de carga permisible se obtiene con la *Ec.1. 14*.

$$DH = H_0 \left[1 - \left(\frac{100 - \%q_e}{100} \right)^{\frac{1}{x}} \right]$$

$$\Delta H = 2.33 \text{ m}$$

Pérdida permisible en la línea regante.

La pérdida permisible en la línea regante se obtiene de la siguiente manera, con la *Ec.1.15*.

$$DHL_r = \left(\frac{\% Hlr}{100} \right) (DH)$$
$$\Delta H Lr = 0.53 \text{ m}$$

Pérdida de carga en el distribuidor

La pérdida de carga en el distribuidor se obtiene con la *Ec.1.16*.

$$DH_d = \left(\frac{\% H_d}{100} \right) (DH)$$

$$\Delta Hd = 1.79 \text{ m}$$

Diámetro de la línea regante.

El diámetro de la línea regante se obtiene con la *Ec.1.17*, proponiendo un diámetro de la línea regante, para este caso será de 19 mm.

$$N = \left[\frac{hf_{(Total)}}{\left(\frac{10.29n^2sq^2}{d^{16/3}} + \frac{K_Lq^2}{2gA^2} \right) \left(\frac{1}{3} + \frac{1}{2N} + \frac{1}{6N^2} \right)} \right]^{1/3}$$

$$DLr = 19 \text{ mm}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Diámetro del distribuidor.

Se determina con la *Ec.1.18*, para este caso se propone un diámetro de 101.6 mm.

$$DLr = 101.6 \text{ mm}$$

Número de líneas regantes.

Se determina con la *Ec.1.18* con el diámetro del distribuidor calculado anteriormente.

$$NLr = 64$$

Gasto total por unidad.

Se determina con la *Ec.1.21*.

$$Q \text{ total por unidad (lps)} = 4000 (Ne) * (qe) * (NLr)$$

$$Q \text{ total por unidad} = 4000 (333) * (0.000000388) * (64) = 33.07 \text{ lps}$$

Ancho de la unidad de riego. *Ec.1.23*

$$\text{Ancho de la unidad (m)} = Se + 2Se + (Ne - 1)$$

$$\text{Ancho de la unidad (m)} = 0.3 + ((2*0.3) * (333 - 1))$$

$$\text{Ancho de la unidad (m)} = 199.5$$

Largo de la unidad. *Ec.1.22*

$$\text{Largo de la unidad (m)} = 1.5 + (2*1.5) * (64 - 1)$$

$$\text{Largo de la unidad (m)} = 190.5$$

Superficie de la unidad. *Ec.1.23*

$$\text{Superficie de la unidad (ha)} = (\text{Ancho de la unidad} * \text{largo de la unidad})$$

$$\text{Superficie de la unidad (ha)} = (199.5 * 190.5) / 10,000$$

$$\text{Superficie de la unidad (ha)} = 3.8$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Pérdida del cabezal de descarga.

Las especificaciones técnicas de los equipos de fertilización, decantación y filtrado los proporcionan los fabricantes.

- a) Pérdidas de carga por dosificador de agroquímicos. Seleccionando un venturi que succiona 220 lph de gasto para inyectar los fertilizantes al sistema, se pierden 6 m de carga hidráulica, pasando por el Venturi 650 litros por hora.
- b) Pérdida de carga en el filtro. Se seleccionan los filtros de malla y arena, esto depende de la calidad del agua; para que pasen 50 lps por el sistema de filtrado y se considera que la pérdida de carga, funcionando succión no deben de exceder 4 m.
- c) Pérdida de carga por hidrociclón. Para este caso se considera que la pérdida de carga es de 1 m de acuerdo a las especificaciones del equipo.

$$**Hcabezal:** 6+4+1= 11 \text{ m}$$

Perdidas de carga en el sistema.

$$H_f: 10.08+2.33+0.53+1.79+11 = 25.73$$

Pérdidas de carga localizadas en el sistema

$$H_l: H_e+H_r+H_d+H_c+H_{cab} = H_L: 0.1*14.73= 2.57$$

Carga total de operación del sistema.

La cota de la base de la bomba está a 120 m, y la tubería está a nivel y el desnivel entre el primer y último emisor es del 2%, además se requiere bombear 30.6 litros por segundo, la altura de bombeo es 25 metros además se propone una eficiencia del sistema de bombeo del 70%.

$$H_T: 25.73+2.57+0.02+25= 53.3$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$Pot(hp) = \frac{HT * Q}{76 * Ef}$$

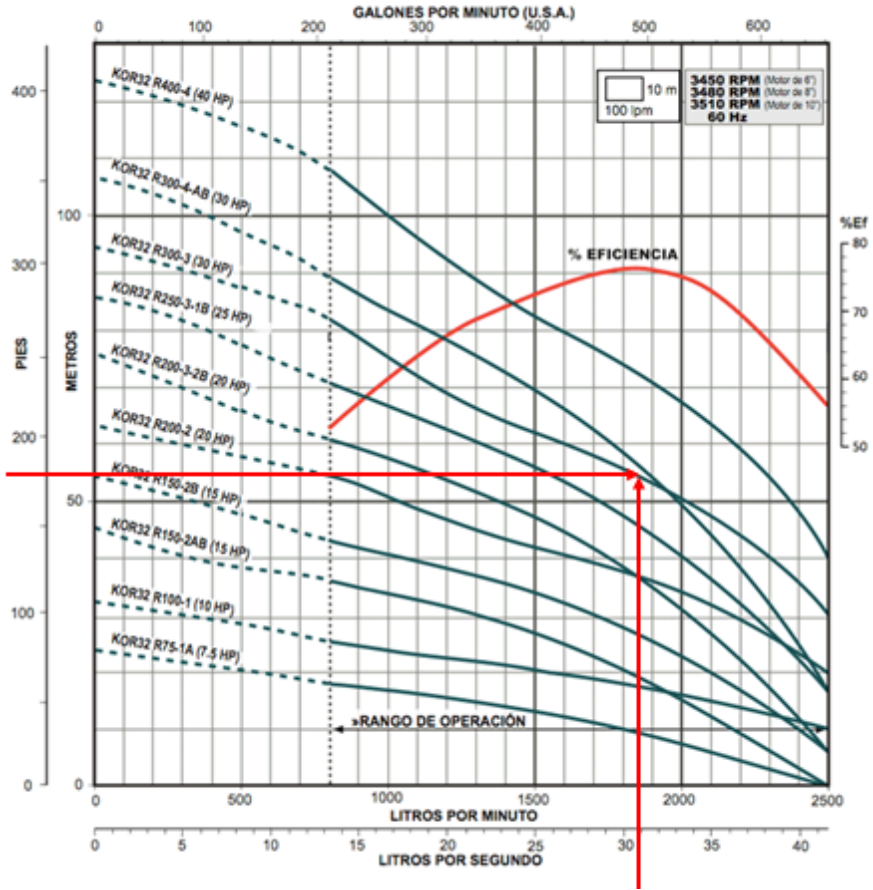
$$Pot(hp) = \frac{53.3 * 30.6}{76 * 0.7}$$

$$Pot(hp) = \frac{1630.98}{53.2}$$

$$Pot(hp) = 30.65$$

La potencia del equipo de bombeo resulto de 30.65 hp, para elegir el modelo nos dirigimos a las curvas características de las diferentes comerciales. Por ejemplo, vamos a elegir de la marca Altamira, la elección se realiza con la carga total y el gasto a bombear, interceptamos el gasto y la carga total y nos indica una bomba de 30 hp, que coincide con el calculado anteriormente.

SERIE KOR32 Descarga: 6" NPT **32 Ips**



Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

1.6. Bibliografía

1. Allen, R. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
2. Angeles Hernández, J., León Mojarro, F., & Robles Rubio, B. (2007). Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
3. Bahena D., G.; Mario A., T. C. (2007). La Tecnología de Microirrigación, una Alternativa para el Manejo Sustentable del Agua en la Producción de Maíz en el Estado de Morelos, México. Agricultura. Núm. 809.
4. Bahena D., G. et al. (2009). Sustentabilidad del Agua en la Producción de Maíces Criollos en Xalostoc, Morelos, México. Agricultura, Sociedad y Desarrollo. Vol. 6, Núm. 2.
5. Bedoya-Cardoso, M., & Ángeles-Montiel, V. (2017). Comparación de métodos para estimar pérdidas localizadas en riego por goteo. Tecnología Y Ciencias Del Agua, VIII(4), 117-125. <http://dx.doi.org/10.24850/j-tyca-2017-04-07>
6. CONAGUA. (2002). *Manual para la elaboración y revisión de proyectos ejecutivos de sistemas de riego parcelario*. Comisión Nacional del Agua, Subdirección General de Operación Gerencia de Distritos y Unidades de Riego. México: Comisión Nacional del Agua.
7. El riego y sus tecnologías. (2010). Albacete, España. Recuperado de: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/El-Riego-y-sus-Tecnologias.pdf>
8. Intagri. (2017). Intagri. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/riego-por-goteo-para-el-cultivo-de-citricos>
9. Intagri. (2017). Intagri. Recuperado de: <https://www.intagri.com/articulos/frutales/riego-por-goteo-para-el-cultivo-de-citricos>

10. Giiberries. (2013). Recuperado de:
http://www.giiberries.org/images/Riego/2_RIEGO%20LOCALIZADO.pdf
11. Maíz. (2017). Irritec - Sistemas de riego. Recuperado de:
<https://www.irritec.com/es/soluciones/agricultura/maiz/>
12. Martínez Elizondo, R. (1991). Riego localizado. Chapingo: Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación.
13. Martínez, R. (1991). *Riego localizado: Diseño y Evaluación*. Texcoco, Estado de México: Universidad Autónoma Chapingo.
14. Peña, E., & Montiel, M. (2004). Tecnificación del riego presurizado. In *Curso Internacional de Sistemas de Riego* (Vol. II, pp. 33-49). Universidad Autónoma Chapingo: Departamento de Irrigación de la UACH.
15. Pereira, L. (1999). Higher performance through combined improvements in irrigation methods and scheduling: a discussion. *Agricultural Water Management*, 40(2-3), 153-169. Recuperado de:
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(98\)00118-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(98)00118-8)
16. Producción de maíz en riego por goteo. (2017). Unisem. Recuperado de: <https://semillastodoterreno.com/2012/07/produccion-de-maiz-en-riego-por-goteo/comment-page-1/>
17. [Sistemasaltamira.com](http://www.sistemasaltamira.com). Recuperado de:
<http://www.sistemasaltamira.com/serie-kor32.php>
18. Tarjuelo Martín-Benito, J. (2005). El riego por aspersión y su tecnología. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
19. Wade Rain. (2017). Waderain.com. Recuperado de:
<http://www.waderain.com/index.php?page=handmove>.

Capítulo 2 Evaluación de un Sistema de Riego

Fabiel Vázquez Cruz¹
Orlando Ramírez Valle²
Miguel Servín Palestina³
Guillermo Jesuita Pérez Marroqui⁴

2.1. Introducción

El objetivo de los sistemas de riego es poner a disposición de los cultivos el agua necesaria para que cubran sus necesidades, complementando la recibida en forma de precipitaciones naturales. Cuando se distribuye agua por una parcela de cultivo, existen dificultades que ocasionan pérdidas e impiden que el agua se reparta de forma homogénea. Es importante solventar estas dificultades, pero lo es aún mayor cuando el agua es un recurso de escasez creciente. Para juzgar la calidad de un sistema o instalación de riego se emplean algunos conceptos que es necesario conocer. (Badillo et al, 2009).

¹ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

² Campo Experimental Sierra de Chihuahua

³ Campo Experimental Zacatecas, Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5 Calera Zacatecas, México CP: 98500.

⁴ Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Según Norero (1984) el riego es la práctica de la ingeniería más adecuada para aumentar la eficiencia del agua y la productividad de la tierra, permitiendo regular la aplicación del agua a los requerimientos de los cultivos.

Según Grassi (1998) el objetivo fundamental del riego es mejorar las condiciones y calidad de vida. Ello implica perfeccionar las condiciones económicas y sociales de los beneficiarios, así como el ambiente en el cual desenvuelven sus actividades.

Evaluar la eficiencia del sistema de riego es importante no sólo para ahorrar agua y energía eléctrica, sino también para mejorar la aplicación de fertilizantes cuando se trata de fertirrigación y favorecer las condiciones para que el cultivo exprese su máximo potencial productivo. En este sentido, es importante evaluar la uniformidad en la descarga de los goteros de manera periódica, ya que es un indicador de la eficiencia con la que se está aplicando el agua; las evaluaciones iniciales son indicativos tanto de la calidad del diseño como de la instalación, y las siguientes de las condiciones de mantenimiento y operación.

La evaluación del sistema es recomendable realizarla en los siguientes casos:

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- a) Una vez terminada la instalación del sistema de riego.
- b) Al menos una vez durante el ciclo de cultivos anuales, puede ser al inicio o a mediados de la temporada.
- c) Cuando se detecten anomalías en el gasto de los goteros. Los resultados hacen visibles los ajustes necesarios para que el sistema trabaje minimizando las pérdidas.

Así, a partir del análisis del comportamiento real del sistema, conseguiremos:

- identificar las deficiencias de diseño y de funcionamiento del sistema, y consecuentemente, las alternativas a realizar para corregir las condiciones de la explotación,
- determinar los niveles de eficiencia del sistema referidos a la aplicación y uniformidad de distribución de agua, y su comparación con los niveles potenciales admitidos,
- la obtención de datos que conduzca a la mejora de la concepción de futuros sistemas semejantes,
- hacer acopio de información en relación a la comparación de distintos métodos, sistemas de distribución y condiciones de

operación en bases económicas, con el fin de determinar su validez,

- la evaluación de la normativa que rige el funcionamiento del sistema de riego, y la propuesta de las mejoras oportunas, en su caso.

2.2. Riego

El riego es la aplicación de agua por métodos artificiales a cualquier superficie dedicada al cultivo de plantas. El riego se practica en muchas partes del mundo como complemento o sustitución de las precipitaciones naturales para aportar al suelo la humedad necesaria al cultivo de las plantas. El mantenimiento de la humedad adecuada del suelo es un factor esencial para el desarrollo de una agricultura productiva. Por otra parte, es sabido que las actividades agropecuarias son la base de la alimentación y de sobrevivencia para el hombre, por esta razón cada una de sus áreas o disciplinas de estudio e investigación, deben fortalecerse para producir más con menos recursos y a un menor costo. El riego agrícola, por su estrecha relación con el uso, el manejo y la conservación del agua, es una de estas áreas dentro de la agricultura que requiere de mayores estudios, avances tecnológicos y de la aplicación de los mismos sin deteriorar el medio ambiente. (Cisneros, 2003).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El principal desafío que enfrenta la agricultura en nuestro país es la disponibilidad y uso eficiente del agua, como insumo fundamental para la producción. Solo el 26% de la superficie cultivable cuenta con riego. Por ello el incremento de la productividad se apoya en el uso eficiente y sustentable del agua, así como en la expansión de la superficie de riego.

2.3. Métodos y sistemas de riego.

Es común referirse al riego en la parcela utilizando dos términos, métodos de riego y sistemas de riego; a veces, como sinónimos. Se hace aquí una distinción; se entiende por método de riego al conjunto de aspectos que caracterizan el modo de aplicar el agua a las parcelas regadas, y se entiende por sistema de riego al conjunto de equipamientos y técnicas que proporcionan esa aplicación siguiendo un método dado.

Pereira y Trout, (1999), señalan que se entiende por método de riego la forma en que se aplica el agua al suelo para que sea utilizada por la planta. Una forma de clasificar los métodos es (Tarjuelo 2005):

- Riego de superficie, o por gravedad, comprendiendo el riego por inundación, en canteros tradicionales y surcos cortos o en canteros con nivelado de precisión, el riego por sumersión en canteros para

arroz, el riego por infiltración en surcos o en fajas y el riego por escorrentía libre.

- Riego por aspersión, con sistemas estáticos y disposición en cuadrícula, fijo o móvil, con sistemas móviles de cañón o ala sobre carro tirada por enrollador o por cable, y sistemas de lateral móvil, pivotante o de desplazamiento lineal.
- Riego localizado, o microrriego, comprendiendo el riego por goteo, por difusores o borboteadores ("bubblers"), por tubos perforados o porosos, el micro-aspersión y el riego sub-superficial por tubos perforados y tubos porosos.
- Riego subterráneo, realizado por control de la profundidad de la capa freática. (Santos et al. 2010).

2.3.1. Clasificación de los sistemas de aspersión.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Resulta conveniente clasificar los sistemas de aspersión en función de la movilidad de los diferentes elementos del sistema ya que facilita la comprensión de su funcionamiento y puede dar idea de los gastos de inversión necesarios.

Los sistemas de riego por aspersión pueden agruparse en dos grandes familias: los estacionarios, que permanecen fijos mientras riegan, y los de desplazamiento continuo mientras realizan la aplicación del agua (Tarjuelo, 2005).

2.3.2. Sistema de riego por pivote central

Un pivote central o lateral móvil consiste básicamente en una tubería lateral con aspersores (Figura 2.1). La tubería lateral es soportada por tensores de acero y torres (Figura 2.1) espaciadas entre 30 y 60 m. Cada torre cuenta con un motor y va sentada sobre dos o cuatro grandes ruedas de goma. El conjunto de tuberías, tensores y aspersores entre dos torres se llama tramo (Figura 2.3). En cada torre hay acoples flexibles que conectan las tuberías de dos tramos adyacentes. El largo máximo de los tramos es función del tamaño de la tubería, su espesor, pendiente y topografía del terreno. Los largos de los tramos no tienen por qué ser

uniformes y generalmente varía para adecuarse a las dimensiones del campo o para ajustar la altura de los aspersores en terrenos ondulados. El voladizo (Figura 2.4) es una tubería de menor diámetro, con aspersores, suspendida por cables al final de la última torre para aumentar el área regada. Cañones y sistemas de esquinas pueden ser colocados al final del equipo para aumentar el radio mojado o regar en las esquinas. La longitud más común de los pivotes es 400 m y su vida útil es de 15 a 20 años. (Barona, 2012).



Figura 2.1. Sistema de riego por pivote central.

La mayoría de los pivotes son eléctricos, aunque también usan motores hidráulicos que son más caros. Un motor eléctrico o hidráulico de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

alrededor de 1 HP va en cada torre para permitir su movimiento en forma autónoma. Cables eléctricos y líneas hidráulicas van colocados longitudinalmente a la tubería lateral, contando con cajas de control en cada torre. El panel de control usualmente se localiza en la estructura base o centro de pivote. (Barona 2012).

El cultivo es plantado en círculo para que los bajantes no dañen las plantas. Las máquinas modernas son generalmente diseñadas para operar a 250 KPa o menos. Estas presiones son insuficientes para los cañones finales, por lo que se colocan bombas eléctricas en la última torre. La descarga de los cañones finales y sistemas de equinas deben ser controlados para no mojar caminos, flujos de agua, redes de drenaje, especialmente cuando se aplican químicos. (Barona 2012).

Para realizar la evaluación hidráulica de una máquina de riego, se basa en la metodología definida en las normas vigentes, que en el caso del pivote de riego son:

- **UNE-EN ISO 11545:2002**, Equipos de riego. Pivote central y sistemas de avance frontal con boquillas para aspersores o difusores. Determinación de la uniformidad en la distribución del riego.

- **UNE-EN 14049:2005**, Técnicas de riego. Intensidad de aplicación de agua. Principios de cálculo y métodos de medida.
- **UNE-EN 12325:2000**, Partes 1 a 3: técnicas de riego. Instalaciones de pivote central y de avance frontal.

2.3.3. Evaluación hidráulica del pivote central.

Para determinar la eficiencia del sistema, la evaluación hidráulica de un pivote de riego se realizará por el método del cuarto inferior y Heermann y Hein.

Uniformidad de Distribución

Este es el cálculo más importante, ya que es representativo de la calidad del riego que estamos aportando con el pivote.

Uniformidad en base al método del cuarto inferior.

El coeficiente de uniformidad (CU), por el método del cuarto inferior, se define según la expresión siguiente:

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$Cu = \frac{q_{25}}{qm} \times 100$$

Dónde:

CU: Coeficiente de uniformidad de

qm: Caudal medio de una instalación de riego

q25: Caudal medio de los emisores que constituye el 25% que erogon el más bajo caudal.

Este coeficiente es de utilidad tanto para el diseño de riego como para la evaluación del sistema.

Uniformidad de Heermann y Hein.

El cálculo del coeficiente de uniformidad de Heerman y Hein, el más habitual en estos casos, siendo además el empleado en la norma UNE-EN ISO 11545.

Se formula de la siguiente forma:

$$CU_h = \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n D_i |C_1 - M_c|}{\sum_{i=1}^n C_i D_i} \right] \cdot 100(\%)$$

Dónde:

CU_h: Coeficiente de uniformidad de Heerman y hein

N: número de colectores

C_i: cantidad recogida por el colector (con i variando entre 1 y n);

D_i: área regada por el colector i aunque es más sencillo utilizar la distancia del centro del pivote al colector i, o también la posición ocupada por el colector i, con un valor de 1 para el más cercano al centro 2, al siguiente y así hasta un valor n para el más alejado.

M_c: media ponderada de las cantidades recogidas por la n colectores y se determina por la siguiente:

$$M_c = \frac{\sum_{i=1}^n C_i D_i}{\sum_{i=1}^n D_i}$$

Los volúmenes obtenidos en los pluviómetros deben ser ponderados, ya que lo obtenido en los diferentes puntos representa áreas cada vez mayores a medida que aumenta la distancia del centro del pivote. La ponderación se puede hacer multiplicando el volumen obtenido

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

en cada pluviómetro por su distancia al origen o por su número de posición.

Para los sistemas de movimiento de pivote central y lineales operados en viento ligero, una uniformidad de aplicación mayor que 85 % es la uniformidad de aplicación común entre los 70 % y 85 % se encuentra en la "buena" y la gama es aceptable para el uso de aguas residuales.

Generalmente, una uniformidad de aplicación por debajo de 70 % se considera inaceptable para el riego de aguas residuales mediante pivotes centrales y sistemas lineales de movimiento. Si el computado C_u es inferior a 70 %, se requieren los ajustes del sistema. Los problemas más comunes incluyen: los inyectores están obstruidos, aspersores no gira correctamente, la presión del sistema inadecuado, aspersores instalados en orden incorrecto, mal boquilla de la pistola y / o desgaste de boquillas. Póngase en contacto con su distribuidor de riego o Técnico Especialista Certificado de asistencia (Ramírez et al 2007).

Procedimiento para evaluar un pivote central.

Los dispositivos necesarios para llevar a cabo el ensayo son:

- Cinta métrica de 50 m y precisión de ± 10 cm.
- Medidores de presión con precisión de $\pm 1\%$, para medir la presión a la entrada del pivote y en el extremo del lateral.
- Caudalímetro, con precisión de $\pm 1\%$, para medir el volumen de agua a la entrada de la máquina de riego.
- Dispositivo de medida del viento.
- En nuestro ensayo, como ya se dijo, se midió la velocidad del viento en la estación meteorológica con velocidad umbral de 0,3 m/s, con precisión de 10%.
- Grupo de pluviómetros, según las características indicadas en la norma UNE-EN ISO 11545. Así, todos los pluviómetros deben ser iguales, con borde simétrico y sin depresiones, con una altura mínima de 120 mm, y diámetro de entrada superior a los 60 mm.
- Los pluviómetros utilizados en los ensayos tenían una altura de 125 mm, y diámetro de apertura de 110 mm.
- Probeta de precisión de medida de $\pm 3\%$, para medir el volumen de agua recogida por los pluviómetros.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

En nuestro caso el volumen de agua recogida se midió con dos probetas de 250 ml (precisión de ± 1 mm) y 100 ml (precisión de ± 2 mm).

Pendiente del terreno, con un dispositivo que mida variaciones de altura del terreno de 0,2 m en una distancia de 50 m.

Disposición y características de los pluviómetros.

Para determinar la disposición de los pluviómetros, se procedió de acuerdo a la norma UNE 11545. En ella se indican distintas condiciones a cumplir a la hora de colocar los pluviómetros, que pueden verse gráficamente. (Figura 2.2).

Leyenda:

X_0 Es la posición inicial del pivote, al comenzar el ensayo.

X_1 Es la posición del pivote cuando llega a la primera línea de pluviómetros. Allí se empiezan a tomar tiempos para comprobar la velocidad real del pivote.

X_2 Es la posición del pivote cuando llega a la segunda línea de pluviómetros.

X_F Es la posición final del pivote, al finalizar el ensayo.

w Es la velocidad angular del pivote.

Características del pluviómetro (Figura 2.3).

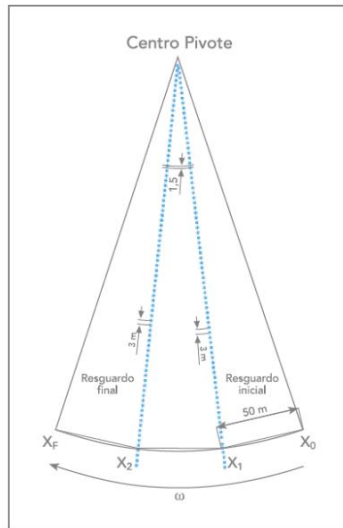


Figura 2.2. Disposición de los pluviómetros

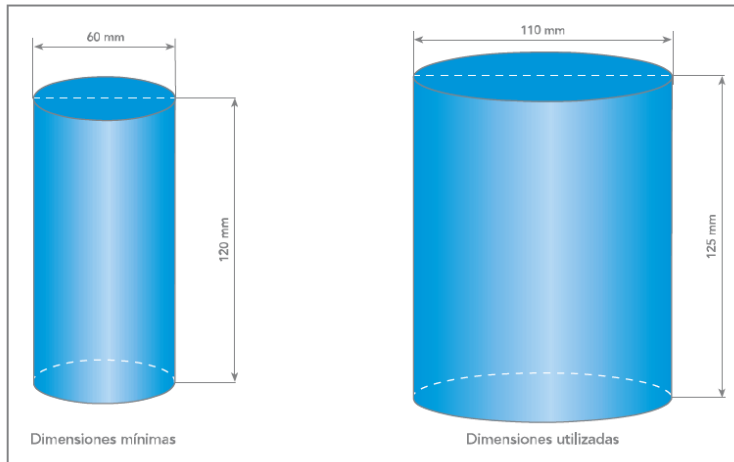


Figura 2.3. Características del pluviómetro (según UNE-EN-11545)

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Se deben situar los pluviómetros de tal manera que los posibles obstáculos no interfieran con la medición de la aplicación del riego. En concreto esto se traduce en que cuando exista algún obstáculo a una altura situada entre el pluviómetro y la boquilla, se debe despejar una zona en horizontal alrededor de la línea de pluviómetros de al menos el doble de la altura del obstáculo. Si este obstáculo superara en altura a las boquillas, la distancia horizontal despejada debe ser de 1,25 veces el radio mojado de la boquilla a cada lado de la línea de pluviómetros.

Hay que asegurarse de que la parte de entrada de los pluviómetros está nivelada. Y que cuando se esperan velocidades de viento superiores a 2 m/s, la distancia entre el suelo, y la parte superior de los pluviómetros no debe superar los 0,3 metros. La distancia entre el emisor y el pluviómetro debe ser de mínimo 1 metro de altura. Se debe registrar la altura de las boquillas de los emisores, así como la abertura del pluviómetro. Se mide la velocidad del viento durante el ensayo y la dirección del viento en relación a la línea de pluviómetros. Según la norma estas medidas se llevan a cabo cada 15 minutos una vez finalizada la prueba se realizan los cálculos con las ecuaciones arriba mencionadas.

Ejemplo evaluación de un pivote central.

Primeramente, se colocaron los recipientes (pluviómetros) a lo largo del pivote a una separación de 3 metros entre pluviómetros, colocando 69 recipientes (Figura 2.4).



Figura 2.4. Colocación de pluviómetros

Se contabilizó el número de aspersores y se inició la operación del pivote central. (Figura 2.5).



Figura 2.5. Configuración y encendido del equipo a evaluar

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Se mide el gasto y la presión de los aspersores. Para determinar la presión se utiliza un manómetro y para el aforo una cubeta de 20 litros de capacidad para conocer el gasto descargado por cada aspersor (Figura 2.6).



Figura 2.6. Medición de gasto y aforo de aspersores.

Después de haber pasado el pivote por los pluviómetros se mide el volumen de agua contenido en cada uno de ellos (Figura 2.7).



Figura 2.7. Medición de volumen recogido en los pluviómetros.

Con los datos obtenidos se realizan los cálculos correspondientes.

Resultados:

En el cuadro 2.1, se encuentran los datos obtenidos en campo.

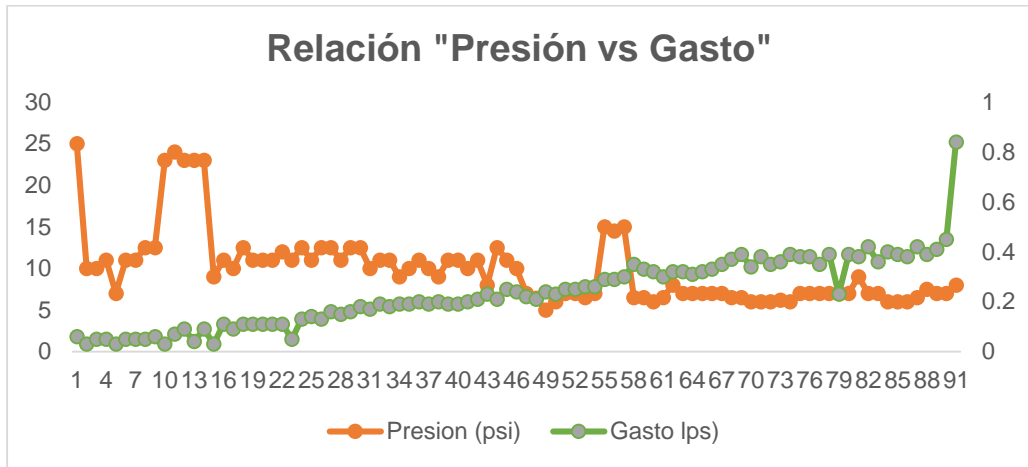
Cuadro 2.1. Presión y gasto de los aspersores evaluados

Asper sor	Presión (psi)	Gasto lps)	Asper sor	Presión (psi)	Gasto lps)	Asper sor	Presión (psi)	Gasto lps)
1	25	0.06	21	11	0.11	41	10	0.2
2	10	0.03	22	12	0.11	42	11	0.21
3	10	0.05	23	11	0.05	43	8	0.23
4	11	0.05	24	12.5	0.13	44	12.5	0.21
5	7	0.03	25	11	0.14	45	11	0.25
6	11	0.05	26	12.5	0.13	46	10	0.24
7	11	0.05	27	12.5	0.16	47	7	0.22
8	12.5	0.05	28	11	0.15	48	6.4	0.21
9	12.5	0.06	29	12.5	0.16	49	5	0.24
10	23	0.03	30	12.5	0.18	50	6	0.23
11	24	0.07	31	10	0.17	51	7	0.25
12	23	0.09	32	11	0.19	52	7	0.25
13	23	0.04	33	11	0.18	53	6.5	0.26
14	23	0.09	34	9	0.19	54	7	0.26
15	9	0.03	35	10	0.19	55	15	0.29
16	11	0.11	36	11	0.2	56	14.5	0.29
17	10	0.09	37	10	0.19	57	15	0.3
18	12.5	0.11	38	9	0.2			
19	11	0.11	39	11	0.19			
20	11	0.11	40	11	0.19			

Con los resultados obtenidos de presión y gastos se realiza una gráfica relacionando la presión y el gasto, de manera general se puede

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

observar que la presión disminuye conforme se incrementa la distancia del centro del pivote. En caso contrario, el gasto se incrementa ya que la superficie que se tiene que cubrir es mayor, Grafica 2.1.



Grafica 2.1. Grafica de la relación presión vs gasto

En el cuadro 2.2, se presentan los datos del volumen capturado de los 69 pluviómetros, considerando la distancia de ellos respecto al centro del pivote.

Cuadro 2.2. Distancia de los aspersores con respecto al centro del pivote.

Pluviómetro	Dist* (m)	Vc** (ml)	Pluviómetro	Dist (m)	Vc (ml)
-------------	-----------	-----------	-------------	----------	---------

1	48.5	89	36	153.5	100
2	51.5	100	37	156.5	132
3	54.5	60	38	159.5	120
4	57.5	57	39	162.5	110
5	60.5	57	40	165.5	108
6	63.5	90	41	168.5	121
7	66.5	110	42	171.5	111
8	69.5	85	43	174.5	96
9	72.5	101	44	177.5	90
10	75.5	70	45	180.5	91
11	78.5	110	46	183.5	90
12	81.5	124	47	186.5	111
13	84.5	118	48	189.5	105
14	87.5	95	49	192.5	112
15	90.5	126	50	195.5	95
16	93.5	70	51	198.5	100
17	96.5	123	52	201.5	139
18	99.5	106	53	204.5	110
19	102.5	78	54	207.5	105
20	105.5	92	55	210.5	60
21	108.5	110	56	213.5	117
22	111.5	120	57	216.5	84
23	114.5	115	58	219.5	96
24	117.5	95	59	222.5	60
25	120.5	105	60	225.5	108
26	123.5	89	61	228.5	95
27	126.5	119	62	231.5	94
28	129.5	114	63	234.5	110
29	132.5	105	64	237.5	90
30	135.5	135	65	240.5	118
31	138.5	126	66	243.5	130
32	141.5	340	67	246.5	54
33	144.5	100	68	249.5	133
34	147.5	112	69	252.5	80
35	150.5	94		Sumatoria	7215
				Media:	104.6

***Dist = Distancia del punto pivote, **Vc = Volumen captado**

Para determinar el número de valores a considera en el cálculo, se procede a determinar a aquellos pluviómetros donde se halla capturado el 50% del valor de la media, en este caso sería: $104.6/2= 52.3 = 52$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Al revisar los datos, se observa que no se encontró un valor con el volumen menor a esa cantidad.

Determinación del coeficiente de uniformidad en base al método del cuarto inferior.

La sumatoria de los 17 pluviómetros con menor volumen que representa el 25% de los volúmenes bajos fue de 1263. Por lo tanto, el valor de la media es de $(1263/17) = 74.29$, el valor de la media general es de 104.57, (Cuadro 2.3) considerando estos valores tenemos:

Cuadro 2.3. Valores del 25% de los volúmenes más bajos

Valor bajo (25%)
54
57
57
60
60
60
70
70
78
80

84
85
89
89
90
90
90
74.29

$$Cu = \frac{74.29}{104.57} \times 100 = 71\%$$

Uniformidad de Heermann y Hein.

En el cuadro 2.4, se presentan los resultados elaborados en Excel para facilitar el cálculo de los valores que serán utilizados en la ecuación.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 2.4. Cálculos para la Obtención de la uniformidad de Heermann y Hein.

Posición	Distancia	Volumen	Di*Ci	Volumen	Valor Abs	Ci - (Med(Ci*M C))*Di	Valor Abs
	al centro del pivote(m)	colectado (ml)		ponderad o (ml.m)			
	Di	Ci		Mc			
1	48.5	89	4316.5	-16.24	16.24	-787.74	787.74
2	51.5	100	5150	-5.24	5.24	-269.97	269.97
3	54.5	60	3270	-45.24	45.24	-2465.69	2465.69
4	57.5	57	3277.5	-48.24	48.24	-2773.92	2773.92
5	60.5	57	3448.5	-48.24	48.24	-2918.65	2918.65
6	63.5	90	5715	-15.24	15.24	-967.87	967.87
7	66.5	110	7315	4.76	4.76	316.40	316.40
8	69.5	85	5907.5	-20.24	20.24	-1406.83	1406.83
9	72.5	101	7322.5	-4.24	4.24	-307.55	307.55
10	75.5	70	5285	-35.24	35.24	-2660.78	2660.78
11	78.5	110	8635	4.76	4.76	373.50	373.50
12	81.5	124	10106	18.76	18.76	1528.77	1528.77
13	84.5	118	9971	12.76	12.76	1078.04	1078.04
14	87.5	95	8312.5	-10.24	10.24	-896.18	896.18
15	90.5	126	11403	20.76	20.76	1878.59	1878.59
16	93.5	70	6545	-35.24	35.24	-3295.14	3295.14
17	96.5	123	11869.5	17.76	17.76	1713.64	1713.64
18	99.5	106	10547	0.76	0.76	75.41	75.41
19	102.5	78	7995	-27.24	27.24	-2792.31	2792.31
20	105.5	92	9706	-13.24	13.24	-1397.04	1397.04
21	108.5	110	11935	4.76	4.76	516.23	516.23
22	111.5	120	13380	14.76	14.76	1645.51	1645.51
23	114.5	115	13167.5	9.76	9.76	1117.28	1117.28
24	117.5	95	11162.5	-10.24	10.24	-1203.45	1203.45
25	120.5	105	12652.5	-0.24	0.24	-29.17	29.17
26	123.5	89	10991.5	-16.24	16.24	-2005.90	2005.90
27	126.5	119	15053.5	13.76	13.76	1740.38	1740.38
28	129.5	114	14763	8.76	8.76	1134.15	1134.15
29	132.5	105	13912.5	-0.24	0.24	-32.08	32.08
30	135.5	135	18292.5	29.76	29.76	4032.20	4032.20
31	138.5	126	17451	20.76	20.76	2874.97	2874.97
32	141.5	340	48110	234.76	234.76	33218.24	33218.24
33	144.5	100	14450	-5.24	5.24	-757.48	757.48

34	147.5	112	16520	6.76	6.76	996.79	996.79
35	150.5	94	14147	-11.24	11.24	-1691.93	1691.93
36	153.5	100	15350	-5.24	5.24	-804.66	804.66
37	156.5	132	20658	26.76	26.76	4187.61	4187.61
38	159.5	120	19140	14.76	14.76	2353.89	2353.89
39	162.5	110	17875	4.76	4.76	773.16	773.16
40	165.5	108	17874	2.76	2.76	456.43	456.43
41	168.5	121	20388.5	15.76	15.76	2655.21	2655.21
42	171.5	111	19036.5	5.76	5.76	987.48	987.48
43	174.5	96	16752	-9.24	9.24	-1612.74	1612.74
44	177.5	90	15975	-15.24	15.24	-2705.47	2705.47
45	180.5	91	16425.5	-14.24	14.24	-2570.70	2570.70
46	183.5	90	16515	-15.24	15.24	-2796.92	2796.92
47	186.5	111	20701.5	5.76	5.76	1073.85	1073.85
48	189.5	105	19897.5	-0.24	0.24	-45.88	45.88
49	192.5	112	21560	6.76	6.76	1300.90	1300.90
50	195.5	95	18572.5	-10.24	10.24	-2002.33	2002.33
51	198.5	100	19850	-5.24	5.24	-1040.56	1040.56
52	201.5	139	28008.5	33.76	33.76	6802.22	6802.22
53	204.5	110	22495	4.76	4.76	972.99	972.99
54	207.5	105	21787.5	-0.24	0.24	-50.23	50.23
55	210.5	60	12630	-45.24	45.24	-9523.46	9523.46
56	213.5	117	24979.5	11.76	11.76	2510.31	2510.31
57	216.5	84	18186	-21.24	21.24	-4598.91	4598.91
58	219.5	96	21072	-9.24	9.24	-2028.64	2028.64
59	222.5	60	13350	-45.24	45.24	-10066.37	10066.37
60	225.5	108	24354	2.76	2.76	621.91	621.91
61	228.5	95	21707.5	-10.24	10.24	-2340.32	2340.32
62	231.5	94	21761	-11.24	11.24	-2602.54	2602.54
63	234.5	110	25795	4.76	4.76	1115.73	1115.73
64	237.5	90	21375	-15.24	15.24	-3620.00	3620.00
65	240.5	118	28379	12.76	12.76	3068.28	3068.28
66	243.5	130	31655	24.76	24.76	6028.55	6028.55
67	246.5	54	13311	-51.24	51.24	-12631.18	12631.18
68	249.5	133	33183.5	27.76	27.76	6925.60	6925.60
69	252.5	80	20200	-25.24	25.24	-6373.63	6373.63
	10384.5	7215	1092886.5				192148.43
Prom:		104.57	105.24				

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Sustituyendo los valores anteriormente calculados se determina el coeficiente de uniformidad del sistema evaluado, de la siguiente manera:

Calculo de la media ponderada:

$$\text{VolPonderado} = \frac{1092886.5}{10384.5} = 105$$

Determinación de la Uniformidad:

$$C_{UH} = \left[1 - \frac{192148.43}{1092886.5} \right] * 100$$

$$C_{UH} = [1 - 0.1758] * 100 = 82.41 \%$$

En cuanto a los datos obtenidos para determinar la uniformidad, el coeficiente con base al 25% más bajo fue de 71 %, y por el método de Heermann y Hein fue de 82.41%, estos resultados no indican que es aceptable ya que el rango nos dice que debe de estar entre 70 y 85%.

2.3.4.-Procedimiento para evaluar un sistema de riego por aspersión portátil.

La evaluación de un sistema de riego por aspersión es un proceso por el que se puede saber si la instalación y el manejo que se hace de ella reúnen las condiciones necesarias para aplicar los riegos

adecuadamente, esto es, cubriendo las necesidades del cultivo para la obtención de máximas producciones y al mismo tiempo minimizando las pérdidas de agua.

Las evaluaciones se realizarán en las condiciones normales de funcionamiento, de forma que lo observado coincida con la situación usual durante la aplicación de los riegos.

Material necesario para la evaluación

El material necesario para realizar la evaluación de una instalación de riego por aspersión se relaciona a continuación:

- Vasos pluviométricos que según la norma UNE 68-072 serán de forma cilíndrica y tamaño uniforme, con los bordes agudos y sin deformaciones, con una altura de al menos 12 cm y con un diámetro mínimo de 8,5 cm (recomendable mayor de 12 cm).
- Manómetro de aguja en baño de glicerina con acoplamiento para boquilla de aspersor o tubo de Pitot.
- Cronómetro.
- Manguera flexible de unos 2 cm de diámetro y 2,5 m de longitud.
- Bidón o cubetas de plástico graduado en 10, 15 ó 20 litros.
- Probeta graduada en unidades de 2 cm³.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- Cinta métrica de 25 ó 50 m.
- Anemómetro.

Pasos a seguir a la hora de realizar la evaluación

- Elegir el lugar del ensayo en la zona central del bloque de riego y donde las presiones existentes sean lo más parecidas posible a las de diseño del sistema. Si el agricultor ha detectado problemas en una zona concreta, es allá donde realizar la evaluación.
- Determinar el número de pluviómetros a colocar y la separación entre estos. Colocar la red de pluviómetros a un marco no mayor de 3 m x 3 m, con un mínimo de 24 pluviómetros. Los pluviómetros se instalarán sobre el suelo cuando el cultivo no altere la lluvia de los aspersores, y justo sobre el cultivo en caso contrario. (Figura 2.8).
- Comprobar los aspersores: marca, modelo y diámetros de boquillas.
- Medir la presión y el caudal descargado por los aspersores que mojan la zona ocupada por los pluviómetros.
- Anotar la hora de inicio de la evaluación.
- Medir la presión en el grupo de bombeo, en los aspersores del origen y del extremo de las líneas implicadas en el ensayo, así como en los puntos más significativos del sector.

- La duración del ensayo deber ser lo más parecida posible a la de un riego real para obtener el efecto total del viento y evaporación.
- Medir los volúmenes recogidos en los pluviómetros.
- Se toman anotaciones sobre las características de las parcelas, en cuanto al número de aspersores, pendientes del terreno, y se hace un croquis localizando la evaluación, presiones, etc.

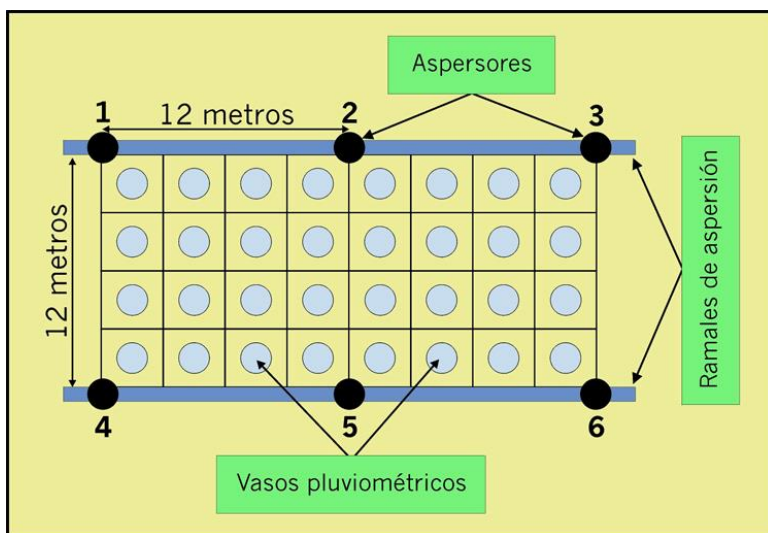


Figura 2.8. Esquema de pluviómetros y aspersores.

Si la parcela se riega con un único ramal de aspersión, los vasos se colocarán a ambos lados del ramal y se sumarán los volúmenes recogidos en los pluviómetros colocados a cada lado, según se muestra en la figura. El procedimiento de cálculo de UD (zona) será idéntico en todo lo demás (Figura 2.9).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

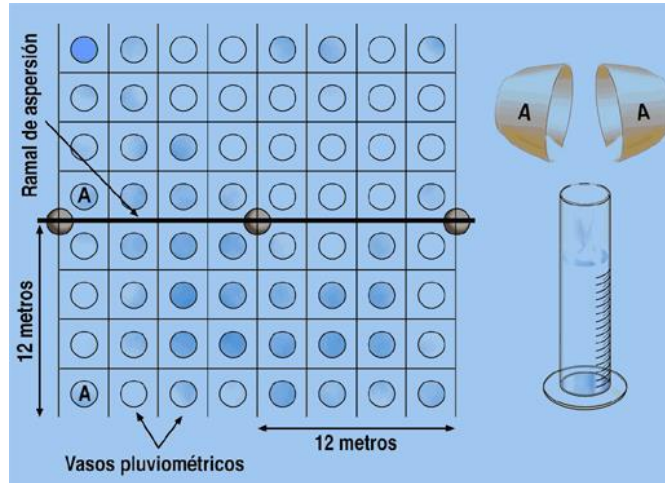


Figura 2.9. Colocación de pluviómetros en el área a evaluar.

La uniformidad también depende del viento y de las condiciones atmosféricas, por lo que se tomarán datos de viento y temperatura, para fijar las condiciones en las que se realiza la evaluación. (Figura 2.10).

VALOR DE LA UNIFORMIDAD DE DISTRIBUCIÓN	CALIFICACIÓN
Mayor de 85 %	EXCELENTE
De 80 a 85 %	BUENA
De 75 a 80 %	ACEPTABLE
Menor de 75 %	INACEPTABLE

Figura 2.10. Valores de uniformidad de distribución en aspersión portátil.

Expresiones para el cálculo del Coeficiente de Uniformidad.

Wicox y Swailes:

$$Cu = \left[1 - \frac{S}{\bar{X}}\right] * 100$$

Hart:

$$Cu = \left[1 - 0.798 \frac{S}{\bar{X}}\right] * 100$$

USDA:

$$Cu = \frac{\text{promedio del 25\% mas bajo}}{\text{promedio general}} * 100$$

Christiansen:

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{\sum |X_i - Med|}{Med * n}\right]$$

Dónde:

S: desviación estándar de las láminas medias en las observaciones individuales, **X:** lamina promedio,

Xi-Med: Desviación absoluta de las observaciones de precipitaciones individuales respecto a la media, (cm³ o mm)

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

X: Observaciones individuales de lámina de agua captada en cada punto de una malla regular de colectores de precipitación del sistema de aspersión en cm^3 o mm,

Med: media de las precipitaciones en cm^3 o mm, n = número de observaciones.

Coeficiente de uniformidad de Christiansen (CU)

El Coeficiente de Uniformidad fue desarrollado por Christiansen (1942). Es una representación estadística de la uniformidad, utilizado principalmente en los sistemas de aspersión; Es el parámetro de uniformidad de uso más generalizado. En sistemas de riego por aspersión estacionario se recomiendan valores de CU mayores al 80% (aunque depende de la velocidad del viento (Tarjuelo 1995; Tarjuelo, *et al* 1992).

Evaluación de las pérdidas por evaporación y arrastre del viento

En riego por aspersión existen dos factores que afectan negativamente a la aplicación de agua sobre el suelo: la evaporación de las gotas de agua que producen los aspersores y el arrastre de dichas gotas por efecto del viento. En las pérdidas por evaporación y arrastre del viento tiene gran importancia el tamaño de las gotas de agua que dan los

aspersores y serán mayores cuanto más pequeñas sean las gotas y mayor sea el viento y la temperatura.

Las pérdidas por evaporación y arrastre del viento (Pe) se calculan como la diferencia entre la lámina de agua aplicada por los aspersores (La) y la lámina de agua recogida en los pluviómetros (Lp):

$$Pe = 100 * \frac{La - Lp}{La}$$

Para calcular la lámina de agua aplicada por los aspersores (La) se medirá el caudal de cada aspersor que moja la zona evaluada con ayuda de una manguera, un cronómetro y un bidón de plástico en el que se marca un volumen conocido (de 10 a 20 litros). Con estas medidas se seguirán los siguientes pasos:

1. El caudal de cada aspersor, en litros por hora, se calculará mediante la fórmula:

$$\begin{aligned} & \text{Caudal del aspersor (lpm)} \\ & = \frac{\text{volumen recogido en el bidon(litros)}}{\text{Tiempo de llenado (segundos)}} * 3600 \end{aligned}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

2. El caudal aplicado sobre la zona evaluada (litros/hora) se calculará teniendo en cuenta que, si se toman 6 aspersores, la cuarta parte del agua de los aspersores de las esquinas y la mitad de los otros dos cae en la zona evaluada (Figura 2.11).

