

ASISTENCIA TÉCNICA EN LÍNEA PARA EL PRONÓSTICO DEL RIEGO EN LA REGIÓN NORTE-CENTRO DE MÉXICO

Ernesto A. Catalán Valencia, Ma. Magdalena Villa Castorena, Marco A. Inzunza Ibarra, Abel Román López, Gerardo Delgado Ramírez



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

**SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO
RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN**

Lic. Enrique Martínez y Martínez
Secretario

Lic. Jesús Alberto Aguilar Padilla
Subsecretario de Agricultura

Lic. Ricardo Aguilar Castillo
Subsecretario de Alimentación y Competitividad

Prof. Arturo Osornio Sánchez
Subsecretario de Desarrollo Rural

**INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES,
AGRÍCOLAS Y PECUARIAS**

Dr. Luis Fernando Flores Lui
Director General

Dr. Manuel Rafael Villa Issa
Coordinador de Investigación, Innovación y Vinculación

M.C. Jorge Fajardo Guel
Coordinador de Planeación y Desarrollo

M.A. Eduardo Francisco Berterame Barquin
Coordinador de Administración y Sistemas

**CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN LA
RELACIÓN AGUA SUELO PLANTA ATMÓSFERA**

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director del CENID

ASISTENCIA TÉCNICA EN LÍNEA PARA EL PRONÓSTICO DEL RIEGO EN LA REGIÓN NORTE-CENTRO DE MÉXICO

Ernesto A. Catalán Valencia*

Magdalena Villa Castorena*

Marco Antonio Inzunza Ibarra*

Abel Román López*

Gerardo Delgado Ramírez*

*Investigadores del Centro de Investigación Disciplinaria en la Relación
Agua Suelo Planta Atmósfera

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias
Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua Suelo
Planta Atmósfera

Diciembre del 2014

**Instituto Nacional de Investigaciones
Forestales, Agrícolas y Pecuarias**

**Av. Progreso No. 5 Barrio de Santa Catarina,
Delegación Coyoacán, C.P. 04010 México, D. F.
Teléfono (55) 38718700
<http://www.inifap.gob.mx>**

ISBN: 978-607-37-0327-7

Primera Edición 2014; Derechos reservados ©

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, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito a la institución.

INTRODUCCIÓN

El sector agrícola consume actualmente el 77% del volumen total de agua concesionado en México. Nuestro país ocupa el sexto lugar mundial en términos de superficie con infraestructura de riego con 6.46 millones de hectáreas. En la región norte centro de México (Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas y Aguascalientes), el volumen de agua anual concesionado es de 10,700 millones de m³, de los cuales el 87% (9,365 millones de m³) se destina a uso agrícola (CNA, 2008).

Se estima que los distritos de riego del país operan con un nivel de eficiencia global por debajo del 40%, lo cual significa que el 60% del volumen de agua total disponible se pierde durante la conducción y aplicación del agua. En las zonas de riego de la región norte centro de México, la eficiencia de riego promedio a nivel parcelario es de 60%. Sin embargo, mediante la tecnificación del riego es posible incrementar este valor en por lo menos un 20%, lo cual significa un ahorro de agua mínimo de 25 cm (2,500 m³ha⁻¹) si se considera una lámina neta de riego promedio de 60 cm para todo un ciclo de cultivo. A nivel regional, el ahorro potencial de agua es de 2,667 millones de m³ en 1,067,000 ha bajo riego (CNA, 2008).

El Programa Nacional Hídrico (PNH) 2014-2018 incorpora los objetivos, estrategias y metas que se establecen en el Plan Nacional de Desarrollo en relación con el adecuado manejo y preservación del agua. Uno de los objetivos del plan es asegurar el agua para riego, para lo cual se desarrollarán diversas estrategias como la tecnificación del riego, mejoramiento de eficiencias, así como desarrollar, adoptar y aplicar tecnologías de información y comunicación para diseminar el conocimiento de los problemas del agua y sus posibles soluciones (SEMARNAT, 2013).

La tecnificación del riego parcelario implica tanto la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos como la transferencia y adopción de estas técnicas por el usuario. A pesar de los avances logrados en la ingeniería del riego, los procesos de transferencia y adopción tecnológica se han rezagado por distintas razones. Además de la falta de un esquema de valoración económica real del agua para riego, se tiene que la asimilación e implementación de la tecnología disponible se complican por los altos grados de especialización y entrenamiento requeridos. También ha influido la supresión y/o desaparición de funciones como la capacitación y asistencia técnica

anteriormente proporcionadas a los usuarios por parte del gobierno federal a través de las oficinas de ingeniería de riego y drenaje de los distritos y unidades de riego.

No obstante lo anteriormente expuesto, la disponibilidad de infraestructura y aplicación de nuevos métodos de investigación dan un nuevo impulso a la difusión, transferencia y adopción de la tecnología de riego, acercando el conocimiento a los productores. El INIFAP en conjunción con las Fundaciones Produce estatales, opera la Red Nacional de Estaciones Agroclimáticas Automáticas, lo cual ha permitido que los usuarios dispongan de información en tiempo cuasi real de la climatología en las zonas agrícolas y ganaderas más importantes. Actualmente, la red cuenta con 926 estaciones distribuidas en 29 estados del país (<http://clima.inifap.gob.mx>). Con la presente contribución se pretende aprovechar las ventajas que provee esta infraestructura y la red de Internet para sistematizar, difundir y transferir a los usuarios potenciales la tecnología de riego disponible.

OBJETIVOS

El objetivo general de esta publicación es poner a la disposición de los usuarios del riego una plataforma de asistencia técnica en línea para la gestión del riego parcelario, teniendo como objetivos particulares los siguientes:

-Desarrollar un programa computacional, en línea y tiempo real, para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de los cultivos en la región norte centro de México.

-Proveer de información básica a usuarios del riego, técnicos e investigadores sobre las demandas de agua y programación del riego de los cultivos en los distritos y unidades de riego de la región norte centro de México.

METODOLOGÍA

El desarrollo del sistema computacional expuesto se realizó en las instalaciones del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA) del INIFAP, localizado en el margen derecho del canal principal Sacramento km 6.5 en Gómez Palacio, Durango.

Programación del riego

La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso.

La programación de riego generalmente se realiza de manera anticipada, según la experiencia y conocimiento del usuario del riego, suponiendo que, en términos climatológicos, el año se comportará como el año típico o promedio. Después a lo largo de la campaña, los parámetros de riego se van corrigiendo en función de información actual: factores climáticos, desarrollo del cultivo, disponibilidad de agua. Sin embargo, lo deseable es que cada vez intervengan menos factores subjetivos, razón por la cual se han desarrollado distintos métodos para programar los riegos, los cuales pueden agruparse en tres categorías según el tipo de mediciones en que se basan: 1) parámetros climáticos, 2) medición de la humedad del suelo y 3) medición del estrés hídrico de las plantas (FAO, 1989). En el orden en que se han citado, los métodos van de menos a más rigurosos. Desgraciadamente, la facilidad de aplicación de los métodos va en orden inverso.

Programación del riego basada en parámetros del clima

Este método consiste en realizar un balance hídrico en el perfil del suelo, tomando en cuenta, por una parte, las aportaciones de agua del riego y la lluvia, y por otra, la demanda evapotranspirativa del cultivo. La parte fundamental del cálculo es la determinación de la evapotranspiración con datos climáticos.

Balance de agua en el suelo

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, es igual a la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) en dicho volumen de suelo y puede expresarse como:

$$V_{ent}-V_{sal}=\Delta\theta \quad (1)$$

Donde V_{ent} es el volumen de agua que entra al suelo y V_{sal} 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 (P) (incluidas condensaciones por rocío o encharcamiento) y el riego (R):

$$V_{ent}=P+R \quad (2)$$

Las pérdidas de agua se deben a los procesos de escorrentía (E), drenaje (D) y a la evapotranspiración (ET) o consumo de agua por parte de las plantas:

$$V_{sal}=E+D+ET \quad (3)$$

La escorrentía supone una pérdida de agua desde la superficie del suelo, pero puede suponer una ganancia de agua si ésta fluye hacia dicha superficie desde zonas adyacentes. El drenaje por percolación profunda normalmente adquiere valores positivos, pero podría alcanzar valores negativos en el caso que hubiera ascenso capilar de agua desde un nivel freático somero. Por su parte, la evapotranspiración representa la suma de la evaporación directa desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación.

Cuando se realiza el balance de agua del suelo, suele ignorarse el agua de lluvia o riego interceptada por la vegetación, así como el agua depositada en charcos sobre el terreno, por ser fenómenos muy efímeros y de menor cuantía en relación con los otros componentes del balance. Así pues, el balance de agua en el suelo en cualquier escala,

pasando desde plantas individuales hasta cuencas hidrológicas, puede representarse como:

$$\Delta\theta=P+R-E-D-ET \quad (4)$$

Retención de agua en el suelo

La cantidad de agua que un suelo puede retener depende en gran medida del tamaño de las partículas minerales que lo componen, es decir, de su textura. Un suelo pesado, compuesto por partículas finas de arcilla retiene más agua que un suelo ligero compuesto por partículas gruesas de arena. En este proceso, la materia orgánica contenida en el suelo juega un papel preponderante; a mayor contenido de materia orgánica, mayor capacidad del suelo para retener agua.

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 ocurre algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por lluvia o riego. Representa un nivel de humedad óptimo para las plantas, al cual se le asocia un valor de tensión o potencial mátrico entre -0.1 y -0.3 bars y se considera que a esta tensión, las plantas toman el agua del suelo fácilmente,

A nivel de campo, el valor de θ_{CC} se determina vertiendo agua sobre 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 medirles gravimétricamente su contenido de agua. 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

posteriormente. La mayoría de las plantas cultivadas se marchitan en el rango de -14 a -18 bars de tensión mátrica, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua a -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del punto de marchitez permanente. Se considera que a esta tensión, los cultivos no pueden absorber más agua del suelo.

