



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**SISTEMA PARA EL DISEÑO AGRONÓMICO DE RIEGO EN
PLATAFORMA SIG EN EL DR 001 PABELLÓN DE
ARTEAGA, ESTADO DE AGUASCALIENTES.**

JOSÉ GENARO CONTRERAS FLORES

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO.

2014

La presente tesis, titulada: **Sistema para el Diseño Agronómico de Riego en Plataforma SIG en el DR 001 Pabellón de Arteaga, Estado de Aguascalientes**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

Consejero:



DRA. MA. DE LOURDES DE LA ISLA SERRANO

Asesor:



DR. JORGE ARTURO SALGADO TRÁNSITO

Asesor:



M.C. ENRIQUE RODRÍGUEZ CRUZ

Asesor:



M.C. SANDRA LUZ TORRES SUÁREZ

Montecillo, Texcoco, México, Julio de 2014.

Sistema para el Diseño Agronómico de Riego en Plataforma SIG en el DR 001

Pabellón de Arteaga, Estado de Aguascalientes

Contreras Flores José Genaro, MC.

Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue desarrollar un sistema informático para la determinación del requerimiento de riego en un ambiente de sistemas de información geográfico para el Distrito de Riego 001 Pabellón en el Estado de Aguascalientes, denominado “RdR” (Requerimiento de Riego). Dicho sistema se alimentó, entre otra información, de capas vectoriales de las parcelas del distrito de riego, la delimitación política del estado de Aguascalientes (con sus municipios), y estaciones climatológicas. Las bases de datos incluidas corresponden a los registros históricos de información climatológica de las estaciones de la región, además de los cultivos y tipo de suelo con sus características. La ecuación utilizada para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (E_t0) fue la de Penman-Monteith, y la precipitación efectiva (PE) tiene 4 opciones a elegir para su determinación, en general la metodología se siguió de acuerdo a las recomendaciones de la FAO. La programación de “RdR” se realizó en el lenguaje C#, programación orientada a objetos (POO). Y la validación del sistema se efectuó mediante el análisis de varianza (ANOVA) de los resultados de E_t0 obtenidos para los cultivos de maíz y avena forrajera con “RdR” vs los obtenidos con el programa CROPWAT 8.0, dónde se encontró que $F_{calc}=2817.23 > F_{\alpha,1,n-2}=4.96$ para el cultivo de maíz y $F_{calc}=1828.82 > F_{\alpha,1,n-2}=4.96$ para la avena forrajera, por lo que en ambos casos se rechazó la hipótesis nula de no linealidad, es decir, los resultados no presentaron diferencias estadísticamente significativas ($\alpha=0.05$). En conclusión, el sistema “RdR” arroja resultados confiables en la determinación de los requerimientos de riego, que al manejarse en un ambiente de información geográfica facilita su determinación, en este caso para el DR 001 Pabellón, en el Estado de Aguascalientes.

Palabras clave: evapotranspiración, requerimiento de riego, precipitación efectiva, validación, CROPWAT, Aguascalientes.

**System for agronomic design of irrigation on GIS platform in the DR 001 Pabellón de
Arteaga, Aguascalientes state.**

Contreras Flores José Genaro, MC.

Colegio de Postgraduados, 2014

ABSTRACT

The aim of this work was to develop a computer system for determining the irrigation requirement in an environment of geographical information system for the Irrigation District 001 Pabellón in Aguascalientes state, called "RDR" (Irrigation Requirement). The system was supplied, among other information, vector layers of the plots of the irrigation district, the political boundaries of the state of Aguascalientes (with municipalities), and weather stations. The databases included correspond to the historical records of climatological information of the stations of the region, and type of crop and soil characteristics. The equation used for calculating reference evapotranspiration (ET₀) was Penman-Monteith, and effective precipitation (PE) has 4 options to choose from for their determination, in general methodology was followed according to the recommendations of the FAO. Programming "RDR" was held in the C# language, object-oriented programming (OOP). And the validation of the system was performed by analysis of variance (ANOVA) of the results obtained ET₀ for growing corn and forage oats with "RDR" vs those obtained with the 8.0 CROPWAT program, where it was found that $F_{calc} = 2817.23 > F_{\alpha, 1, n-2} = 4.96$ for corn and $F_{calc} = 1828.82 > F_{\alpha, 1, n-2} = 4.96$ in forage oats, so the null hypothesis of non-linearity in both cases was rejected, i.e. the results showed no statistically significant differences ($\alpha = 0.05$). In conclusion, the "RDR" system provide reliable results for determining irrigation requirements, that used in an environment of geographical information facilitates its determination in this case for the DR 001 Pabellón in Aguascalientes state.

Keywords: evapotranspiration, irrigation requirement, effective rainfall, validation, CROPWAT, Aguascalientes.

DEDICATORIA

A mi madre con todo mi cariño, gracias porque has hecho todo lo posible para que yo salga adelante, has sido un pilar en mi formación y educación, me has apoyado en todo lo que he emprendido y gracias por tus consejos y enseñanzas de la vida.

A mi tía Juana, gracias porque has sido como una segunda madre, que siempre me has brindado tu cariño y apoyo incondicional.

A mi abuelo Leonardo que ya está en el cielo, pero que siempre lo recordaré porque fue un gran hombre y un padre para mí.

A mi esposa, gracias por tu amor, apoyo y compañía en este camino, sé que has sacrificado muchas cosas para que yo pudiera realizar este logro.

A mis hijas Leilani y Etel, a quienes amo y son la fuente de mi motivación para seguir adelante en la vida.

A mis hermanos Javier, José Luis y Enrique con quienes he compartido alegrías y tristezas, gracias por la confianza que han tenido en mí y sobretodo porque sé que cuento con ustedes.

A mis amigos por compartir muchos de los mejores y peores momentos de la vida: Arturo, Celedonio, Juan Carlos, Jesús y Roberto.

A mi familia en general por sus palabras de aliento, en especial a mi abuela Victorina, tías María Flores, Leticia y María Contreras.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, porque gracias a él todo esto es posible.

Al Colegio de Postgraduados y su personal porque gracias a esta Institución se forman profesionales que son parte de la generación de conocimiento para un México mejor.

Mi agradecimiento al CONACYT por el recurso económico brindado y que gracias a ello es posible sostenerse económicamente durante el proceso de investigación.

Agradezco a mi directora de Tesis la Dra. Ma. De Lourdes de la Isla por su paciencia, comprensión y apoyo durante la ejecución de la presente tesis.

Agradezco a mis asesores Dr. Arturo Salgado, M.C. Sandra Luz Torres y M.C. Enrique Rodríguez, por su gran apoyo y disposición, su conocimiento y experiencia fue de suma importancia para orientarme en la realización de esta tesis.

Un agradecimiento especial al Dr. Abel Quevedo por su apoyo total así como sus atinadas observaciones e impulsarme a terminar el presente trabajo.

Un agradecimiento a quienes me apoyaron y compartieron su conocimiento así como su ayuda en la revisión de mi investigación: Gonzalo, Sandra, Andrés, Enrique, Fernando y Yesica.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. GENERAL.....	14
2.2. PARTICULARES.....	14
3. HIPÓTESIS	15
4. REVISIÓN DE LITERATURA	16
4.1. DISEÑO AGRONÓMICO	16
4.2. DATOS NECESARIOS PARA EFECTUAR EL DISEÑO AGRONÓMICO	16
4.2.1. <i>Necesidades de agua de los cultivos</i>	18
4.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	20
4.3.1. <i>Método de Penman-Monteith</i>	22
4.3.2. <i>Método de Blanney-Cridde modificado por Phelan</i>	32
4.3.3. <i>Método del tanque evaporímetro tipo A</i>	35
4.4. COEFICIENTE DE CULTIVO.....	38
4.5. LLUVIA EFECTIVA O PRECIPITACIÓN EFECTIVA (PE)	46
4.6. EFICIENCIA DE APLICACIÓN	49
4.7. UNIFORMIDAD DE EMISIÓN	52
4.8. NECESIDADES NETAS DE RIEGO.....	52
4.9. NECESIDADES TOTALES DE RIEGO.....	55
4.10. NECESIDADES DE LAVADO	56
4.11. SOFTWARE EXISTENTE PARA LA DETERMINACIÓN DE REQUERIMIENTO DE RIEGO.	59
4.11.1. <i>CROPWAT</i>	59
4.11.2. <i>BLANEY</i>	62
4.11.3. <i>DEMANDA</i>	63
4.11.4. <i>REQUERI</i>	63
4.11.5. <i>RASPAWIN</i>	63
4.11.6. <i>SPRITER</i>	63
4.12. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG).....	64
4.12.1. <i>Elementos de un SIG</i>	64
4.12.2. <i>Referencia Geográfica</i>	66
4.12.3. <i>Ventajas de los SIG</i>	68
4.13. CONCLUSIONES DE REVISION DE LITERATURA	68
5. MATERIALES Y MÉTODOS	69
5.1. MATERIALES	69
5.1.1. <i>Hardware</i>	69
5.1.2. <i>Software</i>	69
5.1.3. <i>Información climática</i>	69
5.1.4. <i>Información edáfica</i>	69
5.1.5. <i>Cultivos</i>	70
5.1.6. <i>Otros</i>	70

5.2.	MÉTODOS	71
5.2.1.	<i>Elección de la fórmula a emplear en los cálculos de Evapotranspiración de referencia E_{t_0}..</i>	71
5.2.2.	<i>Determinación de la precipitación efectiva (PE).....</i>	71
5.2.3.	<i>Requerimiento y Calendario de Riego</i>	72
5.2.4.	<i>Programación del sistema.....</i>	73
6.	RESULTADOS	75
6.1.	ESTRUCTURA GENERAL DE LA PROGRAMACIÓN DEL SISTEMA “RdR”	75
6.2.	BASE DE DATOS ASOCIADA	76
6.3.	REQUISITOS, COMPONENTES DEL SOFTWARE E INSTALACIÓN DEL RdR.....	78
6.4.	DESCRIPCIÓN DEL CUADRO DE DIALOGO PRINCIPAL DEL SISTEMA RdR.....	79
6.5.	MENÚ Y SUBMENÚS	79
6.6.	INTEGRACIÓN DE INFORMACIÓN DE BASE DE DATOS Y SHP.	80
6.7.	APLICACIÓN DEL RdR PARA DETERMINAR LOS REQUERIMIENTOS DE RIEGO.....	84
6.7.1.	<i>Composición del programa</i>	84
6.7.2.	<i>Ejecución del RR.....</i>	85
6.7.3.	<i>Características generales</i>	85
6.7.4.	<i>Ejemplo de calculo.....</i>	99
6.8.	VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	120
6.8.1.	<i>Cultivo de Maíz.....</i>	120
6.8.2.	<i>Cultivo de Avena Forrajera</i>	129
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	139
7.1.	CONCLUSIONES.....	139
7.2.	RECOMENDACIONES	139
8.	LITERATURA CITADA.....	140