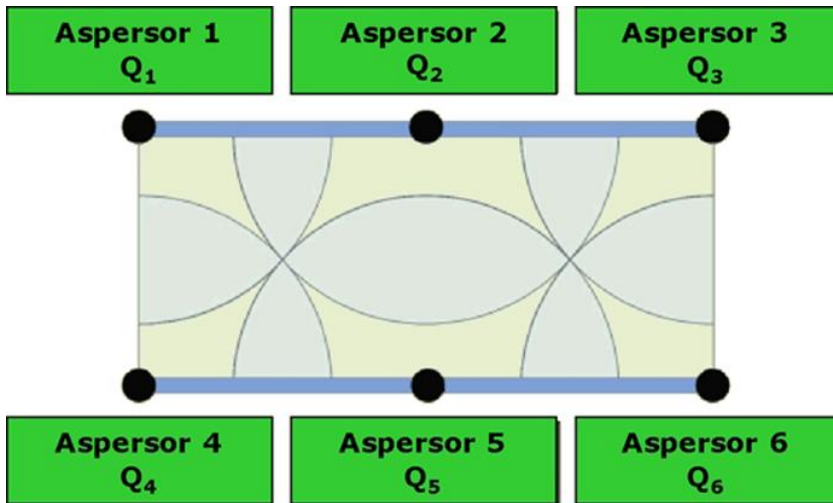


Figura 2.11. Distribución de pluviómetros en dos líneas regantes

$$Q_a = \frac{Q_1}{4} + \frac{Q_2}{2} + \frac{Q_3}{4} + \frac{Q_4}{4} + \frac{Q_5}{2} + \frac{Q_6}{4}$$

3. L_a se obtendrá con la siguiente fórmula:

$$L_a (mm) = \frac{Q_a (lph)}{\text{superficie zona evaluada (m}^2\text{)}} * \text{Tiempo de evaluación}$$

La lámina de agua recogida por los pluviómetros Lp se calculará siguiendo los siguientes pasos:

1. Se calcula el área de la embocadura de los pluviómetros (cm²) tal y como aparece en la formula siguiente:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = 0,785 \cdot (\text{Diámetro})^2$$

2. La lámina de agua recogida en los pluviómetros se calculará como:

$$Lp \text{ (mm)} = \frac{\text{volumen medio recogido (cm}^3\text{)}}{\text{Area de la embocadura de los vasos (cm}^2\text{)}} * 10$$

Evaluación del índice de grosor de gota.

El grosor de las gotas se evalúa con el Índice de grosor (IG). Para calcular IG se medirá la presión (P) en Kg/cm² en cada uno de los aspersores seleccionados para la evaluación y el diámetro (d) de las boquillas en mm:

$$IG = 12.85 * \frac{P^{1.3}}{d}$$

Es recomendable que el índice de grosor esté entre 7 y 17. Valores menores que 7 indican gotas demasiado gruesas, y valores mayores que 17 indican gotas demasiado finas. La distribución del agua puede verse

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

afectada negativamente con tamaños de gota extremos. Sólo se justifican valores de IG menores de 7 en condiciones de vientos fuertes (más de 4,5 m/s ó 16 Km/h).

Ejemplo evaluación uniformidad del riego por aspersión portátil.

Un agricultor, colocando vasos pluviométricos según se muestra en el cuadro 2.5, ha medido los volúmenes que se indican en la siguiente tabla. Con ellos quiere calcular el coeficiente de uniformidad en la zona evaluada.

Cuadro 2.5. Volúmenes obtenidos en la evaluación del sistema riego por aspersión portátil.

Volúmenes obtenidos en los pluviómetros (centímetros cúbicos, cm ³)							
198	175	145	186	185	158	165	210
150	156	127	178	176	156	154	182
146	138	121	135	161	162	143	189
154	148	210	195	166	131	132	185

Primero se calcula la media de los volúmenes medios en todos los pluviómetros (promedio del 25% más bajo).

$$Cu = \frac{\text{promedio del 25\% mas bajo}}{\text{promedio general}} * 100$$

Promedio del 25%= 134.12

Promedio del volumen total= 163.03

$$Cu_{25\%} = \frac{134.12}{163.02} * 100 = 82.2\%$$

Coeficiente de uniformidad de Christiansen.

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{\sum |Xi - Med|}{Med * n} \right]$$

$$Cu = 100 \left[1 - \frac{\sum |635.13|}{163.0 * 32} \right] = 87.8 \%$$

Pérdidas por evaporación y arrastre

$$Pe = 100 * \frac{La - Lp}{La}$$

Segundo. El caudal de cada aspersor, en litros por hora, se calculará mediante la fórmula:

Caudal del aspersor (lpm)

$$= \frac{\text{volumen recogido en el bidon(litros)}}{\text{Tiempo de llenado (segundos)}} * 3600$$

$$\text{Caudal del aspersor (lph)} = \frac{10 * 60}{31.1} * 3600 = 19.3 \text{ lpm}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Tercero. Se calcula el caudal aplicado en la zona evaluada (litros/minuto), se calculará teniendo en cuenta que, si se toman seis aspersores, la cuarta parte del agua de los aspersores de las esquinas y la mitad de los otros dos cae en la zona evaluada (Figura 2.12).

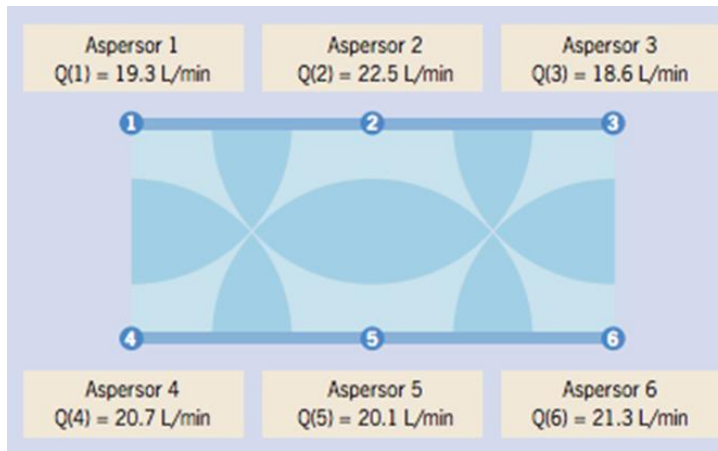


Figura 2.12. Caudal aplicado en la evaluación del sistema riego por aspersión portátil.

$$Qa = \frac{19.3}{4} + \frac{22.5}{2} + \frac{18.6}{4} + \frac{20.7}{4} + \frac{20.1}{2} + \frac{21.3}{4} = 41.3 \text{ litros/minuto}$$

Cuarto. Se determina la lámina de agua aplicada por los aspersores con la siguiente fórmula:

$$La (mm) = \frac{Qa (lph)}{\text{superficie zona evaluada (m}^2\text{)}} * \text{Tiempo de evaluación}$$

El marco de los aspersores es 12x12 metros, el caudal aplicado por ellos en la zona donde se situaron los vasos fue 41.3 litros/minuto y el tiempo durante el que se estuvieron llenando los vasos la lámina aplicada fue de 90 minutos:

Superficie evaluada = 288 m²

$$La (mm) = \frac{41.3 (lph)}{288 (m^2)} * 90 = 12.9 \frac{\text{litros}}{m^2} = 12.9 mm$$

Cálculo de la lámina recogida en los vasos.

1. Se calcula el área de la embocadura de los pluviómetros (cm²) tal y como aparece en la formula siguiente:

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = 0,785 \cdot (\text{Diámetro})^2$$

El diámetro de los vasos pluviométricos utilizados en una evaluación de riego por aspersión es 13.5 centímetros y la media del volumen de agua medido en todos ellos fue 163 centímetros cúbicos (cm³). El área de la embocadura de los vasos es:

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$\text{Área (cm}^2\text{)} = 0,785 \cdot (13.5)^2 = 143 \text{ cm}^2$$

2. La lámina de agua recogida en los pluviómetros se calculará como:

$$Lp \text{ (mm)} = \frac{\text{volumen medio recogido (cm}^3\text{)}}{\text{Area de la embocadura de los vasos (cm}^2\text{)}} * 10$$

Y la lámina de riego en los pluviómetros es:

$$Lp \text{ (mm)} = \frac{163 \text{ (cm}^3\text{)}}{143 \text{ (cm}^2\text{)}} * 10 = 11.39 \text{ mm}$$

3. Realizar la evaluación se obtuvo una lámina de agua aplicada por los aspersores L_a : 12.9 mm y una lámina de agua obtenida por los vasos de L_p : 11.39 mm. Por lo tanto, las pérdidas por evaporación y arrastre son:

$$Pe = 100 * \frac{12.9 - 11.39}{12.9}$$

$$Pe = 11.70 \%$$

Evaluación del índice de grosor de gota.

Se midió la presión (P) en Kg/cm² en cada uno de los aspersores seleccionados para la evaluación y el diámetro (d) de las boquillas en mm, obteniendo las siguientes presiones:

Presión aspersor 1: 4.6 Kg/cm²

Presión aspersor 2: 4.6 Kg/cm²

Presión aspersor 3: 4.6 Kg/cm²

Presión aspersor 4: 4.6 Kg/cm²

$$IG = 12.85 * \frac{4.6^{1.3}}{4.4}$$

$$IG = 21.23$$

Es recomendable que el índice de grosor esté entre 7 y 17. Valores menores que 7 indican gotas demasiado gruesas, y valores mayores que 17 indican gotas demasiado finas.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

2.3.5. Procedimiento para la evaluación hidráulica de riego por goteo.

Las técnicas de evaluación de los sistemas de riego permiten conocer la aplicación del agua con base a ensayos en campo realizados bajo las condiciones normales de trabajo y determinar los cambios precisos para mejorar el proceso de riego (Muñiz, 2000). Por tal razón, es necesario determinar de manera rutinaria el coeficiente de uniformidad (CU) y el coeficiente de variación (CV) para corregir alguna alteración del sistema de manera oportuna y así satisfacer las necesidades de agua en los cultivos (Román et al., 2005).

La evaluación del comportamiento hidráulico permite determinar la relación presión-caudal y el coeficiente de variación por fabricación de los emisores, parámetro influyente en el coeficiente de uniformidad de los sistemas de riego y en consecuencia en su eficiencia.

Coefficiente de Uniformidad

Para la obtención del (CU) Coeficiente de Uniformidad se utiliza la siguiente ecuación propuesta por Christiansen (1942).

$$CU = 100 \left[1 - \frac{\sum_1^n (q_i - q_m)}{n * q_m} \right]$$

Donde CU es el Coeficiente de Uniformidad en porcentaje, q_m es el caudal promedio en (L h⁻¹), q_i el caudal de cada observación en (L h⁻¹) y n el número de observaciones. La clasificación del (CU) se determinó por medio de la clasificación del Cuadro 2.6

Cuadro 2.6. Clasificación de coeficiente de uniformidad de descarga de los goteros (Rodrigo *et al.*, 1992).

Clasificación	CU (%)
Excelente	> 92
Bueno	87 – 92
Aceptable	80 – 87
Pobre	70 – 80
Inaceptable	< 70

Coeficiente de Variación.

Se calcula con la siguiente ecuación, según la American Society of Agricultural Engineers ASAE, (2003):

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$CV = \frac{S}{qm}$$

Donde CV es el Coeficiente de Variación, S la desviación estándar (valor adimensional) que se calculó con la ecuación:

$$S = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (qi - qm)^2}{n - 1} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Donde qi es el gasto observado ($L h^{-1}$), qm es el gasto promedio ($L h^{-1}$) y n es el número de emisores. Los resultados de los (CV) se clasificaron de acuerdo al Cuadro 2.7.

Cuadro 2.7. Clasificación del coeficiente de variación de descarga de los goteros. ASAE (2003).

Clasificación	CV
Bueno	< 0.10
Medio	0.1 - 0.2
Aceptable	> 0.20

Variación del gasto entre el primero y el último emisor.

El cálculo de la variación define la diferencia que hay entre el gasto del emisor al inicio y al final de la línea regante. Para diseño de riego por goteo se acepta una variación máxima del 10% en esta variable, ecuación:

$$VQ = \frac{Q_i - Q_f}{Q_i} * 100$$

Donde VQ es la variación del gasto en porcentaje, Q_i ($L h^{-1}$) es el gasto inicial y Q_f gasto final ($L h^{-1}$).

La obtención del modelo Carga-Gasto, se determinó con la ecuación general del emisor, Karmelli y Keller, (1975); Burtn y Stuart, (1994).

$$Q = KH^x$$

Donde Q es el caudal del emisor en ($L h^{-1}$); H es la presión de operación, K es el coeficiente de descarga y x el exponente de descarga.

El valor de K y x se determina de la siguiente manera:

$$x = \frac{\ln(Q_1/Q_2)}{\ln(H_1/H_2)}$$

$$K = \frac{Q_1}{H_1^x}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El exponente de descarga x , es una medida de la sensibilidad de los emisores a la variación de carga. El valor absoluto de la diferencia entre el gasto de operación y el gasto aforado de cada emisor para identificar que tan estable es el gasto del emisor a través de la longitud de la línea regante:

$$|D| = \frac{Q_i - Q_0}{Q_i}$$

Donde $|D|$ es la variación del gasto ($L h^{-1}$), Q_i es el gasto del emisor y Q_0 gasto de operación según el proveedor ($L h^{-1}$).

Para la toma de datos, se deberá poner a funcionar el sistema de riego esperando 30 minutos para normalizar las presiones dentro de las secciones de riego y se medirán los gastos de al menos 16 goteros distribuidos en forma sistemática como se ilustra en la (Figura 2.13).

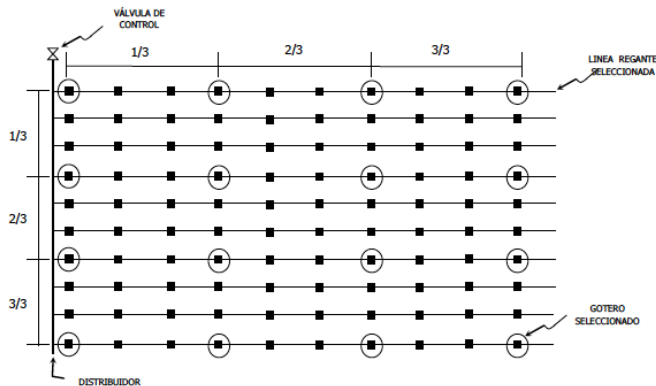


Figura 2.13. Selección de goteros y líneas regantes.

Ejemplo de evaluación hidráulica de goteros.

El estudio se realizó en las instalaciones Campo Experimental Zacatecas (CEZAC) del INIFAP, localizado en el kilómetro 24.5 de la carretera Zacatecas-Fresnillo, a una altitud media de 2,197 msnm. La temperatura media anual es de 14.6 °C. La precipitación media anual es de 416 mm, de los cuales el 75 % ocurre durante el verano, específicamente de junio a septiembre, y el resto durante el invierno, la evaporación media anual es de 1,609 mm (Servín, 2015). En un terreno con textura franco-arcillosa, densidad aparente 1.43 gcm⁻³, con una pendiente de 0.75%, donde se llevó a cabo las evaluaciones de seis cintillas comerciales en los meses de septiembre - octubre del año 2015. Las especificaciones técnicas de cada cintilla fueron obtenidas de los catálogos entregados por los proveedores (Cuadro 2.8).

Cuadro 2.8. Ficha técnica de las cintillas de riego evaluadas.

Cintilla	Q_o (L h⁻¹)	E_e (cm)	Calibre	Ø_i (mm)	P_o (psi)	P_{max} (psi)
AQUA-TRAXX	1.01	20	6 mil	16	8	12
CHAPIN	1.01	20	6 mil	16	8	10
EURIDRIP	0.83	20	6 mil	16.1	8	14
NETAFIM	0.87	20	6 mil	16.2	9	12
RO-DRIP	1	20	6 mil	16	8	-
T-TAPE	1	20	6 mil	16	8	-

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Q_o : Gasto de operación, E_e : Espaciamiento entre emisores, \emptyset_i : Diámetro interno, P_o : Presión de operación, P_{max} : Presión máxima de operación.

Coefficientes de uniformidad

En la Figura 2.14 se muestra el CU de las cintillas evaluadas con respecto a la longitud, en dicha Figura se observa una disminución de CU a medida que se incrementa la longitud. El Cuadro 2.6, el 66% de las cintillas evaluadas se mantienen en el rango de Excelente hasta los 160 metros de longitud y el 34 % restante presentaron una ligera variación después de los 120 m. Sin embargo, de acuerdo con la clasificación (Cuadro 2.6) se consideraron como bueno” hasta los 160 m de longitud. El valor más alto fue de 99.75% para Eurodrip y valores de 95.6% para T-Tape; aunque, los datos muestran una ligera variación en su comportamiento en las longitudes de 140 m atribuibles al relieve del terreno. De acuerdo a esta variable sobresale la cintilla Netafim® y Eurodrip® como la más estable y con los valores más altos CU a través de las diferentes longitudes, esto debido al menor gasto de operación mostrado en los catálogos (Cuadro 2.8) y en menor medida al diseño del emisor que es en forma de pastilla.

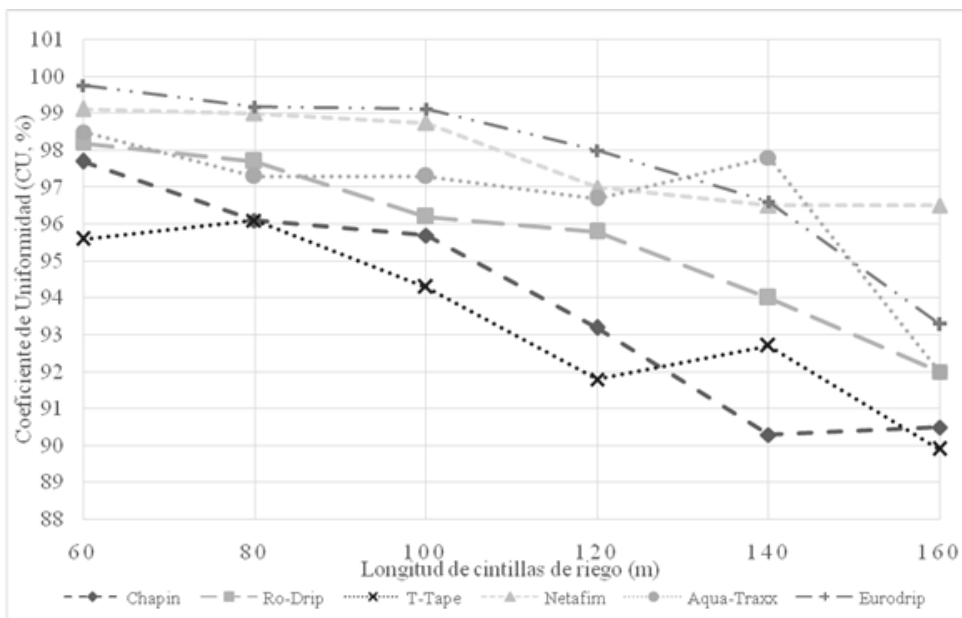


Figura 2.14.-Coeficientes de uniformidad de seis cintillas comerciales en función de la longitud

Coeficientes de variación (CV)

En la Figura 2.15, se observa un comportamiento lineal ascendente de los valores de (CV) a medida que incrementa la longitud de la cintilla para todos los tratamientos, de acuerdo con la ASAE (2003), Cuadro 2.9, las cintillas evaluadas se clasificaron de la siguiente manera; Eurodrip® y Netafim® presentaron una clasificación *bueno* para todas las longitudes, reportando valores 0.09 – 0.13. La cintilla Aqua-Traxx®, I-Tape® y Ro-Drip® presentaron una clasificación *bueno* hasta 140 m de longitud y medio para 160 m, con valores mayores de 0.10 y menores de 0.2,

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Chapín® con valores menores de 0.10 hasta 120 m de longitud clasificado como *bueno*, y *medio* en las longitudes de 140 y 160 m. Y por último T-Tape® con datos muy variables en todas sus longitudes que se clasifican en bueno y medio.

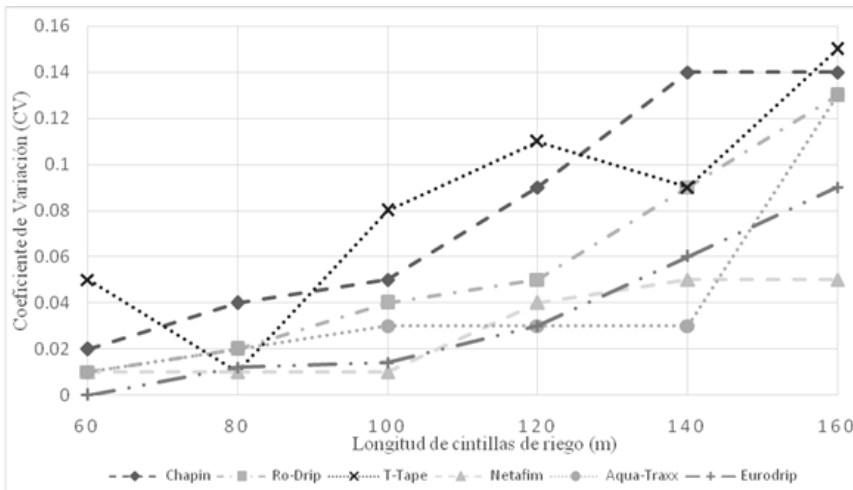


Figura 2.15. Coeficientes de variación de seis cintillas comerciales en función de la longitud

Cuadro 2.9. Parámetros K y x para las diferentes cintillas evaluadas.

Cintilla	$Q = KH^X$	R^2	K	X
Aqua-Traxx	$Q = 0.6541H^{0.168}$	0.9957	0.6541	0.168
Chapin	$Q = 0.6017H^{0.276}$	0.9714	0.6017	0.276
Eurodrip	$Q = 0.4380H^{0.291}$	0.8895	0.438	0.291
Netafim	$Q = 0.4664H^{0.277}$	0.9281	0.4664	0.277
Ro-Drip	$Q = 0.7018H^{0.173}$	0.989	0.7018	0.173
T-Tape	$Q = 0.5423H^{0.330}$	0.8978	0.5423	0.33

Variación del gasto (VQ)

En la Figura 2.16, se ilustra el comportamiento del gasto ($Q_{10\%}$) de cada una de las cintillas, Aqua-Traxx® resultó tener mayor frecuencia en valores aceptables de variación de 60 a 140 m, Eurodrip® y Ro-Drip® mostraron valores de variación menores al 10 % en las longitudes de 60 a 120 m, para Chapin® y T-Tape® solo para las longitudes de 60 y 80 m se aceptó variación del gasto, para el caso de Netafim® hasta 100 m y por último hasta 80 m para T-Tape®.

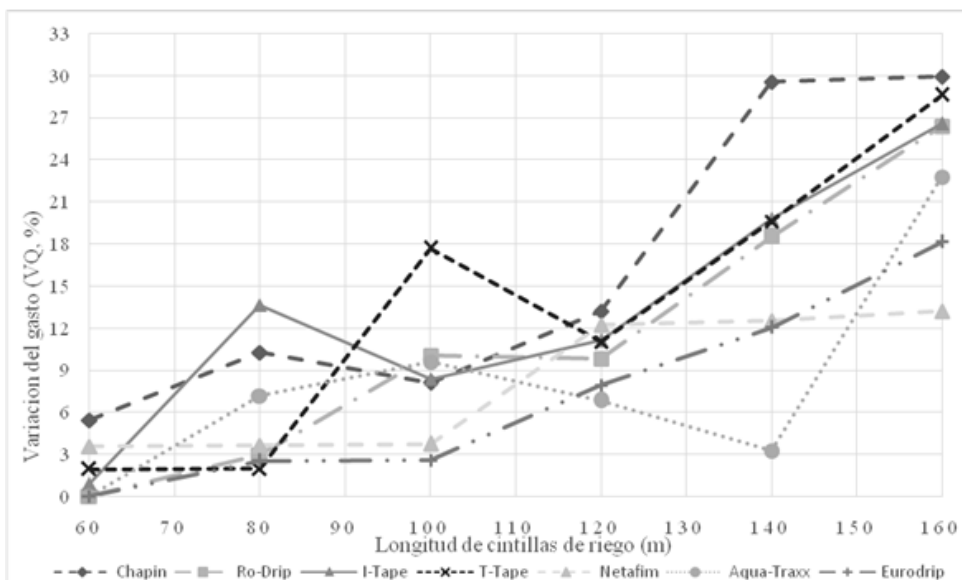


Figura 2.16. Análisis de comparación de diferencia absoluta de las cintillas evaluadas.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

2.4. Bibliografía

1. Barona V.J. (2012). Desarrollo de un Protocolo de Evaluación Técnica y Económica de Proyectos de Riegos Para Pradera del Sur de Chile.
2. Castañón Li3n, G. (1991). Riego por aspersi3n. Mundi-Prensa. Madrid.
3. Cisneros, A, R. (2005). Apuntes de la materia de riego y drenaje. Recuperado de: <http://www.ingenieria.uaslp.mx/Documents/Apuntes/Riego%20y%20Drenaje.pdf>
4. Grassi, C.J. 1987. Dise3no y operaci3n del riego por superficie. CIDIAT. M3rida, Venezuela
5. Heermann, D. F.; R. Hein: Performance characteristics of self-proped center pivot sprinkler irrigation system, Transactions of the ASAE 11(1): 11-15, 1968.
6. Manual de buenas pr3cticas de riego. Propuesta de WWF para un uso eficiente del agua en la agricultura. (2009). Recuperado de: http://awsassets.wwf.es/downloads/buenas_practicas_de_riego.pdf
7. Manual de riego para agricultores. Riego por aspersion. (2010). Recuperado de: http://www.juntadeandalucia.es/export/drupal/jda/1337160240Riego_por_aspersixn.pdf
8. Miguel Servin Palestina, Edilberto Carpio Laureano, Guillermo Jesuita Perez Marroquin, Martin Garcia Bandala, Orlando Ramirez Valle, Fabiel Vazquez Cruz. (2017). Evaluacion Hidraulica de Cintillas Comerciales. En AgroFaz(17). Universidad Ju3rez del Estado de Durango. Facultad de Agricultura y Zootecnia: Universidad Ju3rez del Estado de Durango
9. Norero, A. 1984. La evapotranspiraci3n de los cultivos. Aspectos agrof3sicos. CIDIAT, M3rida, Venezuela

10. Norma UNE-EN 12325-2:2000. “Técnicas de riego. Instalaciones de pivote central y de avance frontal. Parte 2: Funcionamiento y características técnicas mínimas”.
11. Norma UNE-EN 12325-2:2000. “Técnicas de riego. Instalaciones de pivote central y de avance frontal. Parte 2: Funcionamiento y características técnicas mínimas”.
12. Pereira L.S., Trout T.J. 1999. Irrigation methods. En: van Lier HN, Pereira LS, Steiner FR (Eds.). CIGR Handbook of agricultural engineering. vol. I: Land and water engineering. Michigan: ASABE. pp. 297-379
13. Ramírez L. J, Zazo S. T., Pinilla H. I.. (2007). Evaluación Hidráulica de Máquinas de Riego Móviles: Pivote de Riego. Centro Nacional de tecnología de Riego. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. España.
14. Rosas, Alayola., S.G. (2014). Evaluacion hidraulica del pivote central. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autonoma de Baja California Sur.
15. Tarjuelo, J.M., Valiente M. y Lozoya J. (1992). Working conditions of a sprinkler to optimize the application of water. J. Irrig. Drain. Eng. 118(6): 895-913.
16. Tarjuelo J.M. (1995): El riego por aspersión y su tecnología. Ed. Mundi-Prensa, Madrid.
17. Tarjuelo Martín-Benito, J.M. (1999). El Riego por Aspersión y su Tecnología. Mundi-Prensa. Madrid.
18. Tarjuelo M.-B. J. M. (2005). El Riego por Aspersión. Centro Regional de Estudios del Agua-CREA-Universidad de Castilla-La Mancha. España.
19. UNE-EN ISO 11545:(2002). Equipos de riego. Pivote central y sistemas de avance frontal con boquillas para aspersores o difusores. Determinación de la uniformidad en la distribución del riego. (ISO 11545:2001). Recuperado de: http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0027194#.We4vtROCw_U

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

20. UNE-EN 14049:(2005). Técnicas de riego. Intensidad de aplicación de agua. Principios de cálculo y métodos de medida. Recuperado de:
http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0032780#.We4wcROCw_U

Capítulo 3

Mantenimiento y operación

Luis Humberto Maciel Pérez
Luis Martín Macías Váldez
Arturo Cruz Vázquez

3.1. Introducción

El funcionamiento eficaz de un sistema de riego depende principalmente de los conocimientos que recibe el usuario mediante capacitación teórica y práctica acerca de este, antes de utilizarlo a nivel parcelario para la producción comercial de cultivos; lo cual en teoría es parte del contrato realizado con la empresa encargada de su diseño, instalación y puesta en operación, además de entregar un “manual de usuario”, lo que en la práctica difícilmente sucede.

Existen varios factores que deben ser considerados para asegurar la operación eficiente del sistema de riego, sin embargo, el que influye de manera determinante es el diseño y su compatibilidad con las prácticas de manejo que realiza el productor tanto del terreno como de los cultivos en los que se va a empelar. El cumplimiento de las normas de instalación de los distintos componentes que integran el sistema de riego, que de manera general son el cabezal de riego (con la energía hidráulica, sistema de filtro e inyección que demanda el sistema), las líneas de conducción,

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

válvulas de alivio (aire, reguladoras y sostenedoras de presión), los puntos de control (válvulas de apertura y cierre) y las líneas regantes; en las que se involucran la calidad de materiales utilizado; y finalmente, la capacitación y experiencia de los operarios, serán determinantes en la operación eficiente del sistema de riego.

De acuerdo a lo anterior, la operación y mantenimiento del sistema de riego es entonces la condición más importante para el buen manejo del riego, por lo que el objetivo primordial de este capítulo, es proporcionar al productor, técnico, usuario u operario del riego, los elementos necesarios y esenciales para implementar un programa de operación y mantenimiento en donde pueda consultar los procedimientos desde su instalación, puesta en operación, apagado y su almacenaje.

3.2. Consideraciones generales para la operación de los sistemas de riego

3.2.1. Cuanto y Cuando Regar

La aplicación de la cantidad exacta de agua requerida por los cultivos en el momento correcto es la principal característica que debe

cumplir una instalación de riego. Los productores normalmente entienden lo concerniente a los elementos principales de la programación del riego, como son la cantidad de agua por aplicar, las horas de operación y la frecuencia del riego, y ellos pueden seguir rutinariamente las instrucciones. Con una adecuada instalación, una correcta operación y un buen mantenimiento de las redes de conducción, los productores pueden tener un control total sobre el manejo del agua a nivel parcelario. Así, es fácil para ellos aplicar programas de riego basados en las demandas de los cultivos, las características físicas del suelo, la condición del clima, y la disponibilidad de agua en cada finca.

3.2.2. Encendido y apagado del Sistema

El encendido y apagado de los sistemas de riego presurizado debe realizarse de manera muy cuidadosa para prevenir el efecto del golpe de ariete y para evitar la formación de bolsas de aire en las tuberías; por lo que de gran importancia que antes de realizar esta práctica en la sección donde se va a realizar la aplicación del riego disponga de las válvulas de control abiertas, además es necesario que dicha apertura y cierre de las válvulas en el cabezal de control, en la tubería principal y en las laterales, siempre debe hacerse en forma gradual.

Cuando se cuenta con un equipo de bombeo, deben seguirse las

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

instrucciones del proveedor y revisar periódicamente las instalaciones eléctricas para verificar el voltaje, amperaje, checar el llenado de las tuberías, y la lubricación del equipo periódicamente. Los fabricantes proporcionan las instrucciones detalladas en sus instructivos y procedimientos para el arranque y operación de cada unidad de bombeo.

3.2.3. Rendimiento del Equipo

Las revisiones y observaciones frecuentes del equipo de bombeo, deben realizarse de manera rutinaria, tanto durante la temporada de los riegos (época de mayor demanda) y en aquella donde el requerimiento de riego es menor; para asegurar el funcionamiento adecuado y con ello tener un buen rendimiento del sistema. Esto involucra varios procedimientos, que bajo condiciones de campo son evaluaciones y observaciones metódicas simples.

3.2.4. Equipo Necesario para las evaluaciones

Para realizar las observaciones y evaluación en campo, es necesario disponer del siguiente material de trabajo:

- Un plano del área irrigada que muestre la localización de todos los

componentes del sistema y la ubicación de las parcelas.

- Un manómetro portátil (0 - 6.0 bars) con un adaptador especial para entrada de varios diámetros de tubo.
- Un cronómetro
- Una cinta para medir de 20 m de longitud aproximadamente.
- Probetas y/o vasos graduados con capacidad de 1 a 5 litros.
- Una barrena para muestreo de suelo.

En los sistemas de riego a presión hay varios factores que deben ser evaluados para determinar el nivel de funcionamiento y hacer las correcciones necesarias para un funcionamiento adecuado, entre los que destacan:

Presiones de operación: Con el sistema operando, se miden las presiones en varios puntos en la red, preferentemente al inicio y al final de la tubería principal y las sub-laterales. Las presiones de operación de los primeros y últimos emisores en un número de laterales también deben ser medido. Todas las presiones deben estar dentro de los rangos de diseño, por lo que la diferencia de presiones de los emisores no debe diferir de la presión media recomendada en más de un 20 por ciento a nivel del suelo, en caso de presentarse esta condición es necesario identificar el origen de esta variación.

Flujo de descarga: Se determina con la medición de la cantidad del

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

agua (descarga) de los mismos emisores cuyas presiones de operación fueron determinados. Esto se hace tomando el tiempo requerido para llenar con el agua que descarga el emisor; un vaso graduado o probeta. Las lecturas deben estar de acuerdo con las especificaciones del proveedor y la diferencia entre ellos no debe ser mayor de un 10 por ciento. El rango de descarga del sistema es la suma del rango promedio de la descarga de todos los emisores.

Uniformidad de aplicación y profundidad de mojado: Esto puede verificarse mediante muestreo de la humedad del suelo en diversos puntos a lo largo del terreno, usando para ello un medidor de humedad portátil, pala o barrena. El muestreo puede hacerse de 12 a 24 horas después del riego dependiendo del tipo de suelo. La capacidad de infiltración de los suelos, está en función directa de la textura del suelo, de tal manera de en forma general los suelos arenosos presentan alta tasa de infiltración, los suelos francos o migajones muestran una infiltración media y los arcillosos una baja tasa de infiltración, lo cual es un factor determinante en la frecuencia y cantidad de agua que se aplica a un suelo. Es importante evitar las apreciaciones visuales para propósitos de evaluación de cualquier tipo de sistema de riego, ya que generalmente conducen a juicios erróneos.

Además de las evaluaciones y observaciones anteriores, es necesario considerar las siguientes acciones para el mantenimiento preventivo, sobre todo cuando se realizan modificaciones en la infraestructura del lugar, por lo que es necesario realizar lo siguiente:

- Checar y reparar fugas en tuberías y válvulas.
- Acomodar los aspersores verticalmente al suelo y verificar el espaciamiento entre aspersores y laterales.
- Reemplazar o reparar los emisores tapados.
- Drenar para limpiar la red del sistema por lo menos tres veces durante la época de máxima demanda de riego, sobre todos cuando el agua proviene del sub-suelo; es recomendable también la limpieza del depósito de agua cuando menos dos veces al año, para eliminar algas y otros microorganismos que puedan ocasionar daños en las líneas de conducción y aplicación del agua. En tuberías de conducción y regantes un tiempo de drenado de aproximadamente de dos a tres minutos en cada línea prevendrá la sedimentación en el interior de las paredes de los tubos.
- Revisar y limpiar en caso de ser necesario, los filtros del sistema antes de cada riego. Durante el funcionamiento, verifique que la diferencia de presión entre la entrada y la salida del cuerpo principal del filtro sea mínima de acuerdo al manual de operación.
- Revisar las válvulas de admisión y expulsión de aire para un

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

funcionamiento apropiado.

- Inspeccionar las piezas plásticas del sistema, como válvulas y dispositivos para evitar roturas y otros daños físicos.
- Vaciar y limpiar los inyectores de fertilizantes (bomba y depósitos) después de cada aplicación, así como revisar conexiones, mangueras y válvulas.
- Implementar chequeos sistemáticos para detectar equipo que no estén funcionando adecuadamente debido a causas externas como deterioro físico y/o posible daño por la maquinaria, animales, etc.
- Realizar revisiones visuales frecuentes del sistema para asegurar que esté en buenas condiciones y operando eficazmente.

3.2.5. Equipo de Bombeo

El mantenimiento preventivo del equipo de bombeo es esencial durante la época de riegos. Los manuales del equipo contienen los principales problemas y sus posibles soluciones para resolver problemas comunes asociados con el funcionamiento normal de la unidad de bombeo. Las siguientes verificaciones e inspecciones son recomendadas para mejorar el funcionamiento del motor eléctrico y demás partes mecánicas que se manejan en los equipos de bombeo:

- Revisar la presencia de sonidos o ruidos extraños del equipo.
- Verificar la presencia de vibraciones en el equipo.
- Reparar fugas o goteo de agua en las partes de la bomba.
- En el caso de equipos de bombeo de flecha, checar la temperatura del motor.
- Checar que el consumo de energía eléctrica o diésel se mantenga en el rango normal.
- Checar la capacidad y rendimiento del equipo (descarga de agua y carga dinámica).
- Verificar la ventilación y mantener limpias las instalaciones.
- Revisar periódicamente la presión o niveles del aceite cuando se lubrique.
- Mantener el equipo engrasado y lubricado en donde sea necesario.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

3.2.6. Mantenimiento

El funcionamiento a largo plazo de las instalaciones de riego depende en gran medida del cuidado y mantenimiento preventivo llevado a cabo por el mismo productor. El servicio periódico de los equipos de bombeo y la reparación de dispositivos especiales (filtros, inyectores, etc.) se recomienda que sea supervisado o llevado a cabo por personal especializado.

El mantenimiento debe llevarse a cabo durante el período en que el equipo no se va a usar a fin de prepararlo para: a) El tiempo en que el equipo va a estar sin uso; y b) para su uso durante el próximo ciclo. Todos los equipos requieren una cierta cantidad de cuidados para su almacenamiento y mantenimiento. Para cada instalación hay un procedimiento concerniente a varios aspectos de la red de distribución y la unidad de bombeo.

3.2.6.1. Del Sistema

El procedimiento para la red de distribución del sistema es como sigue:

- Limpiar la tubería principal, sub-principales, distribuidores y laterales.
- Inspeccionar posibles daños a la red y repararlos.
- Mantener abiertas todas las válvulas y drenarlas completamente.
- Remover la suciedad, corrosión y otro material extraño de las partes que componen el sistema.
- Checar los emisores de posibles obstrucciones, daño, y señales de deterioró, para su reemplazo cuando sea necesario.
- Guardar los emisores nuevos en un lugar limpio y seco en estantes lejos de fertilizantes, agroquímicos, aceites, grasas y lubricantes.
- Examine la condición de las válvulas de admisión y expulsión de aire y válvulas check.
- Vaciar y limpiar el equipo de filtración y el equipo de inyección de fertilizante.
- Limpiar todos los elementos del filtro.
- Checar la condición de los empaque y seguros; quitando, limpiando y guardando en un lugar seco.
- Retirar las mangueras y tubos plásticos portátiles enrollándolos en dispositivos apropiados; y almacenarlos adecuadamente.
- Revisar las tuberías portátiles de aluminio y fierro de posibles daños y realizar las reparaciones necesarias con el proveedor; almacenándolas apropiadamente lejos de cables de alta tensión y alambrado.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- Drenar completamente todas las tuberías.

3.2.6.2. Planta de bombeo

Las plantas de bombeo normalmente consisten en una bomba centrífuga de algún tipo y la unidad de poder (motor eléctrico o de combustión interna). Las instrucciones de mantenimiento están disponibles en los manuales del fabricante. Debe tenerse cuidado especial para proteger los equipos de la humedad que puede acumularse dentro de los equipos y causar serios daños.

A continuación, se da una lista de verificaciones y pasos que deberán ser tomados en cuenta para la preparación del equipo de bombeo para: a) El período en que el equipo no va a estar funcionando y b) Para su uso durante el próximo periodo de riego:

3.2.6.2.1. Mantenimiento del equipo cuando no se usa

Bombas Centrifugas:

- Drenar toda el agua de la bomba y las tuberías que estén conectadas a ella.
- Cuando sea posible, quitar la tubería de succión y guardarla.

- Cuidar que cualquier pieza metálica expuesta y todas las partes que lleven aceite o grasa estén perfectamente lubricados para su protección.
- Limpiar las bridas y cualquier otro material del impulsor y la voluta o carcasa.

Motores de combustión Interna:

- Trabajar el equipo cuando el aceite en el cárter de cigüeñal este completamente caliente; detenga el equipo y drene el aceite del cárter y reemplace el aceite con aceite de buena calidad, cuando inicie la operación del equipo, debe ser despacio (a bajas revoluciones durante dos minutos, hasta que el aceite se distribuya de manera completa en todas las superficies.
- Detener el equipo; quitar todas las bujías y verter 60 ml de aceite en cada agujero de las bujías; con el interruptor de la ignición apagado, mover manualmente el motor del cigüeñal dando varias revoluciones para distribuir el aceite encima de las paredes del cilindro y válvula del motor; y reemplazar las bujías.
- Drenar el aceite del cárter; drenar el sistema de enfriamiento y cerrar las válvulas de drenaje; agotar todo el combustible del tanque, líneas y el carburador; reemplazar todos los tapones dañados y los mismos deben dejarse cerrados.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- Lubricar todos los accesorios y sellar de manera hermética todas las entradas de aire, incluyendo la toma de aire y el escape, con cinta impermeable.
- Checar el filtro del aceite, depósito de combustible y tapón del radiador.
- Rocíe todos los accesorios y el equipo eléctrico con un compuesto aislante conveniente.
- Cuando el equipo este al aire libre, cubrirlo con un material impermeable.

Motores Eléctricos

- Asegurarse de que todos los baleros se lubriquen bien.
- Cubrir el motor para protegerlo contra los roedores, insectos y polvo, pero dejarlo en un lugar ventilado.
- Checar que la caja de controles quede en posición de apagado y cubrirla con una lona cuando quede en un lugar expuesto para protegerla contra la humedad y el polvo.

3.2.6.2.2. Preparación del equipo para la temporada de riegos

Bombas Centrifugas:

- Limpiar e instalar adecuadamente los filtros que se encuentren

sucios.

- Asegurar que la válvula de pie o pichanca en la línea de succión de bombas centrífugas horizontales opere adecuadamente.

3.3. Riego localizado

En este apartado se presente una guía de campo para la operación y mantenimiento de un sistema de riego localizado o por goteo, que permita el ahorro de agua, incremente el rendimiento y haga sustentables y productivas las unidades de producción de la región norte centro de México, donde la superficie bajo riego es de aproximadamente 600,000 ha.

3.3.1. Objetivo del riego por goteo

Es el ahorro de agua a través de la aplicación localizada del riego en forma de gotas por emisores, comúnmente denominados “goteros”, cuya descarga o gasto fluctúa en el rango de 2 a 4 litros por hora por gotero. Ello facilita la dosificación



tomando en cuenta factores como el cultivo, características del suelo y del agua, así como condiciones ambientales específicas; lo cual garantiza

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

una mínima pérdida mínima de agua por evaporación o filtración.

3.3.2. Ventajas del riego por goteo

Permite un ahorro del 30 al 40% de agua, debido a la reducción de la evapotranspiración y de las pérdidas de agua en la conducción y durante la aplicación. Además, debido a la alta uniformidad del riego, todas las plantas crecen uniformemente, ya que reciben volúmenes iguales de agua, siempre que el sistema esté bien diseñado y con buen mantenimiento. También tiene la posibilidad de medir y controlar la cantidad de agua aportada, incluso de programar el riego en forma automatizada.

Es posible mantener el nivel de humedad en el suelo más o menos constante y elevado, sin que llegue a producirse encharcamientos que provoquen la asfixia de la raíz o faciliten el desarrollo de enfermedades.

Posibilita la utilización de aguas ligeramente salinas. La alta frecuencia de riego, hace que las sales estén más diluidas, lavando de forma continua el área húmeda que se forma alrededor del gotero. Otra gran ventaja del riego por goteo, es que reduce la salinización; además, como este método no permite que el agua entre en contacto con el follaje,

se puede utilizar agua de baja calidad con alto contenido de sales en cultivos con cierta tolerancia a las sales.

Facilita el control de maleza, ya que ésta se localiza únicamente en el área húmeda. Los agricultores que pasaron del riego tradicional por gravedad al sistema de riego por goteo han reducido su consumo de agua hasta en un 60 por ciento.



Así mismo con el uso de este sistema de riego, se reduce la mano de obra necesaria para el manejo del riego, además de que la aplicación de los fertilizantes se puede realizar a través del agua de riego, pudiendo de esta manera realizar las dos operaciones al mismo tiempo (riego y fertilización).

Como se dosifica con eficacia la aplicación de agua, y los fertilizantes, se consigue una mejor calidad del producto y un aumento en el rendimiento por arriba del 40 por ciento.

Los equipos tienen larga vida útil, superior a los 20 años y la inversión realizada en su implementación se puede recuperar en los primeros cinco años, dependiendo de la rentabilidad del cultivo y de la dedicación del agricultor.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

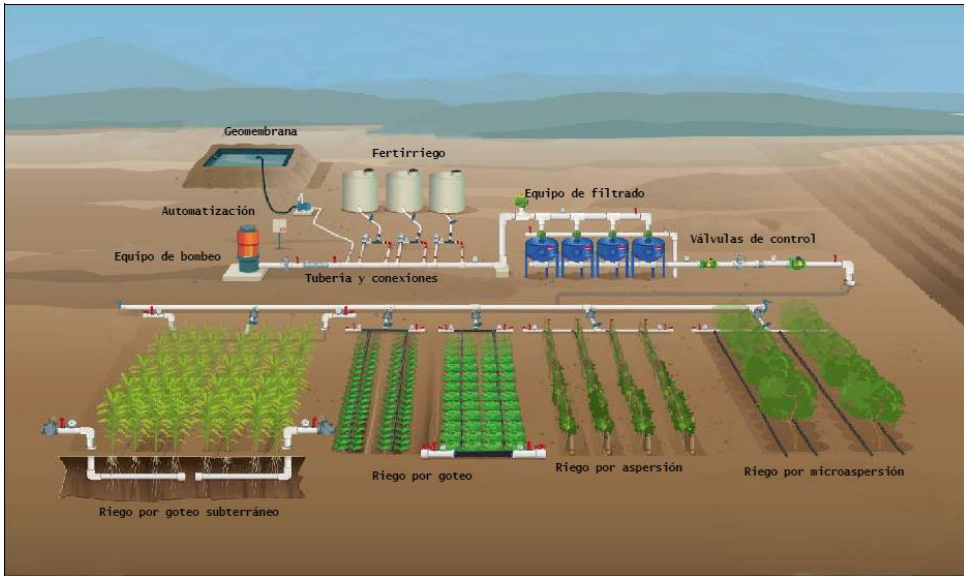


Figura 3.1. Esquema general de un sistema de riego presurizado, en sus distintas modalidades.

3.3.3. Operación del sistema de riego por goteo

La operación del sistema de riego por goteo implica la apertura y cierre de válvulas, para lo cual el productor debe familiarizarse con el concepto “lámina de riego”, con el propósito de que se entienda; es decir, un milímetro (mm) de lámina de agua equivale a un litro por metro cuadrado o a 10 metros cúbicos por hectárea.

También es necesario tener en cuenta que para transformar un caudal o gasto de agua que está expresado en litros por segundo (l/s), a metros cúbicos por hora (m^3/h), solo se requiere multiplicarlo por la constante 3.6. Esto permite determinar el tiempo de riego que el usuario va aplicar al cultivo, con base en el requerimiento de agua del cultivo (se expresa en mm/día) y el gasto o caudal que se tiene disponible en la toma parcelaria (l/s), de tal manera que al realizar una división entre la lámina de agua expresada en volumen (m^3) y el gasto disponible expresado en metros cúbicos por hora (m^3/h), se obtiene el tiempo de riego en horas (h).

Con el concepto anterior, la operación del sistema de riego se hace más sencilla y generalmente se utiliza como referencia el tiempo de riego, para lo cual es necesario considerar una serie de actividades que estarán regidas por el cultivo que se establezca, así como la etapa de desarrollo en que se encuentre y básicamente implica las siguientes acciones: a) conocer la demanda de riego del cultivo, b) aplicar el riego de acuerdo a los requerimientos hídricos, c) disponer de un programa de fertilización y c) Fertilizar el cultivo a través del agua de riego.

Cuando se opere un sistema de riego enterrado se recomienda aplicar el riego en forma intermitente (riego con pausas), lo que favorece el movimiento vertical y horizontal (capilaridad) del agua en comparación

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

cuando se aplica el riego en forma continua, con el mismo tiempo de riego. La aplicación intermitente más recomendable es aplicar el riego por 45 minutos, suspenderlo 45 minutos y aplicar riego por 45 minutos, con lo que se favorece el movimiento del agua.

Otra práctica que permite aumentar la velocidad en el movimiento del agua, es incrementar la presión de *10 a 20 psi*, durante la germinación. Esto eleva el caudal y proporciona un movimiento más amplio del agua en el suelo tanto hacia arriba como lateralmente.

3.3.3. Mantenimiento del sistema de riego por goteo

El mantenimiento del sistema de riego inicia en el momento que se realiza la instalación de éste, ya sea superficial o sub-superficial (enterrado), para lo cual es necesario considerar lo siguiente:

3.3.4.1. Reparación de fugas

En el riego por goteo, las botas, el azadón o la pala son substituidas por tijeras, conectores y cintilla como herramientas básicas para instalar y reparar las fugas.

Es importante detectar las fugas en la cinta de goteo de manera oportuna para evitar áreas del terreno con humedad excesiva, para lo cual

se siguen dos procedimientos, el primero consiste en la verificación de la presión de operación del sistema, para lo cual, una vez que inicia el riego, es necesario realizar un recorrido en la parcela primero sobre la cabecera de la parcela y en la parte final del surco, tomando la cintilla llena de agua con los dedos índice y pulgar para determinar de manera rápida la resistencia que presenta la cinta de goteo a la deformación, si está muy “floja” entonces existe la posibilidad de que exista una fuga, por lo que hay que tratar de localizarla rápidamente; algunas ocasiones el ruido del agua en una fuga en el interior de la parcela le avisará de la necesidad de reparar, nunca deje de hacerlo, es el trabajo más importante durante el cultivo

La segunda estrategia para localizar una fuga es realizar recorridos sobre la línea de plantas (surcos) cada seis surcos aproximadamente y mediante el uso del sentido del oído detectar ruidos que indiquen posibles fugas, ya que cuando el sistema de riego se encuentra en operación sin fugas no se escuchan ruidos de paso de agua. Una vez localizada la fuga en la cintilla, se recomienda el uso de las tijeras (para hacer un corte recto) y un conector de reparación para arreglar la fuga.