Humedad aprovechable

A la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) se le conoce como humedad aprovechable (HA). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr) y que puede ser absorbida por éstas. Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Pr \quad (5)$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en m^3 de agua por m^3 de suelo, HA y Pr en metros. El Cuadro 1 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} y HA para cada tipo de textura y a un metro de profundidad del suelo, los cuales fueron derivados de Saxton *et al.* (1986). Como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa.

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 1). Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_0 = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (6)$$

Cuadro 1. Constantes de humedad por tipo de suelo.

TEXTURA	θ_s	θ_{cc}	θ_{PMP}	HA
Arenosa	0.3545	0.1280	0.0567	0.0714
Areno francosa	0.3878	0.1598	0.0764	0.0834
Franco arenosa	0.4697	0.2522	0.1740	0.0782
Franca	0.4617	0.2540	0.1180	0.1360
Franco arcillo arenosa	0.4784	0.2676	0.1724	0.0952
Franco arcillosa	0.5018	0.3215	0.1838	0.1377
Franco arcillo limosa	0.5203	0.3648	0.1941	0.1707
Franco limosa	0.4676	0.2857	0.1062	0.1794
Arcillo arenosa	0.5052	0.3333	0.2419	0.0914
Arcillo limosa	0.5422	0.4403	0.2786	0.1617
Arcillosa	0.5566	0.5359	0.4127	0.1232
Limosa	0.4154	0.3154	0.0962	0.2192

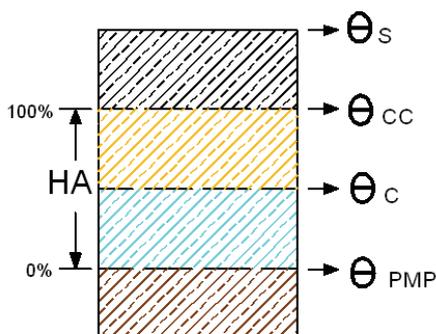


Figura 1. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.

Según la ecuación del balance de agua en el suelo (Ecuación 4), 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} , y el resto de los términos de la ecuación 4 se estiman para el día actual, a excepción de la escorrentía, no considerada aquí:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + P_i - ET_i - D_i \quad (7)$$

Luego se compara θ_i con θ_c para decidir si se aplica un riego o no. Si θ_i es menor que θ_c , entonces el cultivo debe regarse el día siguiente, si no, se actualizan cada uno de los términos de la ecuación 4 para el día siguiente y se compara nuevamente θ_i con θ_c en

ese día. La cantidad de agua por aplicar R, comúnmente denominada como lámina de riego (L_r), puede calcularse como el producto de H_a y FAM, o bien como:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_0) Pr \quad (8)$$

Evapotranspiración

El agua de riego se consume tanto por la evaporación que ocurre desde la superficie del suelo como la que ocurre por transpiración desde la superficie de las hojas y que ha sido previamente absorbida por las raíces de la planta. Ante la dificultad de medir por separado la evaporación y la transpiración, se utiliza el término evapotranspiración (ET_c) para referirse de manera conjunta a ambos tipos de flujo de agua (FAO, 1989). La cantidad de agua consumida por un cultivo durante todo su ciclo se relaciona directamente con su rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1996).

Los métodos para calcular la evapotranspiración pueden clasificarse en métodos directos e indirectos. Los primeros proporcionan directamente el consumo total del agua requerida, utilizando para ello aparatos e instrumentos como lisímetros, evapotranspirómetros y atmómetros. El del lisímetro es uno de los métodos de mayor precisión y resolución, aunque se trata de equipo costoso y poco disponible que se utiliza con fines de investigación para validar otros métodos.

Los métodos indirectos se basan en el uso de ecuaciones físico empíricas para calcular ET_c a partir de datos meteorológicos (temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento) y del cultivo. Tales métodos varían en su precisión dependiendo del enfoque de aproximación y del tipo y número de variables involucradas.

Evapotranspiración de referencia

Ante la dificultad que implica la medición de las resistencias aerodinámica y de la vegetación en las diferentes superficies cultivadas, el procedimiento estándar para estimar ET_c consiste en estimar primero la evapotranspiración de referencia (ET_0) a partir de datos climáticos y luego aplicar coeficientes del cultivo para estimar ET_c (Allen *et al.*, 1990). En la metodología que en la presenta publicación se expone, se utiliza el método combinado FAO Penman-Monteith para estimar el valor de ET_0 de un cultivo hipotético de

referencia con una altura de 0,12 m, una resistencia de la superficie de 70 s m^{-1} y un albedo de 0,23 m, valor que se asemeja a la evaporación que ocurre en una superficie extensa de pasto de altura uniforme, creciendo activamente y bien regada.

El método FAO Penman-Monteith se basa en la ecuación de Penman-Monteith (Monteith, 1981) para estimar ET_0 a partir de datos climáticos estándar, la cual fue modificada en 1990 mediante consulta con un panel de expertos e investigadores, con la colaboración de la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Mundial. El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de FAO Penman-Monteith como el procedimiento estándar para la evapotranspiración de referencia e indicó los procedimientos para calcular los distintos parámetros considerados en el método (FAO, 1998).

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 0.23} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (9)$$

Donde:

- ET_0 evapotranspiración de referencia (mm d^{-1})
- R_n radiación neta en la superficie del cultivo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
- G flujo de calor en el suelo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)
- T temperatura media del aire a 2 m de altura ($^{\circ}\text{C}$)
- U_2 velocidad del viento a 2 m de altura (m s^{-1})
- e_s presión de vapor del aire a saturación (kPa)
- e_a presión de vapor del aire (kPa)
- $e_s - e_a$ déficit de presión de vapor (kPa)
- Δ pendiente de la curva de presión de vapor ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$)
- γ constante psicrométrica ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}$).

Determinación de la evapotranspiración

La evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_0 por un coeficiente que corrige la diferencia entre la evapotranspiración de la superficie cultivada y la superficie del cultivo de referencia:

$$ET_c = K_c * ET_0 \quad (10)$$

Donde K_c es un coeficiente adimensional que varía durante la temporada de crecimiento del cultivo en la medida que sus características de cobertura del suelo (área foliar y su efecto en la resistencia de la vegetación), altura (resistencia aerodinámica y su influencia en la transferencia turbulenta de vapor de agua hacia la atmósfera), humedad en el suelo (por sus efectos sobre el albedo o reflectancia de la radiación solar y evaporación del agua desde la superficie del suelo) difieran de las correspondientes al cultivo de referencia (FAO, 1998).

La mayoría de los efectos de los distintos factores climatológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_0 . Por lo tanto, mientras ET_0 representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c varía principalmente en función de las características particulares del cultivo, variando sólo en una pequeña proporción en función del clima. Esto permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas, lo cual constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de valores de K_c obtenidos a partir de estudios experimentales previos (FAO, 1998).

El valor de K_c en la ecuación 10 permite calcular el valor de ET_c bajo condiciones estándar, también conocido como evapotranspiración máxima. Este valor representa el límite máximo de evapotranspiración del cultivo cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo debido a limitaciones de agua, densidad del cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad. De ser necesario, el valor de ET_c deberá ajustarse en ausencia de las condiciones estándar. (FAO, 1998)

Las diferencias entre las superficies del cultivo y de referencia pueden combinarse dentro de un coeficiente único o integrado del cultivo, o puede separarse en dos factores que describen por separado las diferencias en evaporación y transpiración entre las dos

superficies. La selección del procedimiento a seguir dependerá del propósito del cálculo, la precisión requerida, la disponibilidad de datos climáticos y la escala temporal bajo la cual se realizan los cálculos (FAO, 1998).

Enfoque del coeficiente único del cultivo

El enfoque del coeficiente único del cultivo combina los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo en un solo coeficiente K_c , el cual integra las diferencias de estos dos tipos de flujo entre el cultivo y la superficie del cultivo de referencia. Como la evaporación del suelo puede variar diariamente por el humedecimiento de la superficie del suelo causado por efectos de la lluvia o el riego, el coeficiente único del cultivo expresa los efectos promedios en el tiempo (múltiples días), de la evapotranspiración del cultivo.

Por sus efectos promedio, el coeficiente único del cultivo se utiliza para estimar ET_c durante períodos de tiempo semanales o mayores, en estudios de planeación y diseño de sistemas de riego. Este es el caso de los sistemas de riego por superficie y aspersion donde el intervalo entre riegos sucesivos es de varios días, generalmente de diez o más días. Por lo tanto, para un manejo típico del riego, es válido aplicar el procedimiento del coeficiente único promediado temporalmente (FAO, 1998).

La Figura 2 muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva K_c de un cultivo. Tres valores de K_c : K_{cini} , K_{cmed} y K_{cfin} , así como tres valores más para representar, como fracciones del ciclo vegetativo total, la duración de las tres primeras etapas del cultivo señaladas, ya que la duración de la cuarta y última etapa sería la fracción complementaria del 100% del ciclo del cultivo.

Enfoque del coeficiente dual del cultivo

En este enfoque, los efectos de la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo se determinan por separado. Se aplican dos coeficientes: el coeficiente basal del cultivo (K_{cb}) para describir la transpiración y el coeficiente de evaporación (K_e) para describir la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. El coeficiente único K_c se reemplaza por:

$$K_c = K_{cb} + K_e$$

(11)

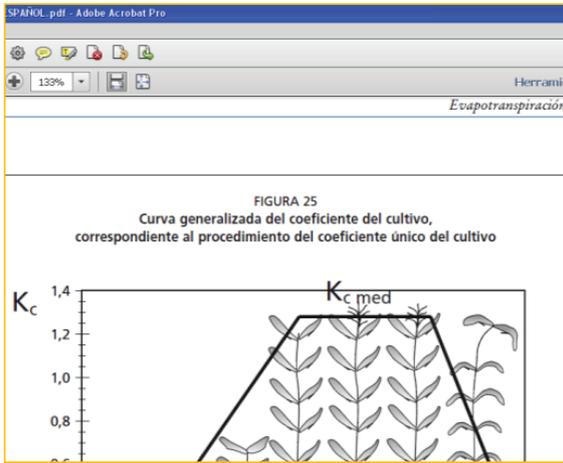


Figura 2. Curva del coeficiente único del cultivo.
Fuente: FAO, 1998.