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Porcentaje de horas luz o insolación en el día para cada mes del año en relación al número total en un año.	33
Cuadro 2.	Coeficiente global (Kg) para diferentes cultivos.	34
Cuadro 3.	Coeficiente de tanque evaporímetro.....	36
Cuadro 4.	Etapas de desarrollo del cultivo, según FAO.	39
Cuadro 5.	Coeficiente de cultivo (Kc) para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos anuales.	41
Cuadro 6.	Coeficiente de cultivo (Kc) para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos perennes.	42
Cuadro 7.	Coeficientes de cultivo recomendado por la FAO.	42
Cuadro 8.	Eficiencia de aplicación típica para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm.	51
Cuadro 9.	Rangos Recomendados para la Uniformidad de Emisión.....	52
Cuadro 10.	Tolerancia del cultivo a las sales, expresada en Conductividad Eléctrica (CEe).....	58
Cuadro 11.	Cuadro de resultados en resumen de los riegos (cantidad y fecha de aplicación). ...	120
Cuadro 12.	Datos de la estación meteorológica el Chayote Tepezala (1904).....	121
Cuadro 13.	Resultados comparativos para la ETo, cultivo de maíz.....	121
Cuadro 14.	Estadísticas de la regresión Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de maíz.....	123
Cuadro 15.	Análisis de varianza Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de maíz.....	123
Cuadro 16.	Análisis de los residuales Et0 Cropwat-Et0 RdR cultivo de maíz	124
Cuadro 17.	Resultados de precipitación efectiva por programa, cultivo de maíz.	126
Cuadro 18.	Características generales del cultivo del maíz.	127
Cuadro 19.	Características del suelo, cultivo de maíz	127
Cuadro 20.	Cuadro comparativo de resultados en lámina neta para ambos programa, cultivo de maíz.	128
Cuadro 21.	Cuadro comparativo de requerimiento de riego por programa, cultivo de maíz.	129
Cuadro 22.	Resultados comparativos de ET0, cultivo de avena.....	130
Cuadro 23.	Estadísticas de la regresión Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.....	132
Cuadro 24.	Análisis de varianza Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.....	132
Cuadro 25.	Análisis de los residuales Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.	132
Cuadro 26.	Resultados de precipitación efectiva por programa, cultivo de avena.	135
Cuadro 27.	Características generales del cultivo de avena forrajera.....	135
Cuadro 28.	Características del suelo, cultivo de avena	136
Cuadro 29.	Cuadro comparativo de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de avena.	137
Cuadro 30.	Cuadro comparativo de requerimiento de riego en cada programa, cultivo de avena.	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Determinación de las necesidades totales de agua de riego de los cultivos.	19
Figura 2.	Factores que afectan la evapotranspiración.....	21
Figura 3.	Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.	21
Figura 4.	Componentes de la radiación.	30
Figura 5.	Forma de instalación del tanque evaporímetro tipo A, caso A.	37
Figura 6.	Forma de instalación del tanque evaporímetro tipo A, Caso B. Fuente: Duran, 2000.	37
Figura 7.	Coeficiente del cultivo y etapas de desarrollo.	38
Figura 8.	Determinación de la evapotranspiración real del cultivo.	39
Figura 9.	Componentes de la precipitación efectiva.	47
Figura 10.	Eficiencia de aplicación.....	50
Figura 11.	Fracción de área sombreada.	54
Figura 12.	Balance de agua en la zona radicular.	57
Figura 13.	Esquema de la ventana principal de CROPWAT.	61
Figura 14.	“Barra de módulos” con acceso directo (izquierda) y barra de herramientas (derecha).	62
Figura 15.	Modelo vector y modelo raster.	67
Figura 16.	Diagrama de Flujo del programa “Requerimiento de Riego”.....	75
Figura 17.	Bases de datos contenidas dentro del programa “Requerimiento de Riego”.....	77
Figura 18.	Ventana principal del programa “Requerimiento de Riego”.	79
Figura 19.	Información de estaciones.	80
Figura 20.	Información de Estados.	81
Figura 21.	Información de Perímetro.	81
Figura 22.	Información de Riego 001 Pabellón.....	82
Figura 23.	Información de Organismo de Cuenca.	83
Figura 24.	Información de Cuencas.	83
Figura 25.	Ventana de ingreso de contraseña.	85
Figura 26.	Ventana principal.	86
Figura 27.	Opciones y herramientas ubicadas en la parte superior.	86
Figura 28.	Herramientas para el sistema de información geográfica.	86
Figura 29.	Herramientas que se ubica en la parte izquierda.	87
Figura 30.	Herramientas para manipulación del sistema de información geográfica.	88
Figura 31.	Distintas capas disponibles para ser seleccionadas.	88
Figura 32.	Características de la capa de estaciones meteorológicas seleccionada.	88
Figura 33.	Icono para selección múltiple de estaciones meteorológicas.	89
Figura 34.	Distintas estaciones seleccionadas.	89
Figura 35.	Icono para cálculo de Evapotranspiración de referencia.....	90
Figura 36.	Ventana de cálculo de evapotranspiración.....	90
Figura 37.	Grafica de la evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas anuales.	91
Figura 38.	Icono de cálculo de precipitación efectiva.	91
Figura 39.	Distintos métodos disponibles del cálculo de la precipitación efectiva (PE).	92
Figura 40.	Diálogo donde se indica el cálculo de precipitación efectiva (PE).	92
Figura 41.	Grafía de precipitación anual y precipitación efectiva expresada en milímetros.	92
Figura 42.	Icono para selección de cultivo.....	93
Figura 43.	Cuadro para selección de cultivo y modificación de características.	93

Figura 44.	Icono para selección de suelo.	94
Figura 45.	Cuadro para selección de suelo y modificación de características.	94
Figura 46.	Icono de opciones de RR.	94
Figura 47.	Opciones para modificar eficiencia y tiempo de riego.	95
Figura 48.	Icono de cálculo de Requerimiento de agua	95
Figura 49.	Cálculo de requerimiento de riego.	95
Figura 50.	Icono de cálculo de calendario de riego.	96
Figura 51.	Calendario de riego.	96
Figura 52.	Grafica de humedad aprovechable, humedad permisible y déficit durante toda la etapa de desarrollo del cultivo expresada en milímetros.	98
Figura 53.	Vista general de la ventana de trabajo de R_0R	100
Figura 54.	Vista del botón de Selección múltiple y del área de trabajo.	101
Figura 55.	Vista de la Estación Meteorológica 1094.	101
Figura 56.	Vista de la Estación Meteorológica 1025.	102
Figura 57.	Vista de la Estación Meteorológica 1014.	102
Figura 58.	Vista de las estaciones meteorológicas seleccionadas y aviso de transferencia satisfactoria de datos.	103
Figura 59.	Vista del botón de ET_0 y ventana de ET_0	104
Figura 60.	Vistas de la opción calcular y transferir datos de la ventana ET_0	104
Figura 61.	Vistas de la opción graficar y ventana de gráfica de ET_0	105
Figura 62.	Vistas de cambiar grafico de la ventana de gráfica de ET_0	106
Figura 63.	Vista de Gráfica con cambio de tipo de gráfico.	106
Figura 64.	Vista de ventana para exportar Gráfica a imagen.	107
Figura 65.	Gráfica exportada como imagen.	107
Figura 66.	Vista de botón de Precipitación (PE) y ventana de PE.	108
Figura 67.	Vistas de método de cálculo, cálculo de PE y transferencia de datos a gráfica de la ventana de PE.	108
Figura 68.	Representación de grafica de precipitación efectiva (PE).	109
Figura 69.	Cuadro de diálogo para exportar Gráfica en formato de imagen.	109
Figura 70.	Vista de grafica exportada a imagen.	110
Figura 71.	Vista de botón de cultivo y ventana de cultivo.	110
Figura 72.	Vista de clasificación de cultivo y cultivo.	111
Figura 73.	Vista de entrada de fecha de siembra.	111
Figura 74.	Vista de transferencia de datos de la ventana de cultivo.	112
Figura 75.	Vista de botón de suelo y ventana de suelo.	112
Figura 76.	Vista de selección de tipo de suelo.	113
Figura 77.	Vista de transferencia de datos.	113
Figura 78.	Vista de botón y ventana de requerimientos de agua.	114
Figura 79.	Vistas de botón de opciones y cambio en la eficiencia de riego.	114
Figura 80.	Vista de recalcular en la ventana de requerimientos de agua.	115
Figura 81.	Vistas de botón y ventana de calendario.	115
Figura 82.	Vista de opción "mostrar rangos" en la ventana de calendario.	116
Figura 83.	Vista del calendario de riego en la ventana calendario.	116
Figura 84.	Vista de la opción "exportar calendario" de la ventana de calendario.	117
Figura 85.	Vista de la opción "exportar programa de riego" de la ventana de calendario.	117
Figura 86.	Vista de la opción transferir datos para ver gráfica.	118
Figura 87.	Vista de la ventana de grafica de calendario.	118
Figura 88.	Vista de la opción de exportar gráfica a imagen.	119
Figura 89.	Grafica en formato de imagen.	119

Figura 90.	Comparación de cálculo de ETo. en programa CROPWAT 8.0 y RdR, cultivo de maíz	121
Figura 91.	Gráfica comparativa para cálculo del ETo, cultivo de maíz.....	122
Figura 92.	Gráfica Regresión lineal Et0 Cropwat – Et0 RdR, cultivo de maíz.....	124
Figura 93.	Gráfica Gráfico de los residuales, cultivo de maíz	125
Figura 94.	Calculo de la precipitación efectiva en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz	126
Figura 95.	Ingreso de datos del cultivo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz	127
Figura 96.	Ingreso de datos del suelo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz.	127
Figura 97.	Gráfica comparativa de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de maíz.	128
Figura 98.	Grafica comparativa de resultados para cada parámetro en cada programa, cultivo de maíz.	129
Figura 99.	Comparación de cálculo de ETo. en programa CROPWAT 8.0 y RdR, cultivo de avena.	130
Figura 100.	Gráfica comparativa para cálculo del ETo, cultivo de avena.....	131
Figura 101.	Gráfica Regresión lineal Et0 Cropwat – Et0 RdR, cultivo de avena.....	133
Figura 102.	Gráfica de los residuales, cultivo de avena	134
Figura 103.	Calculo de la precipitación efectiva en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de avena.	134
Figura 104.	Ingreso de datos del cultivo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (derecha) y RdR (izquierda), cultivo de avena.....	136
Figura 105.	Ingreso de datos del suelo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha).....	136
Figura 106.	Gráfica comparativa de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de avena.	137
Figura 107.	Grafica comparativa de resultados para cada parámetro en cada programa, cultivo de avena.	138

1. INTRODUCCIÓN

Para el buen desarrollo de los cultivos de una zona agrícola, es preponderante satisfacer de manera óptima las necesidades hídricas, tanto en cantidad como en tiempo oportuno, y obtener condiciones favorables que conlleven a maximizar los rendimientos éstos. Es por ello que se debe realizar un diseño agronómico que garantice la demanda máxima y con ello determinar la capacidad del sistema de riego, que será la base para la planeación y cálculo del diseño hidráulico.

En el proceso del diseño agronómico es de suma importancia el estimar el requerimiento de riego, el cual contempla las necesidades hídricas menos las aportaciones; dentro de las necesidades hídricas el proceso de cálculo de la evapotranspiración del cultivo no es sencillo, ya que es un fenómeno físico complejo que involucra la interacción del clima, cultivo y suelo.

Dado que no se dispone con la suficiente información de las variables de clima, cultivo y suelo, para la determinación de la evapotranspiración, se han desarrollado numerosas metodologías para estimar la información faltante en función de los distintos modelos matemáticos, relaciones biofísicas, empíricas, que se pretenda utilizar. Una de las variables importantes para estimar las necesidades de riego en los cultivos, es la evapotranspiración de referencia (E_t_0). Existen diferentes modelos para calcularla, uno de estos es la ecuación de Penman-Monteith, que emplea la FAO, como una referencia a nivel mundial, ya que considera los componentes aerodinámicos, energéticos y de sequedad de la atmósfera, por lo que ha mostrado buenos resultados. El software de CROPWAT, entre otros usos, es una herramienta para determinar las necesidades de agua de los cultivos, así como los calendarios de riego.

El presente trabajo pretende desarrollar un sistema de cómputo que permita calcular los requerimientos de riego para el Distrito de Riego 001 Pabellón, Ags., a partir de la metodología de la FAO. La diferencia es que se integrará sobre una plataforma SIG (Sistema de Información Geográfica), presente en la misma interface del usuario. Además, el sistema contiene una base de datos de clima del Estado de Aguascalientes, a partir de las estaciones

meteorológicas proporcionadas por CONAGUA; así también, una base de datos de los Kc (coeficiente de cultivo) y de los principales cultivos de México, en sus diferentes etapas de desarrollo, y de los principales tipos de textura de suelo con sus propiedades.

De esta forma, el sistema de cómputo permitirá realizar el proceso de cálculo del “Requerimiento de Riego” de los cultivos en una interface de plataforma SIG, de manera dinámica y ágil, con obtención de resultados que podrán exportarse a formatos de hoja de datos.

2. OBJETIVOS

2.1. General

Diseñar, desarrollar y evaluar un sistema informático para el cálculo de los requerimientos de riego en un ambiente de sistemas de información geográfico para el Distrito de Riego 001 Pabellón en el Estado de Aguascalientes.