3.3.4.2. Inyección de productos químicos para el tratamiento del agua

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Los productos químicos son inyectados en todos los métodos de riego con fines agronómicos; no obstante, los sistemas de goteo son hasta ahora los más populares en prácticas de inyección. Los fines agronómicos incluyen:

- Mejorar la infiltración del agua en el suelo.
- Ferti-irrigación. El fertilizante primario que usualmente es inyectado es nitrógeno, sin embargo, actualmente se inyectan mezclas completas de nutrientes.
- Pesticidas. Pueden aplicarse nematicidas, herbicidas e insecticidas que han sido evaluados y autorizados para inyectarlos a través de sistemas de riego.
- Modificadores del pH del suelo. La modificación del pH incluye inyección de ácidos e inyección de suspensiones muy puras de carbonato de calcio de tamaño de tamiz 200.

La inyección de químicos es esencial para la sostenibilidad a largo plazo del sistema de riego en un medio ambiente árido. Generalmente los fertilizantes deben ser aplicados con el agua de riego para que queden disponibles en la zona de las raíces.

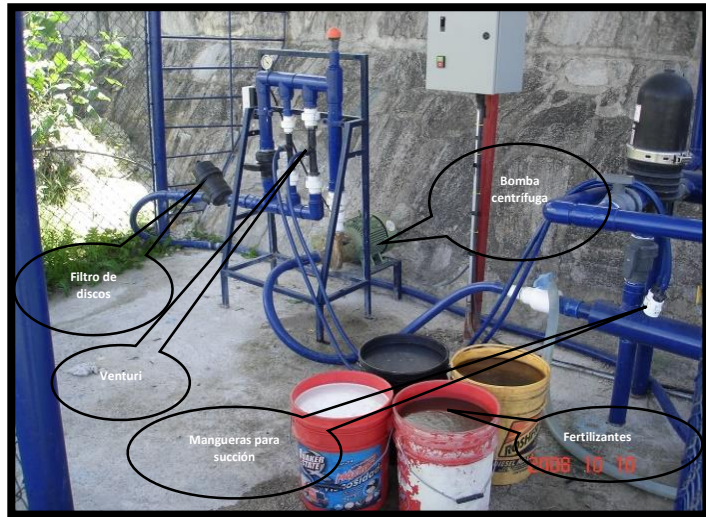
Para las condiciones de la región norte centro de México, existen tres tipos de obstrucción en sistemas de goteo, los cuales requieren la inyección de químicos a través del agua de riego:

- Bacterias limosas. Estas bacterias crecen en el interior de las paredes de las mangueras y de los emisores. Los tratamientos para eliminar bacterias limosas incluyen cloro y ácidos.
- Precipitación de carbonatos de calcio y magnesio.
- Intrusión de raíces dentro de los emisores enterrados.

Es importante realizar una prueba de compatibilidad antes de inyectar o mezclar sustancias químicas, la cual consiste en mezclar una pequeña parte de estas sustancias con el agua de riego, con la finalidad observar si se forma cualquier precipitado, opalescencia o turbidez en un período de 24 horas, de tal manera que si se llegara a presentar, hay mucha probabilidad de que la inyección de químicos cause problemas de obstrucción de los emisores.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Para tener una buena uniformidad, se recomienda que la inyección se inicie después de que el sistema se haya “cargado”, es decir todas las líneas regantes (cintillas) estén llenas y que alcancen el equilibrio normal de caudal y presión, los químicos se distribuirán a través del sistema con la misma uniformidad como se distribuye el agua.



Para determinar el tiempo necesario de espera para iniciar la inyección, se puede considerar como referencia que en promedio el agua circula a una velocidad media de 0.305 m/s, lo que equivale a un tiempo de espera de 3.3 segundos por cada metro de recorrido del flujo de agua, de tal manera que si el punto más lejano del sitio de inyección está a 500 metros, esto equivale a 1,650 segundos, es decir que el tiempo requerido para llenar el sistema, es de 27.5 minutos, por lo que hay que esperar al menos que transcurra este tiempo para iniciar la inyección y un tiempo

similar después de terminar la inyección para la aplicación total del químico.

El inyector deberá siempre localizarse antes del sistema de filtros, en caso contrario se debe asegurar un filtrado especial para evitar la entrada de partículas sólidas que pudieran ocasionar obstrucciones al sistema de riego.

Para la inyección de fertilizantes generalmente se programa aplicar un cierto número de UNIDADES o KILOGRAMOS de fertilizante durante el riego y lo más importante es asegurar que toda la mezcla sea aplicada.

El taponamiento de los goteros, es posible eliminarlo a través del tratamiento químico; en general es deseable mantener un pH igual o menor a 6.5, a través del uso de ácidos, o una concentración de cloro en partes por millón (ppm). Por lo tanto, un inyector debe ser capaz de aplicar una sustancia química de manera constante para prevenir obstrucción. Los métodos utilizados para inyectar químicos modernos utilizan el venturi con bomba centrífuga, venturi con presión diferencial y el tanque de presión diferencial, este último es el único incapaz de inyectar químicos a una tasa más o menos constante.

3.3.4.3. Prevención del taponamiento de los goteros

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La mejor manera de evitar la obstrucción o taponamiento de los goteros es la prevención, la cual debe estar acorde con el problema que se presente.

Uno de los problemas que tiene el riego por goteo es la presencia de bacterias limosas, que crecen en el interior de las paredes de las mangueras y de los emisores. Las partículas de arcilla en el agua, son demasiado pequeñas para ser removidas por el filtrado, de tal manera que se pegan a las bacterias limosas y agravan el problema al proveer nutrientes que favorecen un crecimiento adicional. A medida que el desarrollo de las bacterias se incrementa en tamaño, se desprenden grandes partículas y se mueven aguas abajo y en esa forma se obstruyen los pequeños orificios de los emisores.

Los tratamientos comunes para eliminar bacterias limosas incluyen la aplicación de cloro y la disminución del pH del agua a través de la aplicación de ácidos y fertilizantes con reacción ácida.

3.3.4.4. Aplicación de cloro

El cloro de uso doméstico puede ser utilizado para el mantenimiento del sistema de riego por goteo, el cual presenta una concentración de 5.25% de hipoclorito de sodio, equivalente

aproximadamente a 52.5 gramos por litro. La aplicación del cloro puede realizarse en forma continua a dosis bajas como se muestra en el Cuadro 3.1. (Después de cada riego), en forma periódica (cada 15 días) y al final del ciclo de cultivo, una vez que se ha lavado la cinta de riego. Este cuadro es una guía de la cantidad de cloro comercial utilizado para el hogar que se requiere de acuerdo al gasto que se tiene en la sección o área de riego y el forma de aplicación, en el cual se indica la cantidad de producto en litros que son necesarios de acuerdo al plan de mantenimiento que siga el usuario.

Cuando el cloro se inyecta en el agua, el cloro puede estar en dos formas: ácido hipocloroso e hipoclorito. El porcentaje relativo de cada uno depende del pH del agua. El ácido hipocloroso es mucho más poderoso para eliminar hongos y bacterias que el hipoclorito. Para un tratamiento efectivo con cloro, las aguas alcalinas deben acidificarse a un pH de 6.5, de tal manera que predomine el ácido hipocloroso.

El cloro “libre” residual es aún activo y reaccionará con las bacterias. La aplicación que se sugiere hacer al final del ciclo o cuando el sistema está muy obstruido se denomina *supercloración*, la cual puede dañar a un cultivo que se encuentre en pleno crecimiento o que no haya alcanzado la madurez para su cosecha.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 3.1. Volumen de cloro de uso doméstico en litros, que se sugiere aplicar de acuerdo al gasto disponible.

Tratamiento	Tiempo Aplicación (min)	Gasto o Caudal (litros por segundo)				
		10	15	20	25	30
Después de cada riego	10	0.171	0.257	0.343	0.428	0.514
	15	0.257	0.386	0.514	0.643	0.771
Cada 15 días	30	6.857	10.286	13.714	17.142	20.571
	45	10.286	15.428	20.571	25.714	30.857
	60	13.714	20.571	27.428	34.286	41.143
Al final del ciclo cultivo	15	85.714	128.571	171.428	214.285	257.142

Si se usa supercloración, primero deben lavarse las mangueras por completo; luego el cloro debe inyectarse y permitir que se asiente en las mangueras durante la noche (con el sistema apagado o cerrado) y a continuación, se debe hacer un lavado a todo el sistema. Puede ser necesario que este proceso se repita varias veces.

Es importante resaltar lo siguiente:

- La acidificación del agua y la inyección de cloro deben hacerse en dos puertos de inyección diferentes; mezclar ácido y cloro líquidos en el mismo tanque producirá gas de cloro tóxico.
- Nunca deben almacenarse juntos, ácidos y cloro.

- La inyección de cloro combinado con herbicidas o pesticidas puede reducir la efectividad de estos químicos.
- Siempre hay que adicionar el cloro (líquido o sólido) al agua, y no a la inversa.

3.4. Control de pH

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución e indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. Los tratamientos con ácidos acrecientan la efectividad del cloro y en muchos casos son suficientes por sí solos para eliminar bacterias limosas. Algunos productores usan ácido sulfúrico o fosfórico, otros usan fertilizantes de nitrógeno acidificados, los cuales proporcionan tanto ácido como fertilizante. El uso exclusivo de fertilizante de nitrógeno acidificado o de larga duración para el control de bacterias, debe hacerse con precaución porque: (i) el nitrógeno no se debe aplicar a algunos cultivos que estén próximos a cosecharse y (ii) el pH del suelo se puede afectar en forma adversa.

3.5. Precipitación de Carbonatos de Calcio y Magnesio

Las precipitaciones de carbonatos tienen lugar en los mismos emisores o goteros y puede ocasionar taponamiento de los mismos. Su presencia

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

puede identificarse fácilmente colocando una gota de ácido muriático (ácido clorhídrico) sobre un emisor obstruido. Si se produce efervescencia sobre el material, se trata de carbonatos.

La solución más popular para la remoción de carbonatos del agua es la inyección de ácido, antes de que ocurra su precipitación. En este proceso se usan algunos ácidos como el sulfúrico, nítrico y fosfórico, que permiten bajar el pH a 6.5 lo que previene la precipitación de carbonatos y el taponamiento u obstrucción de los goteros.

Cuadro 3.2. Necesidades de ácido nítrico para prevenir el taponamiento en base al gasto del sistema de riego.

Tratamiento	Tiempo Aplicación (min)	Gasto o Caudal (litros por segundo)				
		10	15	20	25	30
Después de cada riego	15	0.9	1.35	1.8	2.25	2.7
	20	3.6	5.4	7.2	9	10.8
Cada 15 días	30	9.0	13.5	18.0	22.5	27.0
Cada 20 días	30	18.0	27.0	36.0	45.0	54.0
Al final del ciclo cultivo	30	72.0	108.0	144.0	180.0	216.0

En el Cuadro 3.2 se presenta una guía de las cantidades requeridas de ácido nítrico que se deben aplicar al tomar como referencia el gasto o caudal que se tenga disponible en el sistema de riego, la frecuencia de aplicación del ácido, que puede ser después de cada riego, cada 15 o 20 días y al final del ciclo de cultivo. Se debe considerar el tiempo de aplicación, por ejemplo: si se aplica ácido nítrico en cada riego, con un tiempo de inyección de 15 minutos y el gasto del sistema es de 15 lps, se requiere de 1.35 litros de ácido; sin embargo, es necesario conocer el gasto del inyector para determinar el volumen de agua necesario para que la inyección se realice en el tiempo de 15 minutos.

Para determinar el tiempo de inyección y el volumen de una solución nutritiva, ácidos o cloro; es necesario calibrar el equipo de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

inyección para obtener el gasto del inyector; para lo cual se requiere conocer el gasto o flujo que se tiene en el sistema de riego, porque de éste depende el gasto de inyección.

El procedimiento general para estimar el gasto del inyector, consiste en disponer de un recipiente de volumen conocido (litros), un cronómetro y una solución (puede ser agua). Se prende el sistema de riego y se espera a que se llenen las tuberías y líneas regantes, se llena el recipiente de volumen conocido con la solución o agua y se pone a funcionar el Venturi para incorporar dicho volumen a la línea de conducción, se registra el tiempo en el cual éste es “succionado” y se repite este procedimiento al menos en seis ocasiones para obtener un tiempo promedio de inyección que sea representativo. El gasto o caudal del inyector se calcula al dividir el volumen conocido (litros) entre el tiempo promedio (segundos) y con ello se obtiene el gasto promedio de inyección en litros por segundo (lps), el cual deberá transformarse a litros por minuto (lpm) multiplicando por 60 y en litros por hora (lph) multiplicando nuevamente por 60.

El Cuadro 3.3 muestra los resultados obtenidos en la evaluación del gasto de inyección de dos Venturi's que tiene un sistema de fertirrigación, el primero de 1" y el segundo de 1 ½" de diámetro; se realizaron

seis muestreos para determinar el tiempo promedio de llenado de un recipiente de volumen conocido (13.74 litros).

Cuadro 3.3. Gasto individual de dos inyectores y la inyección simultanea de ambos en un sistema de riego por goteo.

Venturi (Inyector)	Tiempo promedio (segundos)	Gasto inyector “q” en litros por minuto (lpm)	Gasto inyector “qi” en litros por hora (lph)
1”	201.51	4.09	245.81
1 ½”	85.14	9.68	583.99
1” + 1 ½” (Ambos)	59.84	13.78	838.52

Estos valores corresponden a un gasto promedio del sistema de riego de 6.7 litros por segundo (lps) que es aplicado en la sección de riego; de acuerdo a la información obtenida en las pruebas de inyección de los venturi’s evaluados, el de una pulgada presentó una capacidad de inyección de hasta 245.81 litros por hora, el de 1 ½ “de 583.99 y la inyección simultánea de ambos presentan un gasto de inyección de 838.52 litros por hora.

En el Cuadro 3.4, se muestran los requerimientos generales de ácido nítrico por metro cúbico de agua que se aplica al cultivo, el tiempo de aplicación y la frecuencia con que se realiza el mantenimiento para prevenir el taponamiento de los goteros.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 3.4. Requerimientos de ácido nítrico por metro cúbico de agua aplicado, frecuencia y tiempo de aplicación en minutos.

Tratamiento	Tiempo Aplicación (min)	Litros de ácido nítrico por metro cúbico de agua aplicada
Después de cada riego	15	0.1
	20	0.3
Cada 15 días	30	0.5
Cada 20 días	30	1
Al final del ciclo cultivo	30	4

Para utilizar los datos presentados en los Cuadros 6 y 7, se muestra el siguiente ejemplo: para esto, es necesario suponer que se conoce el gasto aplicado a la sección de riego y además se programa aplicar ácido nítrico después de cada riego, durante un tiempo de 15 minutos (se requiere de 0.1 litros por m³ de agua aplicado) y con el gasto supuesto de 6.7 lps, para convertirlo a m³/h se multiplica por 3.6 y se divide entre 4 porque una hora tiene cuatro periodos de 15 minutos, entonces la operación es $((6.7 \times 3.6 \times 0.1) / 4)$ y el resultado es que es necesario un volumen de ácido de 0.603 litros; ahora si se utiliza el venturi de 1" que presentó un gasto de inyección de 245.81 lph (Cuadro 6) y como se va a inyectar 15 minutos, por lo tanto, se debe dividir entre cuatro

(245.81/4), por tanto el volumen en el que se va a disolver el ácido nítrico que se aplicará es de 61.452 litros.

Intrusión de raíces

La instalación del sistema de riego por goteo sub - superficial o enterrado requiere de una mayor atención a la prevención del crecimiento de raíces dentro de los emisores enterrados.

En cultivos anuales comúnmente se minimiza la intrusión de raíces al evitar estrés de humedad durante el desarrollo del cultivo y a través del mantenimiento del sistema mediante la inyección de ácido una vez que el cultivo ha sido cosechado; también existe la posibilidad del uso de algunos herbicidas con este propósito, con los cuales se crea una zona de repelencia alrededor del gotero lo que limita el crecimiento y la entrada de raíces al emisor, sin ocasionar daños importantes a las plantas.

Como medida preventiva, se recomienda disminuir el pH del agua a 1.5 o 2.0 una vez por semana, mientras el cultivo se encuentre en desarrollo, generalmente se utiliza urea y ácido sulfúrico con tiempo de aplicación de 30 minutos.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La instalación de las cintas a poca profundidad (entre 5 cm y 7.5 cm), puede incrementar los problemas de intrusión de raíces con respecto a profundidades mayores (15 a 25 cm). Una vez que las raíces han obstruido los emisores o goteros, no hay forma de limpiarlos por lo que se deben reemplazar las líneas regantes.

Algunos emisores vienen impregnados desde su manufactura con el ingrediente activo “*trifluronamina*”; sin embargo, su efectividad disminuye con el tiempo; de ahí que puede aplicarse este mismo producto a bajas dosis periódicamente a través del sistema de inyección y utilizando productos comerciales que lo contienen.

Purga o drenado de las líneas regantes

Algunas partículas muy finas pasan a través de los filtros y pueden ocasionar el taponamiento de los goteros, como la velocidad del agua es alta en flujo turbulento, estas partículas permanecen suspendidas, si la velocidad del agua disminuye o es menos turbulento el régimen, estas partículas pueden estabilizarse, lo cual ocurre en los extremos más distantes de las líneas laterales, por lo cual es importante el drenado de las líneas regantes, de las distribuidoras, de la línea secundaria y primarias, por lo que se debe considerar la instalación de válvulas que

permitan realizar el lavado del sistema de manera periódica. Para el caso de las líneas regantes (cintillas superficiales), se recomienda que se realice un drenaje o destapado (quitar los anillos del extremo final) cada dos semanas durante el ciclo de desarrollo del cultivo y por un tiempo de tres minutos; esta actividad es complementaria a la inyección de ácidos y cloro para el mantenimiento del sistema de riego.

En el caso del sistema de riego sub-superficial, esta práctica es más sencilla ya que el sistema de riego dispone de válvulas esfera para la purga de cada una de las secciones, en este caso lo importante es implementar el programa periódico de purga de las líneas regantes como se indicó anteriormente.

Reparación mayor en tuberías parcelarias de PVC

Como parte del mantenimiento del sistema de riego, está la reparación de tubería de PVC, la cual es susceptible de ser dañada por el paso de implementos u otras actividades que impliquen el uso de maquinaria pesada dentro de la parcela, por lo que de



Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

manera general se presenta el procedimiento para realizarlo y disminuir el tiempo de espera para suministrar el riego al cultivo.

Para hacer una reparación de las tuberías de PVC enterradas, se debe primero escarbar dentro del área dañada un metro de longitud y cinco metros en sentido opuesto para facilitar el movimiento del tubo y de esta manera realizar la inserción del cople de reparación en la tubería que se va a reparar. Es importante colocar el empaque con la parte más angosta hacia adentro, además de realizar una “cejilla o chaflán” en el borde de cada uno de los tubos con una escofina o lima para facilitar el ensamble y evitar que se mueva el empaque, se aplica lubricante especial para PVC e insertarlo con mayor facilidad, para la inserción se requiere de ayudarse de un trozo de madera para golpear suave y uniformemente y así facilitar su deslizamiento; de ser necesario se debe utilizar un tramo de tubo con campana para sustituir la sección de conducción dañada. La separación entre la tubería que se va a reparar con el cople de reparación deberá estar lo más cercano posible y no exceder de más de un centímetro.

Recuerde que el cople de reparación tiene un empaque a cada lado y es necesario que estén correctamente colocados para que no existan fugas, además deben quedar justamente al centro del punto de

convergencia de ambos tubos; una vez terminada la reparación, es necesario probar la tubería antes de tatarla para asegurar que la reparación se realizó de manera adecuada.

Recuperación de la cintilla

El uso de materiales plásticos en las actividades agrícolas implica crear en el usuario de riego una cultura de agricultura limpia, ya que se incorpora al sistema de producción estos materiales que por sus características tienen un alto impacto ambiental y contaminante si no se tiene el cuidado de recuperarlos y procurar su reciclaje.

Otra razón por la que se debe recuperar la cinta, sobre todo la instalada superficialmente es debido a la necesidad de utilizarla al menos en tres ciclos productivos, por lo cual se sugiere utilizar materiales de cintilla con calibre o espesor de pared igual o mayor a 8,000 esta actividad puede realizarse manual o mecánica. Para facilitar la recuperación de la cintilla que se instala en la superficie del suelo y en cultivos de hilera como maíz, es necesario que ésta se localice en la parte central del surco, lo cual se logra primero al ubicarla sobre un lado del cultivo y evitando que



Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

se entrelace con las plantas y a medida que va creciendo el cultivo (en sus primeras etapas), hay que moverla de la línea de plantas cuando la altura de la planta no rebase los 20 cm, después de la cual esta labor se dificulta y se tiene el riesgo de dañar la cintilla y al cultivo; posteriormente al momento de recuperarla .

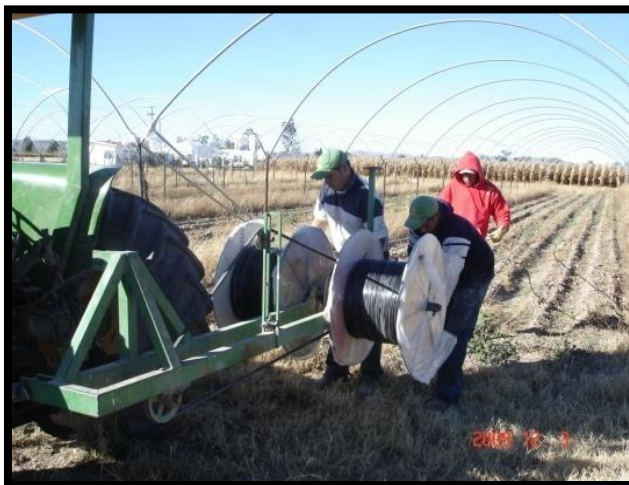
Antes de retirar la cintilla del terreno es importante “lavarla”, con la aplicación de ácidos y cloro, lo que facilita la eliminación de sales, bacterias y hongos que se han incrustado en la cinta de goteo, lo cual se trató anteriormente.

Recuperación manual. Esta labor es difícil de realizar si no se preparó con anticipación la cinta para retirarla del terreno; es necesario que el productor disponga de carretes en los que se almacenará la cintilla, las figuras



mostradas, son ejemplos de carretes para realizar esta práctica; el primero aprovecha el empaque original de la cinta sustituyendo el cartón por triplay de madera y en el segundo es una estructura a base de fierro, en el que se utiliza alambro, tubo de 2”, cartón y plástico industrial para envoltura.

Si el usuario no dispone de maquinaria para recuperar la cinta, basta colocar el carrete en un soporte para dar estabilidad y así realizar la maniobra de recuperación de la cintilla, pueden ser utilizados los extremos del carrete para dar el giro o una manivela que ayude a realizar el embobinado de



la cinta que se va a recolectar. Es importante utilizar guantes de carnaza o un material impermeable para evitar tener contacto con el agua que se encuentra alojada dentro de la cintilla, porque después del lavado es posible que queden residuos de ácidos que en contacto con la piel pueden ocasionar quemaduras.

Recuperación mecánica. Para levantar la cintilla existe un implemento que hace uso de la toma de fuerza del tractor y dispone de un control de mando (freno) para activar y desactivar la operación del embobinado, consta de una barra o eje que soporta dos carretes que tienen la posibilidad de recoger dos surcos al mismo tiempo y requiere tres personas para la recuperación de la cinta de goteo, como se observa en la figura superior.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El Programa de Mecanización Agrícola del Campo Experimental Pabellón del INIFAP desarrolló un prototipo diferente para la recuperación de cintilla, cuya fuente de energía es hidráulica y hace uso de un motor hidráulico que va montado en el recogedor de cinta, ha mostrado una buena eficiencia en la recuperación de la cintilla.



La cinta sub-superficial debe removerse una vez que se haya completado su vida útil o que por causas del taponamiento se haga necesario retirarla del terreno, por lo que se recomienda rastrillar el cultivo después de la cosecha y dejar descansar el terreno por unos días. Esto permite que los residuos del cultivo empiecen a descomponerse y que se deshidraten los residuos vegetales superficiales.

Es recomendable antes de iniciar la remoción de la cinta, aplicar un riego de 4 a 6 horas para suavizar el suelo alrededor de la línea de la cinta. La parte de la tierra que queda arriba de la línea de la cinta puede



entonces ser abierta utilizando un implemento apropiado tal como un arado de aleta o un arado de discos así la cinta se puede jalar hacia afuera. Actualmente existen en el mercado implementos que hacen posible la remoción de la cinta colocada sub - superficialmente, lo que facilita esta actividad.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

3.6 Bibliografía

1. Acrocarpus, S.A de C.V. *Catalogo de productos agrícolas*. Sistemas de Riego. Recuperado de <http://acrocarpus.com/catalogo-agricola.html>.
2. Aguilera, C.M. y Martínez, E.R. 1980. *Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera*. Cuarta Reimpresión 1996. México. Universidad Autónoma Chapingo.
3. ASAE. 1996. Evapotranspiration and Irrigation Scheduling. *Proceedings of the International Conference. November 3-6 1996*. American Society of Agricultural Engineers. The Irrigation Association. The International Commission on Irrigation and Drainage. San Antonio, Texas, U.S.A. 1166 p.
4. Burgueño, H. 1996. La Fertigación. Los Elemento minerales de la fertilización y su relación suelo planta. Curso preparado para INIFAP. BURASAG, S.A. DE C.V. Culiacán, Sin. 122 p.
5. Burt, M. Ch., Styles, W. S. y Forero, S. J. A. 2000. Riego por goteo y por Microaspersión para Árboles, Vides y Cultivos Anuales. *Irrigation Training & Research Center (ITRC)*. BioResearch and Agricultural Engineering Department. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California., USA. 292 p.
6. Burt, M. Ch. 2008. Avoid Common Problems with Drip Tape. *Training & Research Center (ITRC)*. BioResearch and Agricultural Engineering Department. California Polytechnic State University. San Luis Obispo, California, USA. 17 p.
7. Castellanos, J.Z., Uvalle, B. J.X y Aguilar S., A. 2000. Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas. *Instituto de Capacitación para la productividad agrícola*. Segunda Edición. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Gto. 226 p.
8. Enciso, J., Portes, D., Bordovsky, J. and Fipss, G. 2006. Maintaining Subsurface Drip Irrigation Systems. *Texas Cooperative Extensión*. The Texas A&M University System. 6 p.

9. Erie, L. J., O.F. French and K. Harris. 1965. Consumptive of Water by Crops in Arizona. Ariz. Agr. Expt. Sta. *Tech. Bull.* 169, 44 pp.
10. Doorenbos, J. and A.H. Kassam. 1979. Yield response to water. (FAO) *Irrig. Drain. Paper No. 33 Food and Agric. Organization.* United Nations, Rome, Italy.
11. Fuentes, Y. J.L. 1998. *Técnicas de Riego. Tercera Edición.* Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 471 p.
12. García, C.I. 1981. *Diseño, evaluación y operación de sistemas de riego por conductos cerrados.* Notas de Clase. Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro". Buenavista, Saltillo, Coah., México.
13. Gavande, A.S. 1982. *Física de Suelos.* Principios y aplicaciones. Editorial LIMUSA, S.A. Cuarta reimpression. México. 351 p.
14. González, C. F., Peña, R. A., Robles, E. F. J. y Núñez, H. G. 2007. Producción de ensilaje de maíz con alto valor nutricional. *Folleto Técnico Núm. 36.* Campo Experimental Pabellón CIR Norte Centro. INIFAP. 23 p.
15. Hills, J. D. Nawar, F. M. and Waller, M. P. 1989. Effects of Chemical Clogging on Drip – Tape Irrigation Uniformity. *Transactions of the ASAE* Vol. 32(4): 1202-1206.
16. Howell, T.A., D.S. Stevenson, F.K. Aljibury, H.M. Gitlin, I-Pai Wu, A.W. Warrick, y P.A.C. Raats. 1980. Design and operation of trickle (drip) systems. p. 663-717. *In: Design and operation of farm irrigation systems.* ASAE Monograph No. 3., American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, Mich., U.S.A.
17. IMTA. 1997. *Manual para diseño de zonas pequeñas de riego.* Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. Comisión Nacional de Agua. Secretaria de Medio Ambiente, Recursos Naturales. Impreso en México. 321 p.
18. INIA. 1988. *Métodos de Riego.* Proyecto PROM. Cartilla Divulgativa. Centro Regional de Investigación La Platina. Santiago de Chile, República de Chile. 23 p.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

19. Lamm, R. F. 2002. Advantages and disadvantages of subsurface drip irrigation. *In: International Meeting on Advances in Drip/Micro Irrigation*, Puerto La Cruz, Tenerife, Canary Island, Spain. 13 p.
20. Medina, G. G., Maciel, P. L. H., Ruiz, C.J.A., Serrano, A. V. y Silva, S. M. M. 2006. *Estadísticas climatológicas del estado de Aguascalientes (Período 1961 -2003)*. Libro Técnico No. 2. INIFAP. CIR Norte Centro. Campo Experimental Pabellón. México. 156 p.
21. Nakayama, F.S., y D.A. Bucks. (Eds.). 1986. Trickle irrigation for crop production. Design operation and management. *Developments in Agricultural Engineering 9*. Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands.
22. Palacios, E. V. 1998. Porque, cuando, cuanto y como regar para lograr mejores cosechas. Manual para usuarios y técnicos del agua. Colegio de Postgraduados, Chapingo. México.
23. Peña, R. A. y González, C. F. 2005. Manejo agronómico para mejorar la producción y calidad forrajera de maíces precoces. Folleto Científico Núm. 19. Campo Experimental Pabellón CIR Norte Centro. INIFAP. 26 p.
24. PREDES. 2005. Manual de operación y mantenimiento de un sistema de Riego por Goteo. Centro de Estudios y Prevención de Desastres. Ayuda Humanitaria Comisión Europea. . OXFAM GB. Perú. 25 p.
25. Quiñones P., H.E. 1997. Necesidades hídricas de los cultivos. *In: Manual para diseño de zonas de riego pequeñas*. Instituto de Tecnología del Agua. Comisión Nacional del Agua. México. p. 1:13 – 40.
26. Wright J., L. 1982. New Evapotranspiration Crop Coefficients. *J. of Irrig. and Drain. Div., ASCE*, 108:57-74.

Capítulo 4

Programación de riego con sensores de humedad

Juan M. Enciso¹
Miguel Servin Palestina²
Orlando Ramírez Valle³
Héctor. A Gutiérrez Jurado⁴

4.1. Introducción

El monitorear el contenido de agua en el suelo es esencial para ayudar a los agricultores a optimizar la producción, conservar agua, reducir los impactos ambientales y ahorrar dinero (King et al. 2002; Miranda et al. 2005). El monitorear la humedad del suelo le puede ayudar a tomar mejores decisiones en la programación del riego, tales como el determinar la cantidad de agua a aplicar y cuando aplicarla (Enciso et al 2005). También le puede ayudar a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego; y así evitar pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos o bien evitar aplicar una cantidad insuficiente (Servin et al 2017). El exceso de

¹ Profesor Asociado y Especialista en Ingeniería Agrícola, 2401 East Highway 83 Weslaco, TX 78596 *juan.enciso@ag.tamu.edu

² Campo Experimental Zacatecas, Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5 Calera Zacatecas, México CP:98500.

³ Campo Experimental Sierra de Chihuahua Av. Hidalgo N° 1213, Cd. Cuauhtémoc Chihuahua.

⁴ Profesor Investigador de la Universidad de Texas en El Paso. Departamento de Geología.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radicular, producir erosión y transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje (Martin y Muños 2000). El riego insuficiente puede reducir la producción de las cosechas.

Cuadro 4.1 El contenido de humedad del suelo en cm de agua por cm de suelo y en porcentaje

Textura del suelo	Capacidad de campo (1/3 bars)	Punto de marchites permanente (15 bars)	Agua disponible para la planta a 60 cm
Arena	0.100(10)*	0.041(4)	3.50(6)
Arena margosa	0.158(16)	0.066(7)	5.50(9)
Franca arenosa	0.208(21)	0.091(9)	7.00(12)
Franca	0.266(27)	0.116(12)	9.00(15)
Franca limosa	0.300(30)	0.150(15)	9.00(15)
Franca arcillo-arenosa	0.358(36)	0.200(20)	9.50(16)
Arcilla arenosa	0.316(32)	0.183(18)	8.00(14)
Franca arcillosa	0.291(29)	0.183(18)	6.50(11)
Franca arcillo-limosa	0.283(28)	0.150(15)	8.00(13)
Arcilla limosa	0.400(40)	0.200(20)	12.0(20)
Arcilla	0.400(40)	0.216(22)	11.0(18)

Los numeros en parentesis representan el contenido volumetrico de humedad en porcentaje (Hanson 2000).

4.2. Conceptos básicos

La capacidad de almacenamiento del agua del suelo de acuerdo a su textura se presenta en el cuadro 4.1. Con el fin de facilitar el manejo eficiente del riego, se han definido unos parámetros que describen la capacidad de almacenamiento del agua del suelo. Estos parámetros se definen a continuación:

- **La capacidad de campo:** es el contenido de agua en el suelo después de aplicar un riego pesado y cuando la velocidad del drenaje cambia de rápida a lenta. Este punto se logra cuando toda el agua gravitacional se ha drenado (Figura 1). La capacidad de campo se logra normalmente dos o tres días después del riego y se alcanza cuando la tensión del agua en el suelo es de aproximadamente 0.3 bars (30 centibars ó 3 m de columna de agua) en suelos arcillosos o de 0.1 bars en suelos de textura media (Cassel y Nielsen 1986).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

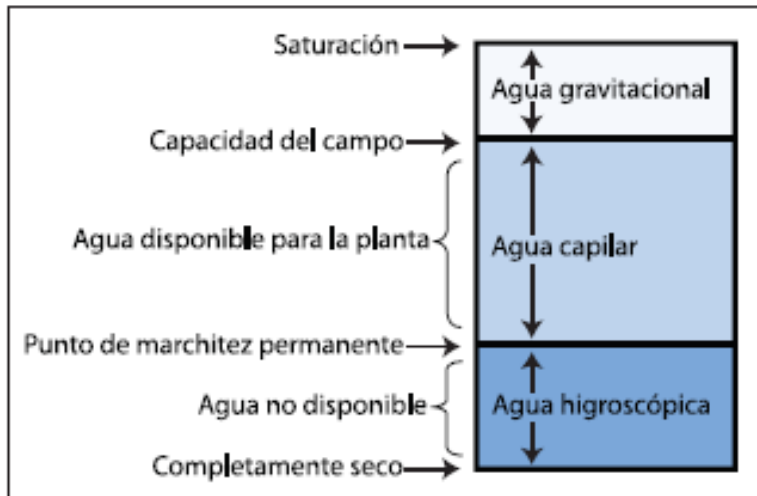


Figura 4.1. Parámetros del contenido de agua en el suelo y tipos de agua en el suelo.

- **El punto de marchitez permanente:** es el contenido de agua en el suelo al cual las plantas no se pueden recuperar y se marchitan aún cuando se les adiciona suficiente humedad. Este parámetro puede variar de acuerdo a las especies de las plantas y al tipo de suelo, y ha sido determinado por experimentos en invernaderos. Este punto se logra cuando la tensión del agua en el suelo alcanza entre 10 y 20 bars (de 102 a 204 m de tensión). Generalmente se utiliza un valor medio de 15 bars (153 m). *El agua higroscópica* es cuando el agua está retenida fuertemente por las partículas del suelo (por debajo del

punto de marchitez permanente) y no puede ser extraída por las raíces de la planta. (Veihmeyer, y Hendrickson, 1949).

- **El agua disponible para la planta:** es el contenido de agua retenido entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. Generalmente, este parámetro se expresa en cm de agua por cm de profundidad del suelo. Éste depende de factores tales como la textura del suelo, densidad aparente y estructura del suelo. El cuadro 4.1 muestra los valores aproximados del agua disponible para la planta para suelos de diferentes tipos de textura. El agua del suelo contenida entre estos límites se mueve primordialmente por fuerzas capilares o matriciales (Van der Paauw, 1971). (Figura 4.1).
- **Contenido gravimétrico de agua:** es una medida directa de la humedad del suelo, y es el método estándar para calibrar otras técnicas de determinación del agua en el suelo. La técnica de secado del suelo en el horno es probablemente la más utilizada de todos los métodos gravimétricos para medir el contenido de agua del suelo (Loveday, 1971). Esta técnica consiste en tomar una muestra del suelo con una barrena. La muestra se coloca en un recipiente y se pesa; posteriormente se seca en un horno a 105°C hasta que se obtiene un peso constante (normalmente después de 24 horas), después se vuelve a pesar. El contenido gravimétrico de agua es la

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

cantidad de agua en la muestra por porcentaje de peso seco del suelo y se calcula de la siguiente manera (OMM 1992):

Contenido gravimétrico de agua (H%) = $\frac{\text{Peso del suelo húmedo (PSH)} - \text{Peso del suelo seco (PSS)}}{\text{Peso del suelo seco (PSS)}} \times 100$

***Peso de suelo seco (PSS)**

- **La densidad aparente:** es el peso del suelo seco por unidad de volumen de suelo. Esta propiedad está relacionada con la porosidad (espacio poroso) y la compactación; y se utiliza para calcular el contenido volumétrico de agua a partir del contenido gravimétrico de agua (Schmugge, T. J., 1985). Generalmente este parámetro se expresa en gramos por centímetro cúbico de suelo, de acuerdo con:

$$\text{Densidad aparente (Da)} = \frac{\text{Peso de suelo seco (PSS)}}{\text{Volumen de suelo (VS)}}$$

- **El contenido volumétrico de agua del suelo:** es comúnmente utilizado para expresar el contenido de agua en el suelo. Éste se obtiene al multiplicar la densidad aparente del suelo por el contenido gravimétrico de agua y se utiliza para calcular la lámina de riego.

Contenido volumétrico del agua (%) = $\frac{\text{Densidad aparente del suelo}}{\text{densidad del agua}} \times \text{Contenido gravimétrico del agua (\%)}$

4.3. Capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

La curva característica de la humedad del suelo (Figura 4.2) describe la relación entre el contenido de agua en el suelo y la tensión a la cual el agua es retenida por el suelo. (Martínez 1995, Pérez, 2008). La relación no es lineal y varía con el tipo de suelo. En un suelo saturado la tensión está muy cerca de cero y a medida que el suelo se seca, la tensión (succión) se incrementa (Bonilla y Cancino, 2001).

La textura del suelo tiene una gran influencia en la curva característica. Los suelos arenosos no retienen suficiente cantidad de agua disponible para la planta, éstos generalmente drenan más rápidamente y necesitan ser regados con más frecuencia que los suelos arcillosos (Cornelis et al 2001) (Cuadro 1). *La humedad disponible para la planta* es la diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo menos el contenido de agua al punto de marchitez permanente (Dourado et al 2000).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

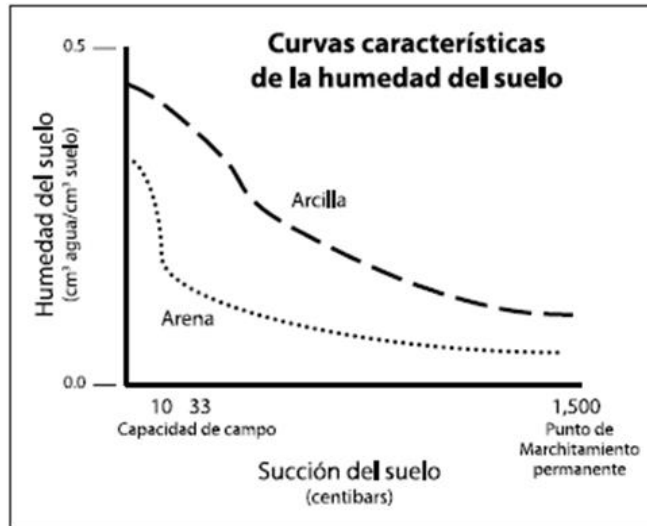


Figura 4.2 curvas características de la humedad para suelos arenosos y arcillosos.

4.4. Déficit permitido en el manejo del riego (DPM)

Es el contenido de agua en el suelo al cual no se debe permitir bajar o llegar al punto de marchitez permanente para evitar el estrés de la planta por falta de agua, y por lo tanto, evitar la reducción en la producción. La diferencia entre el contenido de agua a capacidad de campo y el DPM debe ser la lámina de riego por aplicar. El contenido de agua que queda debajo de este límite es la cantidad de agua que queda en el suelo. El déficit permitido (DPM) dependerá de las especies de plantas y variará de acuerdo con las temporadas de cultivo (Beeson 2006;

Dobriyal et al 2012). Generalmente, el déficit permitido se expresa en porcentajes. El nivel de déficit permitido recomendado para muchos cultivos de campo es de alrededor del 50 por ciento. Para cultivos sensibles a la sequía (incluyendo muchas verduras), el déficit permitido puede ser tan bajo como de un 25 por ciento. El cuadro 4.2 muestra el déficit permitido de manejo del riego para algunos cultivos seleccionados.

Otro criterio que se utiliza frecuentemente para determinar el momento oportuno para aplicar el riego es *la tensión de la humedad del suelo* (Richards 1949; Hanson et al 2000)). Este método es más utilizado para programar el riego en los sistemas por aspersión, microirrigación y goteo, los cuales permiten aplicar láminas pequeñas y muy precisas. La tensión de la humedad del suelo se puede medir con un sensor, tal como el sensor de Watermark® (sensor de matriz granular) o un tensiómetro. La tensión de la humedad del suelo a la que se aplica el riego variará dependiendo del tipo de suelo y a la profundidad que se coloque el sensor de humedad. La calibración y la experiencia que se tenga del sitio predeterminado optimizan la utilización de este método en la programación de la irrigación. Algunos valores para accionar el riego de acuerdo a valores de la tensión del agua en el suelo se sugieren en el cuadro 4.3.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

4.5. La profundidad de la raíz

Determinará la cantidad de agua que la planta puede disponer del suelo. El cuadro 4.2 muestra las profundidades de raíz estimadas para algunos cultivos seleccionados. Las condiciones del suelo (por ejemplo, capas compactadas, nivel freático superficial, suelo seco) pueden limitar la profundidad de la raíz. En general las hortalizas tienen un sistema radicular relativamente superficial y por lo tanto tienen menos capacidad para extraer el agua almacenada en el suelo. Los cultivos que tienen sistemas radiculares superficiales y menores niveles de déficit permitidos requieren de riegos más frecuentes (Gerwitz & Page - 1974).

Cuadro 4.2. Déficit permitido de manejo del riego (DPM, %) y profundidades de las raíces (cm) para algunos cultivos.

Cultivo	Déficit permitido de manejo del riego (%)	Profundidad de la raíz (cm)
cultivos de fibra		
Algodón	65	100-170
Cereales		
cebada y avena	55	100-137
Maíz	50-55	79-182
Sorgo	50-55	100-201
Arroz	20	48-100
Legumbres		
Frijol	45	48-131
Soya	50	60-124
Forrajes		
Alfalfa	50-60	100-301

Bermuda	55-60	100-137
Pasto para pastizales	60	48-100
Césped		
Temporada fría	40	48-67
Temporada Caliente	50	48-67
Caña de azúcar	65	121-198
Arboles		
Durazno	50	100-201
Cítricos		
70% bajo sombra	50	121-152
50% bajo sombra	50	109-152
20% bajo sombra	50	79-109
Árboles coníferos	70	100-137
Huerto de nogales	50	170-243
Hortalizas		
Zanahoria	35	45-100
Melón y sandía	40-45	79-152
Lechuga	30	30-48
Cebollas	30	60-91
Papas	65	30-60
Pimientos Dulces	30	48-97
Calabacines y pepinos	50	60-121

Las profundidades de la raíz pueden ser afectadas por el suelo y por otras condiciones. Con frecuencia, las profundidades efectivas de la zona de la raíz son más superficiales. (Allen et al., 1996).

Cuadro 4.3. Tensiones de humedad recomendadas para algunos cultivos seleccionados.

Cultivo	Tensión centibares
Alfalfa	80-150
Repollo	60-70
Melón	35-40
Zanahoria	55-65
Coliflor	60-70
Apio	20-30
Cítricos	50-70
Maíz (dulce)	50-80

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Árbol deciduo	50-80
Granos	
Etapa de crecimiento vegetativo	40-50
Etapa de maduración	70-80
Lechuga	40-60
Cebolla	45-65
Papas	30-50
Tomates	60-150

Hanson et al. 2000.

4.6. Medición del agua del suelo

Los métodos utilizados para medir el agua en el suelo se clasifican como *directos e indirectos*. El método directo se refiere al método gravimétrico en el cual se recolecta una muestra del suelo, se pesa, se seca en el horno y se pesa nuevamente para determinar el contenido de agua de la muestra. Para obtener el contenido volumétrico se multiplica por la densidad aparente. El método gravimétrico es el estándar contra el cual se calibran los métodos indirectos. Esta sección describe algunos métodos indirectos utilizados para medir la humedad del suelo (Dobriyal et al 2012; Wagner, & Rott., 1999).

4.6.1. Sensores granulares de la matriz y bloques de yeso

Los bloques de yeso responden a los cambios de humedad del suelo de acuerdo con la profundidad en que éstos son colocados en el suelo al medir la resistencia eléctrica entre dos círculos de malla de alambre que están conectados por un material poroso (Muños et al 2004).

4.6.1.1 Funcionamiento

Aunque la resistencia eléctrica se mide en ohms, el medidor portátil convierte automáticamente la lectura a centibars. (1 bar = 100 centibars). La resistencia eléctrica aumenta a medida que se incrementa la succión del agua en el suelo, o a medida que disminuye la humedad del suelo (Bouyoucos, & Mick, 1947). El sensor Watermark® (Figura 4.3) funciona similarmente al sensor de bloques de yeso, sin embargo, difiere de éste porque es más duradero en el suelo y puede responder mejor a los cambios de humedad del mismo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos



Figura 4.3. Sensor Watermark® antes de su instalación.

El medidor portátil del sensor Watermark® (Figura 4.4) mide la tensión de la humedad del suelo en un rango de 0 a 199 centibars (cb). La tensión debe ser interpretada cuidadosamente de acuerdo con las propiedades del suelo (Thompson et al 2006). Por ejemplo, una lectura de 10 cb puede corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura gruesa (arena), mientras que 30 cb pueden corresponder a la capacidad de campo en suelos de textura más fina (limosos, arcillosos). Las lecturas altas en el medidor indican que el suelo se está secando. Por lo tanto una lectura de 75 cb puede corresponder a un déficit de 90 por ciento para suelos de textura gruesa, pero solamente de 30 por ciento para suelos de textura fina. Por esta razón es recomendable calibrar los

sensores Watermark® a cada tipo específico de suelo. Estos sensores se ven afectados ligeramente por la temperatura y la salinidad. El sensor de la Figura 4.4 también puede ajustarse de acuerdo con la temperatura del suelo.



Figura 4.4. Utilizando el medidor portátil del sensor Watermark®.

4.6.1.2 Instalación y lectura

Para obtener una lectura más precisa de la humedad de suelo, es importante instalar varias estaciones de sensores Watermark® por terreno, especialmente si el terreno tiene varios tipos de suelos. Una estación debe consistir en la instalación de varios sensores enterrados a diferentes profundidades, según el tipo de cultivo (a la profundidad

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

efectiva de la raíz), con el fin de evaluar el movimiento y la extracción de la humedad a lo largo de la temporada del cultivo. La colocación de los sensores variará ligeramente de acuerdo al método de riego. Además, los sensores deben de colocarse en un área representativa, tal como dentro de una hilera de plantas para cultivos que se siembran en hileras, o en la cama para cultivos hortícolas o bien en áreas mojadas bajo riego por goteo. La profundidad a la que se colocará el sensor también debe ser representativa de la zona efectiva de la raíz.

Los sensores deben instalarse mojados para mejorar la respuesta de los sensores al primer riego. Para colocarlos dentro del suelo y a una profundidad apropiada, se utiliza un broca de 7/8 de pulgada para perforar un hoyo en el suelo hasta la profundidad deseada. Se empuja el sensor con una varilla dentro del agujero, se agrega agua y tierra para rellenar el agujero, dejando accesible el alambre por encima del terreno. El uso de una bandera o una señal en cada sitio facilitará la localización de los sensores para lecturas posteriores. En caso de que se remuevan los sensores, éstos pueden utilizarse nuevamente por muchas temporadas si se les presta el cuidado apropiado; por lo tanto, se deben de limpiar y secar bien antes de guardarlos. Sin embargo, los sensores deben revisarse antes de instalarlos nuevamente. La revisión consiste en colocarlos dentro de un recipiente con agua y asegurarse que los

sensores sumergidos indiquen entre 0 y 5 cb. Si la lectura es mayor que 5 cb, se deben descartar.

La conexión del alambre de los sensores a un medidor digital Watermark® provee una lectura instantánea. Las lecturas frecuentes indican con cuánta rapidez la humedad del suelo se agota, y por lo tanto, indican cuándo es necesario el riego. Existen algunos aparatos para guardar datos, como el de la Figura 4.5, que permiten que se realice la lectura de los datos directamente y se registren continuamente. También permiten que los datos se descarguen a una computadora portátil.



Figura 5. Sensores Watermark® conectados a un sistema de registro de datos WatchDog® (de hasta 3 sensores).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La Figura 6 muestra el movimiento del contenido de agua en el suelo a diferentes profundidades (6, 18 y 30 pulgadas) en una huerta de naranjas. En esta huerta de riego por goteo, el riego se aplica cuando el sensor colocado a una profundidad de 18 pulgadas alcanza una lectura de aproximadamente 40 cb. Un riego con una lámina (indicada en la gráfica por un triángulo azul) de alrededor de 0.7 pulgadas satura el suelo. Observe que el suelo se seca primero en la parte superior de la zona de la raíz y luego en el área más profunda de la zona radicular.