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , se define como el cociente entre ET_c y ET_o cuando la superficie del suelo se encuentra seca, pero donde el contenido promedio de agua en la zona radicular del suelo es adecuado para mantener totalmente la transpiración de la planta. Representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales causados por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. Por su parte, el coeficiente K_e describe el componente de la evaporación y puede ser grande si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e podrá exceder un valor máximo, K_{cmax} , el cual es determinado por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo (FAO, 1998).

El procedimiento del coeficiente dual se recomienda para la programación del riego en tiempo real a nivel diario como en la metodología que describe la presente publicación, así como en estudios de investigación donde sean importantes tanto los efectos de las

variaciones diarias del humedecimiento de la superficie del suelo y su impacto resultante en el valor diario de ET_c , como el patrón de humedecimiento del perfil del suelo y los flujos de percolación profunda. Este será el caso de los riegos de alta frecuencia a través de micro-irrigación o sistemas de movimiento lateral tales como los pivotes centrales o los sistemas de movimiento lineal (FAO, 1998).

La Figura 3 muestra formas típicas de K_{cb} , K_e y del coeficiente único K_c . La curva K_{cb} representa la línea base de la transpiración que ocurre bajo un suministro adecuado de agua en el suelo. Los picos del valor de K_e constituyen el incremento de la evaporación que ocurre cuando la precipitación o el riego han humedecido la superficie del suelo, lo que produce un aumento temporal del valor de ET_c . La mayor diferencia entre los valores de K_c y K_{cb} ocurre en la etapa inicial de crecimiento, cuando la evapotranspiración está constituida principalmente por la evaporación del suelo y la transpiración del cultivo es relativamente pequeña. Esta diferencia será mayor a mayor frecuencia de humedecimiento. El Cuadro 2 muestra los valores K_{cbini} , K_{cbmed} y K_{cbfin} de algunos de los cultivos más importantes del país. La duración del ciclo (columnas B, C y D) expresan fracciones acumuladas del ciclo vegetativo, al final de las etapas inicial (hasta 10% de cobertura del terreno), desarrollo, intermedia (crecimiento máximo) y final (FAO, 1998).

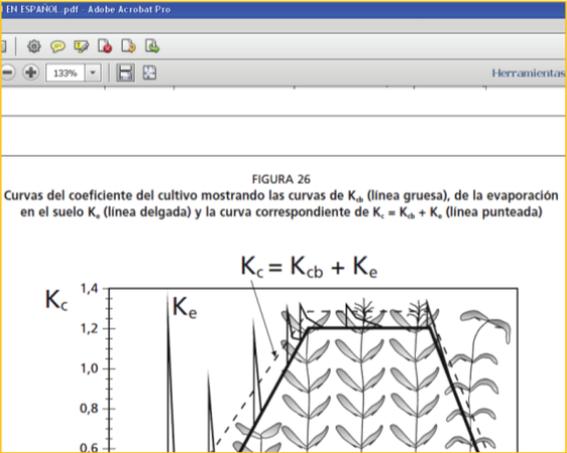


Figura 3. Curva del coeficiente dual del cultivo.
Fuente: FAO, 1998.

Cuadro 2. Coeficientes de cultivo duales. Fuente: FAO, 1998.

CULTIVO	K _{cb_{ini}}	K _{cb_{med}}	K _{cb_{fin}}	B	C	D
Alfalfa	0.75	1.00	0.75	0.08	0.25	0.75
Algodonero	0.15	1.10	0.40	0.17	0.44	0.75
Avena	0.15	1.10	0.15	0.19	0.44	0.81
Cacahuate	0.15	1.10	0.50	0.19	0.46	0.81
Calabaza	0.15	0.90	0.70	0.25	0.60	0.85
Cebolla	0.15	0.95	0.65	0.11	0.28	0.78
Chícharo	0.15	1.10	1.05	0.20	0.50	0.85
Chile	0.15	1.10	0.70	0.19	0.44	0.81
Frijol	0.15	1.10	0.25	0.18	0.45	0.82
Maíz	0.15	1.15	0.15	0.20	0.47	0.80
Manzano	0.50	0.90	0.70	0.13	0.33	0.88
Melón	0.15	0.75	0.50	0.21	0.50	0.83
Nogal	0.40	1.05	0.60	0.13	0.33	0.88
Pasto	0.50	0.95	0.80	0.07	0.19	0.74
Sandía	0.15	0.95	0.70	0.18	0.45	0.73
Sorgo	0.15	1.05	0.35	0.15	0.42	0.77
Tomate	0.15	1.10	0.60	0.19	0.44	0.81
Trigo	0.15	1.10	0.15	0.19	0.44	0.81
Triticale	0.15	1.10	0.15	0.19	0.44	0.81

Los valores de K_{cb} incluidos en el Cuadro 2 fueron originalmente obtenidos bajo condiciones de clima sub-húmedo, con humedad relativa mínima promedio de 45% y velocidad del viento suave a moderada de 2 m s⁻¹ en promedio. Para condiciones diferentes de humedad y velocidad del viento, los coeficientes K_{cb} correspondientes a las etapas intermedia y final, mayores que 0.45, deben ajustarse a nivel diario con base en la siguiente expresión:

$$K_{cb,aj} = K_{cb} + [0.04(U_2 - 2) - 0.004(HR_{min} - 45)] \left(\frac{h}{3}\right)^{0.3} \quad (12)$$

Donde:

- K_{cb,aj} valor de K_{cb} ajustado durante las etapas intermedia y final
- U₂ velocidad del viento promedio diaria a 2 m de altura (m s⁻¹)
- HR_{min} humedad relativa mínima diaria para 20 ≤ HR_{min} ≤ 80 (%)
- h altura de las plantas durante las etapas intermedia y final (m).

Componente de la evaporación ($K_e ET_0$)

El coeficiente de la evaporación K_e representa al componente de la evaporación en el valor de ET_c . Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda, después del riego o la lluvia, el valor de K_e será máximo. Sin embargo, el valor del coeficiente del cultivo ($K_c = K_{cb} + K_e$) no puede exceder a un valor máximo, K_{cmax} , el cual representa el límite superior de la evaporación y la transpiración que puede ocurrir en una superficie cultivada, valor que es impuesto para reflejar los límites naturales definidos por la cantidad de energía disponible ($K_{cb} + K_e \leq K_{cmax}$), o $K_e \leq (K_{cmax} - K_{cb})$. El valor de K_{cmax} tiene un rango que oscila alrededor 1,05 a 1,30, cuando se utiliza la evapotranspiración del pasto de referencia ET_0 .

A medida que la superficie del suelo se seca, K_e disminuye y puede incluso ser cero cuando no exista agua en la superficie del suelo. Por lo tanto, la evaporación comenzara a reducirse en función de la cantidad de agua remanente en la capa superficial del suelo, es decir:

$$K_e = K_r (K_{cmax} - K_{cb}) \leq f_{ew} * K_{cmax} \quad (13)$$

Donde f_{ew} es la fracción expuesta y humedecida del suelo, la cual depende del grado de cobertura del terreno por el cultivo, y de la fracción de terreno humedecida por el sistema de riego. Por su parte, K_r es un coeficiente adimensional de reducción de la evaporación que depende de la humedad aprovechable disponible en los primeros 10 a 15 cm de profundidad del suelo (Figura 4).

Cuando la superficie del suelo se encuentra húmeda y expuesta, el valor de K_r es igual a 1 y la evaporación ocurre a una tasa máxima limitada por la cantidad de energía disponible, hasta que se agota la cantidad de agua fácilmente evaporable, AFE, la cual es del orden de 2 a 12 mm dependiendo de la textura del suelo. Cuando el contenido de agua en la parte superior del suelo empieza a ser limitante, el valor de K_r disminuye, llegando a cero cuando se agota la cantidad de agua evaporable total AET, la cual se estima como el 50% de la humedad aprovechable en la capa superficial del suelo (Figura 4).

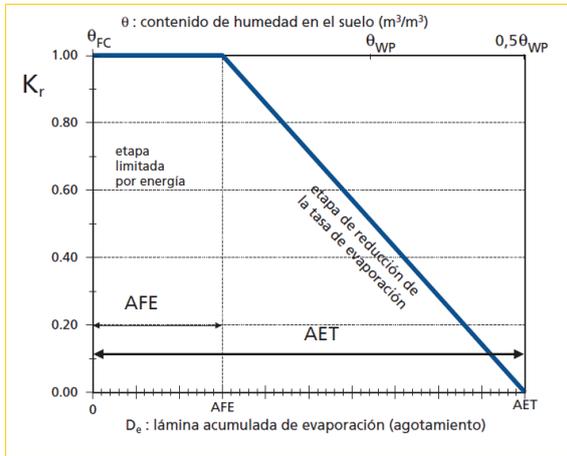


Figura 4. Coeficiente de reducción de la evaporación.

Fuente: FAO, 1998.

La estimación del valor de K_e requiere del cálculo de un balance diario del agua presente en la capa superficial del suelo con el objeto de determinar la lámina acumulada de evaporación o agotamiento. Esto implica la aplicación de la ecuación 4 en la fracción expuesta y humedecida del suelo f_{ew} .

Evapotranspiración (ET_c) bajo condiciones de estrés hídrico

Cuando el suelo se encuentra húmedo, el agua presente tiene una energía potencial alta, gran movilidad y puede ser extraída fácilmente por las raíces de las plantas. En suelos secos, el agua tiene una energía potencial baja, siendo retenida fuertemente por fuerzas capilares y de adsorción a la matriz del suelo, lo que la hace menos extraíble por el cultivo.

Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, θ_t , se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s (Figura 5):

$$ET_{c,aj}=(K_s K_{cb}+K_e)ET_0 \quad (14)$$

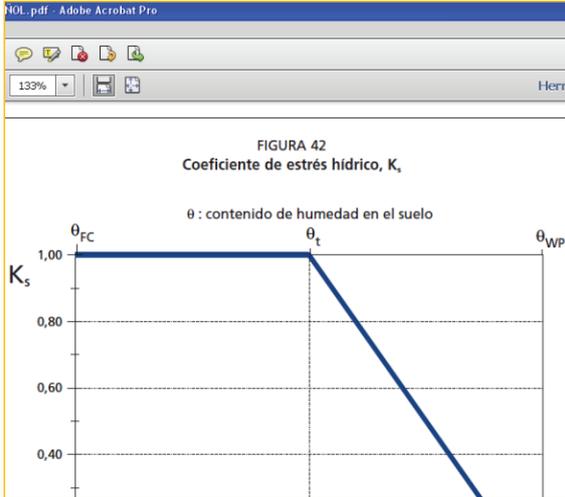


Figura 5. Coeficiente de estrés hídrico.