2.2. Particulares

- Con base en la metodología de la FAO elaborar un sistema informático para determinación de la ET_0 de los cultivos establecidos en el DR 001 Pabellón, Aguascalientes.
- Integrar al sistema informático la información agroclimatológica y edáfica para la operación del mismo, para facilitar el uso.
- Analizar y evaluar el sistema desarrollado con respecto al de la FAO.

3. HIPÓTESIS

La integración de datos de clima, meteorológicos, cultivo y edáficos con un sistema de información geográfica, constituye una herramienta que facilita la determinación de los requerimientos de riego, en este caso para el DR 001 Pabellón, en el Estado de Aguascalientes.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Diseño agronómico

El diseño agronómico consiste en la determinación de la cantidad y el momento de riego considerando aspectos como: el cultivo, características climáticas del lugar, propiedades físicas del suelo, superficie del cultivo, caudal que es capaz de entregar la fuente de agua, etc.

Con base a las características de la especie cultivada y a los datos climáticos del lugar, se traza la evapotranspiración del cultivo, en el tiempo que dura su ciclo, la cual se compara con la precipitación esperada para ese mismo tiempo; a partir de esta gráfica se realiza un balance entre el agua requerida y el agua disponible, para determinar la necesidad de riego.

El diseño agronómico toma en cuenta el gasto que es capaz de entregar la fuente de agua, el emisor seleccionado para no rebasar la velocidad de infiltración básica del suelo, las horas disponibles para el riego y la distribución del cultivo en la parcela, para determinar el cuándo y cuánto de agua regar. El diseño comprende dos fases, las cuales son:

- El cálculo de las necesidades de agua de los cultivos
- La determinación de los parámetros agronómicos de riego: lámina, frecuencia o intervalo entre riego, tiempo de riego y caudal necesario.

4.2. Datos necesarios para efectuar el diseño agronómico

Ángeles (2002) menciona que los datos de inicio para efectuar el diseño agronómico que pretenden caracterizar la climatología, el cultivo (mediante las necesidades de agua del mismo), el comportamiento del suelo, la fuente de agua, la parcela y la disposición de emisores (influenciada por la disposición espacial de la plantación y el manejo del cultivo) son los que se indican a continuación.

Clima

- Precipitación
- Temperatura
- Humedad Relativa
- Evaporación
- Velocidad del Viento
- Porcentaje de horas luz

Suelo

- Textura
- Densidad aparente
- Contenido de humedad a capacidad de campo
- Contenido de humedad en el punto de marchitez permanente
- Infiltración básica
- Profundidad del suelo

Cultivo

- Nombre (especie y variedad)
- Etapas de desarrollo del cultivo
- Coeficiente del cultivo
- Profundidad de la zona radicular efectiva del cultivo
- Máximo aprovechamiento permisible de agua por el cultivo

Fuente de agua

- Tipo de fuente (pozo, río, presa, lago, etc.) y localización
- Caudal o gasto
- Horas de disponibilidad de la fuente
- Calidad física y química del agua

Parcela

- Plano (área, dimensiones, linderos y obstáculos en el terreno)

- Pendiente
- Espaciamiento entre plantas y entre hileras
- Porcentaje del área bajo riego

Sistema de Riego

- Tipo de sistema de riego
- Características del emisor
 - Modelo
 - Caudal y presión
 - Diámetro de mojado y ángulo de cobertura
- Espaciamiento entre emisores y entre laterales
- Eficiencia de riego
- Número de emisores por planta
- Horas máximas de operación por día
- Días de paro
- Coeficiente de uniformidad

4.2.1. Necesidades de agua de los cultivos

La disponibilidad de agua para riego es el recursos que constituye un limitante principal para asegurar una producción agrícola comercial en zonas áridas y semiáridas. Al incrementarse la población, la competencia por el agua se intensifica, siendo necesaria su conservación y uso eficiente mediante el mejoramiento de métodos e instrumentos, tanto para distribuir, usar y evaluar el riego aplicado, como para conocer los requerimientos de riego de los cultivos. Ever (1994) señala que la determinación de la demanda de agua es uno de los factores de mayor importancia, que está relacionado con las necesidades de agua de los cultivos bajo ciertas condiciones de precipitación y tipo de suelo.

Para el cálculo de las necesidades de agua de los cultivos, es necesario determinar la evapotranspiración de referencia para cada mes (ETo) utilizando los valores de los coeficientes de los cultivos (Kc) para las diferentes etapas de desarrollo vegetativo; se calcula la evapotranspiración real o actual del cultivo (ETc) y se relacionan estos valores con la

lluvia, para obtener los requerimientos netos de riego del cultivo. En la Figura 1 se presenta el esquema para determinar las necesidades totales de riego (Fuente: Ángeles *et al*, 2002).

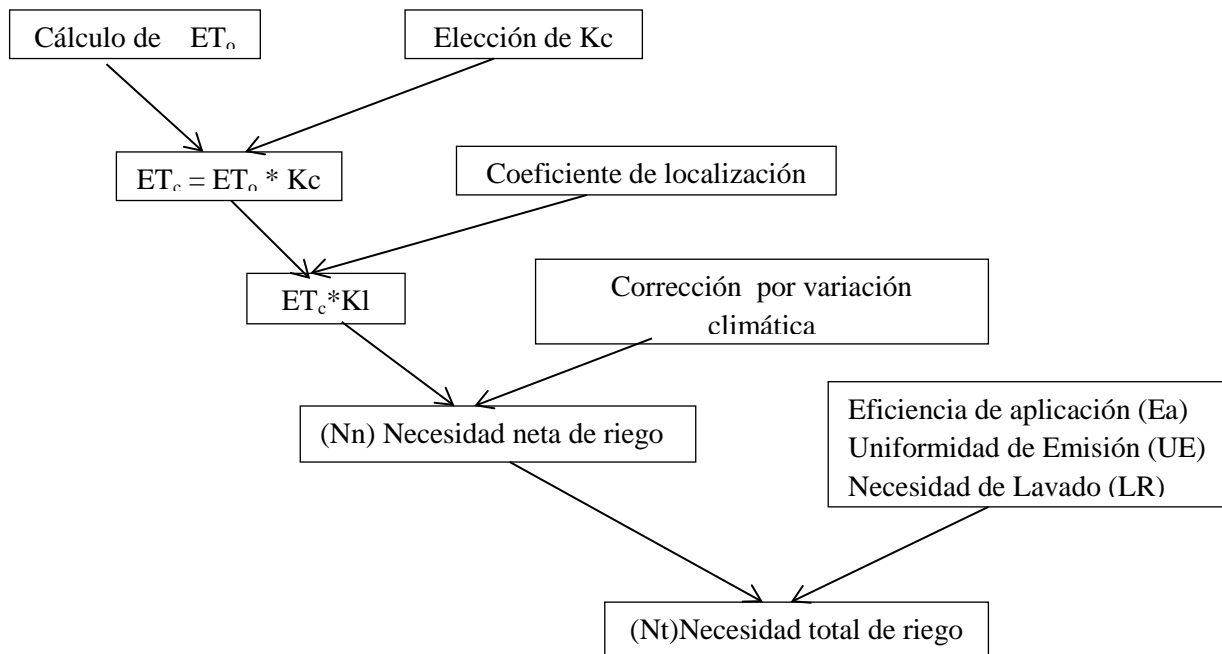


Figura 1. Determinación de las necesidades totales de agua de riego de los cultivos.

Para obtener las necesidades netas de riego, en hay que considerar las correcciones a la evapotranspiración por localización y variación climática:

Coeficiente de localización: Esta corrección es debida a que los cultivos tienen diferente área de sombreado en relación al área debida al marco de plantación, por lo que este efecto se considera a través de un coeficiente de localización (KI), se puede tomar un valor de 0.6 en caso de frutales y 0.7 en caso de hortalizas.

Corrección por variación climática: Cuando la ETo utilizada equivale al valor medio mensual, debe incrementarse por un coeficiente, por lo que hay que aplicar un coeficiente comprendido entre 1.15 y 1.2; mientras el volumen de suelo mojado sea más reducido el coeficiente aumenta. Pudiendo establecer $V_c=1.15$ para microaspersión y $V_c=1.2$ para goteo.

Para la obtención de las necesidades totales de riego, se debe considerar la eficiencia de aplicación, uniformidad de emisión y las necesidades de lavado:

Eficiencia de aplicación: Será de suma importancia el considerar la eficiencia de aplicación, ésta dependerá del método de riego, siendo en términos generales: entubados y multicompuertas (40-75%), aspersión (60-80%), aspersión mecanizada (70-85%), microaspersión (80-90%) y goteo (85-95%).

Uniformidad de emisión: Debido a que los emisores de una instalación arrojan caudales que no son exactamente iguales entre sí, se considera un ajuste para compensar dichas diferencias, en donde el factor es $1/EU$, donde EU es la uniformidad de emisión.

Necesidades de lavado: La evapotranspiración remueve solamente agua hacia la atmósfera, dejando sales en el suelo y concentrando la solución remanente. Por lo que se hace necesario considerar una fracción de la lámina de riego para lavado de las mismas y alejarlas de la zona de raíces. (Fuente: Fernández, 2002).

Una vez obtenidas las necesidades totales de riego se estima la precipitación efectiva, para obtener finalmente los requerimientos de riego.

4.3. Evapotranspiración

La evapotranspiración se conoce como la combinación de procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y mediante la transpiración de cultivo.

Es por eso que evapotranspiración o uso consuntivo es la suma de los volúmenes de agua que se usa en el crecimiento vegetativo por concepto de transpiración y formación de tejidos vegetales y la evaporada del suelo adyacente. El concepto incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c), y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar ($ET_{c_{aj}}$). ET_o es un parámetro relacionado con el clima que expresa el poder evaporante de la atmósfera. ET_c se refiere a la evapotranspiración en condiciones óptimas presentes en parcelas con un excelente manejo y que logra la máxima producción de acuerdo

a las condiciones climáticas. ET_c requiere una corrección cuando no existe un manejo óptimo y se presentan limitantes ambientales que afectan el crecimiento del cultivo y que restringen la evapotranspiración, es decir, bajo condiciones no estándar de cultivo.

La evapotranspiración es afectada por varios elementos, que influyen en las necesidades hídricas de un cultivo (Figura 2 y Figura 3, Fuente: Valverde, 2007).

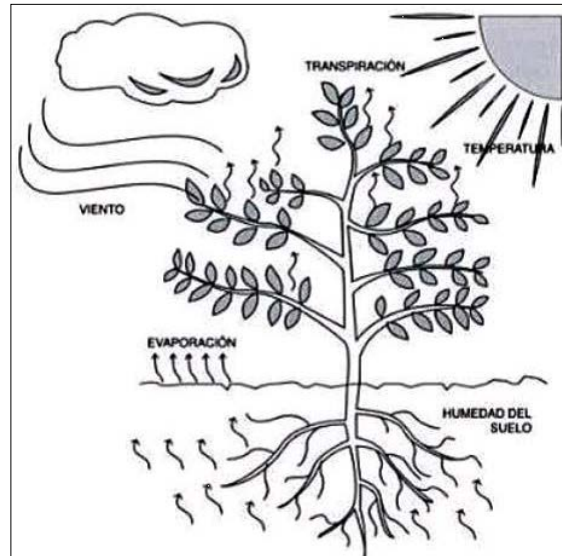


Figura 2. Factores que afectan la evapotranspiración.