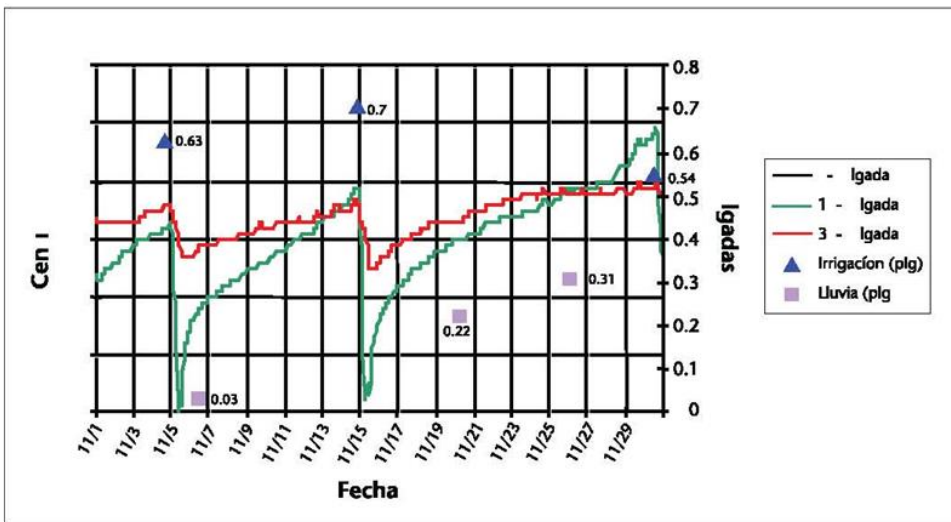


Figura 6. Lecturas del contenido de agua en el suelo realizadas con sensores Watermark®, lecturas de precipitación y láminas de riego en árboles de naranja bajo riego por goteo.

Los sensores sirven para dar seguimiento al riego e indican la tendencia de la humedad del suelo. La lluvia (indicada en el gráfico por los cuadros de color morado) permite que el regador retrase el riego.

4.6.2. Sensores que miden la constante dieléctrica del suelo

Estos sensores miden los cambios en la *constante dieléctrica* del suelo con un capacitor que consta de dos placas de un material conductor que están separadas por una distancia corta (menos de 3/8 de pulgada). Se aplica un voltaje en un extremo de la placa y el material que está entre las dos placas almacena cierto voltaje. Un medidor lee el voltaje conducido entre las placas (Salgado et al 2012).

Cuando el material entre las placas es aire, el capacitor mide 1 (la constante dieléctrica del aire). La mayoría de los materiales del suelo, tales como la arena, arcilla y material orgánico poseen una constante dieléctrica de 2 a 4. El agua tiene la constante dieléctrica más alta, que es de 78. Por lo tanto, los contenidos más altos de agua en un sensor de capacitancia serían indicados por constantes dieléctricas con medidas más altas. Como consecuencia, al medir los cambios en una constante dieléctrica, el contenido de agua se mide indirectamente. Algunos de los sensores disponibles basados en la capacitancia incluyen los sensores

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

ECH2O® (Figura 4.7), EnviroSCAN® y Reflectómetro de Dominio de Tiempo (RDT). (Esta sección solamente describe los sensores ECH2O®.).



Figura 4.7. Sensor ECH2O® y medidor ECH2O® (medidor dieléctrico).

4.6.2.1 Funcionamiento

Estos sensores proporcionan las lecturas de los contenidos volumétricos de agua en el suelo a la profundidad a la que se colocan (m^3 de agua/ m^3 de suelo). Típicamente la humedad del suelo oscila de 0 a 0.4 m^3 de agua por m^3 de suelo. Estos sensores ya están precalibrados para usarse en una amplia gama de tipos de suelo. Sin embargo, para suelos

con altos contenidos de arena (texturas gruesas) y suelos con altos contenidos de sal, la calibración estándar no será exacta. Por lo tanto, se deberán realizar algunas calibraciones. Un valor de 0 a 0.1 m^3/m^3 indica el rango de un suelo seco o cercas del punto de marchitamiento permanente y un valor de 0.3 a 0.4 m^3/m^3 representa el rango de humedad de un suelo de capacidad de campo a saturado.

Los sensores se conectan a un sistema de registro de datos (como el registrador HOBO® o a una estación climatológica) y con un cable en serie se descarga la información a una computadora personal. El registrador de datos HOBO® puede aceptar hasta cuatro sensores.

4.6.2.2 Instalación y lectura

Los sensores se deben colocar a diferentes profundidades en áreas representativas del terreno con el fin de dar seguimiento al movimiento del agua del suelo y a su agotamiento dentro de la zona radicular. Esto permitirá monitorear la humedad y determinar el uso del agua por el cultivo a través del tiempo. Ya que los sensores miden el contenido de agua cerca de su superficie, es importante evitar las bolsas de aire y la compactación excesiva del suelo alrededor de los sensores para obtener lecturas más representativas del suelo natural.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Los sensores se deben separar a una distancia de al menos 3 pulgadas unos de otros o se deben separar de otras superficies metálicas. Se pueden colocar perpendicular o verticalmente a la superficie del suelo. Para colocar un sensor en instalaciones más profundas, se debe hacer un agujero previamente con una broca de 3 pulgadas. Luego se debe utilizar una barrena de la marca ECH2O® para insertar el sensor dentro del suelo a la profundidad deseada (Figura 4.8). Posteriormente, se debe cubrir el sensor colocando tierra alrededor del mismo, asegurándose que exista un buen contacto entre el suelo y el sensor. Los cables del sensor deben estar accesibles para poder ser conectados al sistema de registro de datos a través de sus receptáculos. Si se insertan los cables a través de un conducto podrán durar más tiempo ya que éste los puede proteger de posibles daños causados por animales, productos químicos y de los rayos ultravioletas.



Figura 4.8. Uso de una herramienta especial para instalar sensores ECH2O®: una lámina de acero de la misma medida que el sensor se martilla hacia el suelo (izquierda) antes de insertar y empujar el sensor con otra herramienta (Derecha).

Se necesita un programa de cómputo para bajar la información del registro de datos a la computadora personal (Figura 4.9). El registrador de datos se puede programar para realizar lecturas del sensor de humedad a diferentes intervalos de tiempo (ejem. 1 lectura cada 2 o 24 horas). Con este sistema es posible registrar la información del contenido de agua en el suelo durante toda la temporada del cultivo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos



Figura 4.9. Bajando los datos del registrador de datos a una computadora personal.

4.6.3. Tensiómetro

El tensiómetro mide la tensión o la succión del agua del suelo. Este instrumento consiste de un tubo de plástico lleno de agua y herméticamente cerrado, equipado con un manómetro de vacío en la parte superior y una capsula de cerámica porosa en el extremo inferior (Marfà, & Martínez, 1992) (Figuras 4.10 y 4.11).

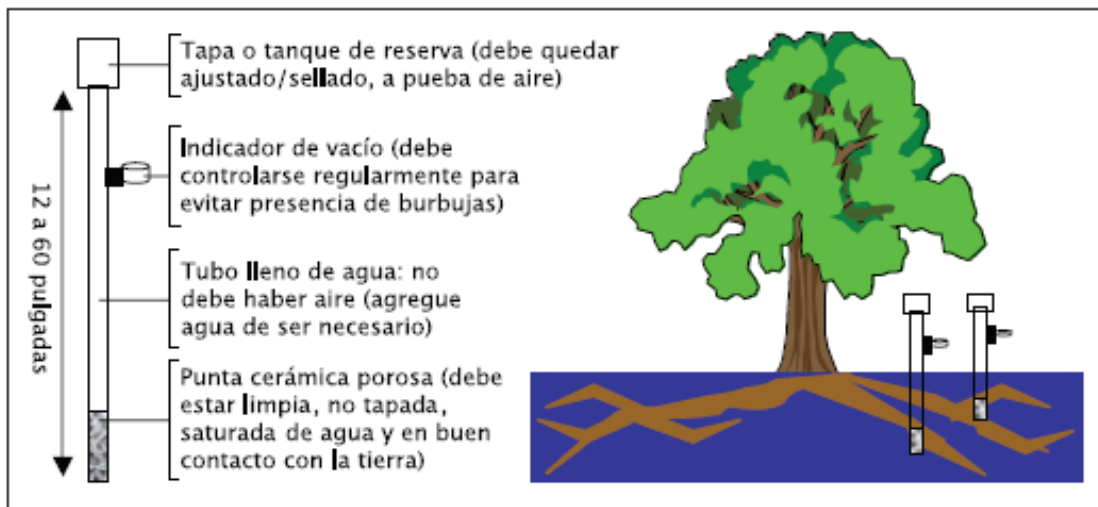


Figura 4.10. Diagrama de un tensiómetro y de una estación de dos tensiómetros instalados a diferentes profundidades del suelo.

4.6.3.1 Funcionamiento

El agua se mueve desde el tubo del tensiómetro a través de la cápsula de cerámica hacia el suelo en respuesta a la succión del agua del suelo (cuando el agua se evapora del suelo o cuando la planta extrae agua del suelo). El agua también se puede mover desde el suelo al tensiómetro durante el riego. A medida que el tensiómetro pierde agua, se genera un vacío en el tubo y éste es registrado por el manómetro. La mayoría de los tensiómetros tienen un manómetro graduado de 0 a 100 (centibars, cb, o kilopascales, kPa). Una lectura de 0 indica un suelo saturado. Conforme el suelo se seca, la lectura en el medidor aumenta.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El límite funcional del tensiómetro es de aproximadamente 80 cb. Más allá de esta tensión, el aire entra a través de la cápsula de cerámica y provoca la falla del instrumento. Por lo tanto, estos instrumentos son más prácticos en suelos arenosos y con cultivos sensibles a la sequía, ya que éstos tienen un rango de manejo de la humedad del suelo menos amplio. Durante el riego, el agua retorna al tensiómetro y la lectura del manómetro se aproxima a 0. Algunos tensiómetros están equipados con pequeñas reservas de agua para reemplazar esta agua y reducir el mantenimiento requerido.



Figura 11. Estación de tres tensiómetros instalados a diferentes profundidades del suelo.

4.6.3.2 Instalación y lectura

Antes de instalar el tensiómetro, se debe mojar el instrumento en un recipiente con agua durante 2 o 3 días. Luego se deben dar los siguientes pasos:

- Saturar el filtro de cerámica con agua para eliminar cualquier burbuja de aire.
- Llenar el tubo con agua destilada, coloreada y tratada con alguicida. Remover las burbujas de aire (del tubo y del manómetro de vacío) golpeando suavemente la parte superior del tensiómetro.
- Vaciar el aire del tubo del tensiómetro con una bomba manual de vacío hasta que el manómetro indique una lectura de 80-85.
- Sellar la tapa adecuadamente.
- Comprobar que la lectura que se obtiene en el manómetro cuando la punta del tensiómetro se sumerja en agua indique 0 centibars.
- Instalar el tensiómetro cuidando que la cápsula de cerámica esté a la profundidad de la zona de raíces del suelo. Se necesitan dos tensiómetros en cada sitio (Figura 4.10). Para cultivos con raíces superficiales tales como las hortalizas, se debe instalar un tensiómetro a 6 pulgadas y otro a 12 pulgadas de profundidad. Para cultivos con raíces más profundas, se debe instalar un tensiómetro a 12 pulgadas y otro a 24 o a 36 pulgadas.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- Usar una broca de 7/8 o que tenga el mismo diámetro que el tubo del tensiómetro para perforar un agujero a la profundidad deseada (menos la altura del extremo de la cerámica). Termine el agujero inicial con una sonda de diámetro más pequeño y empuje el tensiómetro para colocarlo en el lugar. La precisión de la lectura depende del buen contacto del dispositivo con el suelo.
- Tape bien el agujero y vierta agua alrededor del tensiómetro para mejorar su contacto con el suelo, acumule de 3 a 4 pulgadas de tierra alrededor del tubo. También se puede rellenar el agujero con lodo del mismo suelo, vertiéndolo dentro del agujero antes de colocar el tensiómetro.

4.6.4. Sondos de neutrones

La sonda de dispersión de neutrones es una técnica de prueba eficaz para medir el contenido total de agua en el suelo por volumen. Este aparato estima la cantidad de agua en un volumen de suelo al calcular la cantidad de hidrógeno presente (Bacchi et al 2003) figura 4.12.



Figura 4.12. Sonda de neutrones utilizada en un cultivo de naranjas.

4.6.4.1 Funcionamiento

Las sondas de neutrones consisten en una unidad hecha de una fuente de neutrones rápidas y de alta energía (fuente de radioactividad encapsulada) y de un detector. Esta sonda se introduce en un tubo de acceso de PVC o aluminio a la profundidad deseada con la ayuda de sujetadores unidos a un cable. Una unidad de control, la cual permanece en la superficie, se conecta al cable.

Los neutrones rápidos, emitidos de la fuente y que pasan a través del tubo de acceso dentro del suelo adyacente, pierden gradualmente su energía por medio de colisiones con otros núcleos atómicos. Los neutrones chocan con el hidrógeno del agua del suelo y pierden

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

velocidad. Los neutrones lentos rebotan de nuevo a un detector, creando un impulso eléctrico que se registra automáticamente y proporciona un determinado número de neutrones por período de tiempo. Básicamente, este número de pulsos está relacionado linealmente con el contenido volumétrico total del agua en el suelo. Un registro más alto indica un mayor contenido de agua en el suelo. Mientras la relación sea lineal, el dispositivo se debe calibrar para cada tipo de suelo.

Para calibrar la sonda de neutrones, se necesita establecer un sitio seco y uno mojado para cada tipo de suelo. Se toman lecturas con la sonda de neutrones en estos dos sitios y también se toman medidas gravimétricas y de densidad aparente, después se traza una línea de calibración entre estos dos puntos. La calibración convierte las lecturas del medidor de neutrones a contenido volumétrico de agua. Aunque este método tiene gran aceptación por su precisión, el alto costo del equipo, los requerimientos de la licencia y sus altos requerimientos regulatorios limitan su uso para investigación y para áreas donde se requiere de un amplio muestreo.

4.7. Ventajas y desventajas de los sensores seleccionados para medir la humedad del suelo

El cuadro 4.4 describe algunas de las ventajas y desventajas del método gravimétrico, los sensores Watermark®, los sensores ECH2O, los tensiómetros y el dispersor de neutrones.

Cuadro 4.4. Ventajas y desventajas de algunos sistemas para monitorear la humedad del suelo.

	Ventajas	Desventajas
Gravimétrico	Muy preciso.	Destructivo Requiere de mano de obra Consume mucho tiempo
Sensores Watermark	Buena precisión en suelos de textura media a fina debido a sus partículas de tamaño fino similares a la matriz granular del sensor Accesible (Aproximadamente \$20 por sensor, \$250 por el medidor). Manejo fácil (peso ligero, tamaño de bolsillo, instalación fácil y lectura directa). Rango amplio de lecturas de la humedad del suelo (de 0 a 200cb, o kPa). Útil durante varias temporadas con un cuidado apropiado medidas continuas en la misma ubicación	Respuesta lenta a cambios en el contenido de agua en el suelo después de una lluvia o un riego. Falta de precisión en suelos arenosos debido a sus partículas grandes. Requiere de tiempo para determinar cuál lectura del sensor es la más apropiada para el riego. Requiere de mano de obra intensa para recolectar la información regularmente (sin embargo, es posible conectar los sensores Watermark a un registro de dato; por lo tanto, las lecturas se recopilan automáticamente y pueden ser descargadas mediante un programa a una computadora personal
sensor de capacitancia: Sensores ECH2O	Capacidad de leer directamente el contenido volumétrico del agua en el suelo.	Técnica de alto costo. Las sondas EC contenido volumétrico del agua en el Ech2o tienen un costo de \$100 (de 1 a 10 suelo. unidades); sin embargo

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

(modelos EC-20, Ec-10, y EC-5)	<p>No requiere de mantenimiento especial.</p> <p>Alta precisión cuando los sensores están instalados apropiadamente y tienen buen contacto en el suelo.</p> <p>Amplio rango de operación (de 0 hasta suelo saturado)</p> <p>Medidas continuas en la mismo sitio.</p>	<p>tienen un costo de \$70 cada una si se piden 11 unidades o más. Tiene un medidor portátil para tomar mediciones directas que cuesta \$300</p> <p>Si se quiere recolectar la información con un registro de datos se requiere una computadora personal, el programa cuesta \$95 y el registrador de datos HOBO® tiene un costo de \$200 y permite la conexión de varios sensores.</p>
Tensiómetro	<p>Bajo costo</p> <p>Lectura directa de la tensión del agua del suelo para programar el riego.</p> <p>Medidas continuas en el mismo lugar.</p>	<p>Requiere Chequeo periódico.</p> <p>Opera solamente para succión de la humedad del suelo menor a 80cb (no es útil para suelos más secos).</p>
Dispensador de neutrones	<p>Se considera uno de los métodos más exactos para medir el contenido de agua en el suelo cuando se calibra apropiadamente.</p> <p>Tiene Capacidad para medir el agua del suelo a diferentes profundidades, durante muchas veces en la temporada del cultivo.</p>	<p>No puede proporcionar una lectura precisa en las primeras 6 pulgadas de profundidad del suelo debido al escape de neutrones rápidos emitidos de la sonda de neutrones.</p> <p>Requiere de procesos de seguridad para la radiación, que son molestos.</p> <p>Requiere calibración de las lecturas de la sonda de neutrones contra medidas gravimétricas mediante la sección de un sitio mojado y uno seco; para calibrarlo para diferentes tipos y profundidades del suelo.</p> <p>Técnica muy costosa, requiere de licencia especial, entrenamiento regular para el operador, manejo especial, procedimientos de embarque y almacenamiento.</p>

4.8. Manejo de riego con sensores de humedad.

Para un manejo adecuado de riego se deben considerar tres aspectos importantes **1) Capacidad de respuesta:** la sensibilidad de un sensor o capacidad para percibir las variaciones de humedad en el suelo **2) Precisión:** Es el error de medida máximo esperado o la capacidad para darte la lectura de humedad lo más real posible. **3) Costo:** este aspecto el proporcional la capacidad de respuesta y a la precisión por lo que se tiene que hacer un a balance y definir el uso del sensor y la utilidad.

4.8.1 Calibración de sensores de humedad

Los dos primeros aspectos se puede contrarrestar por el conocimiento del sensor en interacción con el cultivo para el cual se utiliza y la calibración en campo es decir relacionara la lectura del sensor con respecto a la humedad del suelo obtenido por el método gravimétrico, con la siguiente ecuación:

$$\%H = \frac{PSH - PSS}{PSS} * 100 \quad \text{Ec. 4.1}$$

Dónde: % H = porcentaje de humedad del suelo (%), PSH = Peso del suelo húmedo (g), PSS = Peso de suelo seco (g).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La calibración de campo del sensor se puede hacer de dos formas: directa e indirecta. La directa es colocar los sensores en la parcela donde se establecerá el cultivo posteriormente se toma la lectura del sensor y a la par se realiza un muestreo gravimétrico. Para la calibración indirecta se realiza un pozo (cajete) de un metro de diámetro y 15 cm de alto cercano a la parcela del cultivo y se coloca el sensor a calibrar a la profundidad deseada (recomendación 30 cm) preferentemente por duplicado, se agrega de 80 a 100 litros de agua, posteriormente se cubre con un plástico para evitar evaporación y se deja drenar el exceso de agua por 24 a 36 horas, después se realiza una lectura del sensor y a la par un muestreo gravimétrico preferentemente cada día hasta que la humedad del suelo sea casi igual a punto de marchites permanente (Grafico 4.1).

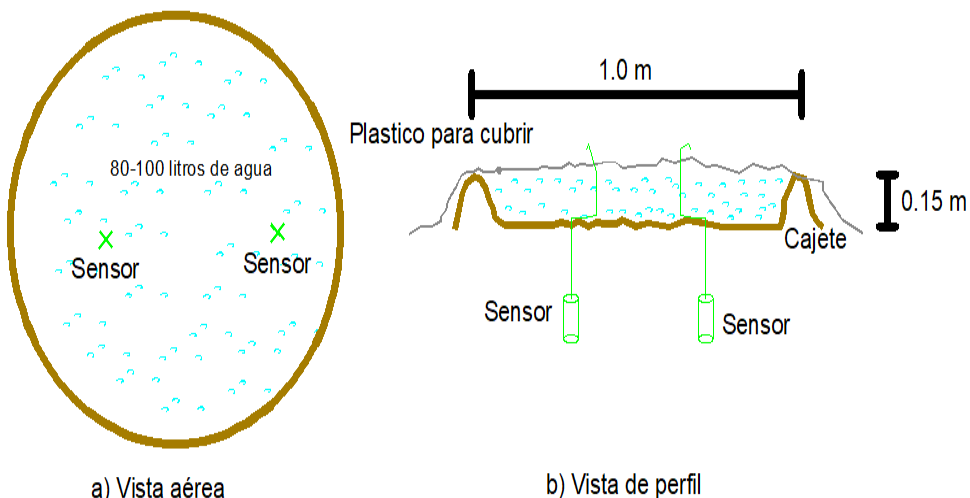


Figura 4.13.- Cajete para calibración de sensores de humedad

Cuadro 4.5.- Hoja de registro de calibración por sensores con cajete

Fecha	PSH+T*	PSS+T	PSH	PSS	%H (X)	Ls (Y)**
15/05/17					Ec. 4.1	
...						
N						

*Peso del bote donde se colocó la muestra **Lectura del sensor

Otra forma de calibración es con el peso del suelo húmedo, es llenar en un bote o bolsa de 15 a 20 litros de suelo de la parcela donde se establecerá el cultivo, colorar el sensor humedad que se va a calibrar, posteriormente se seca hasta peso constante quitando el peso del bote, será peso de suelo seco (PSS), una vez teniendo el PSS se agrega agua hasta saturarlo de 8 a 10 litros y se coloca un plástico para evitar

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

evaporación y se deja drenar por 24 horas. Una vez drenado el exceso de agua se pesa diariamente en una báscula al peso se le quita el peso del bote y del plástico y sería el peso del suelo humedad a la par de cada peso se saca la lectura del sensor.



Figura 4.14.- Calibración de sensores con peso del suelo húmedo

Cuadro 4.6.- Hoja de registro de calibración por sensores bote

Fecha	PSS =	Constante	Peso Bote (T)	Constante
	PSH+T	PSH	= %H (X)	Ls (Y)**
15/05/17			Ec. 4.1	
...				
N				

*Peso del bote donde se colocó la muestra **Lectura del sensor

Los datos obtenidos se analizan de acuerdo a la metodología descrita por Eduardo *et al* (2001) que relaciona las lecturas del sensor (Ls) y valores de porcentaje de humedad (% H) estimados con el método gravimétrico y se hace una regresión. En la figura xx se muestra los datos obtenidos de un sensor watermark colocado a 30 cm de profundidad en un suelo de textura franca arcillosa.

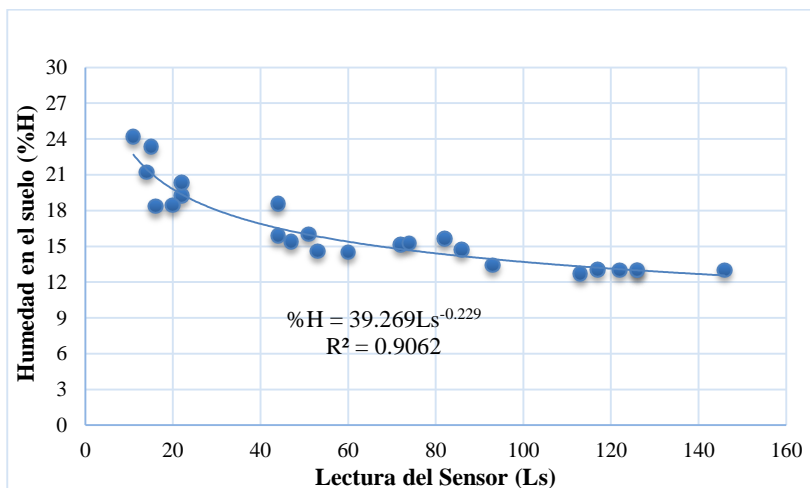


Figura 4.15.- Calibración de sensor watermark a 30 cm de profundidad en un suelo franco arcilloso.

Se prueban varios modelos para obtener la ecuación para calibrar los sensores de humedad y se seleccionó el modelo que presentar mayor ajuste y más simple. En el ejemplo anterior se selecciona un modelo

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

potencial que representa en un 90.6% la humedad del suelo con respecto a la lectura del sensor ($r^2 = 0.9062$).

$$\%H = 39.269 * Ls^{-0.229} \quad \text{Ec. 4.2}$$

4.8.2. Programación de riego

Para iniciar con el riego se requiere determinar la lámina de riego que se debe aportar para llevar a capacidad de campo, es decir al 100 % de humedad aprovechable (**HA**), por medio de la ecuación 3, donde los valores requeridos se obtuvieron del cuadro 4.1 o también se obtiene de análisis de laboratorio.

$$HA = (CC - PMP) * Da * Pr \quad \text{Ec. 4.3}$$

Dónde:

HA: Humedad aprovechable (%),

CC: Capacidad de campo (%),

PMP: Punto de marchitez permanente (%),

Da: Densidad Aparente g cm^{-3})

Pr: Profundidad de riego.

Este será el punto de partida para iniciar con el manejo de riego que posteriormente se tomará diariamente la lectura del sensor (**LS**) que se sustituirá en la ecuación 1, y se determinará el porcentaje de humedad del suelo, una vez determinado se procede a obtener la lámina de riego mediante la fórmula sugerida por Palacios (2002).

$$Lr = (CC - \%H) * Da * Pr \qquad \text{Ec. 4.4}$$

Dónde:

Lr: Lamina de riego

CC: Capacidad De campo

%H: Humedad en el suelo

Da: Densidad Aparente

Pr: Profundidad de riego.

Para definir el tiempo y la lámina de riego bruta (**Lb**) que se va a aplicar con el sistema de riego, Lr se divide entre la eficiencia de aplicación del sistema (**Ea**) (Ecu. 4.5).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$Lb = \frac{Lr}{Ea} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Dónde:

Lb: Lámina de riego bruto

Lr: Lámina de riego

Ea: es la eficiencia de aplicación (%) que es la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y el agua almacenada en zona de raíces considerando un valor de **0.95 (95 %)**.

Para el cálculo de tiempo de riego (**Tr**), el cual depende del caudal o volumen de agua que provee el sistema de riego por unidad de tiempo. Un indicador importante es la tasa horaria (**TH**) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm h^{-1}), para cintilla se estima con base al gasto del emisor (Q_e) en litros por hora (lph); el espaciamiento entre emisores (E_e) en m y entre líneas regantes o surcos (E_{lr}) en m. (Ecu. 4.6).

$$TH = \frac{Q_e}{E_e * E_{lr}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

El tiempo de riego (Tr), es la relación que hay entre la lámina bruta de riego a aplicar entre la TH lo cual indica el número de horas que se regará para mantener la humedad requerida para cada tratamiento.

$$Tr = \frac{Lb}{TH} \quad \text{Ec. 4.7}$$

Consideraciones: la lámina de arranque se fracciona en tres a cinco partes para su aplicación en pulsos, durante los primeros ocho días.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

4.9. Bibliografía

1. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M., 1998. Crop Evapotranspiration- Guidelines for Computing Crop Water Requirements [Evapotranspiración de los cultivos-Guía para calcular los requerimientos de agua para cultivos]. Documento 56 de la FAO Irrigación y Drenaje. Roma.
2. Cassel, D. K., & Nielsen, D. R. (1986). Field capacity and available water capacity. *Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods*, (methodsofsoilan1), 901-926.
3. Bacchi, O. O. S., Reichardt, K., & Calvache, M. (2003). *SONDAS DE NEUTRONES Y GAMMA: SUS APLICACIONES EN AGRONOMIA*.
4. Beeson, R. C. (2006). Relationship of plant growth and actual evapotranspiration to irrigation frequency based on management allowed deficits for container nursery stock. *Journal of the American society for horticultural science*, 131(1), 140-148.
5. BONILLA M., Carlos y CANCINO V., José. ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIANTE EL EMPLEO DE FUNCIONES DE PEDOTRANSFERENCIA. *Agric. Téc.* [online]. 2001, vol.61, n.3, pp.326-338. ISSN 0365-2807. <http://dx.doi.org/10.4067/S0365-28072001000300008>.
6. Bouyoucos, G. J., & Mick, A. H. (1947). Improvements in the plaster of paris absorption block electrical resistance method for measuring soil moisture under field conditions. *Soil Science*, 63(6), 455-466.
7. Cornelis, W. M., Ronsyn, J., Van Meirvenne, M., & Hartmann, R. (2001). Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. *Soil Science Society of America Journal*, 65(3), 638-648.
8. Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., & Hussain, S. A. (2012). A review of the methods available for estimating soil moisture and its

- implications for water resource management. *Journal of Hydrology*, 458, 110-117.
9. Dourado-Neto, D., Nielsen, D. R., Hopmans, J. W., Reichardt, K., & Bacchi, O. O. S. (2000). Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). *Scientia agrícola*, 57(1), 191-192.
 10. Eduardo, D. J. J., Tijerina C., R. Acosta H. & A. López J. (2001) Producción de ciruelo con fertirriego en función de contenidos de humedad y coberturas orgánicas. *Terra* 19: 317-326.
 11. Gerwitz, A., & Page, E. R. (1974). An empirical mathematical model to describe plant root systems. *Journal of Applied Ecology*, 773-781.
 12. Hanson, B., Orloff, S., & Peters, D. (2000). Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. *California Agriculture*, 54(3), 38-42.
 13. Juan M. Enciso, Dana Porter, and Xavier Pérllès. Uso de sensores de humedad del suelo para eficientizar el riego. Extensión Cooperativa de Texas. Publicacion no. B-6194S.08/07 (http://repository.tamu.edu/bitstream/handle/1969.1/87470/pdf_2437.pdf?sequence=1)
 14. King, B.A., Reeder, R.E., Wall, R.W., Stark, J.C., 2002. Comparison of Site-Specific and Conventional Uniform Irrigation Management for Potatoes. ASAE Paper No. 02-2175, ASAE, St. Joseph, MI 49085.
 15. LOVEDAY, J. (1974) Methods for Analysis of Irrigated Soils. Technical Communication 54. Commonwealth Agricultural Bureaux Wilke and Company Limited, Clayton, Victoria, Australia.
 16. Marfà, O., Serrano, L., & Martinez, A. (1992). Uso de tensiómetros con transductor de presión en sustratos. *Actas de Horticultura*, 11, 87-90.
 17. Martin, E. C., & Munoz, C. (2000). Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego ¿ Cuándo? Boletín 01/17 Universidad de Arizona. Tucson AZ. <http://hdl.handle.net/10150/625275>

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

18. Martínez-Fernández, J. (1995). Medida de curvas de retención de humedad en laboratorio y su estimación. Avances en la investigación en la zona no saturada. Serv. Central Publ. del Gob. Vasco. Vitora-Gasteiz, 193-202
19. Miranda, F.R., R.E. Yoder, J.B. Wilkerson, L.O. Odhiambo (2005). An autonomous controller for sitespecific management of fixed irrigation systems. Computers and Electronics in Agriculture 48, 183-197.
20. Muñoz-Carpena, R., Shukla, S., & Morgan, K. (2004). Field devices for monitoring soil water content. University of Florida Cooperative Extension Service, Institute of Food and Agricultural Sciences, EDIS.
21. Organización Meteorológica Mundial, 1992: Snow Cover Measurements and Areal Assessment of Precipitation and Soil Moisture (B. Sevruk). Informe de hidrología operativo No. 35, OMM-No. 749, Ginebra.
22. Palacios, V. E. (2002). ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar?: para lograr mejores cosechas. Editorial Trillas. México, DF. 214 p.
23. Pérez García, N. (2008). Determinacion de curvas características en suelos no saturados con celdas de presión. Publicación técnica, (313) SCT Sanfandila Qro. Pp. 66
24. Richards, L. A. (1949). Methods of measuring soil moisture tension. Soil Science, 68(1), 95.
25. Salgado, H., Romay, C., Zabala, S. M., & Génova, L. (2012). Calibración de campo de un sensor dieléctrico para suelos en la Provincia de Buenos Aires. VI Jornadas Riego y Fertirriego, Mendoza, 7-9.
26. Schmugge, T. J., 1985: Remote sensing of soil moisture. In: Hydrological Forecasting (M. G. Anderson y T. P. Burt, eds.), John Wiley, Nueva York, págs. 10 1 - 1 24. 5. Klute, A. (ed.), 1986: Methods of Soil Analysis. Part I: Physical and mineralogical

- methods. Second edition, American Society of Agronomy and Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin.
27. Shock, C.C., J.M. Barnum, M. Seddigh (1998). Calibration of soil moisture sensors for irrigation management. Proceedings of the Irrigation Association's 19th Annual, 139-146, San Diego, CA.
 28. Thompson, R. B., Gallardo, M., Agüera, T., Valdez, L. C., & Fernández, M. D. (2006). Evaluation of the Watermark sensor for use with drip irrigated vegetable crops. *Irrigation Science*, 24(3), 185-202.
 29. Van der Paauw, F. (1971). An effective water extraction method for the determination of plant-available soil phosphorus. *Plant and Soil*, 34(1), 467-481.
 30. Veihmeyer, F. J., & Hendrickson, A. H. (1949). METHODS OF MEASURING FIELD CAPACITY AND PERMANENT WILTING PERCENTAGE OF SOILS. *Soil science*, 68(1), 75-94.

Capítulo 5. Metodología de ajuste del coeficiente de cultivo para programación de riego

Miguel Servín Palestina¹
Orlando Ramírez Valle²
Alfonso Domínguez Padilla³
Mario Primitivo Narváez Mendoza⁴

5.1.- Introducción

El agua es el elemento fundamental para el desarrollo de la actividad agrícola, la agricultura consume más del 70 por ciento del agua disponible a nivel mundial (WWAP, 2014). En México se utiliza el 77%, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego con eficiencias globales menores al 50% (Sánchez et al, 2006). En zonas áridas y semiáridas el riego es la única opción para la producción de alimentos (Ojeda et al 2006; Geerts y Raes, 2009). A pesar de su enorme importancia la mala distribución y la contaminación hacen que este recurso sea cada día más escaso y costoso (Castro et al, 2008). Esto se debe a que desconocen los

¹Campo Experimental Zacatecas, Carretera Zacatecas-Fresnillo km 24.5 Calera Zacatecas, México CP:98500 *servin.miguel@inifap.gob.mx.

²Campo Experimental Sierra de Chihuahua

³ Centro Regional de Estudios del Agua (CREA), Universidad de Castilla-La Mancha, Ctra. de Las Peñas, km 3.2, 02071 Albacete, España.

⁴Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. C.P. 20660.

requerimientos hídricos de los cultivos (McCarthy et al, 2013). La agricultura es considerada la mayor consumidora por el desperdicio de agua aún en sistemas de riego tecnificados (Servin et al, 2012) La tecnificación del riego debe atender la aplicación de técnicas y métodos racionales y cuantitativos para mejorar la programación, diseño y operación de los sistemas de riego. (Catalán et al, 2012). El uso de la computadora es una herramienta muy útil que ayuda a los agricultores a programar el riego (Martin, 2010). Varios programas de cómputo se han desarrollado para apoyar en esta tarea. CROPWAT (CROPWAT, 1993). DRiego Ver 1.0. (Catalán et al., 2007) Irrinet (Catalán et al, 2013) Sistema Irriga® (2014) y SEPOR ver 2.1 (2014) SIPRO-RIEGO (Servín et al 2017), estos programas de cómputo se basan en la aplicación del principio de conservación de la masa, también conocido como ecuación de continuidad (Martínez y Navarro, 1996; Fernández, 1996). Resuelven el balance de agua en el suelo, mediante la estimación previa de cada uno de sus componentes de pérdida y ganancias de agua es decir mediante un balance hídrico climático (BHC) (Thornthwaite and Mather, 1957), (Navarro y Picatoste, 1996) y (Botey et al, 2009) Con apoyo de datos climáticos de estaciones agrometeorológicas automatizadas (Smith, 1991), (Monteith y Unsworth, 1990) y (Campbell, 1977). El BHC se fundamenta no solo las características del suelo, sino también en la medición de todas las variables necesarias para el cálculo de la

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Evapotranspiración (ET_o) y de la precipitación efectiva (P_e). El modelo de Penman-Monteith (Allen et al, 2006) para el cálculo de ET_o muestra ventaja ante los otros modelos por que combina el balance de energía, factores aerodinámicos (temperatura, presión de vapor y velocidad del viento) y resistencia aerodinámica del cultivo (Jensen et al, 1990). La programación de los riegos de los cultivos normalmente se ejecuta sin soporte técnico y se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada (Catalán et al, 2007). El objetivo de este trabajo fue describir una metodología de ajuste de kc parámetro básico para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos mediante balance hídrico climático.

5.2.- Modelo de coeficiente de cultivo ajustado

5.2.1.- Relación Evapotranspiración - Rendimiento

Para el ajuste del coeficiente de cultivo es necesario diseñar un trabajo experimental donde el cultivo se someta de 3 a 5 niveles de recuperación de la demanda atmosférica tratado de explorar toda la función de respuesta del cultivo, por ejemplo 110, 100, 85, 65 y 50 % de la evapotranspiración potencial calculada por el método de Penman Monteith (Alle et al 2006), la cual puede ser obtenida diariamente de una

estación agroclimática automatizada ubicada dentro o cercana a la parcela experimental (ETo). La aplicación de agua de riego se realiza mediante riego con goteo (cintilla) y se coloca un medidor volumétrico sobre la cintilla del surco central en cada parcela para corroborar la lámina de riego aplicada.

Al inicio del experimento se debe realizar un muestreo gravimétrico para determinar el contenido de humedad residual (CHR), y así calcular la lámina de riego inicial (Palacios, 2002), para el establecimiento del experimento (Ec. 5.1), para los tratamientos 110 y 100 de ETo se llevan a capacidad de campo (100% de la humedad aprovechable). Los demás tratamientos (T) serán el 85, 65 y 50 % de la humedad aprovechable según corresponda a cada T a los primeros 60 cm del perfil del suelo.

Las láminas de establecimiento se aplicarán por pulsos de 20-30 mm. durante la primera semana después de la siembra hasta cubrir el porcentaje de humedad aprovechable para cada tratamiento. Posteriormente se establecerá un programa de riego en base a sumar dos veces por semana los datos diarios del ETo obtenidos de la estación agroclimática y se restó la precipitación efectiva (Pe) (Ec. 5.2); Para zonas áridas y semiáridas, Pp es efectiva si es mayor de 5 mm. y solo se considera únicamente el 75% (Serna et al 2011).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$LRE = (CC - CHR/100) * Da * Pr \quad \text{Ec. 5.1}$$

$$Lr_i = \sum_{i=1}^n ETo_{i-1} - \sum_{i=1}^n Pe_{i-1} \quad \text{Ec. 5.2}$$

Dónde: LRE = lámina de riego de establecimiento (cm); CC = capacidad de campo (%); CHR, contenido de humedad residual (%); Da = densidad aparente (g cm⁻³); Pr, Profundidad del perfil (cm), Lr_i = lamina de riego (mm); ETo = evapotranspiración diaria en (mm); Pe = precipitación efectiva diaria (mm); n= número de días entre riegos de 3 o 4 (riegos dos veces por semana).

Para determinar la lámina de riego neta (Lrn) se considera un 95% de eficiencia de aplicación para riego por goteo. Para el cálculo de tiempo de riego (Tr) expresada en horas, en necesario calcular la tasa horaria (TH) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm h⁻¹), En el sistema de riego por goteo con cintilla, TH se estima con base al gasto del emisor en litros por hora (Qe), al espaciamiento entre emisores en metros (Ee), y Espaciamiento entre líneas regantes en metros (ELr), (Ec. 5.3).

$$TH_{cinta} = \frac{Q_e}{E_e * ELr} \quad \text{Ec. 5.3}$$

El tiempo de riego en horas (Tr) es la relación que hay entre la lámina bruta de riego a aplicar entre la TH lo cual indica el número de horas que se regará.

Con la sumatoria de Lr_i de cada riego se determinó la lámina total (mm, R) y para corroborar el volumen total de agua en cada tratamiento se toman las lecturas de los medidores volumétricos. De igual manera es necesario determinar el rendimiento comercial del cultivo (Y), por ejemplo: grano, fruto o materia seca según corresponda ($kg\ ha^{-1}$, $t\ ha^{-1}$, Frutos ha^{-1}), y también se calcula la evapotranspiración real del cultivo (ETc) que es la suma de R y la precipitación efectiva de todo el ciclo (Pe_t).

De igual manera se calcula la eficiencia en el uso de agua $EUA = Y / R$ y la productividad del agua $PA = Y / ETc$ ambas representadas en $kg\ m^{-3}$ (Caviglia et al., 2004). En los sistemas agrícolas se define como la cosecha física o económica por unidad de agua consumida por el cultivo (en $kg\ m^{-3}$). Para determinarlas se utilizan las siguientes ecuaciones (Ec. 5.4 y Ec. 5.5):

$$EUA \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Y_{kg}}{R_{m^3}} \quad \text{Ec. 5.4}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$PA \left(\frac{kg}{m^3} \right) = \frac{Y_{kg}}{ETc_{M^3}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

Dónde: EUA es la eficiencia del uso de agua, PA es la productividad del agua, ETc es el agua aplicada en el riego más precipitación efectiva, Y_{kg} es el rendimiento en kilogramos y R_{M^3} es el agua total aplicada en metros cúbicos.

Para expresar la fracción de desarrollo de los cultivos en grados días de desarrollo es necesario cuantificar los días después de siembra de por lo menos cuatro etapas fenológicas: 1) de siembra a 10% de cobertura, 2) de 10% a cobertura completa, 3) de cobertura completa a senescencia y 4) de senescencia a madurez fisiológica, así como la temperatura máxima y temperatura mínima desde siembra hasta madurez fisiológica. También es importante conocer el umbral máximo y mínimo donde el cultivo se desarrolla.

5.2.2.- Análisis de datos experimentales

En el cuadro 5.1. se pueden observar los datos de un experimento de avena forrajera llevado a cabo en el ciclo otoño invierno en el campo experimental de Zacatecas donde se observan los resultados de láminas aplicadas, precipitación efectiva presentada en el ciclo, materia seca, eficiencia en el uso de agua y productividad del agua.

Cuadro 5.1. Rendimiento de materia seca, eficiencia y productividad de agua para el cultivo de avena en etapa de masoso-lechoso en Zacatecas México 2016.

Trat (% ETo)	R (mm)	Pe _t (mm)	ETc ¹ (mm)	MS (t ha ⁻¹)	EUA (kg m ⁻³)	PA (kg m ⁻³)
T50	383		422	10.13±0.4 c	2.64±0.12 a	2.40±0.11 a
T65	446		485	11.72±0.4 b	2.62±0.09 b	2.42±0.08 b
T85	551	39	590	12.78±0.2 a	2.32±0.05 b	2.17±0.04 b
T100	708		747	11.21±0.2 b	1.58±0.03 c	1.50±0.03 c
T110	757		796	10.39±0.2 c	1.37±0.03 c	1.31±0.03 c
CV*				3.05	3.52	3.46
MSE**				0.34	0.07	0.06

R - lamina de riego aplicada; Pe_t - precipitación efectiva total; ETc¹ - evapotranspiración real del cultivo; MS - rendimiento de materia seca; EUA - eficiencia en el uso de agua; PA- productividad de agua de riego; *Coeficiente de variación ** Error de cuadrados medios. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente según Tukey al 5%.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Con los datos observados se realiza una función de respuesta del cultivo a los diferentes niveles de humedad, que se obtiene al relacionar los datos observados (cuadro 5.1) del rendimiento de materia seca ($t\ ha^{-1}$; MS) y productividad de agua ($kg\ m^{-3}$; PA) como variables dependientes (eje de las ordenadas) y la evapotranspiración real del cultivo (mm ; ETc^1) como variable independiente (eje de las abscisas) (Figura 5.1).

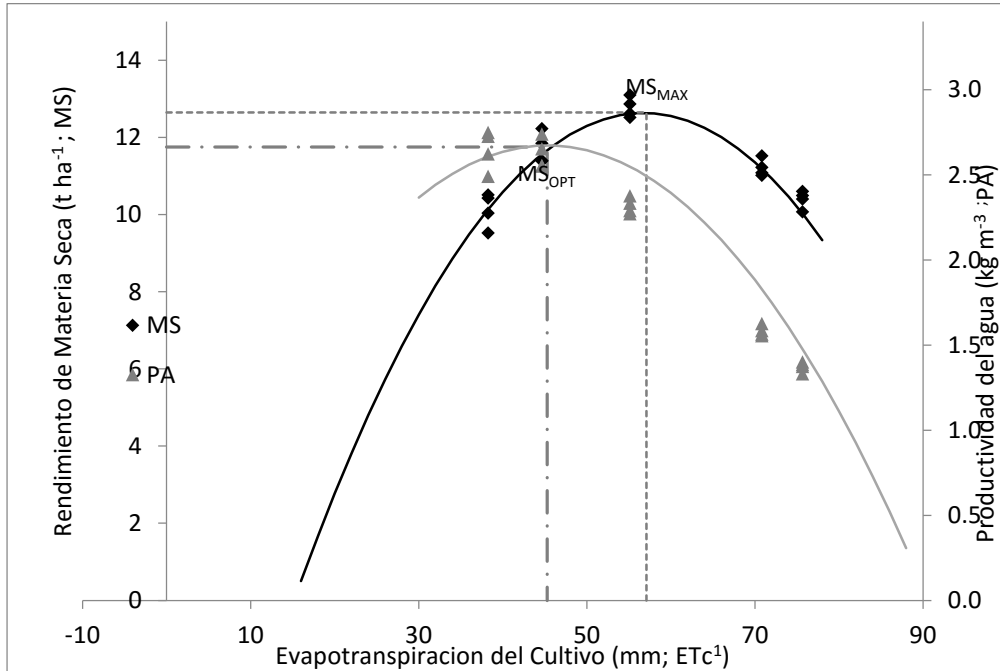


Figura 5.1.-Relacion de rendimiento de materia seca y productividad de agua del cultivo de avena para forraje en etapa de grano lechoso-masoso en Zacatecas, México.

También se agregan las líneas de tendencia de los datos, donde se muestra un punto máximo de rendimiento y un punto máximo de productividad, donde se intersectan ambas curvas se encuentra el punto óptimo donde se obtiene la máxima productividad del agua sin poner en riesgo el rendimiento.

Posteriormente se realiza una regresión en SAS con el procedimiento Stepwise, o el Excel, ajustándolos a un modelo cuadrático de segundo orden, de la forma:

$$MS = \beta_0 + \beta_1 ETc + \beta_2 ETc^2 \quad \text{Ec. 5.6}$$

$$PA = \beta_3 ETc + \beta_4 ETc^2 \quad \text{Ec. 5.7}$$

Dónde:

MS: Rendimiento de materia seca toneladas por hectárea ($t \text{ ha}^{-1}$);

ETc: evapotranspiración real del cultivo en mm;

β_0 : ordenada del origen;

β_1 y β_4 : coeficientes de la regresión.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La ecuación se resuelve por el método matricial, con las siguientes ecuaciones polinomiales ejemplo para rendimiento de materia seca:

$$P_n(x_0) = \beta_0 + \beta_1 ETc_0 + \beta_2 ETc_0^2 + \dots + \beta_n ETc_0^n = MS_0$$

$$P_n(x_1) = \beta_0 + \beta_1 ETc_1 + \beta_2 ETc_1^2 + \dots + \beta_n ETc_1^n = MS_1$$

$$P_n(x_2) = \beta_0 + \beta_1 ETc_2 + \beta_2 ETc_2^2 + \dots + \beta_n ETc_2^n = MS_2$$

$$P_n(x_n) = \beta_0 + \beta_1 ETc_n + \beta_2 ETc_n^2 + \dots + \beta_n ETc_n^n = MS_n$$

Y se establece que:

$$ETC = \begin{bmatrix} 1 & ETc_0 & ETc_0^2 & \dots & ETc_0^n \\ 1 & ETc_1 & ETc_1^2 & \dots & ETc_1^n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & ETc_n & ETc_n^2 & \dots & ETc_n^n \end{bmatrix} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} \quad MS = \begin{bmatrix} MS_0 \\ MS_1 \\ \vdots \\ MS_n \end{bmatrix}$$

Entonces se puede escribir:

$$Xa = [y] \quad y \quad a = [y] * [x]^{-1}$$

Dando como resultado: Ejemplo de avena forrajera con datos del cuadro 5.1.

$$\begin{aligned}
 MS &= -10.885 + 0.8287ET_c - 0.0073ET_c^2 \\
 R^2 &= 0.91 \quad CV = 3\% \\
 PA &= 0.0102ET_c - 0.000011ET_c^2 \\
 R^2 &= 0.97 \quad CV = 3\%
 \end{aligned}$$

Para obtener la evapotranspiración del cultivo que maximiza el rendimiento de materia seca, grano o fruto, llamada: Evapotranspiración del cultivo máxima (ET_{cmax}) y la evapotranspiración del cultivo que presenta el valor más alto de productividad de agua y rendimiento óptimo llamada: Evapotranspiración optima del cultivo (ET_{copt}), se realiza un análisis de optimización con la teoría de máximos y mínimos del cálculo diferencial e integral (Steel et al 1997). Dónde: El rendimiento máximo se obtiene la derivada del modelo para obtener la ET_{max} donde se consigue el máximo rendimiento de materia seca con la forma:

$$\frac{\partial_{ms}}{\partial_{ET_c}} = \beta_0 + \beta_1ET_c - \beta_2ET_c^2 \quad \text{Ec. 5.8}$$

$$\frac{\partial_{PA}}{\partial_{ET_c}} = \beta_3ET_c - \beta_4ET_c^2 \quad \text{Ec. 5.9}$$

Para obtener el valor máximo de ET_c donde se observa el rendimiento máximo el resultado de la derivada se iguala a "0";

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$\frac{\partial_{ms}}{\partial_{ETc}} = 0 \quad \text{Ec. 5.10}$$

$$\frac{\partial_{PA}}{\partial_{ETc}} = 0 \quad \text{Ec. 5.11}$$

Siguiendo con el ejemplo anterior: con los modelos de MS y PA el análisis de optimización permite deducir que la avena forrajera maximiza su producción a 12.78 t ha^{-1} (MSmax), cuando consume $ET_{cmax} = \mathbf{610.13 \text{ mm}}$. y el valor máximo de productividad del agua de 2.36 kg m^{-3} se alcanza cuando consume $ET_{Copt} = \mathbf{463.64 \text{ mm}}$ presentando un rendimiento óptimo de 11.22 t ha^{-1} (MS_{opt}), hasta los 155 DDS que abarca de la siembra hasta la etapa de grano lechoso-masoso.