Fuente: FAO, 1998.

Cuando el suelo se encuentra en capacidad de campo, es decir, a su máxima capacidad de retención de agua, $K_s=1$ porque no existen condiciones de estrés para el cultivo. Estas condiciones se mantendrán a medida que aumenta el consumo de agua hasta que se haya abatido el agua fácilmente disponible o aprovechable, AFD, la cual es una fracción del agua disponible o aprovechable total, ADT (Figura 5). Esta fracción varía de un cultivo a otro, normalmente entre 0.30 para plantas de raíces poco profundas, a tasas altas de $ET_c (> 8 \text{ mm d}^{-1})$, hasta 0.70 para plantas de raíces profundas y tasas bajas de $ET_c (< 3 \text{ mm d}^{-1})$. Comúnmente se aplica un valor de 0.50 para una gran variedad de cultivos.

Consideraciones de la calendarización del riego

El programa de cómputo descrito en la presente publicación está diseñado para programar los riegos durante todo el ciclo del cultivo y puede utilizarse con fines de

planeación o de operación. Si se ejecuta antes de la fecha de siembra, el programa produce un calendario de riegos típico o esperado, lo cual es importante desde el punto de vista de la planeación del riego. Sin embargo, el interés principal de la programación del riego en tiempo real se enfoca en el aspecto operativo del sistema de riego, por lo cual la mayor atención se centra en el período comprendido entre la fecha en que se aplicó el último riego y la fecha en que se pronostica el riego siguiente.

Desde la siembra y hasta la fecha de ejecución del programa o fecha actual, el programa utiliza información climática medida y registrada en tiempo real para estimar consumo de agua, realizar el balance de agua en el suelo y definir la oportunidad de los riegos. Después de la fecha actual, el programa pronostica los riegos con base en información climática generada estadísticamente. Por lo tanto, el pronóstico del próximo o siguiente riego será más preciso y menos incierto cuando se realice lo más próximo posible (hasta un día antes) a la fecha pronosticada para dicho riego.

Por cuestiones operativas, las fechas en que se aplicaron los riegos previos a la fecha actual pueden diferir con respecto a las fechas resultantes en el calendario de riegos. Para cumplir con el tipo de control del riego considerado (abatimiento de humedad aprovechable o intervalo de riegos) en la definición de la fecha del próximo riego, la fecha resultante del último riego es forzada para que coincida con la fecha real en que se aplicó dicho riego.

EJECUCIÓN DEL PROGRAMA Y EJEMPLO DE APLICACIÓN

Los aspectos teóricos fundamentales de la aplicación computacional han quedado descritos en las secciones precedentes. En esta sección se describen los pasos para ejecutar el programa, es decir, el orden con que deben ingresarse los datos de entrada y las salidas o resultados arrojados por el mismo. Para acceder al sistema se debe ingresar al sitio <http://www.cenidraspa.org>. La primera pantalla muestra los botones “Inicio”, “DRIEGO”, “SERG” y “Contacto”. El botón “Inicio” presenta descripciones breves del SISTEMA IRRINET y del CENID RASPA. El botón “DRIEGO” permite el acceso al programa descrito en esta publicación, mientras que el botón “SERG” da acceso a una aplicación actualmente en desarrollo para resolver el diseño, evaluación y operación de los sistemas de riego por gravedad. El botón “Contacto”, presenta un formulario para

contactar a los autores del programa y un mapa de localización del CENID RASPA (Figura 6).

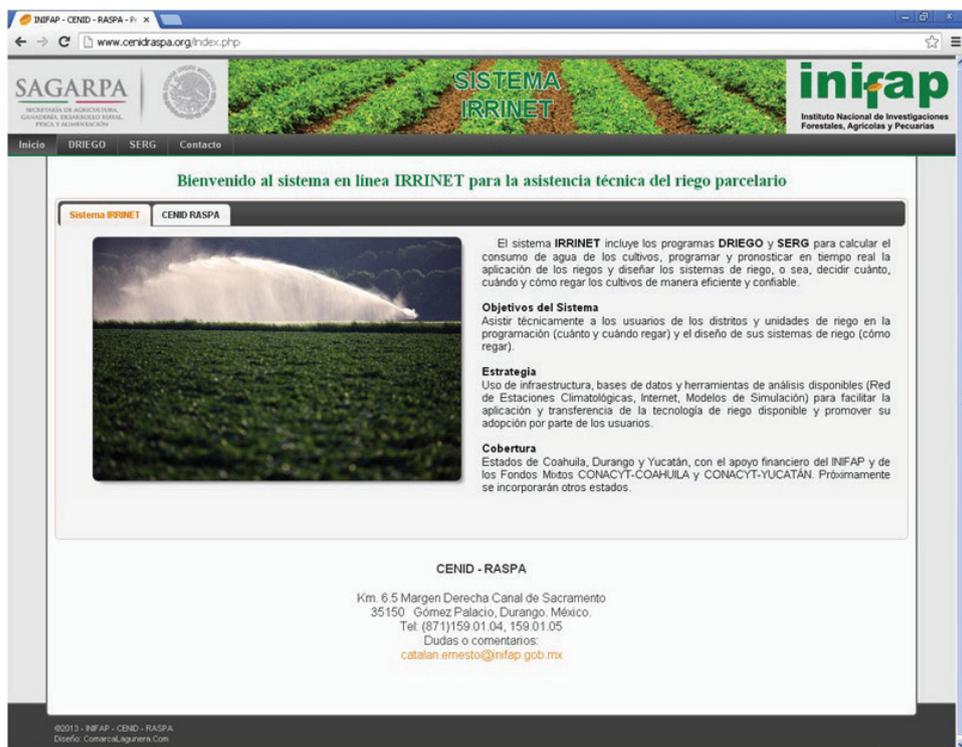


Figura 6. Primera pantalla de la aplicación (<http://www.cenidraspa.org>).

Una vez seleccionado el botón “DRIEGO”, el programa despliega una segunda pantalla que presenta una breve descripción del mismo. En esta pantalla se selecciona alguna de las entidades federativas de la región norte centro, dentro de las cuales, y a manera de ejemplo, se selecciona el estado de Coahuila (Figura 7). Al seleccionar el estado, aparece la pantalla con el menú principal del programa DRIEGO, el cual muestra cinco botones: 1. Inicio, 2. Cultivo, 3. Suelo, 4. Riego y 5. Resultados (Figura 8). Los cuatro primeros botones despliegan pantallas para la captura de información o datos de

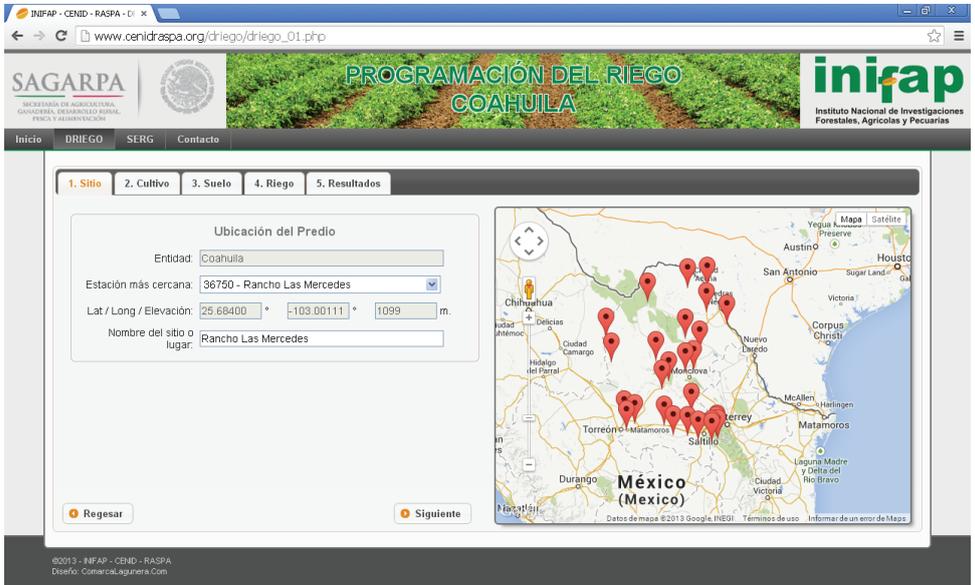


Figura 8. Selección del sitio y su estación climatológica.

1. **Inicio:** En este apartado se solicita al usuario la selección de la estación climatológica más cercana a su localidad para acceder en línea, y en tiempo real, a su base de datos. Se muestra la ubicación de cada una de las 27 estaciones del estado de Coahuila en una interface Google Earth, ya sea en modo mapa o imagen del satélite (Figura 8). El usuario deberá seleccionar la estación directamente en el mapa o desplegando la lista de estaciones en el campo “Estación más cercana” adyacente. Una vez seleccionada la estación, el programa despliega la información correspondiente como el nombre, coordenadas geográficas y altura del sitio.
2. **Cultivo:** Aquí se solicita el tipo de cultivo, a escoger de los enlistados en el Cuadro 3 (Figura 9). Una vez seleccionado el cultivo, el programa propone datos predefinidos para la fecha de siembra, duración del ciclo vegetativo (desde siembra o establecimiento hasta la madurez fisiológica) y la altura máxima del cultivo, datos que el usuario puede cambiar. También se despliegan los valores de las curvas de los coeficientes basales del cultivo recomendados por la FAO (Cuadro 2), los cuales el

usuario no debe modificar, a menos que disponga de dicha información derivada de estudios experimentales propios.

Cuadro 3. Cultivos considerados en el programa.