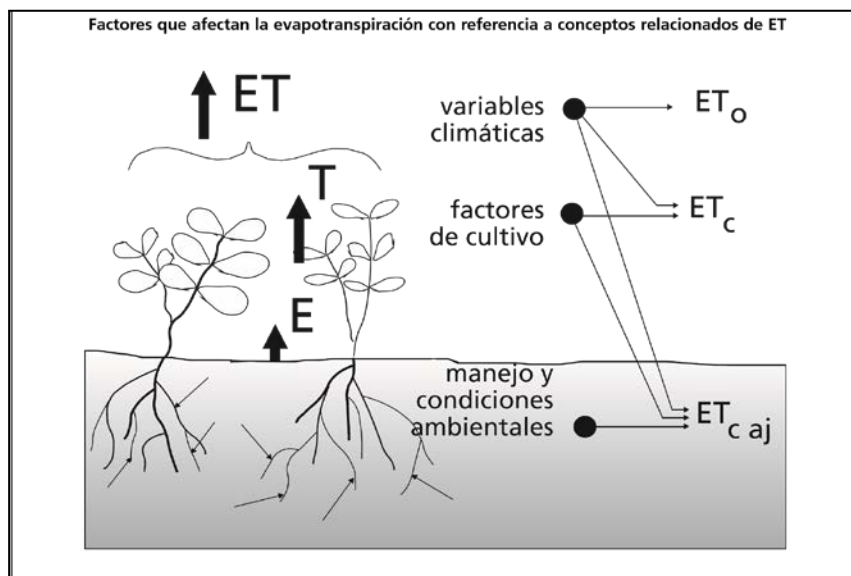


Figura 3. Factores que afectan la evapotranspiración con referencia a conceptos relacionados de ET.

Factores que afectan la evapotranspiración (Allen *et al.*, 2006):

- Factores climáticos: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, e intensidad de la radiación solar.
- Disponibilidad de agua en el suelo.
- Características del cultivo: especie, grado de cobertura y etapa fenológica del cultivo.
- Manejo del suelo y del riego.

Los procedimientos para determinar y estimar la evapotranspiración se puede clasificar como: directos e indirectos.

Los métodos directos proporcionan el valor del consumo total del agua requerida por las plantas, para lo cual se utilizan diversos aparatos e instrumentos en su determinación (por los alcances del presente documento no son analizados).

Los métodos indirectos proporcionan un valor estimado del agua requerida a través de todo el ciclo vegetativo, mediante la aplicación de fórmulas empíricas con base en datos climáticos. A continuación se describen algunos de estos métodos.

4.3.1. Método de Penman-Monteith

El método FAO Penman-Monteith se recomienda actualmente como el método estándar para la definición y el cálculo de la evapotranspiración de referencia, E_{T0} . Este método es probablemente el más aceptado para la estimación mensual de la evapotranspiración de referencia (E_{T0}) y es apropiado para diferentes climas. El cálculo de E_{T0} requiere de varios datos de entrada, como valores mínimos y máximos de temperatura, humedad relativa, horas de insolación, velocidad del viento y radiación solar (Allen *et.al.*, 2006; Ahmadi y Foodlandmand, 2008).

Este método fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia, tomando como ejemplo un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 sm^{-1} y un albedo de 0.23, dichas características representan la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y regado de forma adecuada. El método desarrollado reduce las imprecisiones del

método anterior de FAO Penman y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos.

La ecuación que se usa para calcular la evapotranspiración de referencia es:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 U_2)} \quad (1)$$

Donde:

ET_0 = Evapotranspiración de referencia, en mm día⁻¹

Rn = Radiación neta en la superficie del cultivo, en MJ /m² /día

G = Flujo de calor en el suelo, en MJ/ m² /día

T = Temperatura media en °C

U_2 = Velocidad del viento medida a 2 m de altura, en m/s

e_s = Presión de vapor de saturación, en KPa

e_a = Presión real de vapor, en KPa

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor, en KPa/°C

γ = Constante psicrométrica, en KPa/ °C

900 = Factor de conversión.

Se ha desarrollado un software específico para el uso de esta metodología llamado CROPWAT, el cual está disponible para su descarga de manera gratuita en FAO (2014).

Los factores meteorológicos que determinan la evapotranspiración son los componentes del tiempo que proporcionan energía para la vaporización y extraen vapor de agua de una superficie evaporante. El Manual FAO 56 (2006) señala que los principales parámetros meteorológicos que deben considerarse son:

Parámetros Atmosféricos

- a) Presión Atmosférica, es la presión ejercida por el peso de la atmósfera terrestre. Para calcularse puede emplearse una simplificación de la ley general de los gases ideales, a una temperatura atmosférica estándar de 20 ° C.

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \quad (2)$$

Dónde:

P = Presión Atmosférica, en KPa

z = Elevación sobre el nivel del mar, en m

b) Calor Latente de Vaporización (λ) expresa la energía requerida para cambiar una masa de unidad de agua líquida a vapor de agua bajo presión y temperatura constantes. Su valor varía en función de la temperatura. Como λ varía levemente dentro de rangos de temperaturas normales, se considera un valor constante de 2.45 MJ/kg correspondiente a una temperatura de 20°C.

c) Constante Psicrométrica, se calcula con:

$$\gamma = \frac{c_p \times P}{\varepsilon \times \lambda} = 0.665 \times 10^{-3} \quad (3)$$

Donde:

γ = Constante psicrométrica, en KPa/°C

P = Presión atmosférica, en KPa

λ = Calor latente de vaporización, 2.45 MJ/kg.

c_p = Calor específico a presión constante, 1.013×10^{-3} MJ/kg °C

ε = Cociente del peso molecular del vapor de agua/aire seco = 0.622

Temperatura del Aire

La temperatura del aire solo depende del aporte de la energía solar, la cual es absorbida en diferentes formas según las características de la superficie sobre la cual incide. La temperatura del aire es la que circula a través de un abrigo meteorológico a una altura comprendida entre 1.25 y 2 metros sobre el nivel del suelo.

La temperatura máxima diaria del aire ($T_{\text{máx}}$) y la temperatura mínima diaria del aire ($T_{\text{mín}}$) son, respectivamente observadas durante un periodo de 24 horas.

Humedad del Aire

El contenido de agua del aire se puede expresar de diversas maneras. En agrometeorología, la presión de vapor, la temperatura del punto de condensación (punto de rocío) y la humedad relativa son expresiones comunes para indicar la humedad del aire.

- a) La humedad relativa (HR) expresa el grado de saturación del aire como el cociente entre la presión real de vapor (e_a) a una temperatura dada y la presión de saturación de vapor [$e^o(T)$] a la misma temperatura (T):

$$HR = \frac{e_a}{e^o(T)} \times 100 \quad (4)$$

- b) Presión media de vapor de la saturación (e_s) se puede calcular en función de la temperatura del aire, pues depende de ella. La relación entre ambas variables se expresa como:

$$e^o(T) = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right)} \quad (5)$$

Donde:

$e^o(T)$ = Presión de saturación de vapor a la temperatura del aire, en KPa

T = Temperatura media, en °C

La presión media de vapor de saturación para un día, semana, década o mes, debe ser calculada como el promedio de la presión de saturación de vapor a la temperatura máxima media y la presión de saturación de vapor a la temperatura mínima media del aire para ese período:

$$e_s = \frac{e^o(T_{\text{máx}}) + e^o(T_{\text{mín}})}{2} \quad (6)$$

- c) Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor, para el cálculo de evapotranspiración se requiere calcular este parámetro, dado por la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 e^{\left(\frac{17.27 T}{T+237.3}\right)} \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (7)$$

Donde:

Δ = Pendiente de la curva de saturación de vapor a la temperatura del aire,
en KPa/°C

d) Presión real de vapor se derivada de datos de humedad relativa, con base en la disponibilidad de datos de humedad relativa se tiene la siguiente ecuación:

$$e_a = \frac{e^o(T_{\text{mín}}) \frac{HR_{\text{máx}}}{100} + e^o(T_{\text{máx}}) \frac{HR_{\text{mín}}}{100}}{2} \quad (8)$$

Donde:

e_a = Presión Real de vapor, en KPa

$e^o(T_{\text{mín}})$ = Presión de saturación de vapor a la temperatura mínima, en
KPa

$e^o(T_{\text{máx}})$ = Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima, en
KPa

$HR_{\text{mín}}$ = Humedad relativa mínima, en %.

$HR_{\text{máx}}$ = Humedad relativa máxima, en %.

Radiación

a) Radiación extraterrestre. La radiación que choca a una superficie perpendicular a los rayos del sol en el extremo superior de la atmósfera terrestre, se llama constante solar, y tiene un valor aproximado de 0.082 MJ/m² min. La intensidad local de la radiación, sin embargo, está determinada por el ángulo entre la dirección de los rayos solares y la superficie de la atmósfera. Este ángulo cambia durante el día y es diferente en diversas latitudes y en diversas épocas del año. Para cada día del año y para diversas latitudes se puede estimar a partir de la constante solar, la declinación solar y la época del año:

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} \times G_{sc} \times d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (9)$$

Donde:

R_a = Radiación Extraterrestre, en MJ/m² día

G_{sc} = Constante solar = 0.082 MJ/m² día

d_r = Distancia relativa inversa Tierra-Sol

ω_s = Ángulo de radiación a la puesta del Sol, en rad

φ = Latitud (positiva para el hemisferio norte y negativa para el hemisferio sur), en rad.

δ = Declinación solar, en rad

La distancia inversa tierra sol (d_r) y la declinación solar (φ) están dadas por:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (10)$$

$$\delta = 0.049 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (11)$$

Donde:

J = Día Juliano

El ángulo de radiación a la hora de la puesta del sol (ω_s), se da por:

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} \arctan\left[\frac{-\tan(\varphi) \tan(\delta)}{X^{0.5}}\right] \quad (12)$$

Donde:

$$X = 1 - [\tan(\varphi)]^2 [\tan(\delta)]^2 \text{ y } X = 0.00001 \text{ si } X \leq 0 \quad (13)$$

- b) Radiación Solar, si no se cuenta con mediciones directas de radiación solar, R_s , ésta se calcula a través de la aplicación de la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación:

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N}\right) R_a \quad (14)$$

Donde:

R_s = Radiación solar, en MJ/m² día

n = Duración real de la insolación, en horas

N = Duración máxima posible de la insolación, en horas

$\frac{n}{N}$ = Duración relativa de la insolación, adimensional

R_a = Radiación extraterrestre, en MJ/m² día

a_s = Constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados (n=0)

$a_s + b_s$ = Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados (n=N)

b.1) Radiación solar en un día despejado. En días despejados $n = N$, y la radiación solar se puede calcular de la siguiente forma:

- Para localidades cerca al nivel del mar o cuando se dispone de valores calibrados de a_s y b_s

$$R_{so} = (a_s + b_s)R_a \quad (15)$$

Donde:

R_{so} = Radiación solar en un día despejado, en MJ/m² día

$a_s + b_s$ = Fracción de la radiación extraterrestre que llega a la superficie terrestre en días de cielo despejado (n=N)

- En casos en que los valores calibrados de a_s y b_s no estén disponibles

$$R_{so} = [0.75 + (2 \times 10^{-5})z] R_a \quad (16)$$

Donde:

z = Elevación de la estación sobre el nivel del mar, en m

b.2) La radiación neta solar de onda corta resultante del equilibrio entre la radiación solar entrante y la reflejada está dada por:

$$R_{ns} = (1-\alpha) R_s \quad (17)$$

Donde:

R_{ns} = Radiación neta solar o de onda corta, en MJ/m² día

α = Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo, que es 0.23 para el cultivo hipotético de referencia, adimensional

R_s = Radiación solar entrante, en MJ/m² día

- c) Radiación neta de onda larga. La cantidad de emisión de energía de onda larga es proporcional a la temperatura absoluta de la superficie elevada a la cuarta potencia. Esta relación se expresa cuantitativamente por la ley de Stefan-Boltzmann. Se debe tener en cuenta que el flujo de energía neta que sale de la superficie terrestre es menor que la calculada y dada por la ley; debido a la absorción y radiación devuelta del cielo. El vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono y el polvo absorben y emiten radiación de onda larga. Por ello se deben conocer sus concentraciones para determinar el flujo saliente neto. Como la humedad y la nubosidad tienen un papel importante, la ley de Stefan-Boltzmann se corrige por estos dos factores cuando se estima el flujo saliente neto de la radiación de onda larga. De tal modo que se asume que las concentraciones de los otros factores de absorción de radiación son constantes:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{m\acute{a}x,K^4} + T_{m\acute{i}n,K^4}}{2} \right] (0.34 - 0.14\sqrt{e_a}) \left[1.35 \left(\frac{R_s}{R_{so}} \right) - 0.35 \right] \quad (18)$$

Donde:

R_{nl} = Radiación neta de onda larga, en MJ/m² día

σ = Constante de Stefan-Boltzmann (4.903 10⁻⁹ MJ/ K⁴ m² día)

$T_{m\acute{a}x,K}$ y $T_{m\acute{i}n,K}$ = Temperatura máxima y mínima absoluta durante un periodo de 24 horas [$K = ^\circ C + 273.16$]

e_a = Presión de vapor real, en KPa

R_s/R_{so} = Radiación relativa de onda corta (valores ≤ 1.0)

Comúnmente, en la ecuación de Stefan-Boltzmann se utiliza el promedio de la temperatura máxima del aire elevada a la cuarta potencia y de la temperatura mínima del aire elevada a la cuarta potencia para periodos de 24 horas.

d) La radiación neta es la diferencia entre la radiación neta de onda corta (R_{ns}) y la radiación neta de onda larga (R_{nl}):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (19)$$

Es el equilibrio entre la energía absorbida, reflejada y emitida por la superficie terrestre o la diferencia de la radiación de onda corta entrante neta (R_{ns}) y la radiación de onda larga saliente neta (R_{nl}) (Figura 4, tomado de Allen *et al.*, 2006).