Para la metodología del balance hídrico climático es necesario determinar el coeficiente de cultivo (Kc) y ajustarlo para cada zona o región. Este coeficiente adimensional es específico de cada cultivo y depende de su estado de desarrollo, por lo cual varía en el tiempo y expresa el grado de similitud entre la superficie vegetal del cultivo y la del cultivo de referencia. Sus valores se obtienen empíricamente a partir de datos experimentales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Annandale y Stockle, 1994).

5.2.3.- Modelo de coeficiente del cultivo de referencia

Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo reflejada en la cantidad de agua que la planta extrae del suelo desde la siembra hasta la cosecha. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. (Figura 5.2) Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de K_c : los correspondientes a la etapa inicial (K_{Cini}), la etapa de media temporada (K_{Cmed}) y la etapa final (K_{Cfin}).

Para que dicha curva esté bien definida son necesarios los valores del tiempo de desarrollo ya sea en días o como fracción del ciclo vegetativo en los puntos B, C, y D. Y la fecha de siembra y cosecha el punto A y E respectivamente, que en fracción de desarrollo se representa por 0 y 1. (Doorenbos and Pruitt. 1977).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

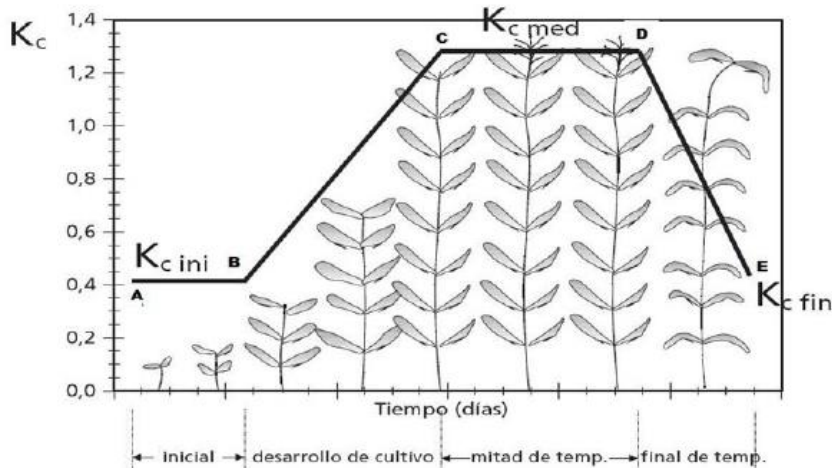


Figura 5.2. Curva generalizada del coeficiente de cultivo K_c . Fuente: (Doorenbos and Pruitt. 1977).

La Figura 5.2. Muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva K_c de un cultivo. Tres valores de K_c : $K_{c\text{ini}}$, $K_{c\text{med}}$ y $K_{c\text{fin}}$, así como la duración en días o como fracción del ciclo vegetativo total en los puntos B, C, y D. En el Cuadro 5.2 se presentan tales valores para varios cultivos, donde la duración del ciclo en los puntos B, C y D se expresan como fracciones acumuladas del ciclo vegetativo (Doorenbos and Pruitt. 1977).

Cuadro 5.2. K_c para diversos cultivos (FAO 1977).

Cultivo	Etapa	Punto	DDS	Fracción de ciclo vegetativo	Coeficientes del cultivo	
	10% Cobertura	B	32	0.2	$K_{c\text{ini}}$	0.60

Maíz (160 días)	Cobertura completa	C	75	0.47	$k_{C_{med}}$	1.05
	Senescencia	D	128	0.8	$K_{C_{fin}}$	0.45
Avena Forrajera (155 días)	10% Cobertura	B	42	0.27	$K_{C_{ini}}$	0.3
	Cobertura completa	C	82	0.53	$k_{C_{med}}$	1.15
	Senescencia	D	194	0.80	$K_{C_{fin}}$	0.61

Continuando con el ejemplo anterior de avena forrajera con los datos observados de 35, 40, 60 y 20 días para la etapa de: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada respectivamente, se obtuvo el desarrollo acumulado K_c donde: $B=0.27$, $C=0.53$ $D=0.80$ (A y B es 0 y 1 respectivamente) y valores de coeficiente de cultivo de: $K_{C_{ini}}=0.3$, $K_{C_{med}}=1.15$ y $K_{C_{fin}}=0.61$. Se generó la curva generalizada de k_c y se sometió a un análisis de regresión. Relacionando el coeficiente de cultivo (K_c) como variables dependientes (eje de las ordenadas) y la fracción de desarrollo acumulada (D) como variable independiente (eje de las abscisas) Figura 5.3. donde la línea continua muestra la curva de K_c para todas las etapas de desarrollo desde siembra hasta cosecha y los puntos representan una línea suavizada donde se obtienen 10 valores de K_c (eje de las y) y valores del porcentaje de desarrollo (eje de las x) para obtener el modelo del K_c .

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

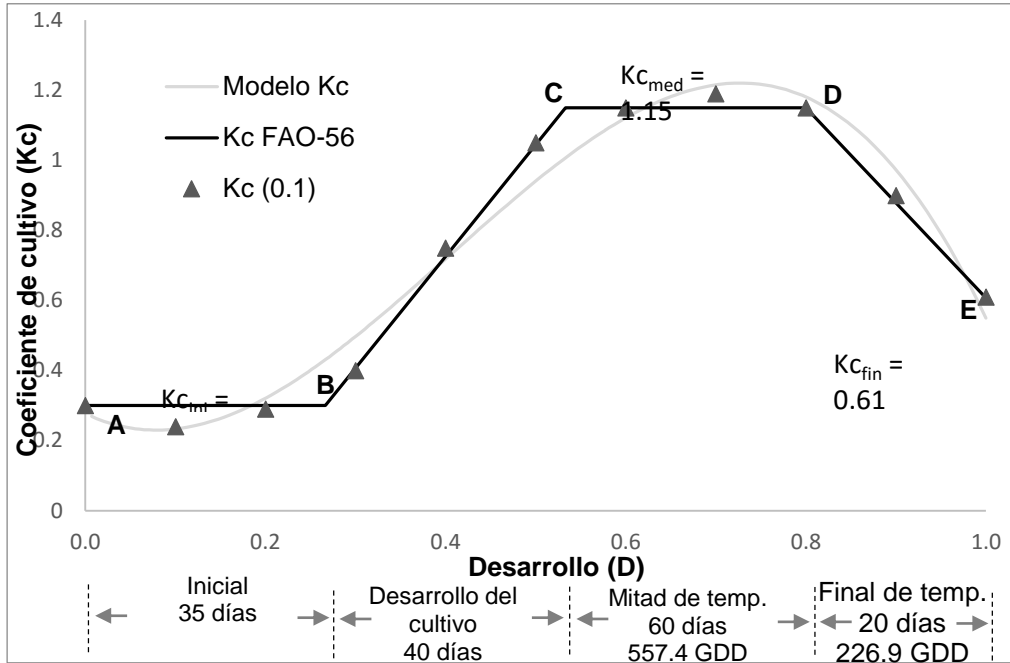


Figura 5.3. Curva generalizada de coeficiente de cultivo para avena de grano con datos obtenidos de manual 56 de la FAO, la línea punteada muestra el Kc final para producción de forraje en la etapa de masoso-lechoso.

Con estos diez puntos (X, Y) se realizó una regresión con el método de mínimos cuadrados para calcular la línea que más se ajusta a los datos y la describe matemáticamente (SAS, 2003). Los modelos obtenidos para algunos cultivos se muestran en el cuadro 5.3.

Cuadro 5.3. Modelos de kc con datos de (Doorenbos and Pruitt, 1977).

Cultivo	Modelo	Coefficiente
Maíz	$Kc = -4.1336D^3 + 4.2226D^2 - 0.1802D + 0.5390$	$R^2 = 0.9859$

Frijol	$Kc = -5.2797D^3 + 5.2809D^2 + 0.1387D + 0.3115$	$R^2 = 0.9707$
Chile	$Kc = -3.6169D^3 + 3.5478D^2 + 0.1115D + 0.5345$	$R^2 = 0.9768$
Ajo	$Kc = -0.5206D^3 - 0.7879D^2 + 1.4274D + 0.5934$	$R^2 = 0.9644$
Avena Forrajera	$Kc = -7.2552D^3 + 8.7745D^2 - 1.2462D + 0.2772$	$R^2 = 0.9754$

Para obtener el coeficiente del cultivo diario se utilizan los modelos generados de Kc (cuadro 5.3), dónde: Kc = coeficiente de cultivo de avena para grano (adimensional) y D = porcentaje de desarrollo del cultivo representando con valores de 0 a 1. Dicho valor se puede determinar por medio de ciclo de cultivo (días) o requerimiento térmico ($^{\circ}C$ o Grados días de desarrollo; GDD).

5.2.4.- Coeficiente del cultivo ajustado

Teniendo el Kc diario, se multiplica por la evapotranspiración potencial calculada por el método de Penman Monteith (Allen et al 2006), registrada diariamente de una estación agroclimática automatizada, cercana a la parcela experimental (ET_o), y se obtiene la evapotranspiración diaria del cultivo calculada (ET_{c_i}). Finalmente se realiza una sumatoria para obtener la evapotranspiración del cultivo calculada ($\sum ET_c$).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Continuando con el ejemplo de avena forrajera la sumatoria de evapotranspiración del cultivo calculada fue de $\sum ET_c = 520.02$ mm. la cual será la celda objetivo para el análisis.

Con los valores de $ET_{C_{max}}$ y $ET_{C_{opt}}$ obtenidos del análisis de optimización (Sección 5.2.2) se procesan en “SOLVER”, una herramienta complementaria de Excel, que optimiza numéricamente los modelos sujetos a restricciones y emplea una técnica llamada algoritmo matemático de programación, con la cual encuentra las decisiones óptimas para un modelo determinado en una hoja de cálculo (Eppen et al 2000). Consiste en cambiar los valores positivos del modelo de $K_c(f)$ [β_0 y β_2] (Sección 5.2.3) por medio de interacciones mediante la metodología de gradiente reducido generalizado (Muramatsu y Risk; 2011) hasta que $ET_{C_{max}} = \sum ET_c$ y el mismo análisis para $ET_{C_{opt}} = \sum ET_c$ y obteniendo un modelo de coeficiente de cultivo que maximiza el rendimiento ($K_{C_{max}}$) y un modelo de coeficiente de cultivo que optimiza el rendimiento ($K_{C_{opt}}$) (Figura 5.4).

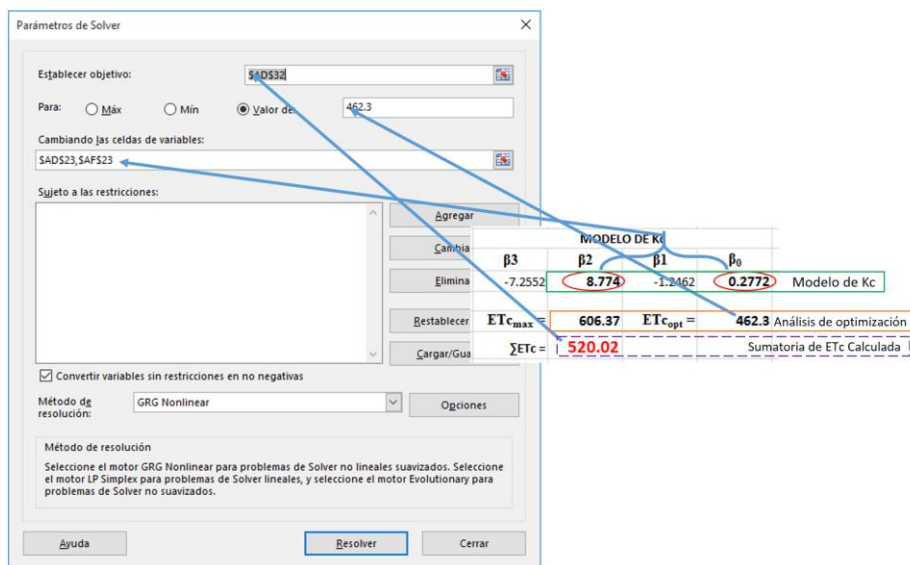


Figura 5.4.- Herramienta solver ajuste de modelo de Kc

Para el ejemplo que se ha estado describiendo, el modelo de Kc para avena forrajera al someter el análisis en “SOLVER” por medio de interacciones y cambiar los valores positivos de modelo Kc, $\beta_0=0.2772$ y $\beta_2=8.7745$, hasta $ETC_{max} = \sum ETC$ y $ETC_{opt} = \sum ETC$ se obtuvieron los modelos que se muestran en la figura 5.6, donde: Kc_{max} = coeficiente de cultivo que maximiza el rendimiento (adim); Kc_{opt} = coeficiente de cultivo que optimiza el rendimiento (adim) y D= porcentaje de desarrollo representado en tanto por 1 en función de fracción del ciclo vegetativo o grados días de desarrollo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Paso 1.- Evapotranspiración del cultivo máxima y optima con datos observados

Generación de modelos:

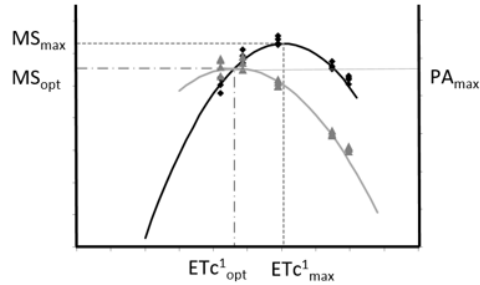
$$MS = \beta_0 + \beta_1 ETC + \beta_2 ETC^2$$

$$PA = \beta_3 ETC + \beta_4 ETC^2$$

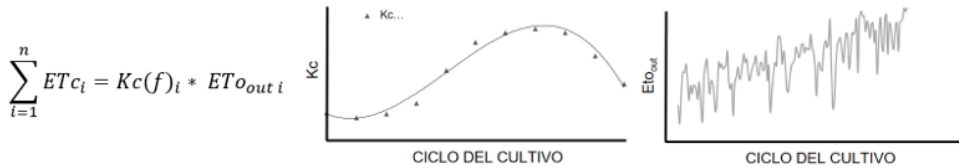
Análisis de optimización:

$$\frac{\partial MS}{\partial ETC} = \beta_0 + \beta_1 ETC + \beta_2 ETC^2$$

$$\frac{\partial PA}{\partial ETC} = \beta_3 ETC + \beta_4 ETC^2$$



Paso 2.- Evapotranspiración del cultivo calculada:



Paso 3.- Modelo de coeficiente de cultivo de referencia:

$$Kc(f) = \beta_0 - \beta_1 D + \beta_2 D^2 - \beta_3 D^3$$

Paso 4.- Igualar Evapotranspiración del cultivo calculada con la de datos observados:

Herramienta Solver	$\sum_{i=1}^n ETC_i = Etc_{opt}^1$	$Kc(f) = \beta_0 - \beta_1 D + \beta_2 D^2 - \beta_3 D^3$
	Objetivo	Variables

Resultado del análisis solver: Nuevo modelo de Kc para calcular ETC_i

$$Kc_{opt} = \beta'_0 - \beta_1 D + \beta'_2 D^2 - \beta_3 D^3$$

Figura 5.5.- Diagrama de flujo para obtención de modelos de coeficiente de cultivo con datos observados y herramienta solver, considerando un modelo de coeficiente de cultivo de referencia.

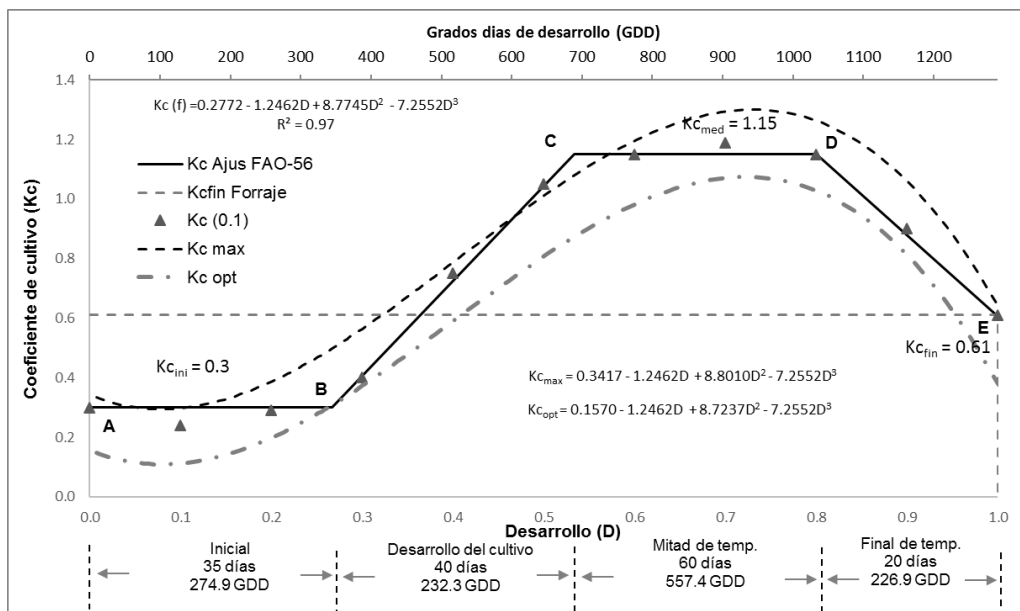


Figura 5.6.- Curva generalizada de coeficiente de cultivo de avena para forraje en la etapa de grano lechoso-masoso. Zacatecas, México. Línea negra representa los valores de Kc (Fuente: FAO-56), mientras que las líneas punteadas son el resultado de análisis de optimización de Kc max y Kc opt.

5.3.- Grados días de desarrollo

Para expresar la fracción de desarrollo del cultivo en grados días de desarrollo (GDD), es necesario cuantificar los días después de siembra (DDS) para las etapas de: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada y se calcularon los GDD con la metodología curva seno modificada, citada por Villa et al (2007), de igual manera es necesario conocer el umbral superior y el umbral inferior de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

temperatura en las cuales se desarrolla cada uno de los cultivos (Cuadro 5.4).

Cuadro 5.4.- Umbrales donde se desarrollan algunos cultivos

Cultivo	Umbral Máximo (°C)	Umbral Mínimo (°C)
Maíz	5	30
Avena	5	30

5.3.1.- Calculo de grados días de desarrollo (GDD)

El ciclo biológico de muchos organismos depende estrechamente de la temperatura. Este hecho llevó al establecimiento del concepto de grados días, que ha sido utilizado con éxito en la predicción del desarrollo de diferentes organismos. El concepto de unidades calor o GDD, fue determinado para expresar matemáticamente la acumulación de temperatura arriba de una temperatura crítica de un organismo dado, lo cual se traduce en desarrollo; es decir todos los organismos tienen una temperatura crítica debajo de la cual no se presenta ninguna actividad biológica de desarrollo, o se produce la muerte de los organismos. De esta forma la edad o desarrollo de algunos organismos está en función de la temperatura acumulada arriba de su temperatura crítica de desarrollo (Neuheimer, & Taggart 2007).

Un grado-día es una unidad que combina el tiempo y la temperatura para estimar el desarrollo de un organismo a partir de un punto a otro en su ciclo de vida. También conocidas como unidades de calor, grados días son el producto acumulado de tiempo y temperatura entre los umbrales de desarrollo del cultivo para cada día.

5.3.2.- Metodología del Seno Simple

Este método trigonométrico ajusta algunas funciones seno a las temperaturas máximas y mínimas diarias. Mediante esta metodología se han corregido errores encontrados en otros métodos utilizando umbrales máximos y mínimos. Las temperaturas máximas y mínimas son variables importantes, ya que éstas controlan la velocidad de desarrollo de muchos organismos como las plantas y los animales invertebrados que requieren una cierta cantidad de calor para el desarrollo de su ciclo de vida. Por otro lado, los umbrales de desarrollo inferior y superior se han determinado para algunos organismos a través de experimentos de laboratorio cuidadosamente controlados en campo. Los umbrales varían según el organismo del que se trate; el umbral inferior de desarrollo es la temperatura por debajo de la cual el desarrollo del cultivo se detiene y el umbral de desarrollo superior es la temperatura sobre la cual la tasa de crecimiento o de desarrollo comienza a disminuir o detener.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

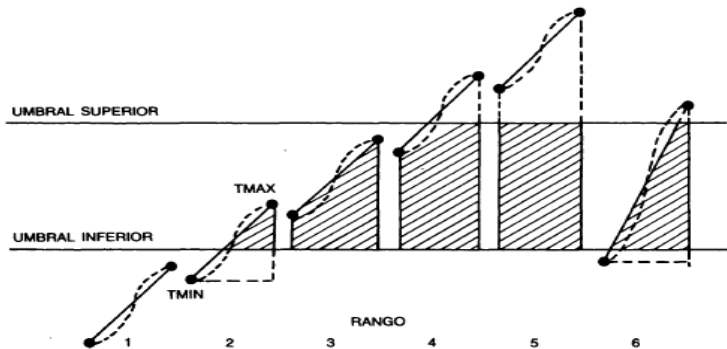


Figura 5.7.- Rangos de temperaturas en relación con los umbrales superior e inferior. Las áreas sombreadas representan los grados-días. (Gonzales y Hernandez., 1990)

Algoritmos para el cálculo de los GDD por el método de triangulación y la función seno de desarrollado por Gonzales y Hernandez., (1990) para un programa en Basic.

$$\begin{aligned} A &= TMAX - M \\ B &= T - M \\ Y &= B/A \\ Z3 &= ABS(1.0001 - Y2) \\ Z2 &= SQR(Z3) \\ Z1 &= Y/Z2 \\ Z &= ATN(Z1) \\ D &= (A * COS(Z) - b * ((M/2) - Z)) / PI \end{aligned}$$

ABREVIATURAS UTILIZADAS

TMIN: Temperatura Mínima diaria.
TMAX: Temperatura Máxima diaria.
L: Umbral inferior de temperatura.
H: Umbral superior de temperatura.
U: Unidades de Grados días.
M: Temperatura Media diaria.
A: Amplitud de la función seno.
B, D, DI, T, Z: Variables temporales.
ATN: Arcotangente.
PI: 3,14159.
GD: Grados días.

Para el ejemplo de avena forrajera con los datos diarios de Tmax y Tmin de la estación agroclimática cercana al experimento se calcularon los grados días de desarrollo diarios y se obtuvieron los siguientes valores acumulados para cada etapa: AB=274.9, BC=232.3, CD=557.4 y DE=226.9 para las etapas de: inicio, desarrollo del cultivo, mitad de temporada y final de temporada respectivamente dando un total de 1,291.5 GDD durante los 155 días del establecimiento del cultivo, que al hacer divididos por los grados diarios acumulados de siembra hasta cosecha de forraje nos da como resultado el porcentaje de desarrollo de 0 a 1.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

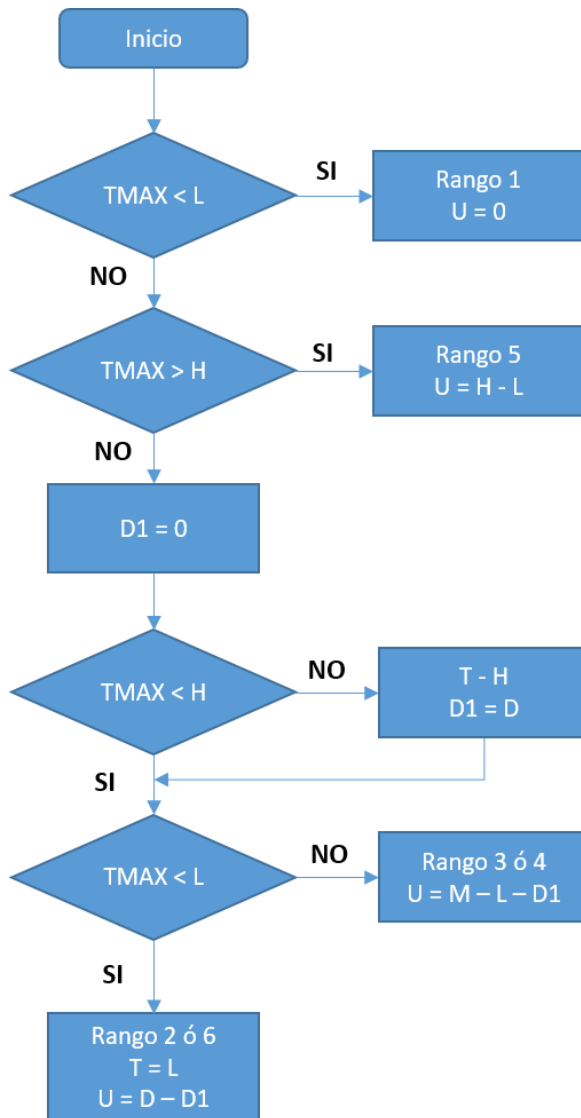


Figura 5.8.- Organigrama para el cálculo de grados-días por los métodos de triangulación y función seno. (Gonzales y Hernandez., 1990)

Posteriormente se calcula el K_{cmax} y K_{copt} diario y se multiplica por ET_o registrada diariamente en la estación agroclimática, y se obtiene la evapotranspiración diaria del cultivo calculada ET_{cmax} y ET_{copt} . que al relacionarlas con el porcentaje de desarrollo (de 0-1) obtenido con los grados días de desarrollo y se obtienen los modelos máximos y óptimos de uso consuntivo para producción de forraje de avena en clima árido templado con enfoque de planeación, para la programación de tiempo real es necesario hacer un balance hídrico climático.

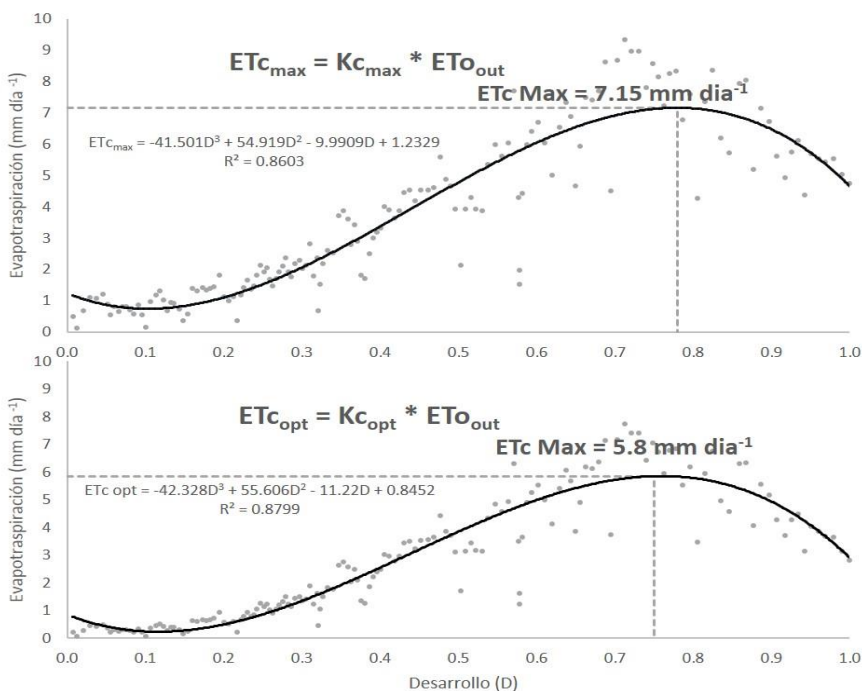


Figura 5.9.- Evapotranspiración diaria del cultivo cuando maximiza su rendimiento y cuando el cultivo optimiza su rendimiento.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

5.4.- Método de balance hídrico climático

Para un volumen dado de suelo durante un cierto periodo de tiempo, la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua perdida (Castro, 2005 y Torres et al, 1996), es igual a la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) en dicho volumen de suelo y puede expresarse como:

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \Delta\theta \qquad \text{Ec. 5.12}$$

Donde *Entradas* es el volumen de agua que entra al suelo y *Salidas* el que sale. Cuando las entradas exceden las salidas, la variación de contenido de humedad es positiva y en caso contrario, negativa.

Las ganancias o **entradas** de agua más importantes son la precipitación efectiva (P_e) (incluidas condensaciones por rocío o encharcamiento) y el riego (R).

$$\text{Entradas} = P_e + R \qquad \text{Ec. 5.13}$$

Según la ecuación del balance de agua en el suelo el contenido de agua del suelo en un día particular, θ_i , se estima con base en el contenido de agua del día previo, θ_{i-1} , tal como se muestra en la siguiente ecuación (Silva, 2001)

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_{e_i} - ET_{c_i} - D_i \quad \text{Ec. 5.14}$$

Dónde:

θ_i	Contenido de agua del suelo en un día particular	(mm día ⁻¹)
θ_{i-1}	Contenido de agua del día previo	(mm día ⁻¹)
R_i	Riego del día particular	(mm día ⁻¹)
P_i	Precipitación efectiva del día particular	(mm día ⁻¹)
ET_i	Evapotranspiración del cultivo del día particular	(mm día ⁻¹)
D_i	Drenaje de un día particular se considera "0"	(mm día ⁻¹)

Para iniciar con el balance hídrico se requirió determinar el inicio del periodo de riego (fecha de siembra) y llevar a capacidad de campo, es decir, llevar la humedad aprovechable (HA) al 100% (Ec. 5.15) donde los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} en cm³/cm³ se consultan en función de la textura del suelo (Cuadro 5.5) y Pr es la profundidad de exploración de las raíces en cm.

Humedad Aprovechable: Es la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) (entre -0.1 y -0.3 bars) y punto de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

marchitez permanente (θ_{PMP}) (-15 bars) se le conoce como humedad aprovechable (HA) (Allen et al., 1998). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua (Israelsen y Hansen, 1965, Withers y Vipond, 1982):

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP})Pr \quad \text{Ec. 5.15}$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en mm^3 de agua por mm^3 de suelo, HA y Pr en mm. El Cuadro 5.5 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} Saxton *et al.* (1986) y HA para cada tipo de textura y a 600 mm de profundidad del suelo, como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa.

Cuadro 5.5.- Constantes de humedad por tipo de suelo.

TEXTURA	θ_s	θ_{CC}	θ_{PMP}	HA (mm)
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	42.78
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	50.04
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	46.92
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	81.60
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	57.12
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	82.62
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	102.42
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	107.70
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	54.84
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	97.02
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	73.92

Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	131.52
--------	--------	--------	--------	--------

Capacidad de campo: La capacidad de campo (θ_{cc}) de un suelo es usualmente descrita como el contenido de agua después que el drenaje de agua por flujo gravitacional es tan pequeño que llega a ser relativamente estable. Esta situación generalmente ocurre algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por lluvia o riego.

La capacidad de campo se determina simplemente vertiendo agua en la superficie del suelo y dejándola drenar por unos cuatro a 10 días (dependiendo del tipo de suelo), previniendo la evaporación de la superficie. Las muestras de suelo son luego recolectadas con barrena para su medición gravimétrica y el contenido de agua es expresado en bases volumétricas. Determinado de esta manera, el valor de capacidad de campo es reproducible si se tiene en cuenta no muestrear en zonas de transición. Debido a que la capacidad de campo es afectada por la estructura del suelo, las determinaciones de laboratorio no son siempre indicadores confiables del valor de campo.

Punto de marchitamiento permanente: El punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) es el contenido de agua del suelo que ocurre cuando la planta se marchita y no recupera su turgencia por más que se riegue.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Briggs y Shantz (1912) enfatizaron primero la importancia de esta constante de agua en el suelo, denominándola como coeficiente de marchitez. Ellos efectuaron mediciones en varios tipos de plantas y encontraron que todas se marchitaron en alrededor del mismo contenido de agua del suelo. Richards y Wadleigh (1952) encontraron que la mayoría de las plantas cultivadas tienen potenciales osmóticos en el rango de -14 a -18 bares, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua en -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente.

Llevar el suelo a capacidad de campo será el punto de partida para iniciar el BHC que posteriormente se acumula continuamente la pérdida de agua por Evapotranspiración del cultivo (ET_c) del día anterior, y se va restando la cantidad de precipitación efectiva (P_e) y de riego (R). Cuando la ET_c acumulada es igual o mayor al punto crítico (θ_c) (Ec. 5.16) se debe regar y regresar al suelo la cantidad de agua que previamente se perdió debido a la evapotranspiración. Entonces la cantidad de agua, lámina neta (L_n) a regar estará en función de la Ec. 5.18.

Abatimiento de humedad aprovechable como criterio de riego: La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico (θ_c) que determina el grado de

estrés hídrico máximo al que se somete el cultivo. Por lo regular, este valor se estima en la escala de la humedad aprovechable, donde θ_{PMP} y θ_{CC} representan el cero y 100 por ciento de HA respectivamente (Figura 5.10). Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad \text{Ec. 5.16}$$

Donde FAM es la fracción de abatimiento máximo es decir la cantidad de agua que sale del sistema antes de aplicar el siguiente riego.

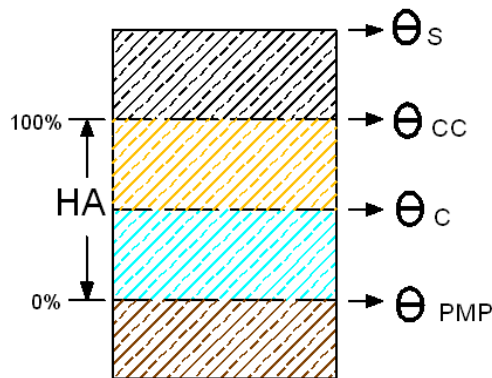


Figura 5.10.-. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.

$$Ln = (\theta_{cc} - \theta_c) Pr \quad \text{Ec. 5.17}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Para estimar la Evapotranspiración del cultivo (ET_c) (Ecu 5.18), se utiliza el K_c diario obtenido del modelo de $K_{c_{opt}}$ (Sección 5.2.4), específico de cada cultivo (Cuadro 5.3). K_s es un coeficiente adimensional por efecto del agua residual almacenada en el suelo, por ser una zona de riego y se prevé que la plantas no se someta a estrés hídrico su valor es la unidad.

$$ET_c = K_s * K_c * ET_o \quad \text{Ec. 5.18}$$

Para obtener la ET_o se consulta de la base de datos climatológicos de la estación agrometeorológica, cercana a la parcela. O calcularla diariamente de acuerdo con el modelo de Penman-Monteith (Allen et al, 2006).

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ET_o , se deriva de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial, obteniéndose:

$$ET_o = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. 5.19}$$

Dónde:

ET_o	Evapotranspiración de referencia	(mm día ⁻¹)
R_n	Radiación neta en la superficie del cultivo	(MJ m ⁻² día ⁻¹)
G	Flujo del calor de suelo	(MJ m ⁻² día ⁻¹)
T	Temperatura media del aire a 2 m. de altura	(°C)
u_2	Velocidad del viento a 2 m de altura	(m s ⁻¹)
e_s	Presión de vapor de saturación	(kPa)
e_a	Presión real de vapor	(kPa)
$(e_s - e_a)$	Déficit de presión de vapor	(kPa)
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor	(kPa °C ⁻¹)
γ	Constante psicrométrica	(kPa °C ⁻¹)

Por su parte la precipitación efectiva (Pe) se resta de la ET_c , la cual es calculada en base a la Ec. 5.20 (Serna et al, 2011)

$$\begin{array}{ll}
 Pe = Pp * 0.75 & \text{Sí } Pp > 5\text{mm} \\
 Pe = 0 & \text{Sí } Pp < 5\text{mm}
 \end{array}
 \qquad \text{Ec. 5.20}$$

Para definir la lámina de riego bruta (L_b) expresada en mm. Que se va a aplicar con el sistema de riego la lámina neta (L_n) se divide entre la eficiencia de aplicación (E_a) (Ec. 5.21).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} \quad \text{Ec. 5.21}$$

Dónde: Ea es la eficiencia de aplicación (%) que es la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y el agua almacenada en zona de raíces considerando un rango de 0.85 a 0.95 para riego por goteo y 0.45 a 0.65 para riego por multicompuertas.

Para el cálculo de tiempo de riego (Tr) expresada en horas, en necesario calcular la tasa horaria (TH) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm h^{-1}), En el sistema de riego por goteo con cintilla, TH se estima con base en el gasto del emisor en litros por hora (Qe), espaciamiento entre emisores en metros (Ee), y espaciamiento entre líneas regantes en metros (ELr), (Ec. 5.3.). Para riego por multicompuerta se toma en cuenta el gasto de entrada a la sección de riego en litros por segundo ($Qsec$) y la superficie que se desea regar en hectáreas (S_{ha}). (Ec. 5.22).

$$TH_{multi} = \frac{Q_{sec} * 3.6}{S_{ha}} \quad \text{Ec. 5.22}$$

El tiempo de riego en horas (Tr) es la relación que hay entre la lámina bruta de riego a aplicar entre la TH lo cual indica el número de horas que se regará (Ec 5.23).

$$Tr = \frac{Lb}{TH} \quad \text{Ec. 5.23}$$

Al regar se lleva al θ_c al 100% de HA, y se reinicia el cálculo hasta que la humedad actual en el suelo sea mayor o igual al punto crítico (Ec. 5.16) y se vuelve a regar así hasta el final del ciclo del cultivo obtenido un balance de agua en el suelo a través del tiempo. En la figura 5.11. Se observan dos ejemplos con diferentes cultivos, sistema de riego y manejo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

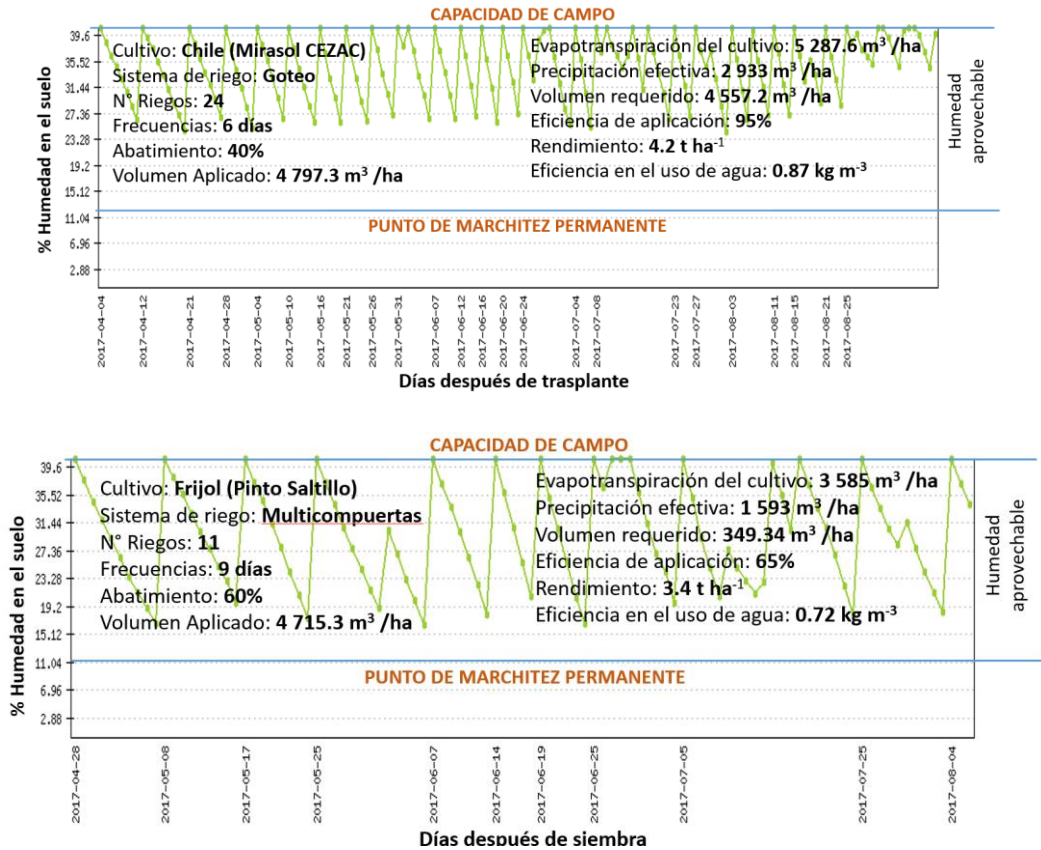


Figura 5.11.-. Calendarios de riego para cultivo de chile y frijol mediante balance hídrico climático.

5.5. Bibliografía

1. Allen R. G., Pereira L. S., Raes. D. y Smith M.. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje. Vol. 56. FAO. Roma. 2006. PP. 323.
2. Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage.Paper 56.
3. Annandale, J.G., and C.O. Stockle. 1994. Fluctuation of crop evapotraspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis. Irrig. Sci. 15:1-7.
4. Botey, R; J.V. Moreno y J. Pérez. 2009. Monitorización de la humedad del suelo en tres observatorios meteorológicos (campaña 2007-2008) 102 pág. AEMET, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
5. Briggs L.J. and H.L. Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
6. Campbell, G. S. (1977). An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Verlag, N. Y. 159 p.
7. Castro, O. 2005. El balance hídrico, herramienta para la planificación del riego en caña de azúcar. En: Memoria de presentación de resultados de investigación zafra 2004-2005. Guatemala. CENGICANA. 185p.
8. Catalán V., E.A.; Sánchez C., I.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A. y Mendoza M., S.F. 2007. Programa para calcular demandas de agua calendarizar el riego de los cultivos. Folleto técnico 7. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio, Durango.
9. Catalán V., E.A.; Villa C., M.M.; Inzunza I., Román L., A. M.A., González B., J.L y Delgado R. G. 2013 IRRINET: Sistema en línea para el pronóstico del riego en tiempo real en Coahuila AGROFAZ: 13: 59-68.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

10. Catalán V., E.A.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A.; Román L., A. y González B., J.L. 2012. Cálculo de demandas de agua y programación del riego de cultivos en Coahuila. AGROFAZ: 12: 123-131.
11. Caviglia, OP, Andrade FH. Sustainable intensification of agriculture in the Argentinean pampas: Capture and use efficiency of environmental resources. Am. J. Plant Sci. Biotechnol 2010; 3: 1-8.
12. CROPWAT, 1993. Programa de ordenador para planificar y manejar el riego. Servicio de fomento y ordenación de recursos hídricos. FAO, Roma.
13. Doorenbos J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.
14. Eppen GD, Gould FJ, Schmidt CP, Moore, JH Weatherford LR. Investigación de operaciones en las ciencias administrativas. Trad. Español. González, R. A. C. y Sánchez, G. G. 5th (Ed.). Pearson, México, D. F. 2000:72 p.
15. Fernández, G. F. (1996). Manual de Climatología Aplicada. Madrid. Síntesis. 285 p (Serie Mayor, 2)
16. Geerts S., Raes. D., 2009. Deficit irrigation as an on-farm strategy to maximize crop water productivity in dry areas. Agric. Water Manage. 96 (9), 1275-1284
17. González, J. L.; Hernández, J. M., 1990: Programa en BASIC para el cálculo de grados días. Bol. San. Veg. Plagas, 16: 159-164.
18. Israelsen O., W., y V.E. Hansen. 1965. Principios y aplicaciones del riego. Seg. Ed. Editorial Reverte, Barcelona, España. 385pp.
19. Jensen M. E., Burman R., D. and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p.

20. Martin E. C. 2010 Métodos para Medir la Humedad del Suelo para la Programación del Riego, College of Agriculture and Life Sciences of The University of Arizona. Arizona USA Septiembre.Pp 8.
21. Martínez A. y Navarro, J. (1996). Hidrología Forestal; El ciclo hidrológico. Valladolid Secretariado de Publicaciones, Universidad de Valladolid. p.286.
22. McCarthy. A.C., Hancock. N.H., Raine., 2013 Advanced process control of irrigation: the current state and an analysis to aid future development Irrigation Sci., 1-10
23. Monteith, J. L. & M. H. Unsworth (1990). Principles of Environmental Physics, 2nd Ed. Edward Arnold, London, UK.
24. Muramatsu M. Risk solver. Versión 11.5. Incline Village, Nevada, EUA: Frontline systems Inc.; 2011.
25. Navarro, J.A. y J.R. Picatoste. 1998. Metodología para estimar de forma operativa la humedad del suelo mediante un Balance Hídrico. Calendario Meteorológico 1998. INM.
26. Neuheimer, A. B., & Taggart, C. T. (2007). The growing degree-day and fish size-at-age: the overlooked metric. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 64(2), 375-385.
27. Ojeda-Bustamante, W.; Sifuentes Ibarra, E.; Unland H. 2006. Programación integral del riego en maíz. Agrociencia 40: 13-25.:
28. Palacios VE. ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar?: para lograr mejores cosechas. México, DF Editorial Trillas 2002: 214 p.
29. Richards, L.A. and C.H. Wadleigh. 1952. Soil physical conditions and plant growth. Ed. Am. Soc. Agron. Monograph.
30. Sánchez C., I.; Catalán V., E.A.; and Villa C., M.M. 2006. Evapotranspiration modeling for irrigation purposes. Chapter book. In. Modeling and Remote Sensing Applied to Agriculture. pp. 71 – 89. USA – Mexico. USDA ARS – INIFAP.
31. SAS. User Guide. Statistical Analysis System. Inc. Cary, NC. versión 9.3. 2003.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

32. Saxton K., E.; Rawls W., J.; Romberger J., S. and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50: 1031-1036.
33. Serna PA, Zegbe JA, Mena CJ. Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. *Revista Chapingo Serie Horticultura* 2011; 17 (SPE 1): 19-24.
34. Servín PM., Tijerina CL., Medina GG., Palacios VO., Flores MH. 2017 Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en tiempo real. Vol.8 Núm.2 15 de febrero - 31 de marzo, 2017 p. 423-430
35. Servín, P. M., Medina, G. G. Casas I.F., Catalán E.V. 2012, Sistema en línea para programación de riego de chile y frijol en Zacatecas. Folleto Técnico No. 42. Campo Experimental Zacatecas. CIRNOC-INIFAP. 42p.
36. Silva, V. M. A. 2001. Meteorología e climatología. Brasilia: INMET, Gráfica y Editora Pax. 532 p.
37. Smith, M. (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
38. Steel RG, Torrie JH, Dickey DA. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Third edition. The McGraw-Hill Companies, Inc 1997
39. Thornthwaite, C. W and Matter, J.R. 1957. Instructions and tables for computing potential vapotranspiration and the water balance. Drexel Institute of Technology. *Climatology*. 10(3):185-311.
40. Torres, J; Cruz R.; Villegas, F. 1996. Avances técnicos para la programación y manejo del riego en caña de azúcar. Colombia. CENICAÑA. 53p.

41. Villa CM, Catalán VE, Román LA, Inzunza IMA, Mendoza M, Duarte J, Báez A, Gómez L. Parámetros fisiotécnicos y requerimientos agroclimáticos de la canola (*Brassica napus* L.). *Agrofaz* 2007; 9:13-19.
42. Withers B., and Vipond S., 1982. *El riego, diseño y práctica*. Tercera reimpresión. Ed. Diana. México, D.F. 350pp.
43. WWAP (2014) *Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos –UNESCO*

Capítulo 6

Pronóstico del riego en maíz (*Zea mays*, L.) con un modelo integral basado en el concepto grados día (°D)

Hilario Flores-Gallardo^{1*}
Humberto Lagos-Gómez²
Saúl Santana-Espinoza¹
Mario Primitivo Narváez-Mendoza³
Isidro Reyes-Juárez⁴

6.1- Introducción

La disponibilidad de agua en las zonas áridas y semiáridas de México, es altamente crítica (Flores-Gallardo et al., 2014), ya que en ellas se produce la mayor cantidad de alimentos durante los ciclos agrícolas primavera-verano (PV), otoño-invierno (OI) y perennes (P), los cuales requieren de la suplementación a través del riego para asegurar rendimientos comercialmente viables. A nivel nacional, se cultivan alrededor de 6.5 millones de hectáreas (ha) bajo riego, las cuales están

¹ Campo Experimental Valle del Guadiana. Carretera Durango – El Mezquital km 4.5, Durango, México. C.P. 34170.

flores.hilario@inifap.gob.mx

² Sitio Experimental La Campana. Carretera Chihuahua-Ojinaga km 33.3, Aldama, Chihuahua, México. C.P. 32910.

³ Campo Experimental Pabellón. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. C.P. 20660.

⁴ Campo Experimental La Laguna. Blvd. José Santos Valdez No. 1200 Pte. Col. Centro, Matamoros, Coahuila, México. C.P. 27440.

distribuidas en 86 distritos de riego (3.3 millones de ha, 51 %) y 40,407 unidades de riego (3.2 millones de ha, 49 %) con diferente grado de tecnificación (CONAGUA, 2016). Sin embargo, del total de la superficie registrada para producir bajo la modalidad de riego, se presentan 1.3 millones de ha tecnificadas con sistemas de riego por multicompuertas, aspersión y goteo; contrastando las 5.2 millones de ha restantes donde el agua se aplica mediante el sistema de riego por gravedad (superficial), por lo cual es necesario e importante un manejo adecuado del riego a nivel parcelario mediante un seguimiento constante que permita realizar evaluaciones sobre la eficiencia y distribución del agua para mejorar su aplicación (Flores-Gallardo et al., 2012).

En el estado de Chihuahua, se siembran en promedio 898 mil ha con cultivos anuales (OI y PV, entre riego y temporal) y 165 mil ha con cultivos perennes (SIAP, 2016). De acuerdo con las estadísticas agrícolas de los distritos de riego (CONAGUA, 2015), la superficie total sembrada bajo riego (90,014 ha) se encuentra distribuida de la siguiente manera entre los distritos de riego de la entidad: DR-005 “Delicias” (54,096 ha), DR-009 “Valle de Juárez” (9,780 ha), DR-042 “Buenaventura” (3,924 ha), DR-089 “El Carmen” (10,507 ha), DR-090 “Bajo Río Conchos” (4,007 ha), DR-103 “Río Florido” (4,266 ha) y DR-113 “Alto Río Conchos” (3,434 ha). Entre los cultivos más importantes por su valor, producción y superficie

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

sembrada, se encuentra el nogal (*Carya illinoensis*), chile verde (*Capsicum annuum*), maíz (*Zea mays* L.), algodón (*Gossypium hirsutum* L.) y manzano (*Malus domestica*). Por lo cual, la programación del riego juega un papel importante en la conservación y distribución del agua de riego en las zonas agrícolas del estado (SIAP, 2016).