Cultivos anuales					
Ajo	Betabel	Cebolla	Garbanzo	Melón	Sorgo
Ajonjolí	Brócoli	Centeno	Girasol	Nabo	Soya
Algodonero	Cacahuatate	Chícharo	Haba	Papa	Tomate
Alpiste	Calabaza	Chile	Jícama	Pepino	Trigo
Apio	Camote	Coliflor	Lechuga	Rábano	Zanahoria
Avena	Cártamo	Espinaca	Lenteja	Repollo	
Berenjena	Cebada	Frijol	Maíz	Sandía	
Cultivos perennes					
Alfalfa	Mandarina	Nogal	Pasto	Torronja	
Durazno	Manzano	Olivo	Pera	Vid	
Limonero	Naranja	Palma datilera	Pistacho		

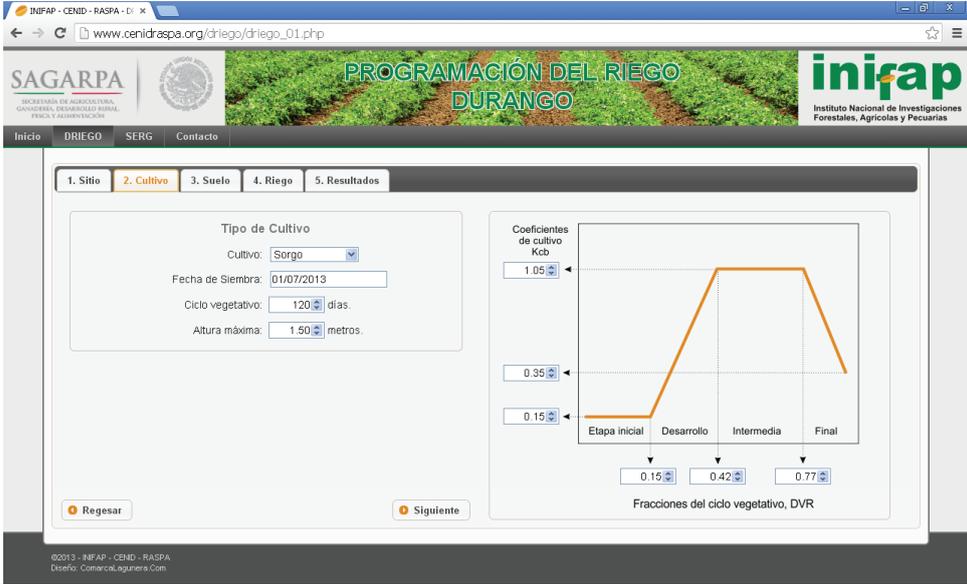


Figura 9. Ingreso de datos del cultivo.

3. Suelo: Es necesario introducir la información que determina la capacidad de retención de agua por el suelo. El programa proporciona un valor predefinido para la profundidad del riego o capa del suelo considerada para el balance de agua. También da la opción de considerar perfil del suelo uniforme o estratificado, es decir un solo estrato o varios estratos con capacidades de retención distintas. En este último caso, solicita el número de estratos y la información necesaria para determinar los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} de cada estrato. Para esto, el programa da al usuario tres posibles opciones dependiendo de la información disponible.

Opción 1: Si no se conocen los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} y sólo se conoce la textura del suelo, seleccionarla de acuerdo a la clasificación del triangulo de texturas (USDA, 1952) (Figura 10 y Cuadro 4). El programa luego asume valores típicos de θ_{CC} y θ_{PMP} de acuerdo a la textura del suelo (Catalán *et al.*, 2006).

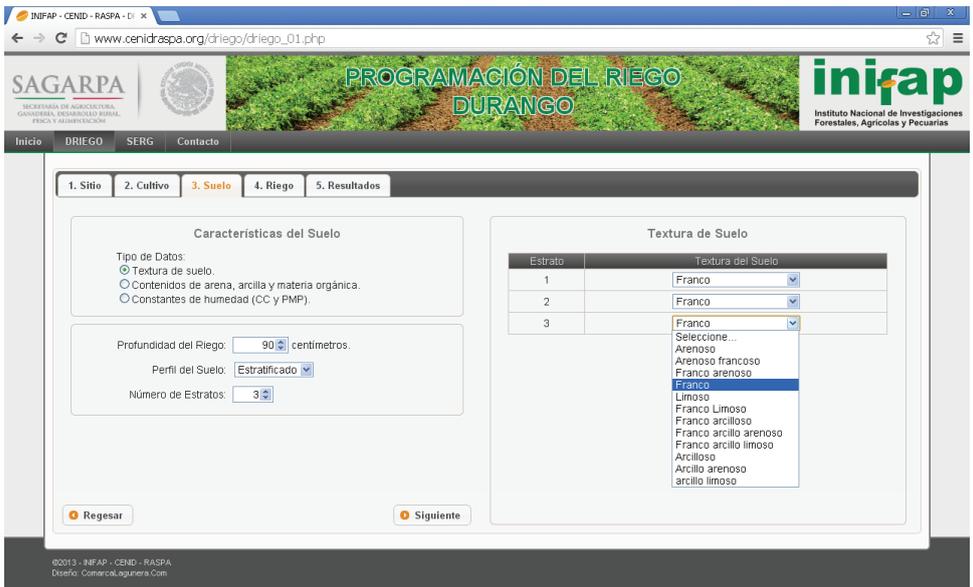


Figura 10. Primera opción para los datos del suelo.

Opción 2: Si no se conocen los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} , pero sí los contenidos de arena, arcilla y materia orgánica del suelo, ingresar estos últimos valores. El programa

luego ejecuta una subrutina para estimar indirectamente θ_{CC} y θ_{PMP} a partir de dichos datos y las funciones desarrolladas por Rawls y Brakensiek, (1982) (Figura 11).

Cuadro 4. Clasificación de los suelos por textura (USDA, 1952).

Arenoso	Franco arcilloso	Franco arcillo arenoso
Areno francoso	Limoso	Arcillo limoso
Franco arenoso	Franco limoso	Arcillo arenoso
Franco	Franco arcillo limoso	Arcilloso

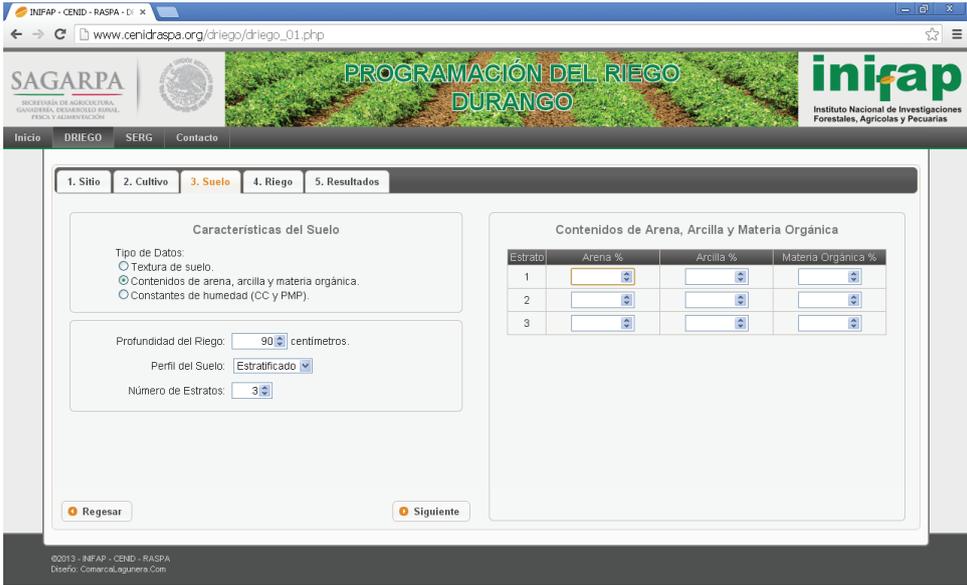


Figura 11. Segunda opción para los datos del suelo.

Opción 3: Esta opción aplica cuando se conocen los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} para toda la profundidad de riego o para cada uno de los estratos predefinidos. A mayor profundidad de riego, mayor capacidad del suelo para retener agua, lo cual producirá menor número de riegos (más espaciados) (Cuadro 4 y Figura 12). El programa luego

asume valores típicos de θ_{CC} y θ_{PMP} de acuerdo a la textura del suelo (Catalán *et al.*, 2006).

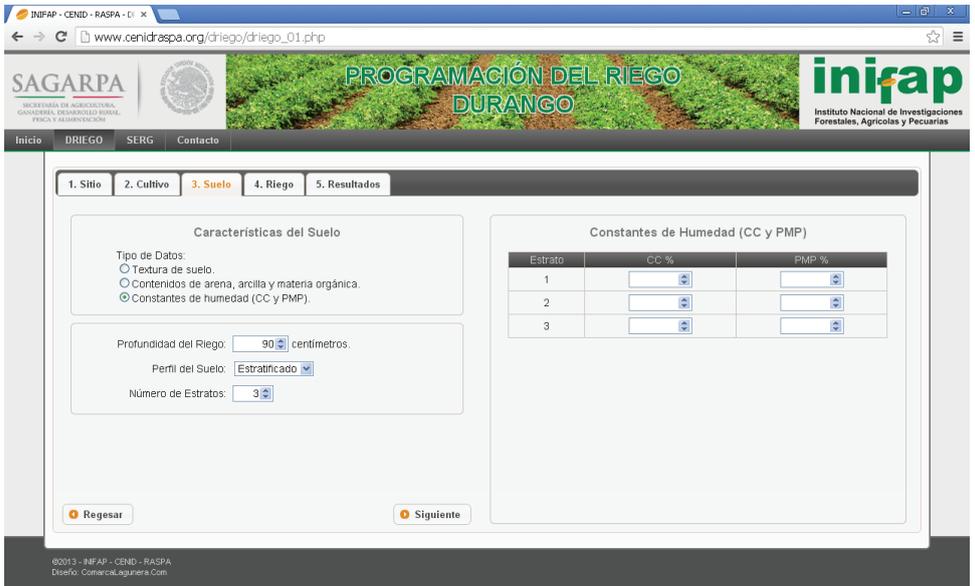


Figura 12. Tercera opción para los datos del suelo.