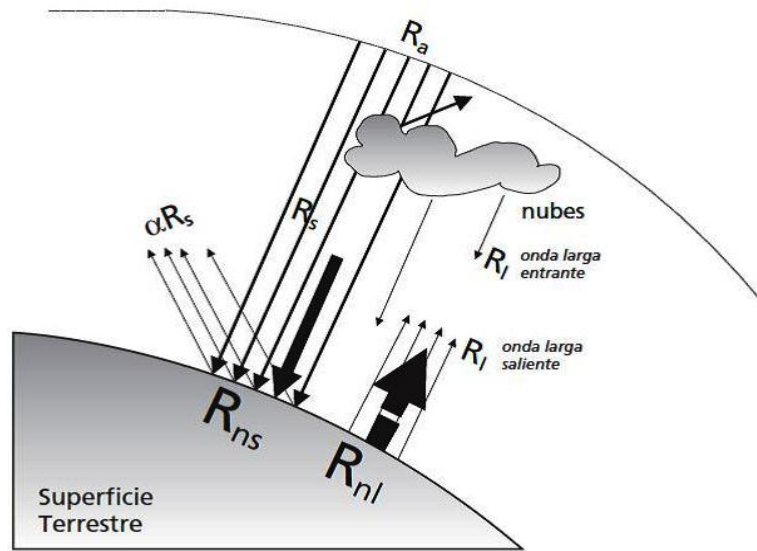


Figura 4. Componentes de la radiación.

e) Flujo del calor del suelo, se cuenta con diversos modelos complejos para describir el flujo de calor del suelo. Como el flujo de calor del suelo es pequeño comparado con la R_n , particularmente cuando la superficie está cubierta con vegetación y los periodos de tiempo de cálculo son de 24 horas o más. Un procedimiento simple del cálculo se presenta aquí para periodos largos de tiempo, con base en la idea de que la temperatura del suelo tiene similar tendencia a la temperatura del aire.

$$G = c_s \left(\frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta t} \right) \Delta z \quad (20)$$

Donde:

G = Flujo del calor del suelo, en MJ/m^2 día

c_s = Capacidad calorífica del suelo, en $\text{MJ}/\text{m}^3\text{°C}$

T_i = Temperatura media del aire del día actual, en $^{\circ}\text{C}$

T_{i-1} = Temperatura media del aire del día anterior, en $^{\circ}\text{C}$

Δt = Intervalo de tiempo considerado, en días

Δz = Profundidad efectiva del suelo, en m

Velocidad del Viento

El viento se caracteriza por su dirección y su velocidad. La dirección del viento se refiere a la orientación en la cual el viento está circulando. Para el cómputo de la evapotranspiración, la velocidad del viento es una variable importante. La velocidad del viento en una localidad dada varía con el tiempo, por lo que es necesario expresarla en unidades que corresponden al tiempo. La velocidad del viento se mide en metros por segundo (m/s) o kilómetros por día (km/día).

- a) Relación del viento con la altura, la velocidad del viento a diversas alturas sobre la superficie del suelo tienen valores diferentes. La fricción superficial tiende a reducir la velocidad del viento que atraviesa la superficie. La velocidad del viento es menor cerca de la superficie y aumenta con la altura. Para ajustar los datos de velocidad de los vientos obtenidos de instrumentos situados a elevaciones diferentes a la altura estándar de 2 m, se puede usar una relación logarítmica:

$$U_2 = U_z \left[\frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \right] \quad (21)$$

Donde:

U_2 = Velocidad del viento a 2 m sobre la superficie, en m/s

U_z = Velocidad del viento medida a z m sobre la superficie, en m/s

z = Altura de la medición sobre la superficie, en m

4.3.2. Método de Blanney-Criddle modificado por Phelan

Blanney y Criddle desarrollaron una fórmula en el Oeste de los Estados Unidos, en la cual interviene la temperatura media mensual y el porcentaje de horas luz por mes con respecto al total anual. Originalmente los autores diseñaron el método para estimar la evapotranspiración total de los cultivos y su fórmula es:

$$ET_c = K_g \times F \quad (22)$$

Donde:

ET_c = Evapotranspiración total de los cultivos, en cm

K_g = Coeficiente total de ajuste que depende del cultivo y de la ubicación de la zona de estudio, adimensional (cuadro 1)

F = Factor climático que es equivalente a la ET_o global, la ecuación que define su cálculo se precisa a continuación:

$$F = \sum_{i=1}^n f_i \quad (23)$$

Donde:

f_i = Valores del factor climático mensuales, en cm

$$f_i = \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right) P_i \quad (24)$$

Donde:

T_i = Temperatura media mensual, en °C

P_i = Porcentaje de horas luz del mes en relación con el total anual, en %
(ver Cuadro 1).

Este método fue modificado por J. T. Phelan, quien propuso la siguiente corrección a cada una de las f_i mensuales, la cual está en función de cada una de las temperaturas medias mensuales (T_i):

$$k_{ti} = 0.031144 T_i + 0.2396 \quad (25)$$

Para conocer la ET_c de cada mes, el producto $(f_i) * (k_{ti})$ se multiplica por un coeficiente mensual del cultivo. El procedimiento seguido es determinar los valores de los coeficientes de

cultivo (Kc) para cada uno de los meses correspondientes al ciclo vegetativo y se calcula una primera estimación de la evapotranspiración potencial.

En resumen, para aplicar el método de Blanney-Criddle, se necesitan datos climáticos como temperatura media mensual y porcentajes de hora luz para cada mes (estos se obtienen de una tabla y están en función de la latitud de la zona de estudio). Se requiere, además de los coeficientes de cultivo, conocer la curva de desarrollo del mismo. Así también, un coeficiente global de cultivo, ver Cuadro 2 (Fuente: Ángeles *et al*, 2002).

Cuadro 1. Porcentaje de horas luz o insolación en el día para cada mes del año en relación al número total en un año.

Latitud	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
15°	7.94	7.1	8.44	8.46	8.99	8.82	9.05	8.83	8.27	8.24	7.73	7.87
16°	7.9	7.08	8.43	8.47	9.02	8.86	9.09	8.86	8.27	8.22	7.7	7.83
17°	7.86	7.06	8.43	8.49	9.06	8.9	9.13	8.88	8.27	8.2	7.66	7.79
18°	7.82	7.04	8.42	8.51	9.1	8.95	9.17	8.91	8.28	8.18	7.63	7.74
19°	7.78	7.02	8.42	8.52	9.13	8.99	9.21	8.93	8.28	8.17	7.59	7.7
20°	7.74	7	8.41	8.54	9.17	9.03	9.25	8.96	8.28	8.15	7.56	7.65
21°	7.7	6.98	8.41	8.56	9.2	9.08	9.3	8.98	8.29	8.13	7.52	7.6
22°	7.66	6.95	8.41	8.58	9.24	9.12	9.34	9.01	8.29	8.11	7.48	7.56
23°	7.62	6.93	8.4	8.6	9.28	9.17	9.38	9.03	8.29	8.09	7.45	7.51
24°	7.57	6.91	8.4	8.61	9.32	9.22	9.42	9.06	8.3	8.07	7.41	7.46
25°	7.53	6.88	8.39	8.63	9.36	9.27	9.47	9.09	8.3	8.05	7.37	7.41
26°	7.49	6.86	8.39	8.65	9.4	9.31	9.51	9.12	8.3	8.03	7.33	7.36
27°	7.44	6.84	8.38	8.67	9.44	9.36	9.56	9.14	8.31	8.01	7.29	7.31
28°	7.39	6.81	8.38	8.69	9.48	9.41	9.61	9.17	8.31	7.99	7.25	7.26
29°	7.35	6.79	8.37	8.71	9.52	9.47	9.66	9.2	8.32	7.97	7.21	7.2
30°	7.3	6.76	8.37	8.73	9.57	9.52	9.71	9.23	8.32	7.94	7.16	7.15
31°	7.25	6.74	8.36	8.75	9.61	9.57	9.76	9.26	8.32	7.92	7.12	7.09
32°	7.2	6.71	8.36	8.77	9.66	9.63	9.81	9.29	8.33	7.9	7.08	7.04

Cuadro 2. Coeficiente global (Kg) para diferentes cultivos.

Cultivo	Periodo de crecimiento vegetativo	Coeficiente Global (Kg)	
		Región húmeda	Región árida
Aguacate	Todo el año	0.5	0.55
Ajonjolí	3 a 4 meses	0.8	
Alfalfa	Entre heladas	0.8	0.85
	En invierno	0.6	
Algodón	6 a 7 meses	0.6	0.65
Arroz	3 a 5 meses	1	1.2
Cacahuate	5 meses	0.6	0.65
Cacao	Todo el año	0.75	0.8
Café	Todo el año	0.75	0.75
Camote	5 a 6 meses	0.6	
Caña de azúcar	Todo el año	0.75	0.9
Cártamo	5 a 8 meses	0.55	0.65
Cereales de granos pequeños (Alpiste, Avena, Cebada, Centeno, Trigo)	3 a 6 meses	0.75	0.85
Cítricos	7 a 8 meses	0.5	0.65
Chile	3 a 4 meses	0.6	
Espárrago	6 a 7 meses	0.6	
Fresa	Todo el año	0.45	0.6
Frijol	3 a 4 meses	0.6	0.7
Frutales de hueso y pepita (hoja caduca)	Entre heladas	0.6	0.7
Garbanzo	4 a 5 meses	0.6	0.7
Girasol	4 meses	0.5	0.65
Gladiola	3 a 4 meses	0.6	
Haba	4 a 5 meses	0.6	0.7
Hortalizas	2 a 4 meses	0.6	
Jitomate	4 meses	0.7	
Lechuga y col	3 meses	0.7	
Lenteja	4 meses	0.6	0.7
Lino	7 a 8 meses	0.7	0.8
Maíz	4 a 7 meses	0.75	0.85
Mango	Todo el año	0.75	0.8
Melón	3 a 4 meses	0.6	

Cultivo	Periodo de crecimiento vegetativo	Coeficiente Global (Kg)	
		Región húmeda	Región árida
Nogal	Entre heladas	0.7	
Papa	3 a 5 meses	0.65	0.75
Palma Datilera	Todo el año	0.65	0.8
Palma de coco	Todo el año	0.8	0.9
Papaya	Todo el año	0.6	0.8
Plátano	Todo el año	0.8	1
Pasto de gramíneas	Todo el año	0.75	
Trébol ladino	Todo el año	0.8	0.85
Remolacha	6 meses	0.65	0.75
Sandía	3 a 4 meses	0.6	
Sorgo	3 a 5 meses	0.7	
Soya	3 a 5 meses	0.6	0.7
Tabaco	4 a 5 meses	0.7	0.8
Tomate	4 a 5 meses	0.7	
Zanahoria	2 a 4 meses	0.6	

4.3.3. Método del tanque evaporímetro tipo A

Es uno de los métodos directos más usados para determinar la evaporación de agua. El tanque evaporímetro tipo A permite estimar los efectos integrados del clima (radiación, temperatura, viento y humedad relativa) en función de la evaporación registrada de una superficie de agua libre de dimensiones estándar. El nivel del agua de tanque debe ser medido diariamente y la evaporación se calcula como la diferencia entre los niveles observados, ajustados por cualquier precipitación medida en una estación pluviométrica.