El desarrollo y popularización de las computadoras proporciona herramientas para almacenar grandes volúmenes de datos y realizar cálculos numerosos (Flores-Gallardo et al., 2013). No obstante, el pronóstico y la calendarización del riego para grandes zonas de riego, requiere modelos de fácil implantación en los sistemas computacionales, porque un pronóstico adecuado y una calendarización efectiva debe permitir el ajuste de la frecuencia y cantidad del riego basándose en factores del suelo, clima, planta y manejo del sistema de riego (Ojeda-Bustamante et al., 2006). Por lo tanto, realizar un pronóstico del riego en tiempo real y su calendarización en los cultivos agrícolas es un reto enorme, puesto que se requiere del monitoreo en campo de diversos factores así como de la tecnificación de la agricultura con fines de monitoreo de la humedad del suelo, información climática de la zona de interés, capacitación de los regadores y con ello poder tomar decisiones oportunas para aplicar los riegos en función del requerimiento hídrico del cultivo. En el presente capítulo, se presenta un ejemplo de la

programación integral del riego para el cultivo de maíz en un caso de estudio para las condiciones edafo-climáticas de la localidad de la Mesa, en el municipio de Aldama, Chihuahua.

6.1.1- Antecedentes

La agricultura de riego en México ha tenido grandes cambios como resultado de la recurrencia de sequías y la transferencia en la administración del agua, esta última se realizó hacia las asociaciones de usuarios del agua por parte del gobierno federal (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2007). Sin embargo, la falta de capacitación y actualización para mejorar la eficiencia de aplicación del riego en la parcela, es consecuencia de las deficiencias que se tienen que corregir en la administración y distribución del agua en los diferentes organismos operadores del recurso vital (distritos, unidades y módulos de riego).

A pesar de que existe resistencia por parte de los agricultores en cambiar la forma tradicional de regar debido a los altos costos de producción y por la ausencia de reglas simples o concretas que son el producto de la complejidad de todos los factores que modifican los requerimientos hídricos del cultivo, es importante considerar el riego en tres partes esenciales para tener una mayor eficiencia en el manejo del agua: 1) antes, 2) durante y 3) después del riego; la primera parte está

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

asociada con el pronóstico del riego que consiste en determinar el momento y cantidad oportuna del mismo, la segunda es propiamente la aplicación del riego al cultivo y la tercera consiste en evaluar si éste se aplicó eficientemente. Por lo anterior y debido a la gran necesidad de generar automáticamente programas de riego para los cultivos de acuerdo con su fenología, se ha generado el concepto grados día ($^{\circ}\text{D}$) con el propósito de pronosticar y calendarizar el riego (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2004).

Es común que los agricultores apliquen el riego en su parcela de acuerdo al criterio que han adquirido como experiencia y al manejo que ofrece cada parcela, ya que la programación científica del riego en la mayoría de los casos se realiza aplicando los procedimientos propuestos por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO, por sus siglas en inglés] (Allen *et al.*, 2006) debido a que existe nula o escaso material bibliográfico generado localmente (Sifuentes y Ojeda, 2005). La desventaja de dichos procedimientos es que fueron generados en otras regiones del mundo, por lo cual resultan empíricos para realizar procesos minuciosos para generar pronósticos con base a días calendario requiriendo de ajustes manuales por el usuario (Doorenbos y Kassam, 1979). Lo anterior complica su adopción total o eficaz en regiones específicas y por lo cual, el concepto grados día ($^{\circ}\text{D}$)

puede auto ajustarse a la variabilidad climática una vez calibrado y validado para la región de interés (Flores-Gallardo *et al.*, 2012).

El concepto grados día (D.) ya se ha utilizado para pronosticar el riego en el cultivo de papa (*Solanum tuberosum* L.) por Ojeda-Bustamante *et al.*, (2004) y Flores-Gallardo *et al.*, (2012), en maíz por Ojeda-Bustamante *et al.*, (2006) y Flores-Gallardo *et al.*, (2014), en algodón por Sifuentes-Ibarra *et al.*, (2014) y, en nogal por Sifuentes-Ibarra *et al.*, (2015). Además, ha sido utilizado con fines de evaluación del tiempo térmico para predecir la fenología de los cultivos (Flores-Magdaleno *et al.*, 2014; Flores-Gallardo *et al.*, 2016).

6.2- Materiales y métodos

6.2.1- Descripción del área de estudio

El trabajo se realizó en una parcela perteneciente a un productor cooperante, la cual se ubica en el rancho el Caracol con las siguientes coordenadas geográficas de latitud norte (LN): 28° 47' 07.7", longitud oeste (LW): -105° 59' 54.0" y con una altitud de 1339 m que corresponden a la localidad de La Mesa, ubicada en el municipio de Aldama, Chihuahua (Figura 6.1). Las características edáficas presentan una clase textural franco arenosa, con una distribución de partículas de suelo de 72 % arena

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

(A), 19 % limo (L) y 9 % arcilla (R), una densidad aparente (ρ_a) de 1.31 g cm⁻³ y un contenido de materia orgánica (MO) de 1.0 %.

Las condiciones climáticas son de tipo áridas, caracterizándose un clima seco templado con verano cálido donde la temperatura media anual es de 20 °C y se registra una precipitación promedio anual entre 200 y 300 mm que ocurren durante los meses de Julio, Agosto y Septiembre, mientras que la evapotranspiración de referencia (ET_o) media anual es de 4.7 mm d⁻¹ con un intervalo de 0.5 a 9.9 mm d⁻¹ (INIFAP, 2017). En esta región se presenta un periodo libre de heladas con alrededor de 210 días al año.

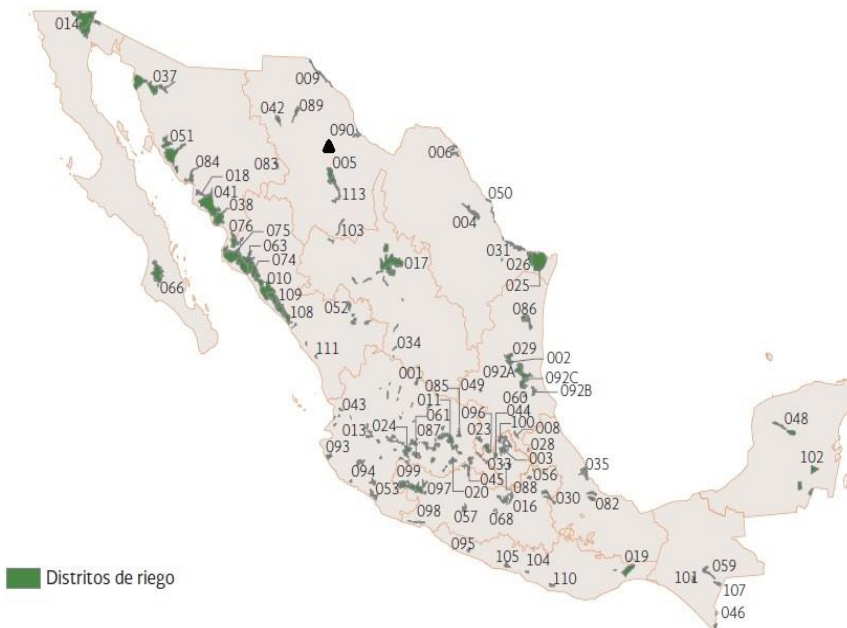


Figura 6.1.- Ubicación del sitio de trabajo entre la distribución de los distritos de riego en México.

6.2.2- Descripción del trabajo agronómico

Se realizó una siembra durante el ciclo agrícola primavera-verano (PV) 2016, donde se utilizó un maíz híbrido con color de grano amarillo (XR20A) y un maíz híbrido con color de grano blanco (XR21), ambos materiales de ciclo intermedio-precoc de la compañía CERES (Cuadro 6.1).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 6.1.- Características de los materiales de maíz utilizados en Aldama, Chihuahua durante el ciclo agrícola PV 2016.

Características	XR20A	XR21
Ciclo (tipo duración)	Intermedio - Precoz	Intermedio - Precoz
Días a floración (d)	65 - 70	66 - 68
Días a madurez (d)	132 - 135	138 - 140
Días a cosecha (d)	160 - 170	165 - 175
Altura de la mazorca (m)	1.14	1.15 m
Altura de la planta (m)	2.45 - 2.75	2.8 - 2.9

d – días, m – metro.

6.2.3- Descripción del modelo integral basado en el concepto grados día (D.)

El modelo integral basado en el concepto grados día (D.) para el pronóstico del riego, fue concebido por Ojeda-Bustamante *et al*, (2004). Dicho modelo se utilizó inicialmente para papa y posteriormente tuvo más utilización en maíz, sin embargo, se ha utilizado para nogal y algodón. Dicho modelo se ajusta automáticamente a las condiciones y variables que predominan en el área de estudio, determinando así el momento oportuno para la aplicación del riego y conociendo la cantidad precisa de agua que requiere el cultivo expresada en lámina de riego (L_r) compensando el déficit de humedad que existe en el suelo durante el desarrollo del cultivo. Es importante mencionar que existen fronteras determinadas como el crecimiento dinámico de la raíz (R_d), coeficiente del

cultivo (K_c), máximo déficit permitido (MDP), etapa fenológica y grados día acumulados ($\Sigma^\circ D$) por la planta. A continuación, se presentan las ecuaciones para determinar los grados día (D.) en el cultivo de maíz:

$$D. = T_a - T_{c\text{-min}}, T_a < T_{c\text{-max}}; \quad \text{Ec. 6.1}$$

$$D. = T_{c\text{-max}} - T_{c\text{-min}}, T_a \geq T_{c\text{-max}}; \quad \text{Ec. 6.2}$$

$$D. = 0, T_a \leq T_{c\text{-min}} \quad \text{Ec. 6.3}$$

De acuerdo con las ecuaciones anteriores, para estimar los grados día (D.) se requiere conocer la temperatura media ambiental diaria (T_a), en donde $T_{c\text{-min}}$ y $T_{c\text{-max}}$ son las temperaturas mínimas y máximas del aire, respectivamente y dentro de las cuales se desarrolla la planta. Para el caso del maíz, se consideran unas temperaturas de 8 y 30 °C, respectivamente, aunque dicha especie puede sobrevivir bajo temperaturas adversas entre 0 y 45 °C.

La fenología del cultivo toma gran importancia cuando se relaciona con las fechas de aplicación de los riegos y con la acumulación de los grados día ($\Sigma^\circ D$), ya que la sensibilidad al estrés hídrico y los requerimientos hídricos varían con la etapa fenológica del cultivo. Mediante el uso de parámetros para calcular las variables como el coeficiente de cultivo (K_c), profundidad radicular (R_d) y el máximo déficit permitido (MDP), se muestran a continuación los modelos desarrollados

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

para las tres variables mencionadas anteriormente, calculándolas en función de los grados día (D.), lo cual se aplica a maíz con el objetivo de calcular la calendarización y pronóstico del riego de acuerdo con la fenología del cultivo.

Para estimar el coeficiente del cultivo (K_c), se aplica la siguiente ecuación:

$$K_c = K_{\max} \operatorname{erfc}\left\{\left(\frac{X - X_{\max}}{\alpha_1}\right)^2\right\} \quad \text{Ec. 6.4}$$

Si $K_c < K_{c0}$, entonces $K_c = K_{c0}$

En donde K_{\max} es el coeficiente de cultivo máximo, K_{c0} es el coeficiente de cultivo inicial, X es una variable auxiliar que depende de los $\Sigma^\circ D$, erfc es una función complementaria del error y α_1 es un parámetro de regresión. Para estimar la profundidad de la raíz (R_d), se aplica la siguiente ecuación:

$$R_d = R_{do} + (R_{d\max} - R_{do})\left\{1 - \exp\left(-\frac{(\Sigma^\circ D)^2}{\alpha_2}\right)\right\} \quad \text{Ec. 6.5}$$

En donde R_{do} es la profundidad inicial de la raíz, $R_{d\max}$ es la profundidad máxima de la raíz, α_2 es un parámetro de regresión y $\Sigma^\circ D$

son los grados día acumulados. Para estimar el máximo déficit permitido (MDP) o también conocido como factor de abatimiento, se utiliza la siguiente ecuación:

$$\text{MDP} = \alpha_3 + \alpha_4 K_c \quad \text{Ec. 6.6}$$

En donde α_3 y α_4 son parámetros de regresión, respectivamente. De acuerdo al sistema de riego varían los parámetros de regresión (α), por lo cual se tuvieron que realizar evaluaciones en campo para determinar los valores para el sistema de riego por gravedad, estos parámetros pueden obtenerse para riego por aspersión y goteo, según sea el interés del usuario, así como el sistema utilizado.

Para alimentar el modelo con datos climáticos, se utilizó la información proporcionada por la Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas (RENEAA) que opera el INIFAP (Figura 6.2) a través del Laboratorio Nacional de Modelaje y Sensores Remotos, ubicado en el Campo Experimental Pabellón, Aguascalientes (INIFAP, 2017).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos



Figura 6.2.- Distribución de las estaciones agrometeorológicas automatizadas a nivel nacional

Además de los modelos descritos anteriormente, se necesita el cálculo de algunas constantes de humedad del suelo, las cuales se obtienen a través de las siguientes ecuaciones y deben ser alimentadas con datos obtenidos mediante un análisis físico-químico de suelo en el laboratorio:

$$\theta_{CC} = 0.3486 - 0.0018 (A) + 0.0039 (R) + 0.0228 (MO) - 0.0738 (\rho_a)$$

$$\theta_{PMP} = 0.0854 - 0.0004 (A) + 0.0044 (R) + 0.0122 (MO) - 0.0182 (\rho_a)$$

Donde θ_{CC} es la capacidad de campo (%), θ_{PMP} es el punto de marchitez permanente (%), MO es la materia orgánica del suelo (%), ρ_a es la densidad aparente (g cm^{-3}), A y R son arena y arcilla (%), respectivamente.

6.3- Resultados y discusión

6.3.1- Fenología en función de los grados día (D.)

Se observaron las diferentes fases fenológicas de acuerdo con Solórzano (2007) en los dos híbridos de maíz utilizados, para ajustar el cálculo realizado por el modelo con la finalidad de determinar cada fase fenológica en función de los grados día (D.) y no en días calendario o días después de siembra, esto último ocasiona incertidumbre porque no se tiene una estimación certera del desarrollo de la planta y debe considerarse que los organismos vivos están regidos por las condiciones ambientales para su desarrollo (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2011). Lo anterior, permitirá predecir la fenología y desarrollo del maíz en ciclos agrícolas posteriores mediante la modelación y así poder determinar labores agronómicas dentro de las cuales se encuentra el riego.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 6.2.- Fenología del maíz en función de los grados día (D).

No.	Clave	Etapa	XR20A		XR21	
			Fecha	D.	Fecha	D.
1	Ve	Germinación y emergencia	01/07/2016	80.40	01/07/2016	80.40
2	V1	Primera hoja	05/07/2016	157.02	05/07/2016	157.02
3	V2	Segunda hoja	06/07/2016	179.02	06/07/2016	179.02
4	V3	Tercera hoja	07/07/2016	201.02	07/07/2016	201.02
5	V4	Cuarta hoja	08/07/2016	220.74	08/07/2016	220.74
6	V5	Quinta hoja	09/07/2016	240.72	09/07/2016	240.72
7	V6	Sexta hoja	10/07/2016	259.91	10/07/2016	259.91
8	V7	Séptima hoja	11/07/2016	281.25	11/07/2016	281.25
9	V8	Octava hoja	13/07/2016	325.14	13/07/2016	325.14
10	V9	Novena hoja	16/07/2016	387.25	16/07/2016	387.25
11	V10	Decima hoja	18/07/2016	429.21	18/07/2016	429.21
12	V11	Decimoprimer hoja	20/07/2016	470.74	20/07/2016	470.74
13	V12	Duodécima hoja	22/07/2016	512.69	22/07/2016	512.69
14	V13	Decimotercer hoja	27/07/2016	618.97	27/07/2016	618.97
15	V14	Decimocuarta hoja	02/08/2016	719.12	02/08/2016	719.12
16	V15	Decimoquinta hoja	04/08/2016	756.67	04/08/2016	756.67
17	V16	Decimosexta hoja	06/08/2016	797.30	06/08/2016	797.30
18	VT	Emergencia de la espiga	09/08/2016	856.71	09/08/2016	856.71
19	R1	Emergencia de los estigmas, antesis (floración)	10/08/2016	872.71	11/08/2016	888.10
20	R2	Estado de ampolla	16/08/2016	962.30	17/08/2016	976.95
21	R3	Fin de la emergencia de la espiga	19/08/2016	1004.83	20/08/2016	1021.91
22	R4	Floración completa	22/08/2016	1051.24	23/08/2016	1066.74
23	R5	Desarrollo de la mazorca	25/08/2016	1095.69	26/08/2016	1110.35

24	R6	Mazorca visible	28/08/2016	1142.37	30/08/2016	1168.95
25	R7	Estado pastoso	02/09/2016	1217.32	05/09/2016	1268.91
26	R8	Comienzo de la dentación	04/09/2016	1251.36	07/09/2016	1301.59
27	R9	Todos los granos dentados por completo	19/09/2016	1505.05	24/09/2016	1590.65
28	R10	Madurez fisiológica	22/09/2016	1558.05	28/09/2016	1628.88

V – etapa vegetativa; R – etapa reproductiva; N/A – no aplica.

La acumulación diaria de los D. es una variable de gran valor predictivo para el manejo del riego. La maduración de las variedades comerciales de maíz varía de 1150 a 1760 para valores acumulados D. Las variedades se pueden clasificar por los requerimientos acumulados de D., las de ciclo corto de 1150 a 1315 D., las de ciclo intermedio de 1315 a 1590 D., y las de ciclo largo de 1590 a 1760 D. (Neild y Newman, 1987). Se obtuvieron ligeras diferencias en la acumulación de D. por cada material y lo cual resultó en diferencia en días de acuerdo al desarrollo fenológico de los maíces utilizados.

De acuerdo con Ojeda-Bustamante *et al.* (2006), el desarrollo de muchos organismos es controlado principalmente por la temperatura. Por lo tanto, los grados día (D.) son una medida indirecta del crecimiento y desarrollo de plantas e insectos, que representan la integración de la temperatura ambiental entre dos temperaturas limitantes, las cuales

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

definen el intervalo en el cual un organismo se encuentra activo. Puesto que fuera de este intervalo el organismo no presenta un desarrollo apreciable o puede morir.

6.3.2- Pronóstico del riego en maíz

Considerando una eficiencia de aplicación del 80 % para el sistema de riego por gravedad, ya que se tuvo un control preciso por ser un estudio experimental, se generó un calendario en función del pronóstico del riego como producto del modelo integral basado en el concepto grados día (D.), obteniendo la cantidad de agua por aplicar (lámina de riego) así como el día en que debe aplicarse para satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo (Cuadro 6.3).

Cuadro 6.3.- Calendario de riego generado con el pronóstico del modelo integral basado en el concepto grados día (D.).

No. de riego	Días al riego	IR	Lr _n	Lr _b
RA	0	0	95.66	1.20
2	24	24	37.11	0.46
3	35	11	53.37	0.67
4	45	10	58.06	0.73
5	61	16	64.23	0.80
6	80	19	67.71	0.85

RA – riego de asiento (pre-siembra); IR – intervalo de riego (días); Lr_n – lámina de riego neta (mm); Lr_b – lámina de riego bruta (cm).

De forma gráfica, en la Figura 6.3 se representa la aplicación de los riegos conforme avanza el desarrollo del cultivo de maíz, lo cual refleja la fluctuación de la humedad en el suelo para satisfacer el requerimiento hídrico del cultivo en función de la relación agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA).

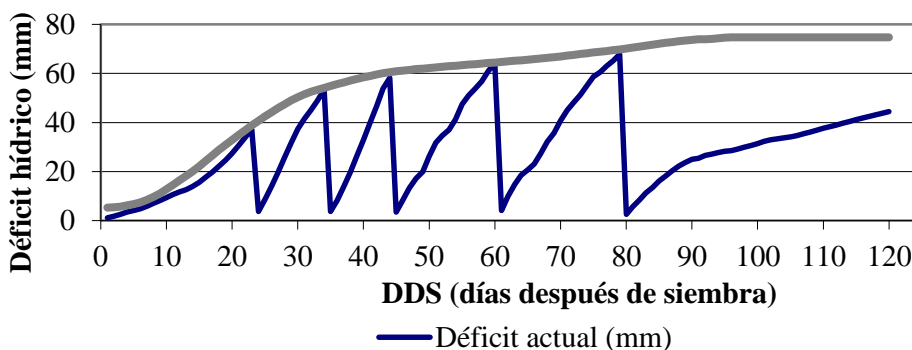


Figura 6.3.- Fluctuación de la humedad en el suelo con respecto al déficit crítico (máximo déficit permitido, también conocido como factor de abatimiento) conforme se aplican los riegos durante el desarrollo del cultivo de maíz.

6.3.3- Rendimiento de grano en maíz

A pesar de que se utilizaron los mismos trabajos agronómicos (tratamientos similares), es importante considerar que la variabilidad edáfica, climática y el trabajo realizado por el personal de campo, no es uniforme y lo cual ocasiona que se obtengan resultados diferentes aunque se utilicen materiales similares (híbridos de maíz).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El rendimiento promedio de grano de maíz más alto, ajustado al 14 % de humedad que se requiere para su comercialización, lo obtuvo el híbrido con grano blanco (XR21) con 11.6 t ha⁻¹ mientras que el híbrido de grano amarillo (XR20A) tuvo un rendimiento promedio de 10.9 t ha⁻¹, lo cual representa una diferencia de 0.7 t ha⁻¹ entre los híbridos utilizados. Sin embargo, el rendimiento promedio de grano a nivel estatal oscila entre las 9.2 t ha⁻¹ para riego y 0.9 t ha⁻¹ para temporal, lo anterior resulta de vital importancia para mejorar el proceso productivo del maíz dependiendo de la región agroecológica del estado de Chihuahua.

Generalmente se busca obtener rendimientos comerciales durante un periodo óptimo del año, lo cual incluye un periodo libre de heladas, así como las mejores condiciones de disponibilidad hídrica para suplementar con los insumos necesarios al cultivo y alcance su máximo potencial de desarrollo, así como de rendimiento.

6.4- Conclusiones

El pronóstico del riego con el modelo basado en el concepto grados día (D.), es viable una vez que se lleva a cabo su calibración y validación para la región de interés, además de contar con la información precisa sobre las condiciones particulares de suelo, cultivo y sistema de riego.

El modelo se ajusta automáticamente a la variabilidad climática (actualización de datos climáticos) y reduce el ajuste manual de los cálculos o calendarios generados con respecto a otras metodologías. Sin embargo, se requiere de la capacitación adecuada para manejar el pronóstico del riego con dicho modelo y se refleje su eficacia en campo mediante la complementación de un manejo adecuado del riego por los regadores.

Es importante considerar la buena calidad de los datos climáticos que se utilizan para pronosticar el riego en tiempo real, puesto que son un factor importante para realizar el cálculo implícito en la relación agua-suelo-planta-atmósfera (RASPA).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

6.5.- Bibliografía

1. Allen R, Pereira L, Raes D, Smith M. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO. Riego y Drenaje 56. Roma, Italia; 2006: 298 p.
2. CONAGUA. Estadísticas del Agua en México. Edición 2016. Comisión Nacional del Agua. México D.F.; 2016: 275 p.
3. CONAGUA. Estadísticas Agrícolas de los Distritos de Riego. Año Agrícola 2013-2014. Comisión Nacional del Agua. México D.F.; 2015: 389 p.
4. Doorenbos J, Kassam A H. Yield response to water. FAO. Irrigation and Drainage. Paper no. 33. Rome, Italy; 1979: 193 p.
5. Flores-Gallardo H, Ojeda-Bustamante W, Flores-Magdaleno H, Mejía-Sáenz E, Sifuentes-Ibarra E. Grados día y la programación integral del riego en el cultivo de papa. Terra Latinoamericana; 2012: 30(1): 59-67.
6. Flores-Gallardo H, Ojeda-Bustamante W, Flores-Magdaleno H, Sifuentes-Ibarra E, Mejía-Sáenz E. Simulación del rendimiento de maíz (*Zea mays* L.) en el norte de Sinaloa usando el modelo AquaCrop. Agrociencia; 2013: 47(4): 347-359.
7. Flores-Gallardo H, Sifuentes-Ibarra E, Flores-Magdaleno H, Ojeda-Bustamante W, Ramos-García C R. Técnicas de conservación del agua en riego por gravedad a nivel parcelario. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas; 2014: 5(2): 241-252.
8. Flores-Magdaleno H, Flores-Gallardo H, Ojeda-Bustamante W. Predicción fenológica del cultivo de papa mediante tiempo térmico. Revista Fitotecnia Mexicana; 2014: 37(2): 149-157.
9. Flores-Gallardo H, Domínguez-Martínez P A, Narváez-Mendoza M P, Zavala-Estrada F, García-Hernández R V. Predicción fenológica en cultivos agrícolas bajo tiempo térmico. Folleto técnico # 85. INIFAP-CIRNOC-CEVAG; 2016: 32 p. ISBN: 978-607-37-0687-2.
10. INIFAP. Red Nacional de Estaciones Agrometeorológicas Automatizadas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales,

- Agrícolas y Pecuarias. Consultado en línea 12/09/2017.
<http://clima.inifap.gob.mx/redinifap/>
11. Iñiguez-Covarrubias M, Ojeda-Bustamante W, Rojano-Aguilar A. Metodología para la determinación de la evapotranspiración integrada y la capacidad de canales en una zona de riego. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias UNCuyo*; 2011: 43(2): 175-191.
 12. Neild R E, Newman J E. Growing season characteristics and requirements in the Corn Belt. *In: National Corn Handbook*. Project leader R. Nielsen. Purdue University. West Lafayette, Indiana. USA; 1987: 16 p.
 13. Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Slack D C, Carrillo M. Generalization of irrigation scheduling parameters using the growing degree concept: application to a potato crop. *Irrigation and Drainage*; 2004: 53: 251-261.
 14. Ojeda-Bustamante W, Sifuentes-Ibarra E, Unland-Weiss H. Programación integral del riego en maíz en el norte de Sinaloa, México. *Agrociencia*; 2006: 40(1): 13-25.
 15. Ojeda-Bustamante W, González-Camacho J M, Sifuentes-Ibarra E, Isidro E, Rendón-Pimentel L. Using spatial information systems to improve water management in Mexico. *Agricultural Water Management*; 2007: 89: 81-88.
 16. SIAP. Infografía Agroalimentaria 2016 - Chihuahua. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Ciudad de México; 2016: 51 p.
 17. Sifuentes I E, Ojeda B W. Métodos de conservación del agua en riego superficial (Una alternativa para incrementar la eficiencia en el uso del agua). *In: memorias del XIII congreso nacional de irrigación (Mesa 4: Innovaciones tecnológicas, de información y servicios en Internet)*. Acapulco, Guerrero, México. 2005.
 18. Sifuentes-Ibarra E, Ruelas-Islas J del R, Soto-Flores J J, Macías-Cervantes J, Palacios-Mondaca C A. Planeación del riego en el cultivo de algodónero (*Gossypium hirsutum* L.), mediante un modelo de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- programación integral en el Distrito 075, Sinaloa, México. *Scientia Agropecuaria*; 2014: 5: 93-102.
19. Sifuentes-Ibarra E, Samaniego-Gaxiola J A, Anaya-Salgado A, Núñez-Moreno J H, Valdez-Gascón B, Gutiérrez-Soto R G, Ruelas-Islas J del R, Macías-Cervantes J. Programación del riego en nogal pecanero (*Carya illinoensis*), mediante un modelo integral basado en tiempo térmico. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*; 2015: 6(8): 1893-1902.
 20. Solórzano V E. Guías fenológicas para cultivos básicos. Editorial Trillas. Primera edición. México; 2007: 152 p.

Capítulo 7

Estimación de la demanda hídrica en los cultivos utilizando el modelo METRIC

Arturo Reyes González¹
Gerardo Delgado Ramírez²
Miguel Rivera González²
Juan Estrada Avalos²
Juan Isidro Sánchez Duarte¹

7.1 Introducción

El agua juega un papel importante en la agricultura bajo riego, por lo que una estimación precisa de los requerimientos hídricos de los cultivos es esencial para eficientar el manejo del agua de riego. En áreas bajo riego existe un método que estima los requerimientos hídricos de los cultivos, este método multiplica la evapotranspiración de referencia (ET_r) por un coeficiente de cultivo (K_c) (Allen et al., 1998 y ASCE-WWRI, 2005). La cuantificación o estimación de la evapotranspiración (ET) ha sido usada para varios propósitos incluyendo la programación del riego y el manejo eficiente del recurso hídrico.

¹ INIFAP CIRNOC Campo Experimental la Laguna, Blvd. José Santos Valdez 1200 Col. Centro C.P.

7440, Matamoros, Coahuila. México

²Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 6.5 Canal Sacramento, Margen derecha. 35140, Gómez Palacio, Dgo., México.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

La ET se define como la pérdida de agua de la superficie de la tierra hacia la atmosfera a través de dos procesos, evaporación (E) la cual es el agua que se evapora de la superficie tales como suelo, vegetación mojada y cuerpos de agua y transpiración (T) la cual consiste en la pérdida de agua contenida en los tejidos de la planta (Allen et al., 1998). En las primeras etapas del cultivo, el agua se pierde por evaporación y cuando el cultivo cubre totalmente el suelo la transpiración es el principal factor. Existen varios métodos para estimar la ET directos e indirectos tales como lisímetros, balance de agua en el suelo, tanque evaporímetro, atmómetros y técnicas de Eddy Covariance y relación de Bowen. Sin embargo, una limitante de estos métodos es que no representan la ET de campos distintos de donde se estimó la ET, para resolver este problema los sensores remotos es una alternativa para estimar la ET campo por campo a una escala regional en menos tiempo y con menos costo.

En las últimas décadas varios modelos se han desarrollado para estimar la evapotranspiración actual o necesidades hídricas de los cultivos utilizando sensores remotos a diferentes escalas (Gowda et al., 2008). Uno de ellos es el modelo METRIC (Mapeo de la Evapotranspiración en altas Resolución y con Calibración Internalizada) desarrollado por la universidad de Idaho, USA. El modelo METRIC utiliza el innovador método del SEBAL (Algoritmo para el Balance de Energía

Superficial) para estimar el flujo de calor latente mediante el uso del gradiente de temperatura cercano a la superficie del aire (dT) para cada pixel dentro de la imagen basada en una relación de regresión entre dT y la temperatura de la superficie radiométrica (T_s) entre dos pixeles. Los pixeles representan las condiciones de un campo agrícola con cobertura vegetal completa (pixel frío) y de un campo agrícola desnudo sin cobertura vegetal (pixel caliente).

Una de las ventajas del modelo METRIC en comparación con los modelos anteriores basados en el balance de energía es que utiliza la E_{Tr} para estimar la evapotranspiración actual (E_{Ta}) en condiciones de pixeles fríos. Debido a que E_{Tr} se basa en mediciones meteorológicas basadas en tierra y debido a que E_{Tr} está calibrado para tener en cuenta las condiciones atmosféricas comunes en condiciones áridas y semiáridas. Por lo tanto, el modelo METRIC puede considerarse un modelo híbrido ya que combina la información de imágenes de satélite con la E_{Tr} derivada de las estaciones meteorológicas para estimar la E_{Ta} (Irmak, et al., 2011).

En la última década el modelo METRIC se ha utilizado para estimar la E_{Ta} a escala de campo y a escala regional en diferentes cultivos, incluido el algodón (Chávez et al., 2007), trigo (Droogers et al., 2010), soya (Choi et al., 2009), maíz (Singh e Irmak, 2009 y Reyes-González, 2017), cultivo de cobertura (Hankerson et al., 2012), alfalfa (Mkhwanazi

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

et al., 2012), pistacho (Mokhtari et al., 2013), viñedos (Carrasco-Benavides et al., 2014), olivo (Paço et al., 2014), caña de azúcar (Zhang et al., 2015) y bosque en el Amazonas (Numata et al., 2017).

El objetivo del presente trabajo fue estimar las necesidades hídricas de los cultivos utilizando imágenes de satélite procesadas mediante el modelo METRIC y compararlas con la ET obtenidas con el atmómetro al este de Dakota del Sur, USA.

7.2 Materiales y Métodos

7.2.1 Área de estudio

El estudio se llevó a cabo al este de Dakota del Sur, a 500 m sobre el nivel del mar. Tres sitios de maíz fueron seleccionados para estimar la ETa (Figura 7.1). La densidad de población fue aproximadamente de 78,000 plantas por hectárea. Los sitios seleccionados presentaron una pendiente de 0 a 2% y todos presentaron un sistema de rotación de cultivo maíz-soya. Los maíces emergieron a principios de mayo y fueron cosechados los últimos de octubre. La precipitación media anual es de 533 mm. La temperatura máxima anual promedio es de 12.3°C, mínima de 0.3°C y media de 6.3°C. El clima del área de estudio se clasifica como

subhúmedo húmedo de acuerdo con el sistema de Thornthwaite (Keim, 2010).

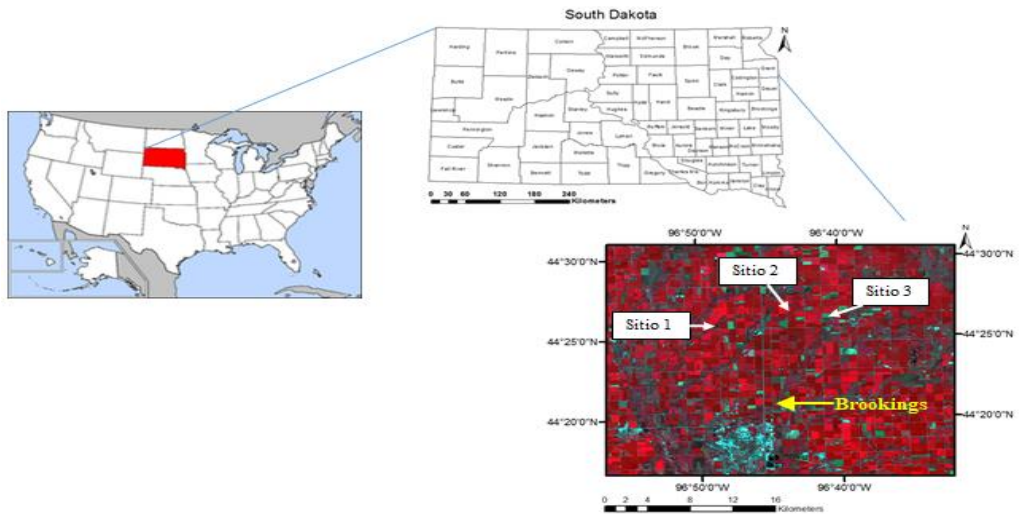


Figura 7.1. Área de estudio en Dakota del Sur e imagen Landsat indicando los sitios de estudio de maíz.

7.2.2 Selección de imágenes

Seis imágenes de satélite derivadas de Landsat 7 y de Landsat 8 (Path 29, Row 29) fueron utilizadas en este estudio (Cuadro 7.1). Las imágenes se seleccionaron en función de la cobertura temporal y las condiciones libre de nubes. Las imágenes con nubes presentes a más de 10 km del área de estudio se consideraron aceptables. Las imágenes de satélite se procesaron utilizando el modelo METRIC que es ejecutado en el software ERDAS Imagine (Kjaersgaard y Allen, 2010).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 7.1. Día del año (DOY), fecha, satélite y path/row usadas para la estimación de ETa.

DOY	Fecha	Satélite	Path/Row
178	06/26/16	Landas 7	29/29
194	07/12/16	Landas 7	29/29
202	07/20/16	Landas 8	29/29
218	08/05/16	Landas 8	29/29
234	08/21/16	Landas 8	29/29
258	09/14/16	Landas 7	29/29

7.2.3 Selección de píxeles

Durante el estudio, diez píxeles fueron seleccionados en cada sitio de maíz. Estos píxeles fueron seleccionados dentro de cada sitio para cada fecha en la que pasó el satélite por el área de estudio. Se usaron los mismos píxeles durante la temporada de crecimiento del cultivo. Se supuso que el número de píxeles (10) fueron representativos de todo el sitio de maíz.

Modelo METRIC

El modelo METRIC es un modelo que procesa las imágenes de satélite para calcular los valores de ET instantáneos como un residual de la ecuación de balance de energía (Allen et al., 2007, 2011):

$$LE = R_n - G - H \quad \text{Ec. 7.1}$$

Donde LE es el calor latente ($W\ m^{-2}$) o ET ($mm\ día^{-1}$), R_n es la radiación neta ($W\ m^{-2}$), G es el flujo del calor del suelo ($W\ m^{-2}$), and H es el flujo de calor sensible ($W\ m^{-2}$).

La radiación neta (R_n) se calcula utilizando la reflectancia de la superficie y la temperatura de la superficie (T_s) derivada de las imágenes de satélite. R_n es la diferencia entre la radiación de onda corta entrante y la radiación de onda larga saliente calculada como:

$$R_n = R_{S\downarrow} - \alpha R_{S\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o) R_{L\downarrow} \quad \text{Ec. 7.2}$$

Dónde: $R_{S\downarrow}$ es la radiación de onda corta que entra a la superficie ($W\ m^{-2}$), α es el albedo (adimensional), $R_{L\downarrow}$ es la radiación de onda larga que entra a la superficie ($W\ m^{-2}$), $R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga que

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

sale de la superficie ($W m^{-2}$), y ε_o , es la emisividad térmica de la superficie (adimensional).

El flujo del calor del suelo (G) es la magnitud del flujo de calor almacenado o liberado en el suelo. G es calculado utilizando las siguientes ecuaciones descritas por Tasumi et al., 2003.

$$\frac{G}{R_n} = 0.05 + 0.18 e^{-0.521 LAI} \quad LAI \geq 0.5 \quad \text{Ec. 7.3}$$

$$\frac{G}{R_n} = 1.80 (T_s - 273.16)/R_n + 0.084 \quad LAI < 0.5 \quad \text{Ec. 7.4}$$

El flujo de calor sensible (H) se determina mediante una función aerodinámica basada en el gradiente de temperatura, la cual es calculada como sigue:

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad \text{Ec. 7.5}$$

Dónde: ρ_{air} es la densidad del aire ($kg m^{-3}$), C_p es el calor específico ($1004 J kg^{-1} K^{-1}$), dT es la diferencia de temperatura entre dos alturas z_1 (0.1m) y z_2 (2m) y r_{ah} es la resistencia aerodinámica al transporte de calor ($s m^{-1}$).

Para las estimaciones del flujo de calor sensible (H) el modelo METRIC utiliza el procedimiento CIMEC (Calibración utilizando un modelo inverso de condiciones extremas) descritas por Bastiaanssen et al. (1998) y Allen et al. (2007) para calibrar la diferencia de temperaturas de la superficie cercana a la del aire para cada pixel dentro de la imagen satelital basada en una relación de regresión entre el dT y el T_s de dos pixeles (frio y caliente). La ventaja del enfoque CIMEC dentro del modelo METRIC es que reduce los posibles impactos de los sesgos en la estimación de la corrección de la estabilidad aerodinámica y la rugosidad de la superficie (Allen et al., 2007).

En este estudio, se seleccionaron pixeles fríos y calientes dentro de campos agrícolas cercanos a la estación meteorológica (<15 km) para cada imagen satelital (Cuadro 7.2). El pixel caliente se seleccionó en un campo agrícola desnudo sin cobertura vegetal, mientras que el pixel frio se seleccionó en un campo agrícola con una cobertura vegetal completa.

Cuadro 7.2. Selección de pixeles (frio y caliente) de acuerdo con los valores de albedo, NDVI, LAI y T_s para cada una de las imágenes en estudio.

DOY	Pixel	Elevación (m)	Albedo	NDVI	LAI	T_s (K)
178	Frio	508	0.19	0.83	4.78	300.75
	Caliente	505	0.16	0.21	0.37	312.94
194	Frio	492	0.23	0.84	5.34	296.63
	Caliente	526	0.17	0.39	0.42	306.97

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

202	Frio	497	0.21	0.83	6.00	299.93
	Caliente	512	0.16	0.36	0.40	308.06
218	Frio	514	0.21	0.89	6.00	296.8
	Caliente	500	0.17	0.39	0.40	303.85
234	Frio	591	0.16	0.78	6.00	294.05
	Caliente	558	0.15	0.37	0.32	299.46
258	Frio	516	0.19	0.84	5.16	289.86
	Caliente	532	0.14	0.18	0.26	300.16

En base a los valores de LE, los valores instantáneos de ET se calculan para cada pixel dentro de la imagen de satélite de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$ET_{inst} = 3600 \frac{LE}{\lambda \rho_w} \quad \text{Ec. 7.6}$$

Dónde: ET_{inst} es la ET instantánea por hora (mm h^{-1}), 3600 es usado para convertir de segundos a hora, LE es el calor latente consumido por la ET, ρ_w es la densidad del agua (1000 kg m^{-3}), λ es el calor latente de vaporización (J kg^{-1}), la cual es calculada como:

$$\lambda = (2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)) \times 10^6 \quad \text{Ec. 7.7}$$

La fracción de ET de referencia (ET_rF) o coeficiente de cultivo (K_c) fue calculada en base a la ET_{inst} para cada pixel y la ET_r fue tomada de la estación meteorológica.

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad \text{Ec. 7.8}$$

Los valores diarios de ET (ET₂₄) para cada pixel es calculada como sigue:

$$ET_{24} = ET_r F \times ET_r 24 \quad \text{Ec 7.9}$$

Dónde: $ET_r F$ es la fracción de ET de referencia, $ET_r 24$ es la ET de referencia de alfalfa acumulada durante el día (mm día⁻¹) y ET_{24} es la ET actual para un periodo de 24 horas (mm día⁻¹).

7.2.4. Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos por hora fueron usados para la calibración interna del modelo METRIC. Las observaciones climáticas fueron tomadas de la estación meteorológica localizada en Brookings, SD.

La ET_r fue calculada usando la ecuación de Penman-Monteith (Allen et al., 1998 y ASCE-WWRI, 2005).

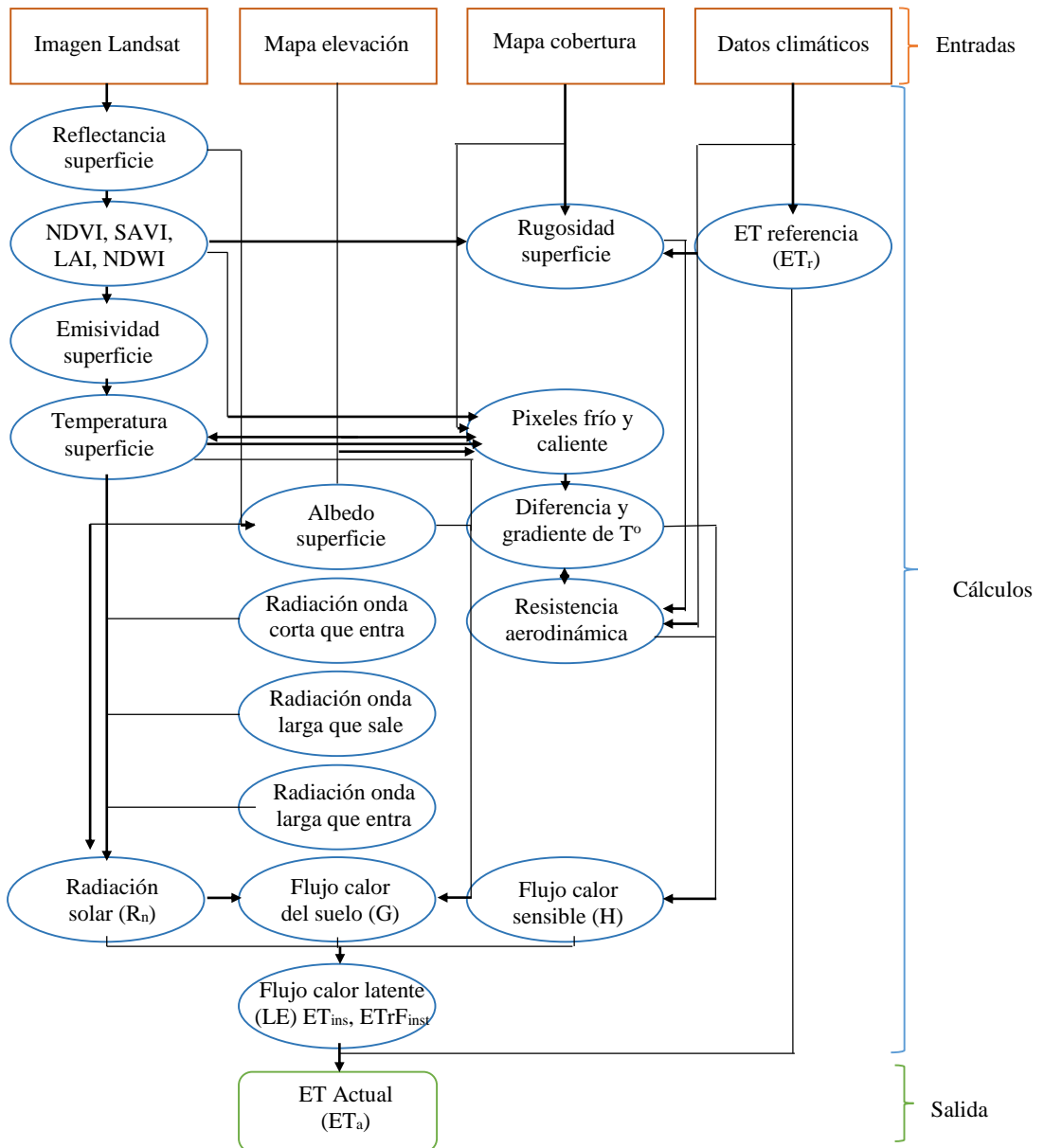
$$ET_{ref} = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{C_n}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + C_d u_2)} \quad \text{Ec. 7.10}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Dónde: ET_{ref} es la ET de referencia (alfalfa), Δ es la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), R_n es la radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), G es el flujo del calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ day}^{-1}$), T es la temperatura media del aire a 1.5 y 2.5 m de altura ($^\circ\text{C}$), u_2 es la velocidad del viento promedio diaria a 2 m de altura (m s^{-1}), $e_s - e_a$ es el déficit de presión del vapor de aire (kPa), γ es la constante psicométrica ($0.0671 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$), C_n es el numerador constante ($1600 \text{ K mm s}^3 \text{ Mg}^{-1} \text{ día}^{-1}$), C_d es el denominador constante (0.38 s m^{-1}) para el cultivo de alfalfa como referencia y 0.408 es el coeficiente constante ($\text{m}^2 \text{ mm MJ}^{-1}$).

Todos los datos meteorológicos fueron sometidos a un estricto control de calidad antes de ser utilizados en cualquier calculo, como lo sugiere Allen et al. (1998). El control de calidad de los datos meteorológicos incluyó las siguientes variables tales como radiación solar, temperatura del aire (máximas y mínimas), velocidad del viento y el déficit de presión de vapor del aire.

Un resumen de la estimación actual de ET con el modelo METRIC con todos los parámetros de entrada son mostrados en la siguiente figura.



Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Figura 7.2. Diagrama de flujo para estimar ET actual usando el modelo METRIC.

7.3 Resultados y Discusión

Durante el periodo de crecimiento el valor de la precipitación fue de 450 mm, dicha precipitación presentó buena distribución ya que los mayores eventos fueron presentados en las etapas críticas del cultivo como son la etapa de desarrollo y poco antes de la etapa de reproducción (Figura 7.3).

La evapotranspiración de referencia medida con el atmómetro varió de 0.5 a 10 mm día⁻¹, mientras que los valores calculados con la ecuación de Penman-Monteith (P-M) variaron de 1.3 a 9.1 mm día⁻¹. Los valores máximos de ETr obtenidos con el atmómetro (ETr-atm) fueron registrados a principios de junio (DOY 161) y los valores mínimos fueron presentados a inicios de septiembre (DOY 249). Los máximos valores calculados con la ecuación de P-M (ETr-PM) fueron reportados a inicios de junio (DOY 157) y los mínimos valores fueron registrados a mediados de septiembre (DOY 259) (Figura 7.3). Sin embargo, una moderada relación ($r^2 = 0.64$) entre los valores de ETr-atm y ETr-PM fue encontrada durante el estudio (Figura 7.4)

La Figura 7.5 muestra las curvas de Kc para tres sitios de maíz localizados al este de Dakota del Sur. Las curvas fueron desarrolladas basadas en el cultivo de alfalfa como referencia tomadas del manual 70 (Jensen y Allen, 2016). Los valores de Kc fueron bajos al inicio del ciclo, luego se incrementaron y posteriormente vuelven a disminuir al final del ciclo. Los máximos valores de Kc observados en este estudio fueron similares a los reportados por Djaman e Irmak, 2013 y Wright, 1982, pero diferentes a los reportados por Irmak e Irmak, 2008 y Singh e Irmak, 2009.

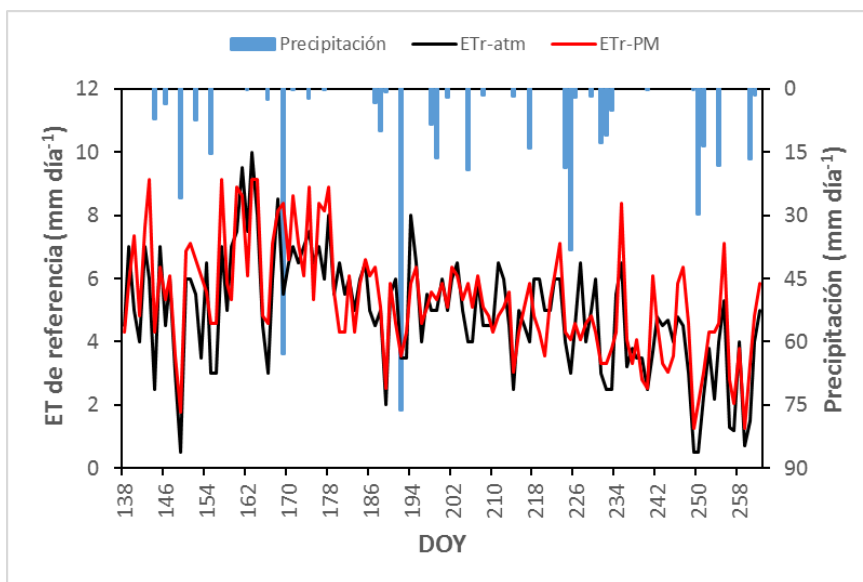


Figura 7.3. Precipitación y ET_r medida con el atmómetro y calculada con la ecuación de P-M durante el ciclo del cultivo 2016.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

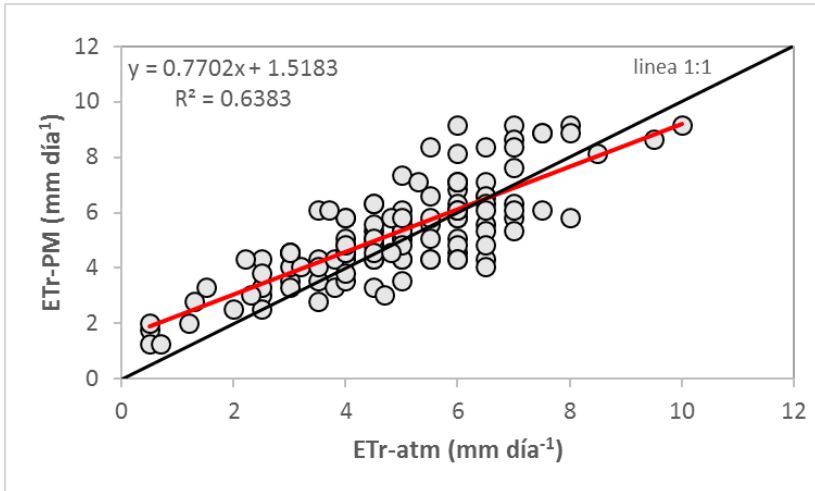


Figura 7.4. Relación entre ETr-atm y ETr-P-M.