4. Riego: Solicita la información referente al sistema de riego y su manejo (Figura 13). Para el sistema de riego existen seis tipos a considerar: melgas, surcos, camas anchas, aspersión, goteo y micro aspersión. Cada uno de estos sistemas tiene un valor predefinido para la fracción del terreno humedecida por el riego, el cual es importante para estimar la evaporación directa del suelo. Este valor puede modificarse por parte del usuario, especialmente para los sistemas de riego presurizado.

También se solicita el tipo de control del riego: por abatimiento de la humedad aprovechable del suelo o por intervalos de riego. Dependiendo de esta elección, el programa despliega la duración de cada etapa del cultivo (inicial, desarrollo, intermedia y final) y solicita, ya sea la fracción de abatimiento máximo de la humedad aprovechable del suelo (FAM), o bien, el intervalo entre riegos en días para cada etapa. Dependiendo del tipo de control del riego, el programa propone valores predeterminados y uniformes (mismo valor para cada etapa) para FAM o para el

intervalo entre riegos, los cuales pueden modificarse de acuerdo con la sensibilidad del cultivo al estrés hídrico en cada etapa de su desarrollo. Valores mayores de FAM producirán mayor abatimiento de la humedad aprovechable, riegos más frecuentes (mayor número de riegos), láminas de riego menores y menor estrés hídrico. Lo contrario ocurrirá con valores de FAM mayores.

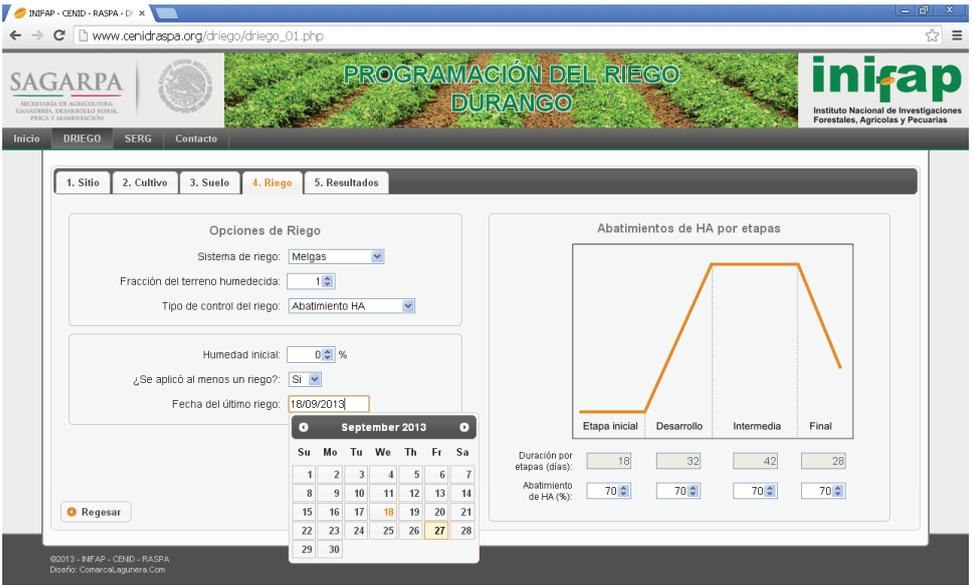


Figura 13. Tercera sección de la pantalla de captura de datos.

El campo “humedad aprovechable inicial” (HAI) se refiere al contenido de humedad del suelo previo al establecimiento del cultivo (θ_0), expresado como un porcentaje de la humedad aprovechable máxima (HA). El programa propone un valor de cero para indicar que el suelo se encuentra sin reservas de agua aprovechable por el cultivo, es decir, a un contenido de humedad igual al punto de marchitamiento permanente (PMP). En regiones con buen temporal como en el sureste del país, donde se aprovechan las lluvias de verano, el suelo suele estar a un contenido de humedad entre PMP (θ_{PMP}) y capacidad de campo (θ_{CC}), es decir a un valor de HAI entre cero y

100 por ciento, lo cual permite aplicar riego complementario, atrasando la aplicación del primer riego:

$$HAI = \frac{(\theta_0 - \theta_{PMP})}{(\theta_{CC} - \theta_{PMP})} * 100 \tag{15}$$

5. Resultados: Este botón ejecuta o corre el programa para los datos de entrada capturados y despliega, en ocho botones, el menú de resultados (Figura 14).

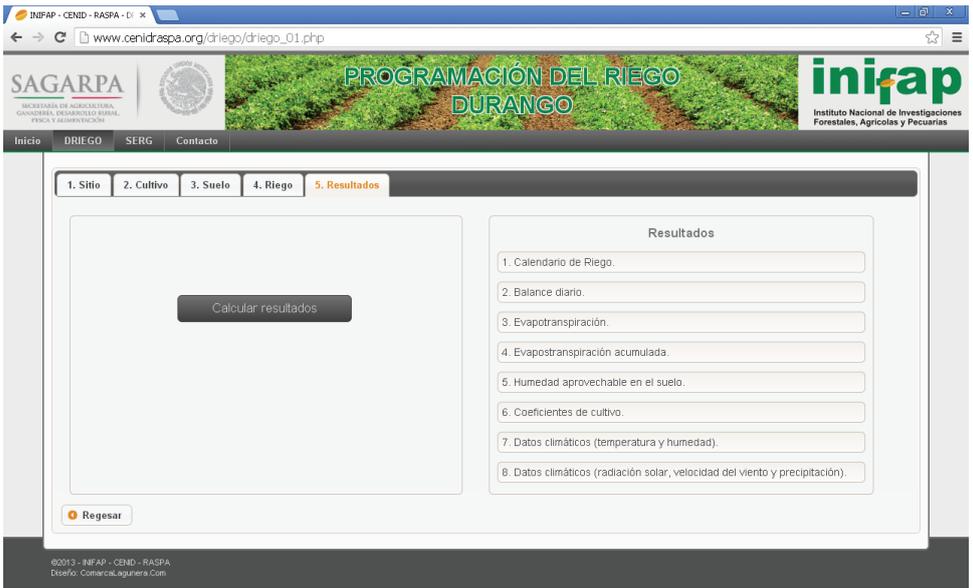


Figura 14. Menú de resultados.

El primer botón del menú de resultados “Calendario de Riego” muestra el programa o calendario de riegos, el cual incluye el número de riego, fecha de aplicación, intervalo de riego, lámina de riego y abatimiento de la humedad aprovechable para cada evento de riego programado. En la figura 15, y de acuerdo con los datos proporcionados en las pantallas de captura antes descritas, se presenta el calendario de riegos resultante de la ejecución del programa, que para el ejemplo fue realizada el 30 de Septiembre del 2013.

El cultivo considerado fue sorgo de 120 días de ciclo vegetativo, sembrado el 1 de Julio del 2013 cerca de la localidad “Agua Nueva”, en un suelo con textura franca uniforme hasta los 90 cm de profundidad y sin humedad inicial aprovechable. La oportunidad de los riegos se decidió con base en el 70% de abatimiento de la humedad aprovechable en el suelo en las cuatro etapas del ciclo vegetativo del cultivo.



Figura 15. Calendario de riegos.

Como encabezado del calendario de riegos aparecen algunas fechas como la de siembra, la actual de ejecución del programa, la del fin del ciclo y la del próximo riego. Aparecen también la lámina o dosis del próximo riego, el consumo de agua proyectado en el ciclo, el consumo de agua máximo o potencial y el porcentaje de reducción del rendimiento potencial, el cual se estima como una proporción de la diferencia entre los consumos de agua máximo y proyectado (Doorenbos y Kassam, 1996).

En el ejemplo aquí descrito, el programa fue ejecutado el 30 de septiembre del 2013. En esa fecha habían transcurrido 12 días desde la aplicación del último riego (4° riego de auxilio) y se pronosticaban 16 días más para aplicar el próximo riego (5° y último riego de auxilio) el 16 de octubre del 2013. Ejecuciones sucesivas del programa a medida que se aproxima la fecha pronosticada para el próximo riego permiten afinar el nivel de precisión o resolución a un día, es decir, pronosticar el próximo riego para el día de mañana, con base en información climatológica medida solamente.

El segundo botón del menú de resultados “Balance diario” presenta los datos tabulados de los componentes del balance de agua del suelo a nivel diario (Figura 16).

Aparecen el consumo de agua del cultivo en sus modalidades de evapotranspiración (ET) máxima y real; la evaporación y transpiración como componentes de la ET real, la lluvia efectiva y la percolación. Aparece también la humedad aprovechable disponible en la zona radicular del cultivo. Enseguida se presenta una breve descripción de cada una de estas variables.

Evapotranspiración máxima: límite máximo de evapotranspiración bajo condiciones estándar, cuando no existen obstáculos al crecimiento del mismo debido a limitaciones de agua, densidad del cultivo, enfermedades, malezas, insectos o excesiva salinidad.

Evapotranspiración real o actual: es la evapotranspiración resultante de los efectos del estrés hídrico inducido por la disminución de la humedad del suelo entre un riego y otro sobre la evapotranspiración máxima.

Precipitación efectiva: cantidad de lluvia aprovechable por el cultivo. Su valor depende de muchos factores como la intensidad y duración de los eventos lluviosos, tipo de suelo, cubierta vegetal y pendiente del terreno, entre otros.

Percolación: cantidad de agua que excede la capacidad de retención de agua por el suelo y que drena por debajo de la profundidad de raíces.