El tanque evaporímetro, éste tiene una forma circular de 122cm de diámetro y 25cm de profundidad. Es de hierro galvanizado (calibre 22) y se sitúa sobre una plataforma de madera de 15cm de altura sobre el suelo; debiendo ser la superficie donde se asienta horizontal.

Para estimar la Evapotranspiración de referencia (ET_o) se utiliza la siguiente fórmula:

$$ET_o = E_v \times K_{tan} \quad (26)$$

Dónde:

ET_o = Evapotranspiración de referencia, en mm/día

K_{tan} = Coeficiente del tanque tipo A, adimensional (Cuadro 3)

E_v =Evaporación media del tanque evaporímetro, en mm/día

Para seleccionar el coeficiente apropiado para un tanque evaporímetro dado, se debe considerar no solamente el tipo del tanque, sino también la cobertura del suelo donde se ubica el tanque, sus alrededores así como el viento y las condiciones generales de humedad.

La localización y el ambiente del tanque evaporímetro también tienen influencia en los resultados. Lo último es particularmente cierto cuando en que el tanque evaporímetro se encuentra situado en suelos bajo barbecho y no en campos cultivados; bajo esta característica, dos casos se consideran comúnmente: caso A, donde el tanque está colocado sobre una cubierta de pasto rodeado por una superficie de suelo sin cultivo (Figura 5), y el caso B, donde el tanque se coloca en una superficie de suelo sin ningún cultivo, rodeado por una cubierta vegetal (Figura 6).

Cuadro 3. Coeficiente de tanque evaporímetro.

	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo				
HR media (%)		Baja <40	Media 40-70	Alta >70		Baja <40	Media 40-70	Alta >70
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)			Distancia del barbecho a barlovento (m)				
Baja < 2	1	0.55	0.65	0.75	1	0.70	0.80	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.60	0.70	0.80
	100	0.70	0.80	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.50	0.60	0.70
Moderada 2 - 5	1	0.50	0.60	0.65	1	0.65	0.75	0.80
	10	0.60	0.70	0.75	10	0.55	0.65	0.70
	100	0.65	0.75	0.80	100	0.50	0.60	0.65
	1000	0.70	0.80	0.80	1000	0.45	0.55	0.60
Alta 5-8	1	0.45	0.50	0.60	1	0.60	0.65	0.70
	10	0.55	0.60	0.65	10	0.50	0.55	0.65

	Caso A: Tanque situado en una superficie cultivada			Caso B: Tanque situado en un suelo desnudo				
HR media (%)		Baja <40	Media 40-70	Alta >70		Baja <40	Media 40-70	Alta >70
Velocidad del viento	Distancia del cultivo a			Distancia del barbecho a				
		100	0.60	0.65	0.70	100	0.45	0.50
	1000	0.65	0.70	0.75	1000	0.40	0.45	0.55
Muy alta > 8	1	0.40	0.45	0.50	1	0.50	0.60	0.65
	10	0.45	0.55	0.60	10	0.45	0.50	0.55
	100	0.50	0.60	0.65	100	0.40	0.45	0.50
	1000	0.55	0.60	0.65	1000	0.35	0.40	0.45

Fuente: Allen *et al.*, 2006.

CASO-A

Tanque evaporímetro rodeado por una cubierta verde

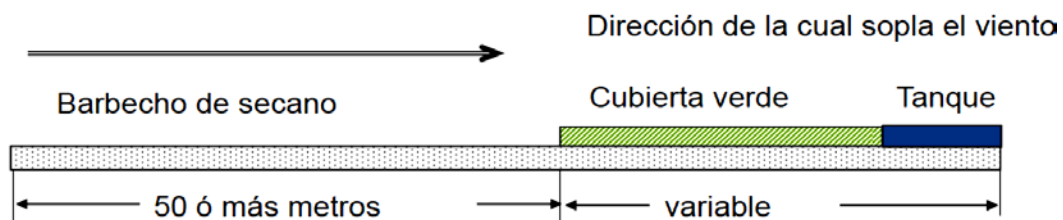


Figura 5. Forma de instalación del tanque evaporímetro tipo A, caso A.

CASO-B-

Tanque evaporímetro rodeado por barbecho de secano

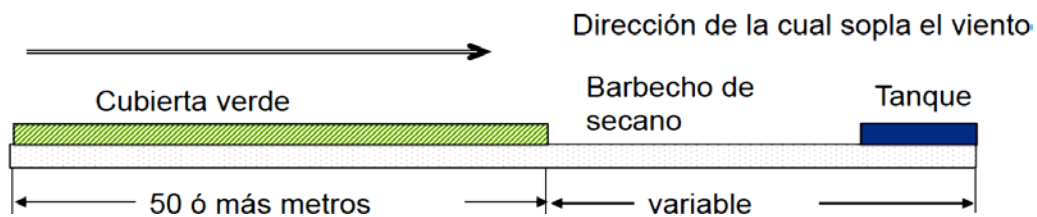


Figura 6. Forma de instalación del tanque evaporímetro tipo A, Caso B.

4.4. Coeficiente de cultivo

El efecto de la transpiración de las plantas y la evaporación del suelo están integrados en un solo coeficiente denominado coeficiente de cultivo (K_c). Ahora bien de acuerdo al enfoque del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo ET_c se calcula como el producto de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ET_o y el coeficiente del cultivo K_c :

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (27)$$

La mayoría de los efectos de los diferentes factores meteorológicos se encuentran incorporados en la estimación de ET_o ; por lo tanto, mientras ET_o representa un indicador de la demanda climática, el valor de K_c cambia principalmente en función de las características particulares del cultivo, y varía solo en una pequeña proporción en función del clima. Motivo por el cual se permite la transferencia de valores estándar del coeficiente del cultivo entre distintas áreas geográficas y climas. Este hecho constituye la razón principal de la aceptación general y utilidad de la metodología del coeficiente del cultivo, así como de los valores de K_c desarrollados en estudios anteriores. El coeficiente de cultivo varía de cultivo en cultivo, etapa de desarrollo y región geográfica. Bajo el método de la FAO, el K_c está representado en 4 etapas de desarrollo (Allen et al., 2006.) (Figura 7 y Cuadro 4).

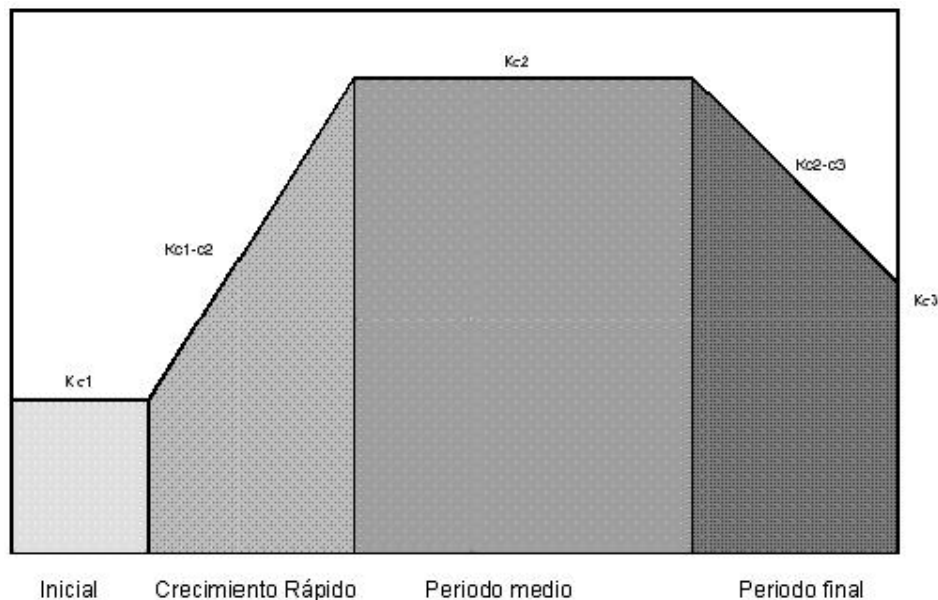


Figura 7. Coeficiente del cultivo y etapas de desarrollo.

Cuadro 4. Etapas de desarrollo del cultivo, según FAO.

Valores de Kc	Etapa de Desarrollo	Descripción
K_{c1}	Inicial	Kc promedio desde la plantación a 10% de cobertura.
$K_{c1}-K_{c2}$	Rápido Crecimiento	De 10% de cobertura a 75% o al máximo consumo de agua, lo que llegue primero.
K_{c2}	Periodo medio	Kc promedio al final de la estación de máximo crecimiento hasta que el consumo de agua comienza a declinar.
$K_{c2}-K_{c3}$	Periodo final	Desde que el Kc comienza a declinar hasta la cosecha o cuando el consumo de agua llega a ser mínimo.

Fuente: Allen *et al.*, 2006.

Conociendo el coeficiente de cultivo en un determinado instante se puede obtener la evapotranspiración real del cultivo, utilizando la evapotranspiración de referencia, calculada anteriormente con parámetros climáticos (Allen et al., 2006); como se especifica en la Figura 8.

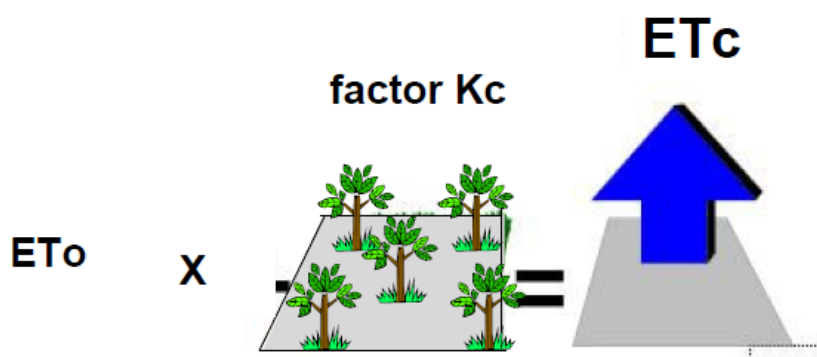


Figura 8. Determinación de la evapotranspiración real del cultivo.

Los factores que determinan el coeficiente del cultivo integran los efectos de las características que distinguen a un cultivo típico de campo del pasto de referencia, el cual

posee una apariencia uniforme y cubre completamente la superficie del suelo. En consecuencia, distintos cultivos poseerán distintos valores de coeficiente del cultivo. Por otra parte, las características del cultivo que varían durante el crecimiento del mismo también afectarían al valor del coeficiente K_c . Por último, debido a que la evaporación es un componente de la evapotranspiración del cultivo, los factores que inciden en la evaporación en el suelo también repercutirán en el valor de K_c .

Para tener en cuenta de forma independiente la evaporación del suelo desnudo y la transpiración de la vegetación, el coeficiente de cultivo se puede dividir en dos términos: el coeficiente de cultivo basal K_{cb} , para la transpiración, y la fracción correspondiente a la evaporación desde el suelo K_e , según el criterio del manual FAO N° 56 (Allen *et al.*, 2006):

$$K_c = K_{cb} + K_e \quad (28)$$

El coeficiente basal del cultivo, K_{cb} , es definido 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. El K_{cb} representa la línea base potencial del valor de K_c en ausencia de los efectos adicionales introducidos por el humedecimiento del suelo a través del riego o la precipitación. El coeficiente de evaporación en el suelo, K_e , describe el componente de la evaporación que ocurre en la superficie del suelo. Si el suelo se encuentra húmedo después de una lluvia o riego, el valor de K_e puede ser grande. Sin embargo, en ningún caso, la suma de los coeficientes K_{cb} y K_e podrá exceder un valor máximo, $K_{c_{máx}}$, el cual es definido por la cantidad de energía disponible en la superficie del suelo para el proceso de evapotranspiración. El valor de K_e se reducirá a medida que se seca la superficie del suelo y será igual a cero cuando no exista agua para la evaporación. La estimación del valor de K_e requiere del cálculo del balance diario del agua en el suelo, para determinar el contenido de humedad remanente en la capa superior del suelo.