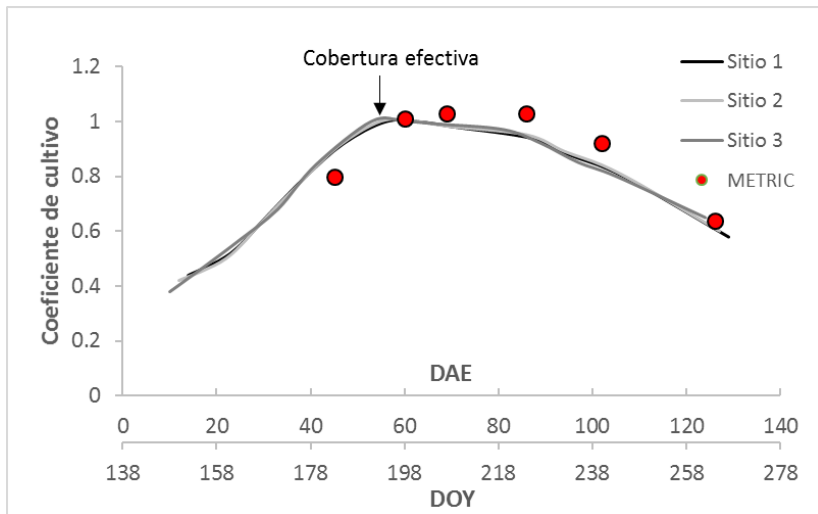


Figura 7.5. Curvas de Kc basados en el coeficiente de cultivo de la alfalfa como referencia en tres sitios. Los círculos rojos representan los Kc estimados con el modelo METRIC.

Los mapas espaciales de ET generados con el modelo METRIC son mostrados en la Figura 8.6. Estos mapas mostraron diferentes valores de ET durante el ciclo, por ejemplo, los valores más altos se indican con el color azul fuerte y los bajos con el color verde claro.

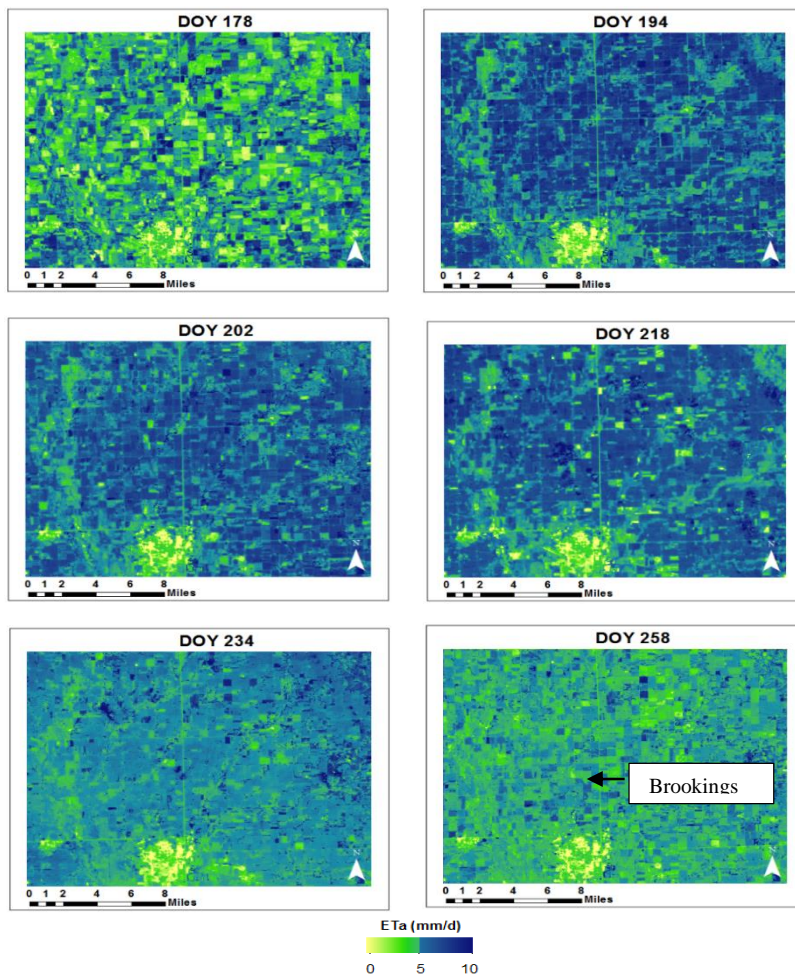


Figura 7.6. Mapas de ET generados con el modelo METRIC.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

En general las altas tasas de ET (8.8 mm día^{-1}) están relacionadas con las altas demandas de agua por el cultivo, la cual ocurren a la mitad del ciclo como se puede observar en la figura anterior, mientras que las bajas tasas de ET (2.7 mm día^{-1}) ocurren al inicio o al final del ciclo cuando el cultivo presenta poca vegetación o está en la etapa de senescencia (Figura 7.6). Los mapas diarios de ET ayudan a explicar la variabilidad espacial de los requerimientos hídricos del cultivo a través de la estación de crecimiento.

Los mapas de ET desarrollados mediante el modelo METRIC en este estudio fueron similares a los mapas de ET reportados por Chávez et al., 2007, Santos et al., 2008, Droogers et al., 2010, Healey et al., 2011 y Zhang et al., 2015, donde algunos de ellos estimaron la ET para el cultivo de maíz usando el modelo METRIC.

Mapas de ET a nivel de campo fueron generados también por el modelo METRIC (Figura 7.7). Los valores de ET a nivel de predio estuvieron en el rango de entre 2.7 y 9.7 mm día^{-1} . Zipper et al., 2015 y Senay et al., 2016 generaron similares mapas de ET a nivel de campo utilizando sensores remotos e imágenes de Landas.

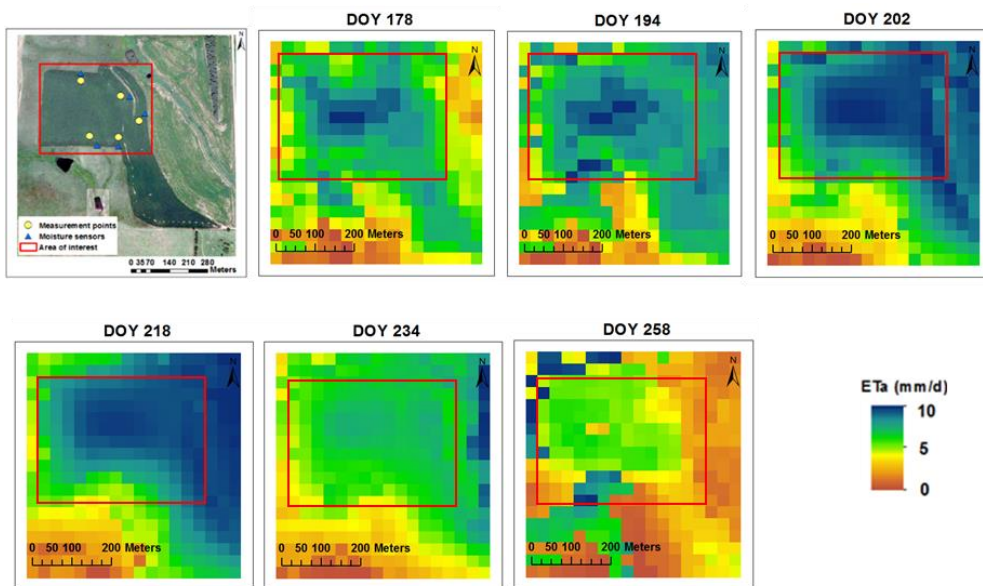


Figura 8.7. Mapas de ET a nivel de campo creados con el modelo METRIC.

Para validar los valores de ET provenientes de mapas generados con el modelo METRIC, estos valores fueron comparados con los valores de ET estimados mediante un atmómetro instalado a menos de 5 km de distancia de los sitios de maíz. Los valores de ET estimados con el atmómetro son el resultado de multiplicar la ET_r medida con el atmómetro y el K_c generado para cada sitio de maíz como se muestra en el cuadro 7.3 para cada imagen satelital en estudio.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 7.3. Sitos de maíz con los valores actuales de ET para METRIC y atmómetro.

Fecha	DOY	Sitio de Maíz	METRIC ET (mm día ⁻¹)	Atmómetro ET (mm día ⁻¹)
06/26/16	178	1	8.51	7.36
07/12/16	194	1	8.69	8.00
07/20/16	202	1	7.00	5.88
08/05/16	218	1	5.21	5.64
08/21/16	234	1	4.49	4.57
09/14/16	258	1	2.81	2.32
06/26/16	178	2	8.56	7.28
07/12/16	194	2	8.80	8.00
07/20/16	202	2	7.20	5.88
08/05/16	218	2	5.41	5.70
08/21/16	234	2	4.58	4.62
09/14/16	258	2	2.71	2.40
06/26/16	178	3	6.26	6.72
07/12/16	194	3	8.59	8.00
07/20/16	202	3	7.19	5.94
08/05/16	218	3	5.24	5.82
08/21/16	234	3	4.37	4.68
09/14/16	258	3	2.85	2.68

La Figura 7.8. Muestra la relación entre ET estimada con el modelo METRIC y la ET estimada con el atmómetro, en dicha figura se muestra una buena distribución de los puntos alrededor de la línea 1:1, lo que significa que hay una fuerte relación entre la ET estimada con METRIC y el atmómetro, esto se fortalece con el valor presentado por el coeficiente de determinación ($r^2 = 0.91$) entre ambos métodos.

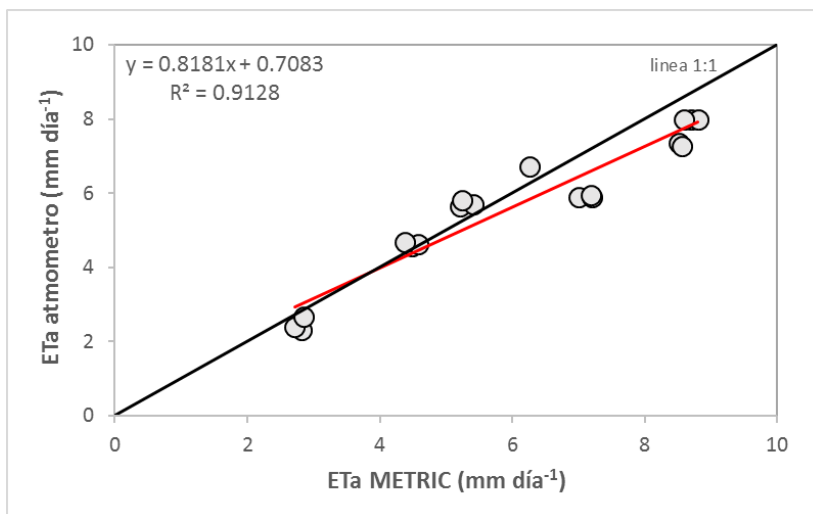


Figura 7.8. Relación entre la ETa estimada con atmómetro y la ETa estimada con el modelo METRIC.

La diferencia entre la ETa estimada con METRIC y la ETa estimada con el atmómetro es presentada en la Figura 7.9. Los valores positivos indican que la ETa estimada con METRIC excedieron a los valores estimados con el atmómetro, mientras que los valores negativos indican que los valores de ETa estimados con METRIC fueron más bajo que los calculados con el atmómetro.

La diferencia diaria de ETa entre el modelo METRIC y el atmómetro vario de -0.43 a 1.23 mm día⁻¹ (Figura 7.9). El valor más negativo fue presentado en el DOY 218, mientras que el valor más positivo fue observado en el DOY 202. Los valores positivos están fuertemente

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

relacionados con los valores altos de velocidad del viento a la hora en que pasa el satélite por el área de estudio (Figura 7.10). Generalmente al incrementarse la velocidad del viento se incrementa la diferencia en ETa.

Diferencias similares en ETa fueron encontradas por Choi et al., 2011 Chávez et al., 2007, Healey et al., 2011 y Hankerson et al., 2012, ellos reportaron diferencias de ET entre -1.0 y $+1.0$ mm dia^{-1} entre el Modelo METRIC y otros métodos que estiman la ET.

En la siguiente figura se muestra un ejemplo de los mapas de ET generados por el modelo METRIC para la Comarca Lagunera los cuales pueden ser utilizados en la programación y calendarización del riego parcelario.

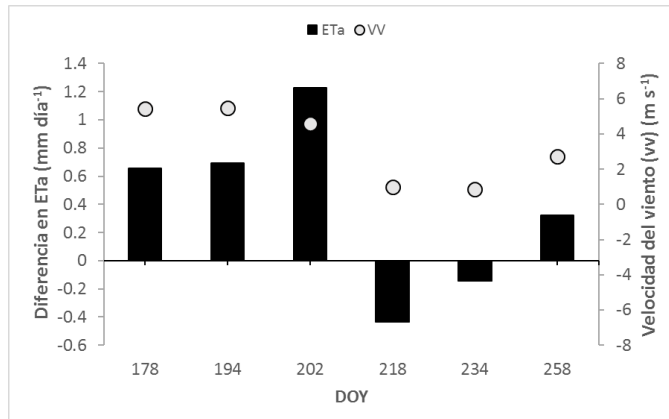


Figure 7.9. Diferencia de ETa entre el modelo METRIC y el atmómetro.

Las columnas representan la diferencia en ETa y los círculos representan la velocidad del viento para cada fecha en la que se obtuvo la imagen de satélite.

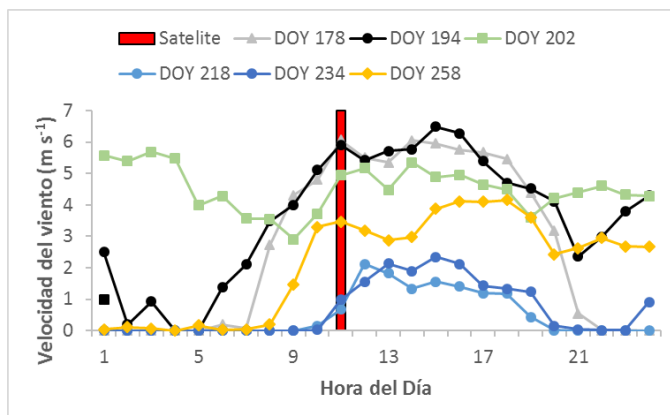


Figura 7.10 Valores de velocidad del viento promedio por hora en la estación meteorológica de Brookings. La columna roja representa la hora en que pasa el satélite por el área de estudio.

La figura de la parte inferior izquierda muestra un ejemplo de ET para un predio de maíz (recuadro negro). La ET para ese día y ese predio fue de 7mm aproximadamente, está perdida de ET deberá ser considerada para el próximo riego. Por otro lado, si se quiere estimar los requerimientos hídricos semanales, mensuales o para el ciclo de cultivo, se tendrá que hacer una interpolación de valores diarios de Kc entre imágenes y multiplicarlo por la ETr para cada día y luego integrarlo para el periodo deseado.

Finalmente, se puede concluir que el modelo METRIC es una herramienta confiable que puede estimar mapas de evapotranspiración o

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

de necesidades hídricas de los cultivos a diferentes escales con gran precisión.

Dichos mapas están disponibles para los productores para que hagan una mejor programación del riego y eficientar el uso de los recursos hídricos.

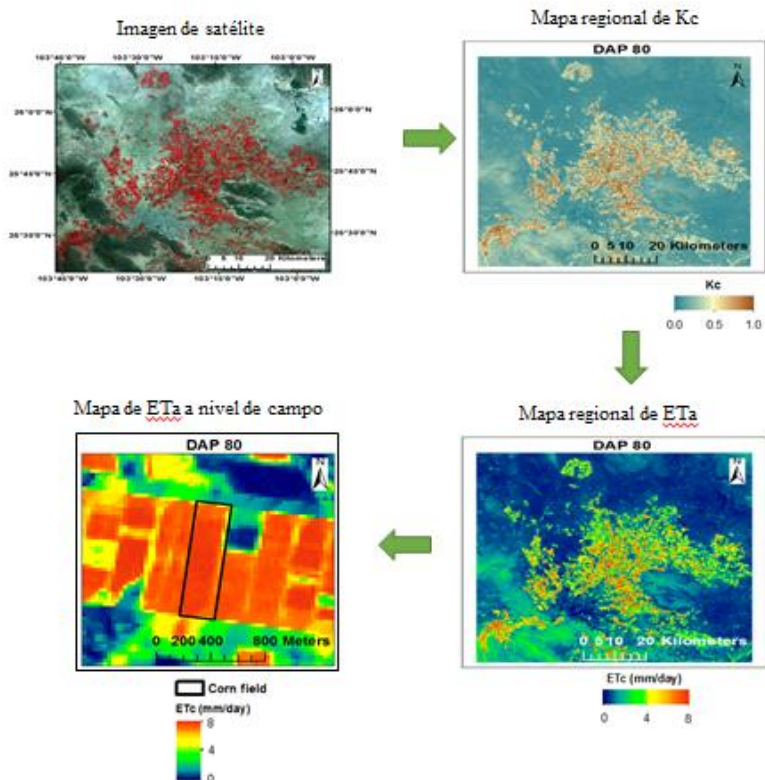


Figura 7.11. Ejemplo de la estimación de ETa a nivel regional y de campo usando el modelo METRIC.

7.4. Conclusiones

Los mapas de ET generados con el modelo METRIC ayudan a entender la variabilidad espacial de los requerimientos hídricos del cultivo a través del ciclo del cultivo, además estos mapas ayudan a estimar las necesidades hídricas de los cultivos casi en tiempo real. Finalmente, los mapas de ET pueden ser útiles para los productores en la programación y la calendarización del riego de sus predios.

En base a los resultados de este trabajo podemos concluir que el modelo METRIC es una herramienta útil para estimar con gran precisión la demanda hídrica de los cultivos a escalas regional y de campo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

7.5. Bibliografía

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. *FAO, Rome, 300(9)*, D05109.
2. Allen, R. G., Tasumi, M., Morse, A., Trezza, R., Wright, J. L., Bastiaanssen, W., . . . Robison, C. W. (2007). Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)—Applications. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *133(4)*, 395-406.
3. Allen, R. G., Pereira, L. S., Howell, T. A., & Jensen, M. E. (2011). Evapotranspiration information reporting: I. Factors governing measurement accuracy. *Agricultural Water Management*, *98(6)*, 899-920.
4. ASCE-EWRI. (2005). *The ASCE standardized reference evapotranspiration equation; ASCE-EWRI Standardization of Reference Evapotranspiration Task Committee Report; ASCE: Reston, VA, USA.*
5. Bastiaanssen, W., Menenti, M., Feddes, R., & Holtslag, A. (1998). A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, *212*, 198-212.
6. Carrasco-Benavides, M., Ortega-Farías, S., Lagos, L. O., Kleissl, J., Morales-Salinas, L., & Kilic, A. (2014). Parameterization of the Satellite-Based Model (METRIC) for the estimation of instantaneous surface energy balance components over a drip-irrigated vineyard. *Remote Sensing*, *6(11)*, 11342-11371.
7. Chavez, J. L., Gowda, P. H., Howell, T. A., Marek, T. H., & New, L. L. (2007). *Evapotranspiration mapping using METRICTM for a region with highly advective conditions.* Paper presented at the 2007 ASABE Annual International Meeting, Technical Papers.

8. Choi, M., Kim, T. W., Park, M., & Kim, S. J. (2011). Evapotranspiration estimation using the Landsat-5 Thematic Mapper image over the Gyungan watershed in Korea. *International journal of remote sensing*, 32(15), 4327-4341.
9. Choi, M., Kustas, W. P., Anderson, M. C., Allen, R. G., Li, F., & Kjaersgaard, J. H. (2009). An intercomparison of three remote sensing-based surface energy balance algorithms over a corn and soybean production region (Iowa, US) during SMACEX. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149(12), 2082-2097.
10. Djaman, K., & Irmak, S. (2012). Actual crop evapotranspiration and alfalfa-and grass-reference crop coefficients of maize under full and limited irrigation and rainfed conditions. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 139(6), 433-446.
11. Droogers, P., Immerzeel, W., & Lorite, I. (2010). Estimating actual irrigation application by remotely sensed evapotranspiration observations. *Agricultural Water Management*, 97(9), 1351-1359.
12. Gowda, P. H., Chavez, J. L., Colaizzi, P. D., Evett, S. R., Howell, T. A., & Tolk, J. A. (2008). ET mapping for agricultural water management: present status and challenges. *Irrigation Science*, 26(3), 223-237.
13. Hankerson, B., Kjaersgaard, J., & Hay, C. (2012). Estimation of evapotranspiration from fields with and without cover crops using remote sensing and in situ methods. *Remote Sensing*, 4(12), 3796-3812.
14. Healey, N. C., Irmak, A., Arkebauer, T. J., Billesbach, D. P., Lenters, J. D., Hubbard, K. G., . . . Kjaersgaard, J. (2011). Remote sensing and in situ-based estimates of evapotranspiration for subirrigated meadow, dry valley, and upland dune ecosystems in the semi-arid sand hills of Nebraska, USA. *Irrigation and Drainage Systems*, 25(3), 151-178.
15. Irmak, A., & Irmak, S. (2008). Reference and crop evapotranspiration in South Central Nebraska. II: Measurement

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- and estimation of actual evapotranspiration for corn. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 134(6), 700-715.
16. Irmak, A., Ratcliffe, I., Ranade, P., Hubbard, K. G., Singh, R. K., Kamble, B., & Kjaersgaard, J. (2011). Estimation of land surface evapotranspiration with a satellite remote sensing procedure. *Great plains research*, 73-88.
 17. Jensen, M. E., & Allen, R. G. (2016). *Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements*.
 18. Keim, B. D. (2010). The lasting scientific impact of the Thornthwaite water–balance model. *Geographical Review*, 100(3), 295-300.
 19. Kjaersgaard, J., & Allen, R. (2010). Remote sensing technology to produce consumptive water use maps for the Nebraska Panhandle. *Final completion report submitted to the University of Nebraska*, 88.
 20. Mkhwanazi, M., Chávez, J. L., & Rambikur, E. H. (2012). Comparison of large aperture scintillometer and satellite-based energy balance models in sensible heat flux and crop evapotranspiration determination. *International Journal of Remote Sensing Applications*, 2(1), 24-30.
 21. Mokhtari, M., Ahmad, B., Hoveidi, H., & Busu, I. (2013). Sensitivity analysis of METRIC–based evapotranspiration algorithm. *International Journal of Environmental Research*, 7(2), 407-422.
 22. Numata, I., Khand, K., Kjaersgaard, J., Cochrane, M. A., & Silva, S. S. (2017). Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. *Remote Sensing*, 9(1)
 23. Paço, T. A., Pôças, I., Cunha, M., Silvestre, J. C., Santos, F. L., Paredes, P., & Pereira, L. S. (2014). Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology*, 519, 2067-2080.

24. Reyes-Gonzalez, Arturo (2017). Using Remote Sensing to Estimate Crop Water Use to Improve Irrigation Water Management. Theses and Dissertations. 1708.
25. Santos, C., Lorite, I., Tasumi, M., Allen, R., & Fereres, E. (2008). Integrating satellite-based evapotranspiration with simulation models for irrigation management at the scheme level. *Irrigation Science*, 26(3), 277-288.
26. Senay, G. B., Friedrichs, M., Singh, R. K., & Velpuri, N. M. (2016). Evaluating Landsat 8 evapotranspiration for water use mapping in the Colorado River Basin. *Remote Sensing of Environment*, 185, 171-185.
27. Singh, R. K., & Irmak, A. (2009). Estimation of crop coefficients using satellite remote sensing. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 135(5), 597-608.
28. Tasumi, M. (2003). *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery*.
29. Wright, J. L. (1982). New evapotranspiration crop coefficients. *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(IR2), 57-74.
30. Zhang, H., Anderson, R. G., & Wang, D. (2015). Satellite-based crop coefficient and regional water use estimates for Hawaiian sugarcane. *Field Crops Research*, 180, 143-154.
31. Zipper, S. C., & Loheide II, S. P. (2014). Using evapotranspiration to assess drought sensitivity on a subfield scale with HRMET, a high resolution surface energy balance model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 197, 91-102.

Capítulo 8

Estimación de demanda hídrica en los cultivos mediante imágenes de satélite y modelo SEBAL

Gerardo Delgado Ramírez¹
Juan Estrada Ávalos¹
Miguel Rivera González¹
Enrique Miguel Valle¹
Arturo Reyes González²

8.1.- Introducción

En la Agricultura, la evapotranspiración (*ET*) es una de las variables elementales para promover un uso más eficiente del agua, por esto, la necesidad de tener estimaciones precisas (Murillas y Londoño, 2014). La correcta estimación de la *ET* en áreas semiáridas es vital para la gestión hídrica de las mismas (Villagarcía *et al.*, 2010). En la actualidad, existen varias metodologías para determinar la *ET* de forma directa o indirecta, destacando métodos, como: lisímetro de pesada, técnicas de Eddy Correlation y relación Bowen, tanque evaporímetro, formulas empíricas como: Penman-Montieth, Hargreaves – Samani, etc. Pero estas

¹ Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo Planta Atmósfera (CENID RASPA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Km 6.5 Canal Sacramento, Margen derecha. 35140, Gómez Palacio, Dgo., México.

² INIFAP CIRNOC Campo Experimental la Laguna, Blvd. José Santos Valdez 1200 Col. Centro C.P. 7440, Matamoros, Coahuila. México

metodologías proporcionan resultados de forma puntual y sobre todo asumiendo que espacialmente el cultivo se encuentra en las mismas condiciones, despreciando la variabilidad de suelo (propiedades físicas), sistema de riego, topografía, manejo de cultivo, etc., variables que influyen en el consumo de agua de los cultivos.

Los valores de evapotranspiración pueden ser importantes para las siguientes aplicaciones: determinar el área que puede regarse con un determinado volumen de agua disponible, elaborar calendarios de riego, estimar los volúmenes de agua que sean necesarios para auxiliar a los cultivos en caso de que la lluvia sea insuficiente para su buen desarrollo. También, permite determinar la lámina adicional de riego necesaria para la prevención de problemas de ensalitramiento de los suelos. De igual forma determina, en forma general, la eficiencia con la que se está aprovechando el agua en otras más aplicaciones (Aguilera y Martínez, 1996; Villaman *et al.*, 2001).

La sensoria remota es una herramienta muy útil para el cálculo de los parámetros que intervienen en el proceso de la *ET*. Además, presenta ventajas sobre los métodos mencionados anteriormente, debido que puede presentar valores de *ET* de forma espacial y temporal. Una opción para estimar la *ET* por teledetección, es el modelo SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm For Land). Este se basa en la ecuación de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

conservación de energía y utiliza información espacial de diferentes sensores que proporcionen imágenes donde se registre radiación visible, infrarroja cercana y termal.

El presente capítulo tiene como objetivo plantear un procedimiento metodológico para estimar la demanda hídrica en los cultivos mediante el uso de imágenes de satélite “Landsat 8.0” y el algoritmo SEBAL, para contribuir en la optimización y gestión del agua en la agricultura.

8.2. Principio de la percepción remota o teledetección.

La percepción remota puede definirse como la ciencia y arte de obtener información de un objeto analizando los datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto, esto es posible gracias a la relación sensor-cobertura, la cual en el caso de los barredores multiespectrales, se expresa a través de la llamada radiación electromagnética. (CONAGUA, 2005).

La percepción remota ha ganado mucho interés como una herramienta potencial de manejo para agricultores de precisión. Las imágenes de satélite o fotografías aéreas permiten al productor visualizar rápidamente los cultivos en su parcela para decidir cuales áreas requieren

un manejo posterior, para optimizar los insumos agrícolas y reducir los costos de producción.

En general, la percepción remota es un grupo de técnicas para recolectar información sobre un objeto o área sin tener que estar en contacto físico con ellos. Las distancias que separan al sensor del objeto o área estudiados pueden variar desde unos pocos metros hasta miles de kilómetros. Los métodos más comunes para recoger información incluyen el uso de sensores colocados sobre aviones, drones o satélites.

Las técnicas de la percepción remota son usadas ampliamente para recolectar información sobre fracciones de la superficie terrestre. Esta información percibida remotamente tiene muchos usos que van desde la vigilancia militar, hasta la planificación del uso de la tierra urbana e industrial, hasta al estudio del suelo agrícola y los cultivos.

La teledetección implica la medición de la energía electromagnética que es reflejada o emitida por objetos. Esta energía viaja por el espacio como ondas electromagnéticas, las cuales se diferencian por su longitud, que es la distancia entre dos crestas sucesivas de una onda. El espectro continuo se subdivide en algunos tipos familiares de energía electromagnética: rayos X, rayos ultravioletas (UV), visibles o RGB, infrarrojo (IR), microondas y ondas de radio. Estos distintos tipos de energía son categorizados por su posición, o longitudes

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

de onda, en el espectro electromagnético. Los rayos X tienen longitudes de onda muy pequeñas alrededor de 0.0001 micrómetros, y las ondas de radio pueden tener longitudes de onda grandes hasta 100 m (Figura 8.1).

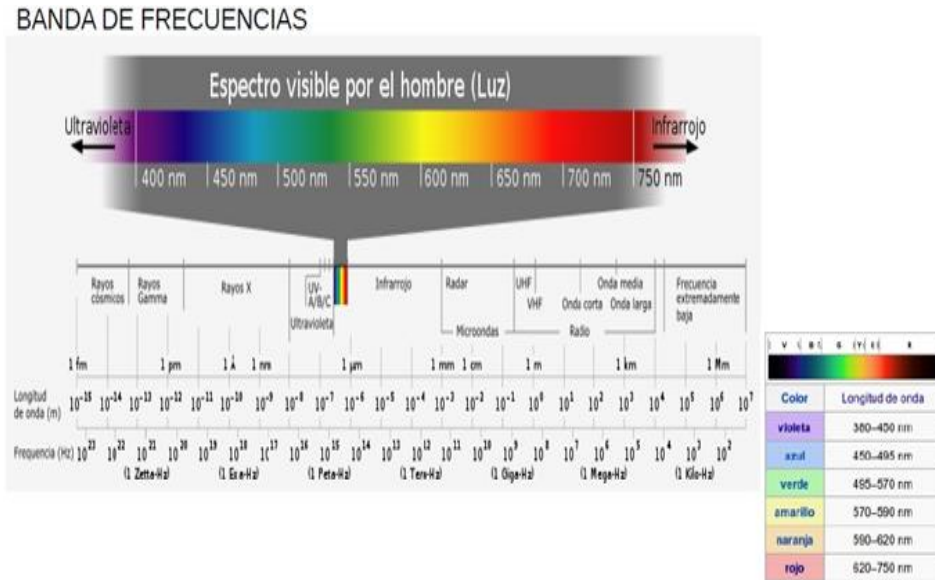


Figura 8.1.- Espectro electromagnético (Fuente: Iglesias, 2016).

Usualmente solo una pequeña porción, o banda, de todo el espectro es de interés en la percepción remota, ya que la luz del sol es la fuente más común de energía usada, las longitudes de onda predominantes en la luz solar son las más importantes. Para las aplicaciones agronómicas, la porción de interés es la que va desde la ultravioleta (UV) hasta el infrarrojo (IR). La mayor parte de la luz solar está

en estas bandas y tiene longitudes de onda entre 0.2 y 0.4 micrómetros (μm).

La luz visible, la porción del espectro que puede ser detectada por el ojo humano, también se encuentra entre el UV y el IR. La banda del visible se extiende de 0.4 a 0.7 μm . La luz azul se encuentra cerca de la región de 0.4 μm y la luz roja cerca de los 0.7 μm , justo sobre la región del rojo se encuentra la banda del infrarrojo cercano (NIR). No existe una distinción clara entre el NIR y el IR. Esta región del infrarrojo cercano, no es detectable por el ojo humano, pero puede ser detectada por sensores artificiales, esta banda es muy importante en la percepción remota.

Todos los objetos emiten energía electromagnética, lo que significa que emiten radiación, y esta se emite en longitudes de onda que están usualmente fuera de la banda visible, por consiguiente, no se puede ver la mayoría de la energía con el ojo humano. La mayor parte que se ve es energía reflejada. Cuando la energía electromagnética pega en un objeto, existen tres acciones que pueden pasar con ella: reflejada por el objeto, transmitida a través del objeto y absorbida por el objeto. Además, existen dos opciones básicas usadas para la percepción remota: sistemas de percepción activa y pasiva. Los activos poseen fuentes internas que generan artificialmente la radiación, como ejemplos se pueden mencionar el radar y el lidar. Con referente a los pasivos, estos detectan la radiación

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

electromagnética emitida o reflejada de fuentes naturales como la luz solar, como ejemplos se pueden mencionar: sistemas fotográficos, radiómetros multi y hiperspectrales, espectrómetros de imagen.

Cuando se comparan los sistemas de percepción remota y las imágenes producidas, se utilizan cuatro indicadores de resolución: espacial, espectral, radiométrica y temporal.

La resolución espacial designa al objeto más pequeño que se puede distinguir en la imagen, está determinada por el tamaño del píxel, medido en metros sobre el terreno, esto depende de la altura del sensor con respecto a la tierra, el ángulo de visión, la velocidad de escaneado y las características ópticas del sensor.

La resolución espectral consiste en el número de canales espectrales (y su ancho de banda) que es capaz de captar un sensor. Por ejemplo “Landsat 8” dispone de un total de 11 bandas.

La resolución radiométrica se refiere a la cantidad de niveles de gris en que se divide la radiación recibida para ser almacenada y procesada posteriormente.

La resolución temporal es la frecuencia del paso del satélite por un mismo punto de la superficie terrestre, es decir, cada cuanto tiempo pasa

el satélite por la misma zona de la tierra, este tipo de resolución depende básicamente de las características de la órbita.

8.3.- Imagen de satélite Landas 8.

En 1972, se puso en órbita el primer satélite para la evaluación de los recursos terrestres por la agencia espacial norteamericana, dando inicio una nueva era en la forma de captar información sobre los recursos terrestres. Este satélite fue denominado “Landas”, a partir de su segundo lanzamiento en 1975 y tres adicionales en el período 1978 a 1984, han constituido uno de los proyectos más fructíferos de percepción remota o teledetección espacial. La buena resolución de sus sensores, en el carácter global y periodo de las observaciones que realizan, explican su gran empleo por expertos de muy variados campos en todo el mundo (CONAGUA, 2005).

El satélite “Landas 8” fue lanzado el 11 de febrero de 2013, cuyo nombre técnico es LDCM (Landas Data Continuity Mission), traducido es “Misión de Continuidad de la Información Landas”. El lanzamiento se realizó desde la base área Vandenberg en California, gracias a una operación conjunta entre la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) y el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), (NASA, 2013).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El satélite “Landsat 8” dispone de dos instrumentos de toma de datos: OLI (Operational Land Imager o Generador Operacional Imágenes Tierra) y el TIRS (Thermal Infrared Sensor, o Sensor Infrarrojo Térmico). Las escenas de este satélite tienen un total de 11 bandas espectrales, 9 tomadas por OLI y 2 por el TIRS. En el Cuadro 8.1 se describen las principales características de “Landsat 8”.

Cuadro 8.1.- Principales características de los sensores OLI y TIRS del satélite Landsat 8 (Fuente: USGS, 2017).

Landsat 8		
Bandas espectrales de OLI	Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)
Banda 1- Aerosol costero	0.433 – 0.453	30
Banda 2- Azul	0.450 – 0.515	30
Banda 3- Verde	0.530 – 0.590	30
Banda 4- Roja	0.640 – 0.670	30
Banda 5- Infrarrojo Cercano (NIR)	0.850 – 0.885	30
Banda 6- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR 1)	1.570 – 1.650	30
Banda 7- Infrarrojo de Onda Corta (SWIR 2)	2.110 – 2.290	30
Banda 8- Pancromática	0.500 – 0.680	15
Banda 9- Cirrus	1.360 – 1.380	30
Bandas espectrales de TIRS	Longitud de Onda (μm)	Resolución (m)
Banda 10- Infrarrojo Térmico (TIRS 1)	10.60 – 11.19	100
Banda 11- Infrarrojo Térmico (TIRS 2)	11.50 – 12.51	100

8.4.- Componentes del Balance de Energía en el Modelo SEBAL.

El algoritmo para el Balance de Energía Superficial (SEBAL por sus siglas en inglés), desarrollado por (Bastiaanssen, 1995), es un método que permite calcular la evapotranspiración utilizando imágenes de satélite que registren radiación visible, infrarroja cercana y térmica. Este método se fundamenta principalmente en el cálculo de las variables que componen el balance de energía a través de procesos aplicados a las imágenes de satélite, disminuyendo en gran medida la toma de datos en campo.

8.4.1.- Radiación Neta.

La radiación neta es imprescindible para la estimación de la evapotranspiración tanto real como potencial, variables que son de alta importancia en el seguimiento y conocimiento de las propiedades de los ecosistemas terrestres y para el apoyo a la agricultura. Por tanto, se define como radiación neta (R_n), al intercambio neto entre el total de radiación de onda corta y de onda larga que se recibe y que se emite o refleja en una superficie. Este, es el balance de energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre, o bien, el balance entre la radiación neta entrante de onda corta y la radiación neta emitida de onda larga (Cristóbal *et al.*, 2009).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

8.4.2.- Flujo de Calor del Suelo.

Este flujo representa el transporte vertical de calor, a través del proceso de conducción de las capas superiores del suelo hacia las capas más profundas, en período diurno y de forma inversa en los períodos nocturnos. El flujo de calor del suelo es altamente dependiente de las condiciones climáticas y consecuentemente de las condiciones de superficie (seca o húmeda expuesta a vegetación). La estimación de esta variable por el modelo SEBAL está determinada por la relación empírica propuesta por (Bastiaanssen, 1995), en esta se calcula primeramente la razón R_n/G y las características de la vegetación pueden ser determinadas por los índices de vegetación ($NDVI$ y $SAVI$) y el índice de área foliar (LAI).

8.4.3.- Flujo de Calor Sensible.

Es la transferencia hidrodinámica del calor del aire, sobre todo por convección, entre la superficie del suelo y las capas de aire cercano a ella. Esta transferencia ocurre fundamentalmente por la diferencia de temperatura entre la superficie y la atmósfera.

El modelo SEBAL estima el flujo de calor sensible del aire usando la ecuación propuesta por (Brutsaert, 1982), relaciona la diferencia de la temperatura aerodinámica y la temperatura del aire, los valores

observados de viento, la resistencia aerodinámica para el transporte de calor sensible entre la superficie y la altura de referencia, en un proceso iterativo. El método SEBAL considera la diferencia de temperatura entre dos niveles próximos a la superficie.

8.4.4.- Temperatura del Aire.

La radiación solar absorbida por la atmósfera y el calor emitido por la tierra elevan la temperatura del aire. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco (Allen *et al.*, 2006).

8.5.- Metodología para estimar consumo de agua de los cultivos.

8.5.1.- Descarga de la imagen de satélite.

Para desarrollar el modelo SEBAL, requiere de imágenes de satélite que registren radiación visible, infrarroja cercana y termal. Para este procedimiento, se sugiere descargar imágenes “Landsat 8”, estas se pueden descargar gratuitamente en la plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos “USGS”; <http://landsat.usgs.gov/> (Figura 8.2). La descarga comprende un archivo comprimido, el cual está compuesto por

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

numerosos archivos *.tif que corresponde uno a cada banda de información, y también por un archivo *.txt que contiene los metadatos, y también por archivos de baja resolución de vista previa.

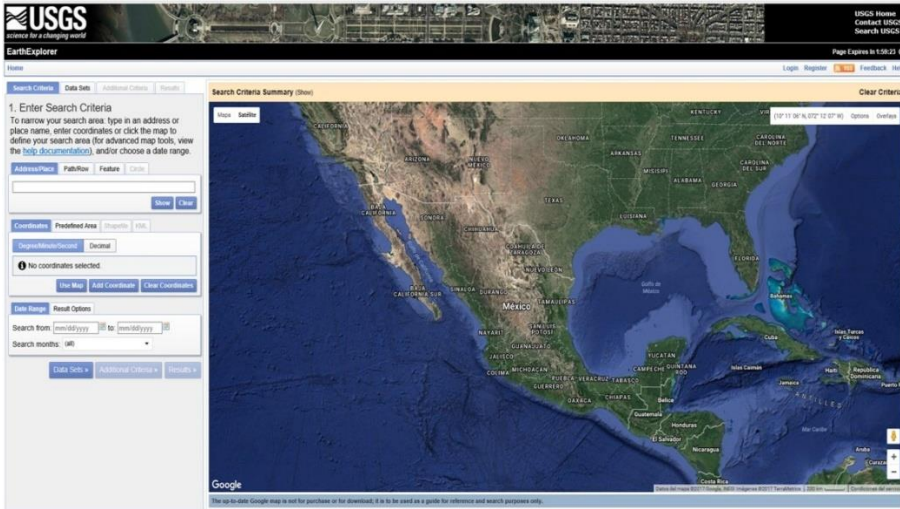


Figura 8.2.- Plataforma del Servicio Geológico de los Estados Unidos “USGS” para descargar imágenes de satélite “Landsat 8”.

El número de imágenes a descargar para estimar las necesidades hídricas, está en función del ciclo vegetativo del cultivo de interés. Cabe recordar que la periodicidad del satélite es de 16 días.

8.5.2.- Obtención de datos meteorológicos.

Para la calibración interna del modelo SEBAL, es indispensable la información de una estación climatológica, la cual debe influir en el área

de interés. Los datos requeridos son: temperaturas máximas y mínimas, velocidad del viento, humedad, radiación solar y precipitación, estos deben estar registrados por lo menos de forma horaria.

8.5.3.- Procesamiento y calibración de las imágenes.

Al implementar el modelo SEBAL es necesario convertir los niveles digitales (DN) de la imagen a parámetros físicos con la finalidad de obtener la radiancia espectral y la reflectancia. Estos representan las bases físicas para el procesamiento de SEBAL y se realizaron mediante el software “QGIS”, este es un Sistema de Información Geográfica (SIG) de código libre, que permite la visualización, edición y análisis de datos geográficos en un entorno amigable.

La radiancia espectral representa la energía solar reflejada por cada pixel, se calcula mediante coeficientes calibrados incluidos en los metadatos de la imagen, aplicando la siguiente ecuación:

$$L_{\lambda} = M_L * Q_{cal} + A_L \qquad \text{Ec. 8.1}$$

Donde L_{λ} es el valor de radiancia espectral medida en valores de ($\text{Watts.m}^{-2} \cdot \text{srad}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$); M_L es el factor multiplicativo de escalado específico obtenido del metadato de la imagen; Q_{cal} es el producto

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

estándar cuantificado y calibrado por valores de pixel (niveles digitales); A_L es el factor aditivo de escalado específico obtenido también del metadato.

La reflectancia representa la proporción de energía reflejada con respecto al total de energía incidente, primero se calcula la reflectancia en la parte superior de la atmósfera, usando los coeficientes de reflectancia reescalados, suministrados en los metadatos, debido a que el cálculo de la reflectancia real de una superficie varía dependiendo del comportamiento de la atmósfera, así como del ángulo de observación se aplica la corrección del ángulo solar para obtener la reflectancia real, esta se determina con la siguiente ecuación:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\vartheta_{SZ})} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\vartheta_{SE})} \quad \text{Ec. 8.2}$$

Donde $\rho\lambda$ es la reflectancia; $\rho\lambda'$ es el valor de reflectancia planetaria, sin corrección por ángulo solar; ϑ_{SE} es el ángulo de elevación solar; ϑ_{SZ} es el ángulo zenit solar; $\vartheta_{SZ} = 90^\circ - \vartheta_{SE}$.

8.5.4.- Estimación de la evapotranspiración (ET) mediante el modelo SEBAL.

El modelo SEBAL, calcula un flujo instantáneo de ET en el momento de la captura de la imagen, este flujo es determinado para cada pixel de la imagen como un residual de la ecuación de balance de energía superficial (Allen *et al.*, 2002).

$$\lambda ET = R_n - G - H \quad \text{Ec. 8.3}$$

Donde λET es el flujo de calor latente (w.m^{-2}); R_n es el flujo de radiación neta en la superficie (w.m^{-2}); H es el flujo de calor sensible del aire (w.m^{-2}). Por ende, se calcularon cada uno de sus componentes, en donde la energía consumida por el proceso de ET se estima como el residuo de la ecuación (3).

a) Albedo superficial: este parámetro fue calculado en primera instancia en la parte superior de la atmósfera (α_{toa}), a partir de la reflectancia de las bandas 2 a las 7 de la imagen de “Landsat 8”. Para aplicar el algoritmo SEBAL, fue necesario que los valores fueran referidos a la superficie de la tierra (Núñez, 2009). Por lo tanto, se debe corregir mediante la transmisividad atmosférica (τ_{sw}), la cual varía en función de la altura sobre el nivel medio del mar. Una vez obtenidos los valores para (τ_{sw}) y α_{toa} se utiliza la siguiente ecuación para calcular el albedo en la superficie (Allen *et al.*, 2002).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{path_radiance}}{\tau_{sw}^2} \quad Ec. 8.4$$

Donde $\alpha_{path_radiance}$ es la fracción media de la radiación solar entrante a través de todas las bandas que es retro-dispersada hacia el satélite antes de alcanzar la superficie de la tierra. Este tiene valores entre el rango de 0.025 y 0.04 para el uso de SEBAL es recomendado emplear el valor de 0.03 (Bastiaanssen, 2000); τ_{sw} es la transmisividad atmosférica, esta se calcula según, (Allen *et al.*, 2006):

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \times 10^{-5} * z \quad Ec.8.5$$

z es la elevación sobre el nivel del mar (m).

En el Cuadro 8.2 se presentan los valores típicos del albedo superficial, donde se observa un rango para superficie con cultivos agrícolas de 0.14 a 0.22.

Cuadro 8.2.- Valores típicos del albedo superficial, (Fuente: Allen *et al.*, 2002).

Tipo de Superficie	Valor mínimo	Valor máximo
Nieve	0.80	0.85
Suelo negro	0.08	0.14
Pasto	0.15	0.25

Campos de Maíz	0.14	0.22
Campos de Arroz	0.17	0.22
Bosques	0.10	0.15
Agua	0.025	0.348

b) Índices de vegetación: los índices de vegetación son utilizados con el fin de resaltar las características de la vegetación sana y desarrollada frente al suelo. Los utilizados en esta metodología son: NDVI, SAVI, y LAI.

El índice de vegetación normalizado “*NDVI*” se calculó a partir de la información obtenida por las bandas del rojo y del infrarrojo cercano (Rouse, 1974), mediante la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(IRC - R)}{(IRC + R)} \quad Ec.8.6$$

Donde *IRC* es la reflectividad en el infrarrojo cercano; *R* corresponde a la reflectividad en el rojo.

El "*NDVI*" varía su valor entre -1 y 1, donde un valor de 0 indica un área de suelo desnudo, mientras que un valor cercano a 1, indica la concentración más alta de hojas verdes en una aérea determinada.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

El índice "SAVI" se utiliza con el fin de disminuir las alteraciones presentadas en los valores del "NDVI" en zonas de escasa vegetación (Huete, 1988), y se calcula como:

$$SAVI = \frac{(1 + 0.5)(IRC - R)}{(0.5 + IRC + R)} \quad Ec. 8.7$$

Para determinar el índice del área foliar "LAI" se utiliza el valor de "SAVI", para calcular la biomasa de cada píxel y es utilizado para estimar la emisividad de la superficie. Este índice es una cantidad adimensional que caracteriza el dosel de las plantas, este es definido como el área de la hoja verde de un solo lado por unidad de área de superficie del suelo en el dosel de la hoja ancha (Velasco y Bernabé, 2004) y se calcula como:

$$LAI = \frac{\ln\left(\frac{0.69 - SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad Ec. 8.8$$

c) Emisividad de la superficie: el cálculo de la emisividad térmica de la superficie (ε_o) se determina en función del índice del área foliar (LAI) de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\varepsilon_o = 0.95 + 0.01 * LAI \quad \text{Ec.8.9}$$

d) **Conversión a temperatura de brillo:** para realizar este procedimiento, es necesario tener los valores de radiancia de las bandas térmicas, se aplica la siguiente ecuación basado en la función de Planck's:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad \text{Ec. 8.10}$$

Donde las constantes térmicas K_1 y K_2 son coeficientes determinados para cada longitud de onda, de cada sensor, estos valores se encuentran en los metadatos; L_λ es el valor de radiancia espectral de cada longitud de onda.

e) **Conversión de temperatura de brillo a temperatura superficial:** la conversión se realiza con la siguiente ecuación propuesta por (Kosa, 2011):

$$T_s = \frac{T}{\varepsilon_o^{0.25}} \quad \text{Ec. 8.11}$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Donde T_s es la temperatura superficial; T es la temperatura de brillo; ε_0 es la emisividad de superficie.

f) Coefficiente de rugosidad de la superficie: este coeficiente corresponde a la altura de vegetación por sobre el plano desplazado definido como cero, que corresponde al plano en donde la velocidad del viento es cero, cuando la cubierta vegetal termina (Núñez, 2009). SEBAL estima este coeficiente usando la siguiente relación empírica propuesta por (Bastiaanssen, 2000).

$$Z_{om} = e^{\left[\left(a \cdot \frac{NDVI}{\alpha}\right) + b\right]} \quad \text{Ec. 8.12}$$

Donde a y b son constantes de correlación derivados de la gráfica $\ln(Z_{om})$ y $NDVI/\alpha$.