INIFAP - CENID - RASPA

Balance Diario

Fecha: Fin de ciclo:
 Lugar o sitio: Próximo riego:
 Entidad: Límite de próximo riego (cm):
 Estación: Consumo de agua proyectado en el ciclo (cm):
 Cultivo: Consumo máximo o potencial (cm):
 Fecha de siembra: Reducción del rendimiento potencial (%):

Día	Fecha	Humedad Aprovechable (cm)	ET de referencia (cm)	ET Máxima (cm)	Evaporación (cm)	Transpiración (cm)	ET real (cm)	Precipitación (cm)	Lluvia Efectiva (cm)
1	01/07/2013	12.69	0.51	0.35	0.28	0.00	0.28	0.00	0.00
2	02/07/2013	12.17	0.42	0.52	0.45	0.06	0.52	0.00	0.00
3	03/07/2013	12.16	0.37	0.46	0.40	0.06	0.46	0.00	0.45
4	04/07/2013	11.66	0.41	0.50	0.44	0.06	0.50	0.00	0.00
5	05/07/2013	11.02	0.52	0.84	0.57	0.08	0.64	0.00	0.00
6	06/07/2013	10.51	0.58	0.51	0.42	0.08	0.50	0.00	0.00
7	07/07/2013	10.20	0.54	0.32	0.23	0.08	0.32	0.00	0.00
8	08/07/2013	9.93	0.64	0.27	0.17	0.10	0.27	0.00	0.00
9	09/07/2013	9.76	0.58	0.17	0.09	0.09	0.17	0.00	0.00
10	10/07/2013	9.63	0.55	0.13	0.05	0.08	0.13	0.00	0.00
11	11/07/2013	9.58	0.58	0.12	0.03	0.09	0.12	0.00	0.00
12	12/07/2013	10.09	0.43	0.08	0.01	0.07	0.08	0.00	0.67
13	13/07/2013	9.79	0.48	0.31	0.23	0.07	0.31	0.00	0.00
14	14/07/2013	9.51	0.59	0.28	0.19	0.09	0.28	0.00	0.00
15	15/07/2013	9.30	0.62	0.22	0.12	0.09	0.22	0.00	0.00
16	16/07/2013	9.12	0.68	0.18	0.07	0.10	0.18	0.00	0.00
17	17/07/2013	8.99	0.64	0.13	0.04	0.10	0.13	0.00	0.00
18	18/07/2013	8.87	0.65	0.12	0.02	0.10	0.12	0.00	0.00
19	18/07/2013	8.76	0.63	0.10	0.01	0.09	0.10	0.00	0.00
20	20/07/2013	10.40	0.57	0.11	0.01	0.10	0.11	0.00	1.75
21	21/07/2013	9.79	0.54	0.67	0.55	0.10	0.67	0.00	0.65
22	22/07/2013	9.76	0.56	0.58	0.44	0.14	0.58	0.00	0.57

Figura 16. Componentes del balance del agua en el suelo.

El tercer botón del menú de resultados “Evapotranspiración” presenta gráficas del consumo de agua diario (ET máxima, ET real y Transpiración) a través del ciclo del cultivo (Figura 17). El cuarto botón “Evapotranspiración acumulada” presenta los mismos datos en valores acumulados (Figura 18). Por su parte, el quinto botón de resultados “Humedad aprovechable en el suelo” presenta dos gráficas que ilustran la variación de la humedad aprovechable del suelo durante el ciclo del cultivo, tanto en porcentaje como en lámina de agua (Figura 19).

El sexto botón del menú de resultados “Coeficientes de cultivo” muestra los valores de los coeficientes del cultivo a través de su ciclo vegetativo. Se presentan los valores del coeficiente basal (K_{cb}) que determina la transpiración del cultivo, el coeficiente K_e que determina la evaporación directa desde la superficie del suelo, y la suma de ambos coeficientes que determina la evapotranspiración (Figura 20).

En las figuras 17 y 20 se puede apreciar cómo el coeficiente dual del cultivo permite estimar, de manera separada y a través del coeficiente K_e , la magnitud de la evaporación directa, afectada tanto por el desarrollo del cultivo como por el tipo de sistema de riego utilizado y su manejo. Riegos frecuentes, amplia superficie humedecida y poca cobertura del terreno incrementan K_e y en consecuencia, la evaporación directa al inicio del ciclo del cultivo, especialmente en cultivos anuales.

Los dos últimos botones del menú de resultados “Datos climáticos” presentan gráficas con los valores de las variables climatológicas registrados durante la estación de crecimiento del cultivo. El penúltimo botón muestra los valores máximos y mínimos diarios de la temperatura y la humedad relativa del aire (Figura 21), mientras que el último botón muestra la radiación solar, velocidad del viento y la precipitación (Figura 22).

Todas las gráficas desplegadas pueden visualizarse e imprimirse todas juntas o bien una por una. Al correr el cursor sobre ellas, se muestran los valores diarios de cada variable. También es posible exportarlas en los formatos PGN, JPEG, PDF y como vector SVG, oprimiendo el botón mostrado en la esquina superior derecha del campo de visualización de cada gráfica.

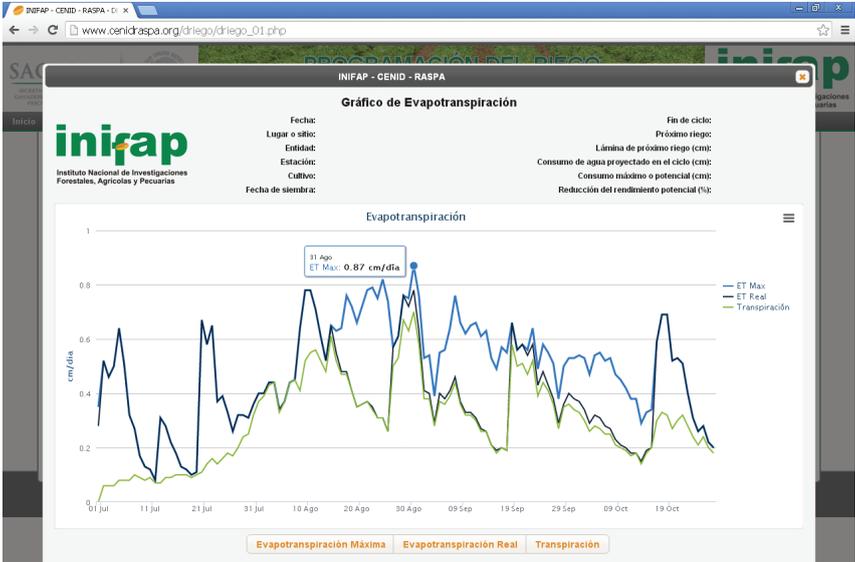


Figura 17. Consumo de agua a través del ciclo del cultivo.

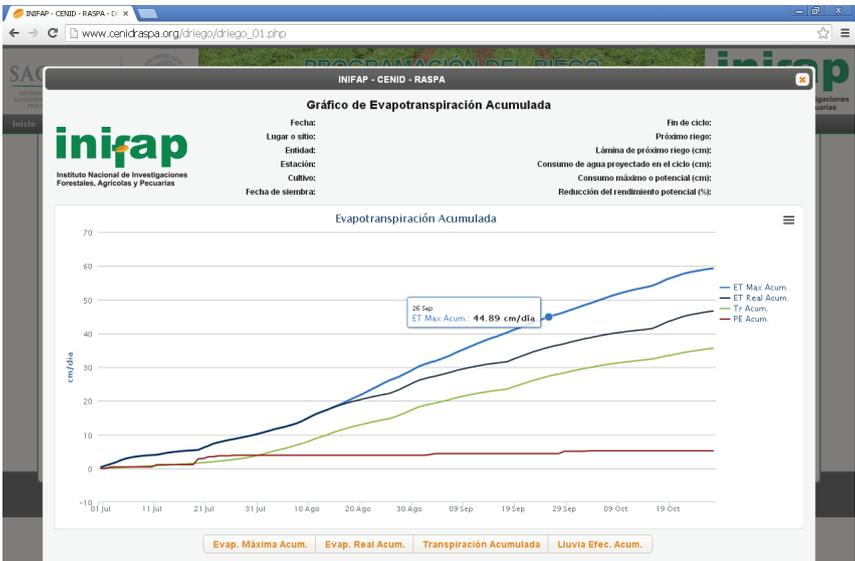


Figura 18. Datos acumulados del consumo de agua y la precipitación efectiva.

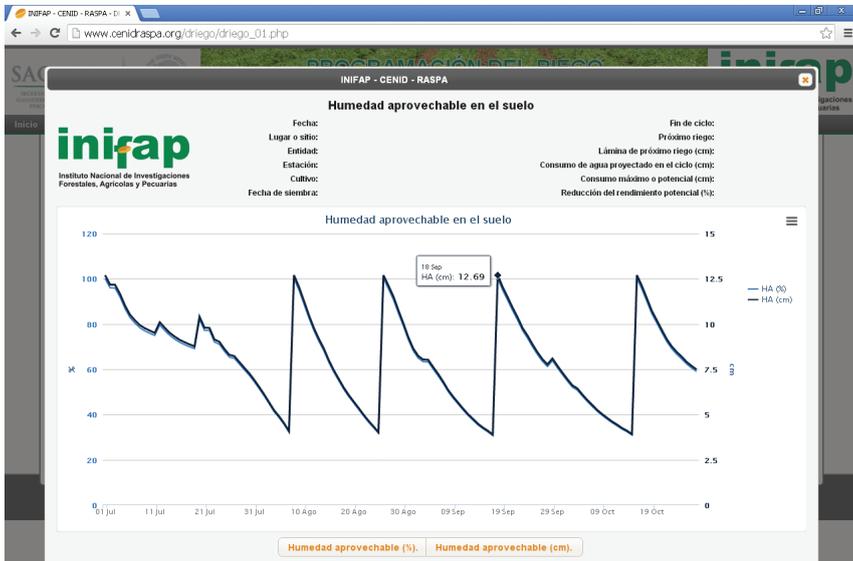


Figura 19. Variación de la humedad aprovechable en el suelo.