El Departamento de Conservación de Suelos del USDA, ha obtenido el coeficiente de desarrollo del cultivo (K_c) para varios de ellos, a partir de datos experimentales utilizados en el método de Blaney-Criddle, los cuales se presentan en el Cuadro 5 y Cuadro 6.

Cuadro 5. Coeficiente de cultivo (Kc) para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos anuales.

% de desarrollo	Maíz	Trigo	Algodón	Sorgo	Cártamo	Soya	Arroz	Frijol	Ajonjolí	Garbanzo	Cebada	Jitomate	Linaza	Chile	Papa	Cacahuete	Cucurbitáceas
0	0.42	0.15	0.20	0.30	0.14	0.51	0.45	0.50	0.30	0.30	0.15	0.43	0.30	0.48	0.30	0.15	0.45
5	0.45	0.20	0.22	0.35	0.16	0.45	0.50	0.54	0.35	0.35	0.20	0.43	0.35	0.50	0.35	0.17	0.47
10	0.48	0.30	0.25	0.40	0.18	0.41	0.55	0.60	0.40	0.40	0.30	0.43	0.40	0.55	0.40	0.20	0.50
15	0.51	0.40	0.28	0.48	0.22	0.45	0.65	0.65	0.50	0.50	0.40	0.45	0.50	0.65	0.45	0.25	0.53
20	0.60	0.55	0.32	0.60	0.27	0.51	0.72	0.73	0.60	0.55	0.55	0.45	0.55	0.75	0.50	0.29	0.55
25	0.65	0.70	0.40	0.70	0.35	0.51	0.80	0.80	0.70	0.65	0.70	0.50	0.70	0.80	0.60	0.36	0.60
30	0.70	0.90	0.50	0.80	0.44	0.51	0.85	0.90	0.80	0.70	0.90	0.55	0.90	0.90	0.70	0.43	0.65
35	0.80	1.10	0.62	0.90	0.54	0.52	0.90	0.97	0.87	0.75	1.10	0.65	1.00	0.93	0.82	0.52	0.70
40	0.90	1.25	0.89	1.00	0.64	0.55	0.92	1.05	0.95	0.78	1.25	0.75	1.10	0.95	0.97	0.61	0.75
45	1.00	1.40	0.90	1.08	0.76	0.57	0.93	1.10	1.00	0.80	1.40	0.85	1.15	1.03	1.05	0.61	0.80
50	1.05	1.50	0.98	1.07	0.88	0.60	0.93	1.12	1.10	0.82	1.50	0.95	1.20	1.05	1.06	0.80	0.81
55	1.07	1.57	1.00	1.05	0.97	0.63	0.93	1.12	1.20	0.85	1.57	1.00	1.28	1.05	1.25	0.90	0.82
60	1.08	1.62	1.02	1.00	1.07	0.66	0.92	1.10	1.28	0.85	1.62	1.03	1.30	1.05	1.30	1.00	0.80
65	1.07	1.61	1.00	0.95	1.07	0.68	0.90	1.05	1.30	0.82	1.61	1.02	1.35	1.03	1.35	1.01	0.79
70	1.05	1.55	0.95	0.90	1.08	0.70	0.85	1.02	1.32	0.80	1.55	0.98	1.30	1.00	1.38	1.02	0.77
75	1.02	1.45	0.87	0.82	1.02	0.70	0.80	0.95	1.29	0.75	1.45	0.95	1.28	0.97	1.38	0.91	0.75
80	1.00	1.30	0.80	0.75	0.96	0.69	0.68	0.87	1.25	0.70	1.30	0.90	1.25	0.90	1.35	0.80	0.72
85	0.95	1.10	0.75	0.70	0.86	0.63	0.63	0.80	1.10	0.65	1.10	0.85	1.10	0.85	1.33	0.60	0.71
90	0.90	0.95	0.65	0.65	0.76	0.56	0.58	0.72	1.00	0.60	0.95	0.80	0.95	0.80	1.30	0.41	0.70
95	0.87	0.80	0.55	0.60	0.60	0.43	0.55	0.70	0.90	0.50	0.80	0.75	0.80	0.70	1.25	0.25	0.67
100	0.85	0.62	0.50	0.55	0.45	0.31	0.47	0.62	0.80	0.40	0.62	0.70	0.60	0.60	1.20	0.11	0.65

Fuente: Palacios, 2002.

Cuadro 6. Coeficiente de cultivo (K_c) para determinar la curva de crecimiento de algunos cultivos perennes.

Mes	Caña	Alfalfa	Pasto	Vid	Cítricos	Frutales de hoja caduca	Frutales de hoja perenne
1	0.30	0.65	0.48	0.20	0.65	0.20	0.60
2	0.35	0.75	0.60	0.23	0.67	0.25	0.75
3	0.50	0.85	0.75	0.30	0.69	0.35	0.85
4	0.60	1.00	0.85	0.50	0.70	0.65	1.00
5	0.77	1.10	0.87	0.70	0.71	0.85	1.10
6	0.90	1.13	0.90	0.80	0.72	0.95	1.12
7	0.98	1.12	0.90	0.80	0.72	0.98	1.12
8	1.02	1.08	0.87	0.75	0.71	0.85	1.05
9	1.02	1.00	0.85	0.67	0.70	0.50	1.00
10	0.98	0.90	0.80	0.50	0.68	0.30	0.85
11	0.90	0.80	0.65	0.35	0.67	0.20	0.75
12	0.78	0.65	0.60	0.25	0.65	0.20	0.60

Fuente: Palacios, 2002.

En el Cuadro 7 se presentan los valores medios de K_{c1} , K_{c2} , y K_{c3} para varios cultivos. Están organizados por grupo: hortalizas pequeñas, legumbres, cereales, etcétera. Normalmente cultivos del mismo grupo tienen consumos similares de agua. Los coeficientes representan la cantidad de la transpiración de cultivo y evaporación de suelo en condiciones de no deficiencia de agua. Estos coeficientes tienen su mejor aplicación en conjunto con el método de Penman-Monteith.

Cuadro 7. Coeficientes de cultivo recomendado por la FAO.

Cultivo	K_{c1}	K_{c2}	K_{c3}	Altura del cultivo (m)
a. Hortalizas pequeñas	0.7	1.05	0.95	
Brócoli		1.05	0.95	0.3
Col de Bruselas		1.05	0.95	0.4
Repollo		1.05	0.95	0.4
Zanahoria		1.05	0.95	0.3

Cultivo	K _{c1}	K _{c2}	K _{c3}	Altura del cultivo (m)
Coliflor		1.05	0.95	0.4
Apio		1.05	1	0.6
Ajo		1	0.7	0.3
Lechuga		1	0.95	0.3
Cebolla				
Seca		1.05	0.75	0.4
Verde		1	1	0.3
Semilla		1.05	0.8	0.5
Espinaca		1	0.95	0.3
Rábano		0.9	0.85	0.3
b. Hortalizas Familia de Solanáceas	0.6	1.15	0.8	
Planta de huevo		1.05	0.9	0.8
Pimiento		1.05	0.9	0.7
Tomate		1.15	0.70-0.90	0.6
c. Hortalizas familia de las cucurbitáceas	0.5	1	0.8	
Pepino				
Fresco	0.6	1	0.75	0.3
Para conservar	0.5	1	0.9	0.3
Calabaza de invierno		1		0.4
Calabaza Zucchini		0.95		0.3
Melón dulce		1.05		0.4
Sandia	0.4	1	0.75	0.4
d. Raíces y tubérculos	0.5	1.1	0.95	
Remolacha		1.05	0.95	0.4
Yuca				
Año 1	0.3	0.8	0.3	1
Año 2	0.3	1.1	0.5	1.5
Chirivía	0.5	1.05	0.95	0.4
Papa		1.15	0.75	0.6
Papa dulce		1.15	0.65	0.4
Nabo				1.10 - 0.95
Remolacha azucarera	0.35	1.2	0.7	0.5
e. Legumbre (Familia de leguminosas)	0.4	1.15	0.55	
Frijol verde	0.5	1.05	0.9	0.4
Frijol seco	0.4	1.15	0.35	0.4

Cultivo	K _{c1}	K _{c2}	K _{c3}	Altura del cultivo (m)
Garbanzo		1	0.35	0.4
haba				
Fresca	0.5	1.15	1.1	0.8
Seca/semilla	0.5	1.15	0.3	0.8
Garbanzo	0.4	1.15	0.35	0.8
Cacahuate		1.15	0.6	0.4
Lenteja		1.1	0.3	0.5
Chícharo				
Fresco	0.5	1.15	1.1	0.5
Seco/semilla		1.15	0.3	0.5
Soya		1.15	0.5	0.5 - 1.0
f. Hortalizas perennes	0.5	1	0.8	
Alcachofa	0.5	1	0.95	0.7
Esparrago	0.5	0.95	0.3	0.2 - 0.8
Hierbabuena	0.6	1.15	1.1	0.6 - 0.8
Fresa	0.4	0.85	0.75	0.2
g. Cultivos de fibras	0.35			
Algodón		1.15 - 1.20	0.70 - 0.50	1.2 - 1.5
Lino		1.1	0.25	1.2
Henequén		0.4 - 0.7	0.4 - 0.7	1.5
h. Cultivo de Oleaginosas	0.35	1.15	0.35	
Higuerilla		1.15	0.55	0.3
Canola		1.0 - 1.15	0.35	0.6
Cártamo		1.0 - 1.16	0.25	0.8
Ajonjolí		1.1	0.25	1
Girasol		1.0 - 1.15	0.35	2
i. Cereales	0.3	1.15	0.4	
Cebada		1.15	0.25	1
Avena		1.15	0.25	1
Trigo de primavera		1.15	0.25- 0.4	1
Trigo de invierno				
Con suelos fríos	0.4	1.15	0.25- 0.4	1
Con suelos no fríos	0.7	1.15	0.25- 0.4	
Maíz para grano		1.2	0.60 - 0.35	2

Cultivo	K _{c1}	K _{c2}	K _{c3}	Altura del cultivo (m)
Maíz dulce		1.15	1.05	1.5
Mijo		1	0.3	1.5
Sorgo				
Grano		1.00 - 1.10	0.55	1-2
Dulce		1.2	1.05	2-4
Arroz	1.05	1.2	0.90- 0.60	1
j. Forrajes				
Alfalfa				
Efectos de corte promediados	0.4	0.95	0.9	0.7
Periodo individual de corte	0.4	1.2	1.15	0.7
Para semilla	0.4	0.5	0.5	0.7
Pasto Bermuda				
Efectos de corte promediados	0.55	1	0.85	0.35
Cultivo de primavera	0.35	0.9	0.65	0.4
Trébol heno (Bersím)				
Efectos de corte promediados	0.4	0.9	0.85	0.6
Entre periodos de corte	0.4	1.15	1.1	0.6
Pasto Rye Grass				
Efectos de corte promediados	0.95	1.05	1	0.3
Pasto Sudán				
Efectos de corte promediados	0.5	0.9	0.85	1.2
Periodo individual de corte	0.5	1.15	1.1	1.2
k. Caña de azúcar	0.4	1.25	0.75	3
l. Frutas y árboles tropicales				
Banana				
Primer año	0.5	1.1	1	3
Segundo año	1	1.2	1.1	4
Cacao	1	1.05	1.05	3
Café				
Suelo desnudo	0.9	0.95	0.95	2-3
con cubierta	1.05	1.1	1.1	2-3
Palma datilera	0.9	0.95	0.95	8
l. Frutas y árboles tropicales				
Palmas	0.95	1	1	8

Cultivo	K _{c1}	K _{c2}	K _{c3}	Altura del cultivo (m)
Piña				
Suelo desnudo	0.5	0.3	0.3	0.60 -1.2
Con cubierta de pasto	0.5	0.5	0.5	0.60 - 1.2
Árbol de hule	0.95	1	1	10
Tea				
Sin sombra	0.95	1	1	1.5
Sombreado	1.1	1.15	1.15	2
m. Uva y frutos pequeños				
Uva de mesa	0.3	0.85	0.45	2
Uva para vino	0.3	0.7	0.45	1.5 - 2
n. Árboles frutales				
Almendra, sin cobertura vegetal	0.4	0.9	0.65	5
Manzana, cereza y pera				
Sin cubierta, frío intenso	0.45	0.95	0.7	4
Sin cubierta, frío moderado	0.6	0.95	0.75	4
con cubierta, frío intenso	0.5	1.2	0.95	4
Con cubierta, frío moderado	0.8	1.2	0.85	4
Cítricos, sin cubierta vegetal				
70% cobertura de árbol	0.65	0.7	0.7	4
50% cobertura de árbol	0.6	0.65	0.65	3
20% cobertura de árbol	0.45	0.5	0.55	2
Cítricos, con cubierta vegetal				
70% cobertura de árbol	0.7	0.75	0.75	4
50% cobertura de árbol	0.8	0.8	0.8	3
20% cobertura de árbol	0.85	0.85	0.85	2
Arboles de coníferas	1	1	1	10
Kiwi	0.4	1.05	1.05	3
Olivo	0.65	0.7	0.7	3-5
Pistache, sin cubierta Vegetal	0.4	1.1	0.45	3-5
Nogal	0.5	1.1	0.65	4-5

Fuente: Allen et al, 2006.