Para realizar la gráfica se debe seleccionar una serie de pixeles, luego se asocian sus valores de "NDVI" y albedo para finalmente estimar una aproximación de Z_{om} usando la siguiente ecuación (Tasumi, 2003):

$$Z_{om} = 0.12 * LAI \quad \text{Ec. 8.13}$$

g) Radiación neta (R_n): El flujo de radiación neta en la superficie (R_n), representa la energía radiante real disponible en la superficie. Se

calcula restando todos los flujos radiantes emitidos de todos los flujos radiantes incidentes:

$$R_n = R_{s\downarrow} - \alpha R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_0)R_{L\downarrow} \quad \text{Ec.8.14}$$

Donde R_n es el flujo de radiación neta en la superficie (w.m^{-2}); $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente; α es el albedo de la superficie; $R_{L\downarrow}$ es la radiación de onda larga incidente (w.m^{-2}); $R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga emitida (w.m^{-2}); ε_0 es la emisividad térmica de la superficie.

i) *Radiación de onda corta incidente* ($R_{s\downarrow}$). Es el flujo de radiación solar directa y difusa que en realidad alcanza la superficie de la tierra (w.m^{-2}), se calcula asumiendo condiciones del cielo despajado según (Bisht *et al.*, 2005):

$$R_{s\downarrow} = G_{sc} * \cos\theta * d_r * \tau_{sw} \quad \text{Ec. 8.15}$$

Donde $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente; G_{sc} es la constante solar atmosférica (1367 w.m^{-2}); θ es el ángulo cenital solar (ángulo cenital = $90 - \text{ángulo de elevación solar}$); d_r es la distancia entre la tierra y el sol, en unidades astronómicas; τ_{sw} corresponde a la transmisividad atmosférica.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

ii) *Radiación de onda larga emitida* ($R_{L\uparrow}$). Es el flujo de radiación térmica emitida por la superficie de la tierra a la atmósfera (w.m^{-2}), esta se determina utilizando la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 * \sigma * T_s^4 \quad \text{Ec. 8.16}$$

Donde $R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga emitida; ε_0 es la emisividad térmica de la superficie; σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ w.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$); T_s es la temperatura superficial ($^{\circ}\text{K}$).

iii) *Radiación de onda larga incidente* ($R_{L\downarrow}$). Es el flujo de radiación térmica que entra desde la atmósfera, la cual se calcula utilizando nuevamente la ecuación de Stefan-Boltzmann:

$$R_{L\downarrow} = \sigma * \varepsilon_a * T_a^4 \quad \text{Ec. 8.17}$$

Donde $R_{L\downarrow}$ es la radiación de onda larga incidente; σ es la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} \text{ w.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$); ε_a es la emisividad atmosférica (adimensional); T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{K}$), se puede utilizar también la T_s registrada en el pixel más frío (T), en la zona de estudio (Allen *et al.*, 2002).

Para estimar la ε_a se aplica la ecuación empírica desarrollada por (Bastiaanssen, 1995):

$$\varepsilon_a = 0.85 * (-Ln\tau_{sw})^{0.09} \quad \text{Ec. 8.18}$$

Donde ε_a es la emisividad atmosférica (adimensional); T_{sw} corresponde a la transmisividad atmosférica calculada en la ecuación (8.5).

h) Flujo de calor del suelo (G): el flujo de calor de suelo es derivado del gradiente térmico de la capa superior del suelo, este gradiente varía con la cubierta vegetal y el índice de área foliar, por otra parte, la temperatura superficial y el gradiente térmico en la capa superior del suelo reaccionan a la radiación neta. Esto permite calcular el flujo de calor del suelo a través de la relación G/R_n usando la ecuación empírica desarrollada por (Bastiaanssen, 2000):

$$\frac{G}{R_n} = \frac{(T_s - 273.15)}{\alpha} (0.0038\alpha + 0.0074\alpha^2)(1 - 0.98NDVI^4) \quad \text{Ec. 8.19}$$

Donde T_s es la temperatura superficial (°K); α es el albedo de la superficie; $NDVI$ es el índice de vegetación de diferencia normalizado.

i) Flujo de calor sensible del aire (H): es la tasa de pérdida de calor del aire por convección y conducción, debido a una diferencia de

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

temperatura. El flujo de calor sensible es la variable más difícil de estimar en el algoritmo SEBAL ya que esta depende de la resistencia aerodinámica. Este parámetro es calculado con la ecuación descrita por (Allen *et al.*, 2002):

$$H = \frac{(\rho * C_p * dT)}{r_{ah}} \quad \text{Ec. 8.20}$$

Donde ρ es la densidad del aire (kg.m^{-3}); C_p es la capacidad de calor específico del aire, su valor equivale a ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); dT es la diferencia de temperaturas entre dos alturas ($T_1 - T_2$) entre dos alturas (z_1 y z_2); r_{ah} es la resistencia aerodinámica para el transporte de calor sensible entre la superficie y la altura de referencia (s.m^{-1}). Este parámetro se calcula con la siguiente ecuación:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u_* * k} \quad \text{Ec. 8.21}$$

Donde z_1 y z_2 son las alturas en metros sobre la superficie, generalmente son utilizados z_1 igual a 0.1 m cercano al suelo y z_2 igual a 2.0 m altura de la vegetación (Bastiaanssen, 1995); k es la constante de Von Karma (0.41); u_* es la velocidad de fricción (m.seg^{-1}).

La velocidad de fricción (u_*), se calcula usando el perfil logarítmico del viento para la condición de estabilidad neutral:

$$u_* = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)} \quad \text{Ec. 8.22}$$

Donde k es la constante de Von Karma (0.41); u_{200} es la velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{seg}^{-1}$) a una altura de 200 m; z_{om} es el coeficiente de rugosidad (m).

El cálculo de la velocidad del viento a una altura de 200 m, donde se asume que los efectos de la rugosidad de la superficie son despreciables, es calculado mediante la expresión:

$$u_{200} = \frac{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)}{k} \quad \text{Ec. 8.23}$$

Donde u_* es la velocidad de fricción en la estación meteorológica; k es la constante de Von Karma (0.41); z_{om} es el coeficiente de rugosidad (m).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Para el cálculo de la resistencia aerodinámica r_{ah} , se requiere una serie de iteraciones para determinar el valor de r_{ah} , el cual considere los impactos de la inestabilidad atmosférica. Para calcular el valor inicial de r_{ah} suponiendo condiciones atmosféricas neutrales se utiliza la ecuación (8.21). Para determinar la diferencia de temperatura cerca de la superficie dT , para cada pixel se asume una relación lineal entre dT y T_s (Bastiaanssen, 1995):

$$dT = b + aT_s \quad \text{Ec. 8.24}$$

Donde T_s es la temperatura superficial; a y b son coeficientes de correlación. Para definir estos coeficientes, SEBAL utiliza dos pixeles “ancla”. Estos son denominados como “pixel frío” y “pixel caliente”. El pixel frío se selecciona con una superficie de cultivo con cobertura completa y bien irrigada en donde se supone que la temperatura de la superficie y el aire son similares. El pixel caliente se selecciona como un campo seco, de suelo desnudo, donde se supone que la ET es cero.

Según (Bastiaanssen, 1995), se asume que en el pixel frío la $ET = R_n - G$, (es decir, que toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua, de modo que H es igual a cero. Algunas características que se tienen en cuenta a la hora de seleccionar el pixel frío, es que represente

una zona agrícola, que tenga un LAI alrededor de 3, que el albedo superficial este en un rango de 0.22 a 0.24.

Las características para la selección del pixel “caliente”, recomendadas por (Bastiaanssen, 1995), es que este ubicado en un campo agrícola que presente suelo desnudo, donde se supone que ET es igual a cero, el índice LAI este en un rango de 0 a 0.4.

El flujo de calor sensible en el pixel frío se define como, (Allen *et al.*, 2002):

$$H_{(frío)} = R_n - G - \lambda ET_{frío} \quad Ec. 8.25$$

Según estudios realizados por (Allen *et al.*, 2002), en campos agrícolas con condiciones de cobertura vegetal densa y bien irrigados tienen aproximadamente la ET un 5% mayor que la ET de referencia (ET_r), por lo tanto $ET_{frío}$ se calcula como:

$$H_{(frío)} = 1.05 * ET_r \quad Ec. 8.26$$

De esta forma se obtiene una nueva ecuación para determinar $H_{(frío)}$:

$$H_{(frío)} = R_n - G - 1.05\lambda ET_r \quad Ec. 8.27$$

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Donde R_n es la radiación neta calculada con la ecuación (8.14), presentada en el “pixel frío”; G es el flujo de calor del suelo estimada mediante la ecuación (8.19), que presenta el “pixel frío”; λ es el calor latente de vaporación (J.kg^{-1}), que representa el calor absorbido cuando un kilogramo de agua se evapora. Se calcula como:

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad \text{Ec. 8.28}$$

Con el cálculo de los parámetros anteriores, se estima dT en el “pixel frío” utilizando la inversa de la ecuación (8.20):

$$dT_{frio} = \frac{H_{frio} * r_{ahfrio}}{\rho_{frio} * C_p} \quad \text{Ec. 8.29}$$

Donde H_{frio} es el flujo de calor sensible en el “pixel frío” ecuación (8.25); r_{ahfrio} es la resistencia aerodinámica para el transporte de calor en el “pixel frío” ecuación (8.21); C_p es la constante de capacidad de calor específico del aire ($1004 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$); ρ corresponde a la densidad del aire en el “pixel frío”.

La densidad del aire es determinada por las ecuaciones normales de presión atmosférica y la ley universal de los gases (Allen *et al.*, 1998):

$$\rho_{air} = \frac{1000P}{1.01(T_s - dT)R} \quad \text{Ec. 8.30}$$

Donde ρ_{air} es la densidad del aire; R es la constante de gas específico ($287 \text{ J.kg}^{-1}\text{K}^{-1}$); $(T_s - dT)$ corresponde a la temperatura del aire cerca de la superficie en el pixel; P es la medida de la presión atmosférica para la elevación del pixel que es calculada como una función exponencial (The Environmental and Water Resources Institute of the American Society of Civil Engineers “ASCE-EWRI”, 2005):

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. 8.31}$$

Donde 293 es la temperatura del aire estándar ($^{\circ}\text{K}$), usada por EWRI en la estandarización de la ET ; z es la altura sobre el nivel del mar.

Para la estimación del flujo de calor sensible en el pixel caliente, se tiene en cuenta el supuesto que en un campo agrícola sin vegetación o seco la ET es igual a cero. Teniendo como resultado:

$$H_{caliente} = R_{n(caliente)} - G_{(caliente)} \quad \text{Ec. 8.32}$$

Donde $R_{n(caliente)}$ y $G_{(caliente)}$, son los valores de radiación neta y flujo de calor del suelo estimado para el “pixel caliente”. Análogamente se calcula la diferencia de temperatura cerca de la superficie para el “pixel caliente”, utilizando la ecuación (8.29).

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Teniendo finalmente los valores dT para cada uno de los pixeles ancla y con ayuda de una hoja de cálculo, se gráfica los valores de dT_{frio} en relación con T_{sfrio} y $dT_{caliente}$ en relación con $T_{scaliente}$. El resultado obtenido es similar a la Figura 8.3.

Con la ecuación de la recta resultante, se tienen los coeficientes a y b , resultado de la relación lineal $dT = b + aT_s$. El diferencial de temperatura (dT) para cada pixel de la imagen se puede calcular usando los coeficientes a y b y la imagen de temperatura superficial (T_s), con este resultado se tiene una aproximación para la temperatura del aire:

$$T_a = T_s - dT \qquad \text{Ec. 8.33}$$

Donde T_s es la temperatura superficial y dT es la diferencia de temperatura estimada con la ecuación (8.29).

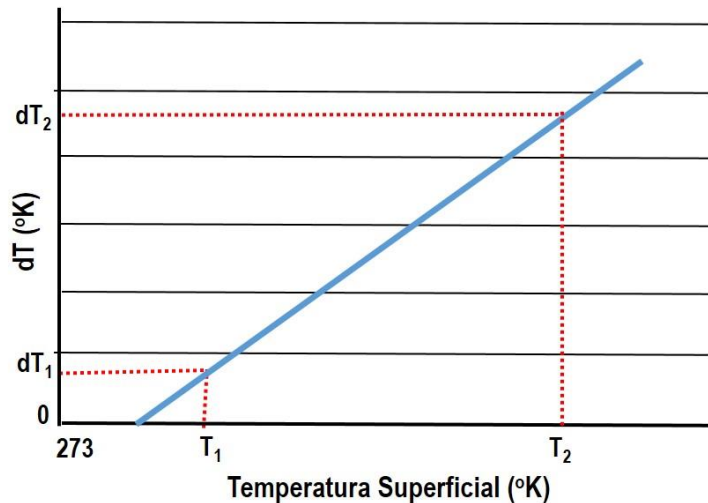


Figura 8.3.- Gráfico de la diferencia de temperatura cerca de la superficie (dT) en relación a la temperatura superficial (T_s). Fuente: (Allen *et al.*, 2002).

Se puede calcular la primera estimación de H , para cada pixel suponiendo condiciones atmosféricas neutrales utilizando la ecuación (8.20).

j) Flujo de calor latente (LE) y ET instantánea: es la cantidad de calor perdido por la superficie debido a la gran evapotranspiración. Este parámetro se puede calcular para cada pixel de la imagen como un residuo del balance de energía. Siendo λET un valor instantáneo para el momento en que el satélite toma la imagen ($w \cdot m^{-2}$). Un valor instantáneo de ET está dado por (Bastiaanssen, 2002):

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

$$ET_{inst} = 3600 \frac{\lambda ET}{\lambda} \quad Ec. 8.34$$

Donde ET_{inst} es el valor instantáneo de la evapotranspiración (ET); el término 3600 es para expresar ET en ($\text{mm}\cdot\text{hr}^{-1}$); λ es el calor latente de vaporación ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}$).

k) Fracción de ET de referencia (ET_rF): esta fracción se obtiene mediante la relación entre la evapotranspiración instantánea (ET_{inst}) calculada y la evapotranspiración de referencia (ET_r) (Bastiaanssen *et al.*, 2002):

$$ET_rF = \frac{ET_{inst}}{ET_r} \quad Ec. 8.35$$

La ET_rF es un término equivalente al coeficiente del cultivo K_c , se utiliza para extrapolar el valor de la ET instantánea estimada en el momento de la toma de la imagen a 24 horas o períodos más largos.

l) Evapotranspiración Diaria (ET_{24}): los valores de ET diaria son a menudo más útiles que los valores de ET instantánea, con el fin de tener valores de ET diaria se asume que la ET_rF se mantiene aproximadamente constante durante las 24 horas del día (Shuttleworth *et al.*, 1989; Brutsaert, 1992). Con esta condición la ET_{24} se calcula con la siguiente ecuación:

$$ET_{24} = ETrF * ETr_{24} \quad \text{Ec. 8.36}$$

Donde $ETrF$ es la fracción de ETr y ETr_{24} es la evapotranspiración de referencia acumulada para el día de la imagen.

m) Evapotranspiración acumulada o mensual: El cálculo de la ET_{24} proporciona una buena indicación de su distribución espacial en el sistema de riego. Sin embargo, estos valores son representativos para la fecha específica de la imagen, por esta razón cuando se quiere hallar valores de ET_{acum} es necesario aplicar la metodología propuesta por (Tasumi *et al.*, 2000), donde se obtienen los valores de ET_{acum} por medio del cálculo de los valores diarios de la evapotranspiración de referencia (ETr) para todo el período de interés, utilizando el método de Penman-Monteith y los datos de estaciones meteorológicas. De esta forma se tiene la ecuación:

$$ET_{acum} = \sum(ET_{24}) \left(\frac{ETrF_{acum}}{ETr_{24}} \right) \quad \text{Ec. 8.37}$$

8.5.5.- Generación de mapas en el software “QGIS”.

En el software “QGIS” se generarán los mapas temáticos de los parámetros determinados en el modelo SEBAL. Este software ofrece crecientes capacidades de diseño e impresión, permite añadir elementos a la vista, como: etiquetas de texto, imágenes, leyendas, barras de escala,

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

formas básicas, flechas, tablas de atributos, etc. La finalidad de los mapas es observar la variabilidad espacial de los parámetros de estudio en el área o parcelas de interés.

8.6.- Caso de estudio: Estimación de consumo de agua en maíz forrajero mediante imágenes de satélite Landas 8.0 y modelo SEBAL.

La estimación de consumo de agua de maíz forrajero, se efectuó en una unidad de producción agropecuaria ubicada geográficamente a una latitud norte de 25° 37'56.9" y una longitud oeste de 103° 20'30.1" a una altura de 1118 msnm (Figura 8.4). El maíz forrajero se sembró el 26 de marzo y se cosecho el 29 de julio del ciclo primavera – verano 2017, cumpliendo un ciclo vegetativo de 124 días. La densidad de siembra fue de aproximadamente 105 mil plantas por hectárea (estableciendo ocho plantas por metro y espaciamiento entre surcos de 76 cm). La textura del suelo del área de estudio es franco-arcilloso.

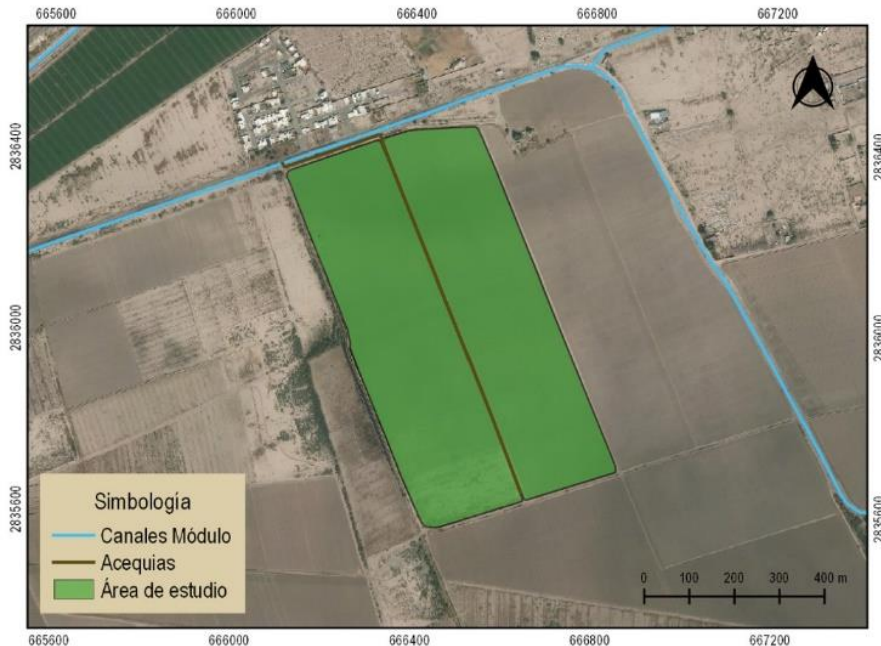


Figura 8.4.- Área de estudio ubicado en la Región Lagunera de Coahuila, dispone de una superficie de 45 has con sistema de riego por gravedad.

Para desarrollar el modelo SEBAL, se utilizaron seis imágenes de satélite “Landas 8” adquiridas por sensores “OLI” y “TIR”, estas se descargaron desde la plataforma de la USGS (<http://landsat.usgs.gov/>). La denominación de las imágenes fueron 30 en Path (franja vertical) y 42 en Row (fila horizontal). En el Cuadro 8.3 se presentan las fechas de las imágenes descargadas para cubrir el ciclo vegetativo del maíz forrajero. Cabe mencionar que no fue posible procesar la imagen del 14 de julio por nubosidad en el área de estudio.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 8.3.- Fechas de las imágenes de satélite “Landsat 8” descargadas para estimar el consumo de agua en maíz forrajero.

Fecha de imagen	Días Después de Siembra (DDS)
25 abril 2017	29
11 mayo 2017	45
27 mayo 2017	61
12 junio 2017	77
28 junio 2017	93
30 julio 2017	125

DDS = Días después de la siembra

En el Cuadro 8.4 se presentan los datos climáticos promedio registrados por la estación climatológica del Campo Experimental La Laguna, perteneciente a la red de estaciones meteorológicas del INIFAP, la cual se ubicaba cerca del área de estudio. La información climática se adquirió durante todo el ciclo vegetativo del maíz forrajero (marzo – julio), y fue importante para la calibración interna del modelo SEBAL.

Cuadro 8.4.- Variables climáticas promedio utilizadas para la calibración del modelo SEBAL durante el período marzo-julio 2017.

Mes	Tem. Max. (°C)	Tem. Min. (°C)	Tem. Prom. (°C)	Hum. Relativa (%)	Rad. Solar (w.m ⁻²)	Vel. Viento (km.hr ⁻¹)	Precipitación Acum. (mm)
Marzo	29.6	11.4	20.9	32.2	519.3	2.3	23.6
Abril	33.3	14.8	24.7	21.8	576.0	2.9	0.0
Mayo	35.4	18.5	27.6	24.2	568.5	3.2	2.2
Junio	35.9	21.8	29.6	29.4	611.9	3.1	0.0
Julio	34.2	21.7	27.7	42.1	565.8	2.9	38.2

Tem. = temperatura; Max. = máxima; Min. = mínima; Prom. = promedio; Hum. = humedad; Rad. = radiación; Vel. = velocidad; Acum. = acumulada.

Después de convertir los niveles digitales (DN) de la imagen a parámetros físicos para obtener la radiancia espectral y la reflectancia, se procedió a calcular el albedo superficial y los índices de vegetación: *NDVI*, *SAVI* y *LAI* mediante las ecuaciones descritas anteriormente en la metodología. En el Cuadro 8.5 se observa que los menores valores de albedo superficial se presentaron a los 77 y 93 DDS, cuando el maíz se encontraba en la etapa de mediados o maduración. Por tanto, los valores de albedo disminuyen cuando existe mayor cobertura vegetal. Con referencia a los índices de vegetación, sus máximos valores se presentaron en la etapa de maduración del cultivo (93 DDS).

Cuadro 8.5.- Valores estimados de albedo superficial e índices de vegetación del maíz forrajero mediante uso de imágenes de satélite “Landsat 8” y software “QGIS”.

Fecha de imagen	(DDS)	Albedo Sup (Adim)	<i>NDVI</i>	<i>SAVI</i>	<i>LAI</i>
25 abril 2017	29	0.26	0.37	0.25	0.33
11 mayo 2017	45	0.24	0.62	0.40	0.77
27 mayo 2017	61	0.23	0.71	0.54	1.48
12 junio 2017	77	0.18	0.73	0.58	1.84
28 junio 2017	93	0.18	0.77	0.60	2.13
30 julio 2017	125	0.32	0.51	0.38	0.70

Sup = superficial; Adim = adimensional.

En la Figura 8.5 se presentan los mapas del índice de vegetación *NDVI* a los 29, 45, 93 y 125 DDS. Los rango de valores de *NDVI* que se presentaron durante todo el ciclo vegetativo del maíz fue de 0.15 a 0.77; por lo que, no exhibió valores cercanos a uno (+1), lo que indica que el

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

cultivo no presentó un desarrollo potencial por diferentes causas, como: estrés hídrico, deficiencia de nitrógeno, problemas de salinidad y sodicidad, presencia de plagas y enfermedades, etc. Esto se confirma por el bajo índice de área foliar registrado en la etapa de maduración.

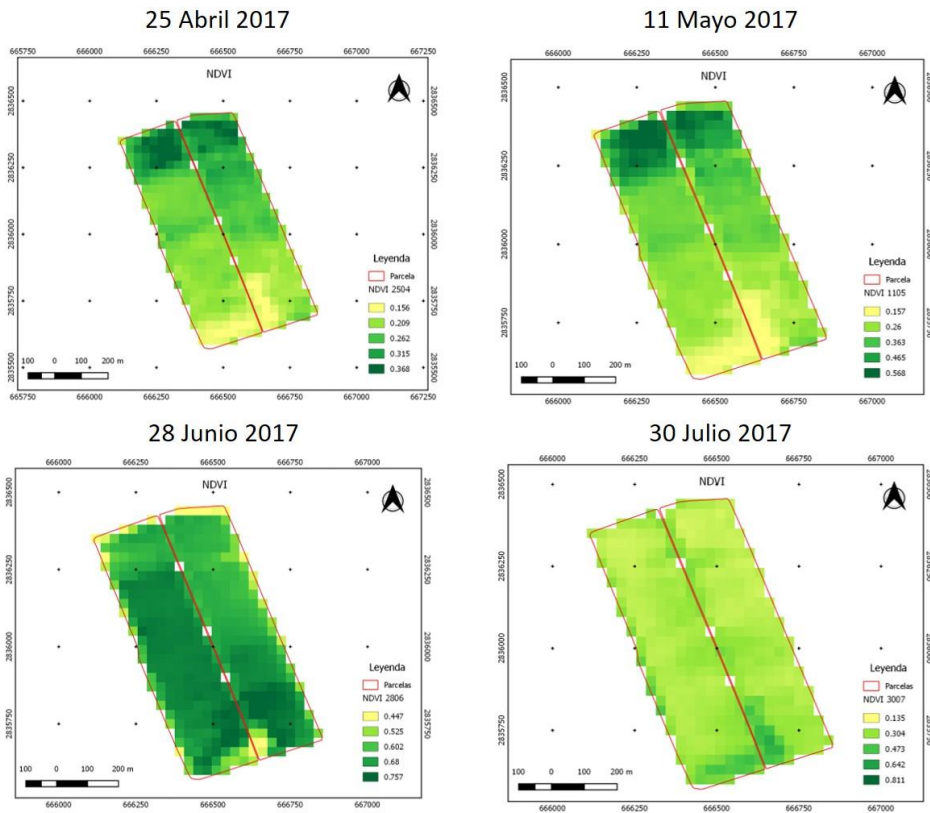


Figura 8.5- Mapa del índice de vegetación *NDVI* del maíz forrajero durante los 29, 45, 93 y 125 DDS.

En el Cuadro 8.6 se presentan los resultados de la estimación de la temperatura superficial, la cual se realizó en base a la función de Planck's, los valores mínimos de temperatura se presentan a los 93 DDS, en la etapa de maduración del cultivo, donde presenta el mayor índice de área foliar. (Murillas y Londoño, 2014) menciona que las bajas temperaturas superficiales se presentaron en áreas con mayor vegetación y las altas temperaturas en las zonas urbanas y suelos desnudos.

Cuadro 8.6.- Rango de valores estimados de temperatura superficial mediante imágenes "Landsat 8" y modelo de balance de energía SEBAL.

Fecha de imagen	(DDS)	Valor Mín. Temp. Sup. (°K)	Valor Max. Temp. Sup. (°K)	Valor Prom. Temp. Sup. (°K)
25 abril 2017	29	321.7	326.3	324.9
11 mayo 2017	45	307.6	320.9	317.7
27 mayo 2017	61	308.0	312.9	309.9
12 junio 2017	77	303.5	307.3	304.3
28 junio 2017	93	297.4	300.9	298.4
30 julio 2017	125	303.9	305.4	304.7

Max. = máximo; Mín. = mínimo; Prom. = promedio.

En el Cuadro 8.7 se presentan los rangos de los valores estimados de radiación neta (R_n), flujo de calor de suelo (G) y flujo de calor sensible del aire (H) durante el ciclo vegetativo del maíz forrajero. Los valores más altos de R_n corresponden a las imágenes del 12 y 28 de junio, cuando el maíz se encontraba en la etapa de mediados o maduración, en esta etapa

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

el cultivo presenta mayor índice de área foliar. (Barbosa *et al.*, 2005), obtiene a través de SEBAL valores de R_n entre 430 y 700 w.m^{-2} ; donde los valores más bajos se presentaron en zonas en suelos descubiertos, en contraste los valores más altos, se presentaron en zonas en buena cobertura vegetal y cultivos de algodón recién irrigados. El flujo de calor de suelo (G), los valores más bajos se presentaron en la imagen del 28 de junio (93 DDS), esto se debe, a que el maíz presentaba mayor índice de área foliar. Por lo tanto, menor fue el flujo de calor de suelo. (Albhaisi, 2004) reportó estimaciones similares, donde los valores más bajos correspondieron a zonas con pastizales naturales, bosques y cobertura con vegetación densa, los valores medios recayeron a cuerpos de agua y los valores más altos a zonas urbanas y suelos desnudos. Con respecto, al flujo de calor sensible del aire (H) se estimaron valores durante todo el ciclo vegetativo de 226.3 a 338.2 w.m^{-2} . El mayor valor de H se presentó un día después de la cosecha de maíz. (Castañeda, 2013) reportó rango de valores de H de 37 a 420 w.m^{-2} en una región del Distrito de Riego Yaqui (Sonora, México), donde los valores más altos se presentaron en zonas de suelo desnudo y los valores más bajos se identificaron en zonas con mayor cobertura del cultivo.

Cuadro 8.7.- Rango de valores estimados de radiación neta, flujo de calor de suelo y flujo de calor sensible del aire mediante imágenes “Landsat 8” y modelo SEBAL.

Fecha de imagen	(DDS)	R_n ($w.m^{-2}$)	G ($w.m^{-2}$)	H ($w.m^{-2}$)
25 abril 2017	29	406.5 -	130.9 -	297.2 -
		543.6	140.8	324.1
11 mayo 2017	45	434.2 -	106.4 -	269.9 -
		723.9	139.9	358.9
27 mayo 2017	61	459.6 -	95.4 - 124.6	276.5 -
		672.3		279.1
12 junio 2017	77	644.9 -	79.1 - 99.3	226.3 -
		719.6		249.5
28 junio 2017	93	645.9 -	58.5 - 90.3	254.7 -
		719.4		280.6
30 julio 2017	125	479.2 -	96.9 - 102.4	325.1 -
		620.2		338.2

En el Cuadro 8.8 se presenta una comparación de la evapotranspiración instantánea calculada por el algoritmo SEBAL y la estimada por el método de Penman Monteith de la estación climatológica del Campo Experimental La Laguna, la cual se encuentra cerca del área de estudio. La estimación de la evapotranspiración por el algoritmo SEBAL se realizó con cinco imágenes de satélite, las cuales cubrieron la mayor parte del ciclo vegetativo. Cabe mencionar que no fue posible procesar la imagen del 14 de julio por nubosidad. La comparación entre ambos métodos presentó un error relativo promedio de 13.0%, siendo la primera imagen la que presentó mayor error relativo, durante esa fecha el cultivo tenía 29 días después de la siembra (DDS), la cual estaba terminando la etapa inicial y empezando la etapa de desarrollo de cultivo.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

Cuadro 8.8.- Comparación de la evapotranspiración instantánea calculada por el algoritmo SEBAL y la estimada por una estación climatológica mediante la metodología Penman Monteith.

Fecha de imagen	DDS	<i>ET</i> inst Penman Monteith (mm.hr ⁻¹)	<i>ET</i> inst SEBAL (mm.hr ⁻¹)	Error Absoluto (mm.hr ⁻¹)	Error Relativo (%)
25 abril 2017	29	0.56	0.16	0.40	71.7
11 mayo 2017	45	0.53	0.51	0.02	3.7
27 mayo 2017	61	0.43	0.44	-0.01	-2.2
12 junio 2017	77	0.58	0.60	-0.02	-3.8
28 junio 2017	93	0.56	0.58	-0.02	-4.3

ET inst = evapotranspiración instantánea.

En el Cuadro 8.9 se presentan los rangos de valores estimados del coeficiente de cultivo en maíz forrajero (ET_rF o K_c), a partir de la ecuación (8.34). Para la obtención de este coeficiente, fue importante la estimación horaria de la evapotranspiración de referencia con el método de Penman Monteith, a la hora más próxima que pasó el satélite en el área de estudio (5:22 pm).

Cuadro 8.9- Rango de valores estimados de coeficiente de cultivo en maíz forrajero mediante imágenes “Landsat 8” y modelo SEBAL.

Fecha de imagen	(DDS)	$K_c (K_{cb} + K_e)$ FAO	K_c SEBAL	Diferencia Absoluta (Adim.)	Diferencia Relativa (%)
25 abril 2017	29	0.30	0.28	0.02	6.7
11 mayo 2017	45	0.79	0.96	-0.17	-21.2
27 mayo 2017	61	1.15	1.02	0.13	11.3
12 junio 2017	77	1.16	1.04	0.12	10.3
28 junio 2017	93	1.15	1.04	0.11	9.6

K_c = coeficiente de cultivo; K_{cb} = coeficiente basal del cultivo; K_e = coeficiente de evaporación del suelo; Adim. = adimensional.

En la Figura 8.6 se presentan los mapas del coeficiente de cultivo (K_c) estimados durante el ciclo vegetativo del maíz forrajero, se observa un rango de K_c de 0.28 hasta 1.04, valores muy similares a los reportados en el manual 56 (FAO, 2006), presentando una diferencia relativa entre ambos resultados de 3.3% (Cuadro 8.8).

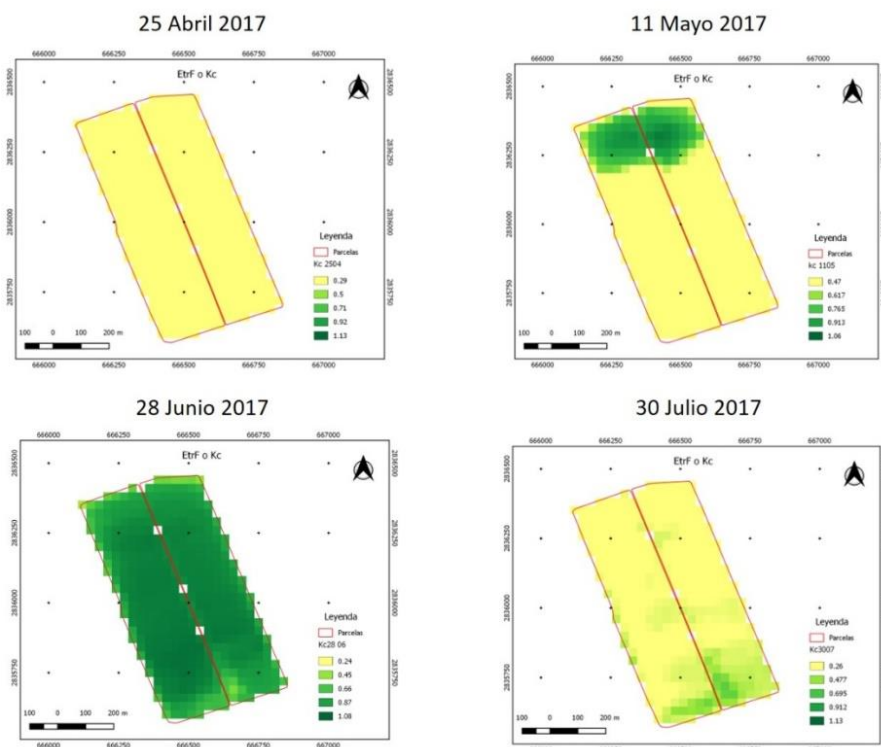


Figura 8.6.- Mapas de coeficiente de cultivo K_c del maíz forrajero durante los 29, 45, 93 y 125 DDS.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

En el Cuadro 8.10 se presenta la comparación de la evapotranspiración real de cultivo diaria calculada por el algoritmo SEBAL y la determinada por el método de Penman Monteith empleando los coeficientes duales ($K_{cb} + K_e$) proporcionados en el manual 56 (FAO, 2006), para este cálculo también se utilizaron los datos climáticos de la estación del Campo Experimental La Laguna. Al igual que la evapotranspiración instantánea se emplearon las mismas cinco imágenes obtenidas por el satélite “Landsat 8” para realizar la estimación de la evapotranspiración real diaria. Esta comparación presentó un error relativo promedio de 7.4%. (García y Llellish, 2011), reportaron un error relativo menor al 10% comparando las mismas metodologías para determinar la evapotranspiración en el Humedal Paraíso – Huacho, Perú.

Cuadro 8.10.- Comparación de la evapotranspiración real de cultivo diaria (24 horas) estimada por el algoritmo SEBAL y la determinada por el método Penman Monteith y coeficientes duales.

Fecha de imagen	DDS	<i>ET_c</i>	<i>ET_c</i>	Error	Error
		$E_{to}^*(K_{cb}+K_e)$ (mm.día ⁻¹)	SEBAL (mm.día ⁻¹)	Absoluto (mm.día ⁻¹)	Relativo (%)
25 abril 2017	29	1.70	1.76	-0.06	-3.4
11 mayo 2017	45	6.30	6.01	0.29	4.6
27 mayo 2017	61	7.30	5.93	1.37	18.8
12 junio 2017	77	6.90	6.43	0.47	6.8
28 junio 2017	93	6.80	6.09	0.71	10.4

En la Figura 8.7 se presentan los mapas de la evapotranspiración real de cultivo estimada a los 29, 45, 93 y 125 DDS. Existiendo variabilidad en los valores en cada imagen procesada. Esto se puede atribuir a factores, como: variabilidad de suelo (características físico-químicas), manejo del riego, presencia de plagas, deficiencia de nitrógeno, etc.

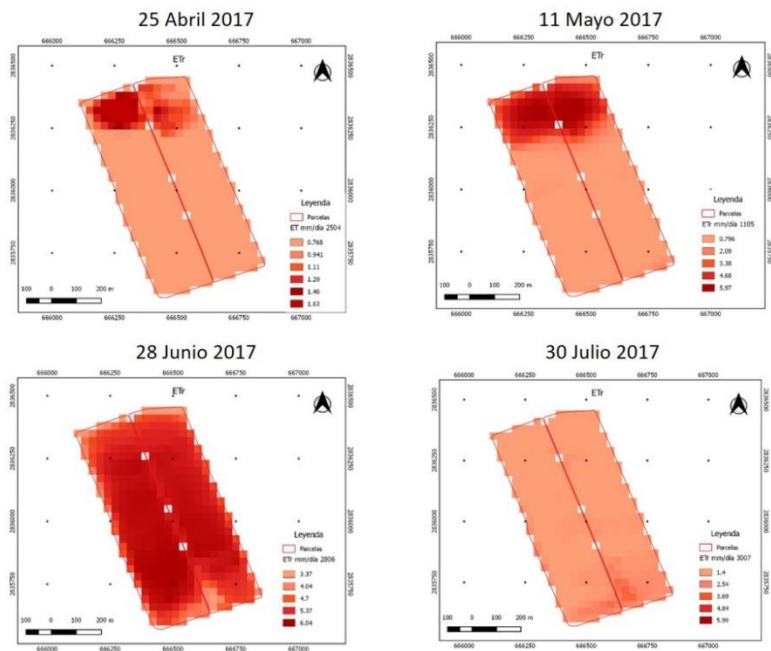


Figura 8.7.- Mapas de evapotranspiración real de cultivo de maíz forrajero durante los 29, 45, 93 y 125 DDS.

La estimación de la evapotranspiración acumulada durante el ciclo vegetativo del maíz forrajero (124 días) por el algoritmo SEBAL fue de 523.3 mm. De igual forma, se realizaron corridas con los softwares

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

“Cropwat 8.0” e “Irrinet” ambos programas calculan el consumo de agua de los cultivos y a su vez generan una programación de riego para optimizar el uso de agua. Estos programas utilizan el método de Penman Monteith y coeficientes duales para estimar la evapotranspiración de cultivo. Los softwares presentaron evapotranspiraciones acumuladas de 459.9 y 517.5 mm respectivamente, comparando estos resultados con la evapotranspiración acumulada calculada por SEBAL, presentó errores relativos de -13.8% con relación al software “Cropwat 8.0” y -0.01% con “Irrinet”. El “Cropwat 8.0” opera con una base de datos climáticos históricos, y la estación se ubica aproximadamente a 25 km del área de interés. Por su parte, el “Irrinet” utiliza datos climáticos de la red de estaciones de INIFAP a tiempo real. Para este caso de estudio, se emplearon los datos de la estación del Campo Experimental La Laguna, eso explica el bajo error relativo de los valores estimados por SEBAL e “Irrinet”. (Koloskov *et al.*, 2007) reportó una diferencia del 3.5% comparando ambos métodos (SEBAL y Penman Monteith con coeficientes duales).

8.7.- Conclusiones.

Con base en los resultados presentados en este capítulo, se puede concluir que es viable la utilización del algoritmo SEBAL para estimar la evapotranspiración real en cultivos forrajeros en sus diferentes conceptos (instantánea, diaria y acumulada).

Este algoritmo permitió la estimación del consumo de agua de maíz forrajero de 523.3 mm equivalentes a 5,233 m³ ha⁻¹. Sin embargo, es necesario realizar pruebas adicionales que permitan seguir evaluando la metodología para ajustar el algoritmo y mejorar su precisión en la estimación del consumo de agua. También se recomienda emplear el modelo SEBAL con imágenes de otros satélites (con mejor resolución) para estimar la evapotranspiración real de los cultivos y comparar sus resultados con los obtenidos con el satélite “Landsat 8”.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

8.8 Bibliografía

1. Aguilera, C. y R. Martínez E. 1996. Relaciones Agua, Suelo, Planta, Atmósfera. 4a ed. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
2. Albhaisi, M. 2004. Estimating Evapotranspiration by Hyperspectral Remote Sensing and GIS of Doode Bemde Wetland, Belgium. Master of Science in Physical Land Resources. Universiteit Gent Vrije Universiteit Brussel Belgium, June. p.61. <http://phylares.vub.ac.be/Thesissen/2004%20Maher%20Albhaisi.pdf>. Fecha: 10 Abril 2014.
3. Allen, R., Perreira, L., Raes, D. y Smith. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. In FAO Irrigation and Drainage Paper 56. 1st ed. Rome, Italy.: FAO. pp.135-56.
4. Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. y W. Bastiaanssen. 2002. SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land. Advance Training and Users Manual. Idaho: a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company University of Idaho.
5. Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M., 2006. Evapotranspiración del Cultivo: Guías para la Determinación de Agua de los Cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje. Roma: FAO Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
6. ASCE- EWRI, 2005. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Phoenix, Arizona, U.S.A: ASCE. <http://www.kimberly.uidaho.edu/water/asceewri/ascestzdetmain2005.pdf>. Fecha: 16 abril 2017.
7. Barbosa, B., Miranda López, G., y Vieira de Azevedo, P. 2005. Balance de Radiación en Areas Irrigadas Utilizando Imagenes LandSat 5 - TM. Revista Brasileira de Meteorología, 20(2), pp.243-52.

8. Bastiaanssen, W. 1995. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: a remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates. Land bouw universiteit te Wageningen, 109, p.273.
9. Bastiaanssen, W., 2000. SEBAL- based Sensible and Latent Heat Fluxes in the Irrigated Gediz Basin, Turkey. Journal of Hydrology, 229(1), pp.87-100.
10. Bastiaanssen, W., Allen, R., Tasumi, M., y R. Trezza. 2002. Surface Energy Balance Algorithms for Land SEBAL. Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual. p. 92.
11. Bisht, G., Venturini, V., Islam, S. y Jiang, L. 2005. Estimation of the Net Radiation Using MODIS (moderate resolution imaging spectroradiometer) Data for Clear Sky Days. Remote Sensing of Environment 97, 97(1), pp.52-67.
12. Brutsaert, W. 1992. Application of self-preservation in the diurnal evolution of the surface energy balance budget to determine daily evaporation. Journal of Geophysical Research.
13. Castañeda, C.R. 2013. Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. Tesis Maestría. Montecillo, México. Colegio de Postgraduados. Institución de enseñanza e investigación en Ciencias Agrícolas.
14. CONAGUA. 2005. Percepción Remota. Fundamentos de teledetección espacial. Comisión Nacional de Agua. Subdirección General de Programación. Subgerencia de Informática y Sistema Geográfico del Agua. <http://siga.conagua.gob.mx/SIGA/Percepcion/Fundamentos%20de%20teledetecci%C3%B3n%20espacial.PDF>. Fecha: 18 septiembre 2017.
15. Cristóbal, J., M. Ninyerola., X. Pons., P. Llorens., y R. Poyatos. 2009. Estimación de la Radiación Neta a Escala Regional Mediante Imágenes de Teledetección y Modelización SIG. Teledetección: Agua y desarrollo sostenible, pp.389-92.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

- <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal98.pdf>. Fecha: 21 Agosto 2017.
16. FAO, 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje. <ftp://ftp.fao.org/agl/aglw/docs/idp56s.pdf>. Fecha: 15 abril 2017.
 17. García, E., y M.A. Llellish. 2011. Estimación espacial de la evapotranspiración mediante imágenes de satélite Landsat y el modelo SEBAL en el humedal Paraíso – Huacho. Proyecto Libro Digital. Encuentro Científico Internacional. Revista ECIPERÚ. Lima, Perú.
 18. Huete, A.R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), pp.295-309.
 19. Iglesias, M. R. 2016. Estimación de evapotranspiración real en trigo con distintas condiciones de estrés hídrico: aplicación de modelos y sensores remotos. Tesis Maestría. Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación. Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina.
 20. Koloskov, G., Mukhamejanov, K., y T. W. Tanton. 2007. Monin-Obukhov length as a cornerstone of the SEBAL calculations of evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 335, p.p. 170 – 179.
 21. Kosa, Preeyaphorn. 2011. The Effect of Temperature on Actual Evapotranspiration based on Landsat 5 TM Satellite Imagery. Thailand: Intech. <http://www.intechopen.com/books/evapotranspiration/the-effect-of-temperature-on-actua-evapotranspiration-based-on-landsat-5-tm-satellite-imagery>. Fecha: 12 noviembre 2013.
 22. Murillas, R., A., y E., A., Londoño, C. 2014. Estimación de la evapotranspiración en cultivos de arroz con sensores remotos. Tesis Licenciatura. Universidad del Valle. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Santiago de Calí. Colombia.

23. NASA. 2013.
http://www.nasa.gov/mission_pages/landsat/main/index.html#.UkMZIn_5NEM. Fecha: 15 junio 2013.
24. Núñez, J., C. M. 2009. Modelación del flujo de calor del suelo y aplicación de algoritmo de cálculo de evapotranspiración mediante teledetección. Tesis Magíster en Ciencias de la Ingeniería. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
25. Rouse, J.W. 1974. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation of Natural Vegetation. Texas: Texas A & M University, Remote Sensing Center.
26. Shuttleworth, W., Gumer, R., Hsu, A., y J. Omsby. 1989. FIFE: the variation in energy partitioning at surface flux sites, remote sensing and large scale global processes. International Association of Hydrological Sciences. p.p. 67 – 74.
27. Tasumi, M., Bastiaanssen, W., y Allen, R. 2000. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and stream flow depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing. Reporte Final. Idaho, USA.: EOSDIS Project Report, Raytheon Systems Company and the University of Idaho, USA.
28. USGS. 2017. Servicio Geológico de los Estados Unidos. <https://landsat.usgs.gov/>. Fecha: 28 marzo 2017.
29. Velasco, E., y Bernabé, R.M., 2004. Emisiones Biogénicas. Primera Edición ed. Ciudad de México D.F., México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales: Instituto Nacional de Ecología.
30. Villagarcía, L., Were, A., García, M., y F. Domingo. 2010. Sensitivity of a clumped model of evapotranspiration to surface resistance parameterisations: Application in a semi-arid environment. Agricultural and Forest Meteorology. p.p. 1068 – 1078.

Técnicas para estimar y monitorear la demanda de agua en los cultivos

31. Villaman, R. P., L. Tijerina C., A. Quevedo N., y G. Crespo Pichardo. 2001. Comporación de métodos micrometeorológicos para estimar evapotranspiración. Revista TERRA. Volumen 19. Número 3. 281-291.

REVISIÓN TÉCNICA

Dr. Leonardo Tijerina Chávez
Posgrado de Hidrociencias – COLPOS Montecillo

Dr. Manuel Antonio Galindo Reyes
Campo Experimental Pabellón

DISEÑO DE PORTADA

MC. Miguel Servín Palestina

CÓDIGO INIFAP

MX-0-310205-13-02-11-06-17

EDICIÓN

ISC. José Israel Casas Flores
MC. Miguel Servín Palestina

COMISIÓN EDITORIAL DEL CEZAC

Presidente: Dra. Raquel K. Cruz Bravo
Secretario: MC. Ricardo A. Sánchez Gutiérrez
Vocal: Dr. Luis R. Reveles Torres
Vocal: Dr. Francisco Gpe. Echavarría Cháirez
Vocal: MC. Mayra Denise Herrera

La presente publicación se terminó de imprimir en el mes de diciembre de 2018 en “Paus” Impresiones, Calle Real del Calvario #125, Col. Real de Calera. C. P. 98500, Calera de V. R., Zacatecas, México.

Tel. (478) 98 5 22 13

Su tiraje constó de 500 ejemplares.

CAMPO EXPERIMENTAL ZACATECAS

DIRECTORIO

Ricardo A. Sánchez Gutiérrez
Director de Coordinación y Vinculación

Dr.	Guillermo Medina García	Agrometeorología y Modelaje
Ing	José Israel Casas Flores	Agrometeorología y Modelaje
MC.	Nadiezhdá Y. Ramírez Cabral	Agrometeorología y Modelaje
Dr.	Alfonso Serna Pérez	Fertilidad de suelos y nutrición vegetal
Dr.	Francisco G. Echavarría Cháirez	Fertilidad de suelos y nutrición vegetal
Ing.	José Ángel Cid Ríos	Frijol y Garbanzo
MC.	Juan José Figueroa González*	Frijol y Garbanzo
MC.	Mayra Denise Herrera	Frijol y Garbanzo
Dr.	Jorge A. Zegbe Domínguez	Frutales
MC	Valentín Melero Meraz	Frutales
Ing.	Manuel Reveles Hernández	Hortalizas
MC.	Miguel Servin Palestina*	Ingeniería de Riego
Dra.	Raquel Cruz Bravo	Inocuidad de Alimentos
MC	Enrique Medina Martínez	Maíz
MC.	Francisco A. Rubio Aguirre	Pastizales y Cultivos Forrajeros
Dr.	Ramón Gutiérrez Luna	Pastizales y Cultivos Forrajeros
Dr.	Luis Roberto Reveles Torres	Recursos Genéticos: Forestales, Agrícolas, Pecuarios y Microbianos
Dr.	Jaime Mena Covarrubias	Sanidad Forestal y Agrícola

*Becarios



WWW.INIFAP.GOB.MX