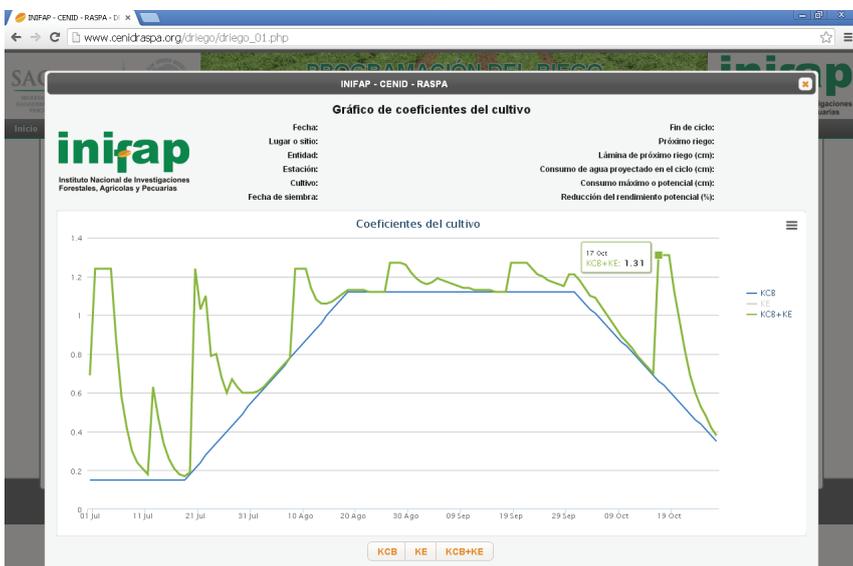


Figura 20. Variación de los coeficientes de cultivo.

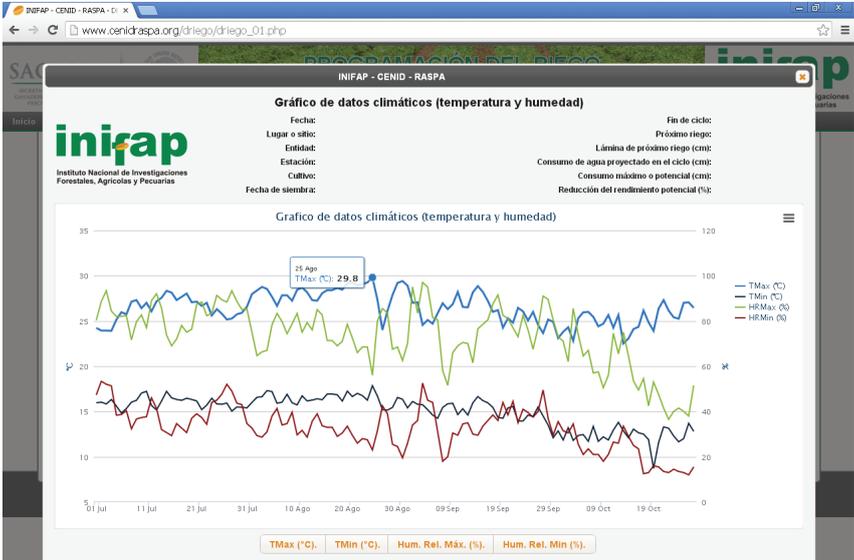


Figura 21. Valores extremos de temperatura y humedad del aire.

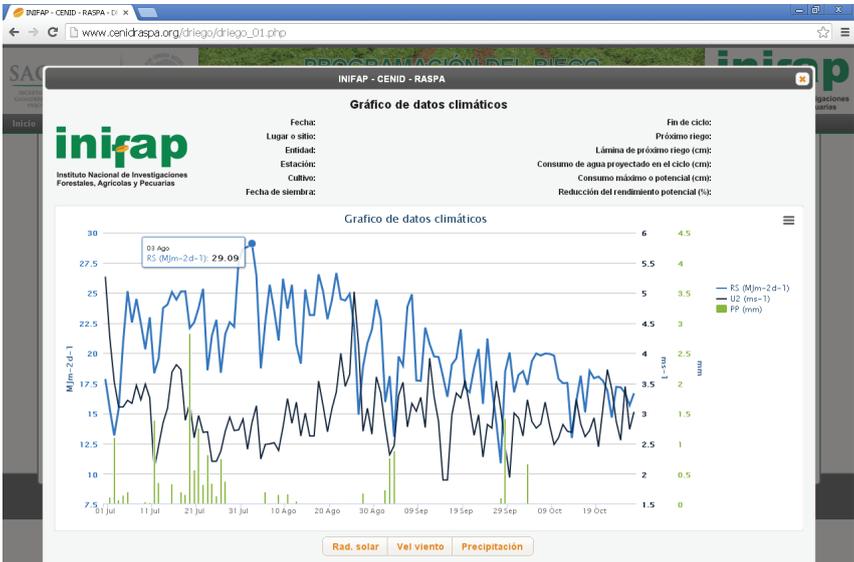


Figura 22. Radiación solar, velocidad del viento y precipitación.

CONCLUSIONES

El programa DRIEGO del sistema IRRINET es una herramienta de asistencia técnica en línea para que los usuarios del riego incorporen un mayor soporte técnico a la tarea de programar el riego de sus cultivos. El acceso irrestricto y gratuito al sistema por parte de los usuarios a través de Internet contribuye a la difusión y transferencia de la tecnología de riego disponible restituyendo, en cierta medida, parte de la asistencia técnica que el gobierno federal proporcionaba en esta materia y que fue suspendida desde hace ya algunas décadas.

La herramienta aquí propuesta hace una estimación del consumo de agua con base en las metodologías recomendadas por la Organización Meteorológica Mundial y la FAO para la programación del riego en tiempo real. El uso de datos climáticos recientes o actuales constituye una mejora con respecto al uso de datos históricos del clima. Es por estas características que es aplicable no sólo para la planeación de los recursos hidráulicos sino también para la operación y manejo de los sistemas de riego.

Además de los usuarios del riego, maestros y estudiantes pueden utilizar el programa con fines didácticos, para entender mejor los principios teóricos involucrados en su desarrollo; así como investigadores para ayudar a definir posibles acciones de investigación orientadas al refinamiento de las técnicas utilizadas en el programa.

El programa también puede utilizarse como herramienta para la planeación y toma de decisiones sobre el uso de los recursos hídricos, tareas en las cuales el conocimiento de las necesidades hídricas de los cultivos es básico e indispensable.

LITERATURA CITADA

- Allen R., G.; Cuenca R., H.; Jensen M., E.; Pruitt W., O.; Blatchlet R., K.; Erpenbeck J., M.; Johns E., L.; Stone J., F.; Burman R., D.; Hill R., W.; Nixon P., R. and Wright J., L. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. Jensen M., E.; Burman R., D. and Allen R., G. Editors. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York.
- Catalán V., E.A.; Villa C., M.M.; Inzunza I., M.A.; Mendoza, M., S.F. y Román L., A. 2006. Caracterización de la variabilidad espacial de las propiedades hidráulicas de los suelos de la Región Lagunera. Memorias de la XVII Semana Internacional de Agronomía. Gómez Palacio, Dgo.

- CNA (Comisión Nacional del Agua). 2008. Estadísticas del Agua en México. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, D.F.
- Doorenbos J. and Kassam A., H. 1996. Yield response to water. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 33. Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome, Italy.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. Training Manual No. 4. Rome Italy.
- Monteith J. L. 1981. Evaporation and surface temperature. Quart. J. Roy. Met. Soc. 107, 1–27.
- Rawls W., J. and Brankensiek D., L. 1982. Estimating soil water retention from soil properties. Journal of the ASCE 108: 166-171.
- Saxton K., E.; Rawls W., J.; Romberger J., S. and Papendick R., I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1031-1036.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2013. Programa Nacional Hídrico 2014-2018. Boulevard Adolfo Ruiz Cortines No. 4209 Col. Jardines en la Montaña C.P. 14210, Tlalpan, México, D.F.
- USDA. 1952. Soil Survey Manual. USDA Handbook 18. USDA. Washington, DC.

Comité Editorial del **CENID-RASPA**

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong

Secretario: Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle

Vocales: Dr. Juan Estrada Ávalos

M.C. Miguel Rivera González

REVISIÓN TÉCNICA:

Dr. Ignacio Sánchez Cohen

Dr. Juan Guillermo Martínez Rodríguez

Esta publicación se terminó de imprimir
en el mes de Diciembre del 2014 en los
Talleres de Carmona Impresores S.A. de C.V.
Blvd. Paseo del Sol #115 Col. Jardines del Sol
C.P. 27014 Torreón, Coah., México.
Su tiraje consta de 550 ejemplares

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN LA RELACIÓN AGUA SUELO PLANTA ATMÓSFERA

Dr. José Antonio Cueto Wong
Director
Ing. Armando Estrada González
Jefe de Operación
Lic. Flor Carina Espinoza Delgadillo
Jefe Administrativo

Personal Investigador

M.C. Palmira Bueno Hurtado
Dr. Ernesto Alonso Catalán Valencia
M.C. Julián Cerano Paredes
Ing. Vicenta Constante García
M.C. Gerardo Delgado Ramírez
M.C. Gerardo Esquivel Arriaga
Dr. Juan Estrada Ávalos
Dr. José Luis González Barrios
Dr. Guillermo González Cervantes
Dr. Marco Antonio Inzunza Ibarra
M.C. Rosario Jacobo Salcedo
M.C. Hilario Macías Rodríguez
Dr. Jesús Arcadio Muñoz Villalobos
M.C. María del Carmen Potisek Talavera
M.C. Miguel Rivera González
M.C. Abel Román López
Dr. Ignacio Sánchez Cohen
M.C. Ramón Trucios Caciano
Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle
Dra. Ma. Magdalena Villa Castorena
Dr. José Villanueva Díaz

www.INIFAP.GOB.MX

La programación del riego, es decir, la técnica consistente en determinar la cantidad de agua y el momento en que han de regarse los cultivos es un instrumento fundamental para lograr un uso eficiente del agua. Regularmente se realiza sin soporte técnico, razón por la cual se requiere mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada. El objetivo de este trabajo fue desarrollar un programa de cómputo para que los usuarios de los distritos y unidades de riego calculen, en línea y tiempo real, las demandas de agua de sus cultivos y programen sus riegos. El subprograma DRIEGO del sistema IRRINET resuelve el balance de agua en el suelo a nivel diario a partir de la estimación de cada uno de sus componentes: riego y lluvia efectiva como principales entradas de agua, así como evapotranspiración del cultivo y percolación o drenaje como salidas de agua más importantes (<http://www.cenidraspa.org>). Cuenta con acceso en tiempo real a los datos de las redes de estaciones climatológicas estatales e incluye una base de datos con información de 54 cultivos: ciclos de cultivo, fechas de siembra, profundidad de raíces, criterios de abatimiento de humedad del suelo y coeficientes de cultivo para la estimación de la evapotranspiración.