4.5. Lluvia efectiva o precipitación efectiva (PE)

La precipitación efectiva es la fracción de la precipitación total utilizada para satisfacer las necesidades de agua del cultivo; quedan por tanto excluidas: la infiltración profunda, la

escorrentía superficial y la evaporación de la superficie del suelo, como se observa en la Figura 9.

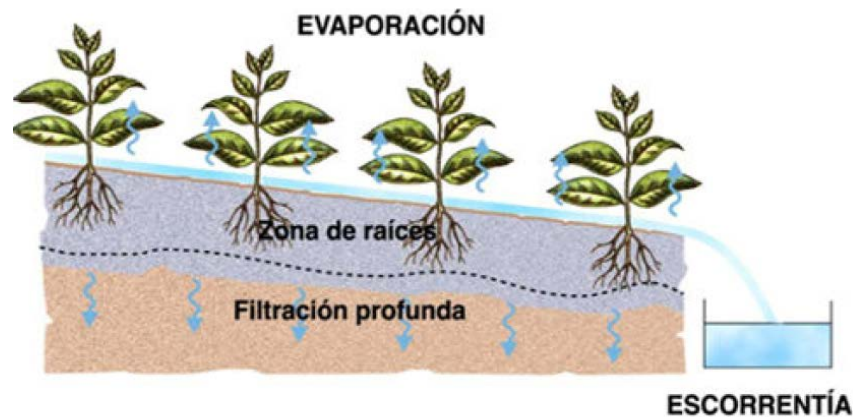


Figura 9. Componentes de la precipitación efectiva.

La precipitación efectiva es la porción de agua de lluvia que queda dentro del sistema radicular de la planta. Su magnitud depende de múltiples factores como: la intensidad de la precipitación o la aridez del clima, y también de otros como la inclinación del terreno, contenido en humedad del suelo o velocidad de infiltración.

Como primera aproximación, Brouwer y Heibloem (1986), proponen las siguientes fórmulas para su aplicación en áreas con pendientes inferiores al 5 %. Así en función de la precipitación ocurrida durante el mes se tiene:

Si $P > 75$ mm por mes

$$PE = 0.8 P - 25 \quad (29)$$

Si $P < 75$ mm por mes

$$PE = 0.6 P - 10 \quad (30)$$

Donde:

P = Precipitación media mensual (mm)

PE = Precipitación efectiva (mm)

En climas secos, las lluvias inferiores a 5 mm no añaden humedad a la reserva del suelo. Así, sí la precipitación es inferior a 5 mm se considera una precipitación efectiva nula. Por otro lado, sólo un 75 % de la lluvia sobre los 5 mm se considera efectiva. Se puede usar la expresión:

$$PE = 0.75(\text{lluvia caída} - 5 \text{ mm}) \quad (31)$$

En climas húmedos o en situaciones, o períodos del año en los que llueve en forma continua durante varios días, la precipitación efectiva se obtiene sumando todos los volúmenes de precipitación, salvo cuando en un día llueve menos de 3 mm (Palacios, 2011).

Existen diversos métodos para calcular la precipitación efectiva que emplean parámetros adicionales, pero en ninguno de los casos los resultados son realmente confiables debido a lo aleatorio de este fenómeno.

El valor resultante de la precipitación efectiva, depende fundamentalmente de la capacidad de almacenamiento de agua del suelo y ésta a su vez, está determinada por cada tipo de suelo y la capacidad de retención máxima de agua de éste, en la zona de actividad de las raíces.

Otro procedimiento para calcular la precipitación efectiva es empleando el Método de Prescott y Anderson. Este método considera para el cálculo de la lluvia efectiva la precipitación media calculada en función de la evaporación media mensual y se compara con la precipitación media mensual, de acuerdo con la ecuación 32 (Tijerina, 1999).

$$P_{cm} = 0.9 * E_v^{0.75} \quad (32)$$

Donde:

P_{cm} = Precipitación media calculada

E_v = Evaporación mensual media, medida en el tanque tipo "A"

Para calcular la precipitación efectiva (PE), se utiliza el siguiente criterio:

Si $P_{cm} > P_m$, entonces $PE = 0$

Si $P_{cm} < P_m$, entonces $PE = 0.8 P_{cm}$

Donde:

P_m = Precipitación media mensual

El Servicio de Agricultura de los estados unidos (USDA), propone la siguiente expresión para la determinación de la Precipitación efectiva (Martínez, 2010):

$$PE = P * \left(1 - \left(\frac{0.2 * P}{125}\right)\right) \text{ cuando } P < 250 \text{ mm/periodo} \quad (33)$$

$$PE = 125 - 0.1 * P \text{ cuando } > 250 \text{ mm/periodo} \quad (34)$$

Donde:

PE = Precipitación efectiva, mm o cm.

P = Precipitación total, mm o cm.

La FAO emplea la siguiente fórmula (Smith, 1988):

Si $P > 70$ mm por mes

$$PE = 0.8 P - 25 \quad (35)$$

Si $P < 70$ mm por mes

$$PE = 0.6 P - 10 \quad (36)$$

4.6. Eficiencia de aplicación

La eficiencia de aplicación es la relación que existe entre el volumen de agua almacenado en la profundidad radicular (V_a) y el volumen de agua derivado a la parcela (V_d).

$$E_a = \frac{V_a}{V_d} \times 100 \quad (37)$$

Las principales pérdidas de agua que influyen en la eficiencia de aplicación son: la filtración profunda o percolación y la escorrentía como se muestra en la Figura 10.

Aplicada = Filtración profunda + Almacenada + Escorrentía



Figura 10. Eficiencia de aplicación.

En los riegos localizados de alta frecuencia, las pérdidas producidas por transporte dentro de la parcela son nulas, ocurriendo solo las producidas debido a la percolación no controlable fuera del alcance radicular, a la falta de uniformidad de descarga de los emisores en la superficie de riego y a las producidas por la salinidad del agua de riego.

En el 0 se presentan los porcentajes de eficiencia de aplicación para los sistemas de riego presurizado.

Cuadro 8. Eficiencia de aplicación típica para diferentes sistemas de riego y láminas brutas requeridas para aplicar una lámina neta de 1 cm.

Sistema de Riego	Eficiencia de aplicación (%)	Cantidad de agua requerida (cm) para poner un centímetro en la zona de raíces
Gravedad		
Surcos	35-85	1.2-2.8
Surcos corrugados	30-55	1.8-3.8
Melgas a nivel	60-85	1.2-1.7
Melgas en pendiente	55-75	1.3-1.8
Inundación sin control	15-35	2.8-6.7
Impulsos	50-85	1.2-2.0
Aspersión		
Lateral estacionario o portátil (side roll)	60-85	1.2-1.7
Lateral fijo	60-85	1.2-1.7
Cañón viajero	55-80	1.2-1.8
Cañón estacionario	50-75	1.3-2.0
Pivote central de alta presión	65-85	1.3-1.5
Pivote central de baja presión	75-90	1.1-1.3
Lateral de avance frontal movimiento lineal	80-90	1.1-1.2
Localizado		
Goteo	80-95	1.05-1.2
Microaspersión	75-90	1.1-1.3
Nota: Bajo condiciones de viento y amplio espaciamiento entre aspersores, los sistemas por aspersión presentan menores eficiencias que las mostradas en la tabla anterior.		

Fuente: Ojeda *et al.*, 2004.

4.7. Uniformidad de emisión

Los emisores de una instalación arrojan caudales que no son exactamente iguales entre sí, lo que ocasiona que los cultivos reciban dosis de riego diferentes. Para efectos de diseño se establece la condición de que la parte del terreno que menos agua reciba, lo haga como mínimo una cierta fracción de la dosis media. La necesidad se ve afectada por el factor $1/UE$, siendo UE la uniformidad de emisión.

Se impone la condición de que la parte menos regada reciba una dosis del 90% de la media, esto es, $UE=0.90$. Este factor será muy importante para el diseño hidráulico. En el Cuadro 9 se anotan los rangos recomendados para UE según Keller-Bliesner (1990) para riego localizado, de acuerdo con el sistema de riego y la topografía.

Cuadro 9. Rangos Recomendados para la Uniformidad de Emisión.

Tipo de emisor	Emisores por planta	Topografía	Rango de UE
Puntual	≥ 3	Uniforme	90 - 95
Puntual	< 3	Uniforme	85 - 90
Puntual	≥ 3	Ondulada	85 - 90
Puntual	< 3	Ondulada	80 - 90
Microaspersión	---	Uniforme	90 - 95
Microaspersión	---	Ondulada	85 - 95
Cinta de riego	---	Uniforme	80 - 90
Cinta de riego	---	Ondulada	70 - 85
Pendiente Uniforme hasta 2%, Pendiente Ondulada $> 2\%$			

4.8. Necesidades netas de riego

Las necesidades netas de riego (N_n) en el cultivo vienen definidas por las siguientes variables:

- La evapotranspiración del cultivo (ET_C)
- Aportaciones de la precipitación efectiva (Pe)

- Aporte capilar desde una capa freática próxima a las raíces (Gw)
- Variación en el almacenamiento de agua en el suelo (Δw)

$$N_n = ET_C - Pe + Gw - \Delta w \quad (38)$$

El aporte por capilar puede ser importante en los casos en que la capa freática esté próxima además de que su cálculo es materia difícil, por este motivo la gran mayoría de las literaturas expresan la fórmula anterior como sigue:

$$N_n = ET_C - Pe \quad (39)$$

A efectos de diseño, las aportaciones por precipitación efectiva no se consideran en el riego localizado, ya que dada la gran frecuencia de riego (diaria, por lo general) resulta prácticamente imposible que llueva siempre entre dos intervalos de riego. Tampoco se consideran los aportes capilares, salvo casos especiales, ni las variaciones de almacenamiento.

Por tanto:

$$N_n = ET_C \quad (40)$$

En cualquier caso, las necesidades netas se corrigen mediante los siguientes coeficientes:

$$N_n = (ET_C - Pe + Gw - \Delta w) \times k_{vc} \times k_l \times k_a \quad (41)$$

$$N_n = (ET_C - Pe) \times k_{vc} \times k_l \times k_a \quad (42)$$

$$N_n = ET_C \times k_{vc} \times k_l \times k_a \quad (43)$$

Donde los coeficientes k_{vl} , k_l , k_a se describen a continuación.

Corrección por variación climática (k_{cv})

Cuando la ET_o utilizada en el cálculo equivale al valor medio del periodo de estudio, se debe aumentar al multiplicar por un coeficiente, ya que, de otra forma las necesidades calculadas serían también un valor medio; esto significa que quieres decir que aproximadamente la mitad de los años el valor calculado sería insuficiente. En los riegos convencionales el coeficiente depende de varios factores, entre ellos la cantidad de humedad del suelo en el momento del riego: cuanto mayor es ésta menor es el coeficiente. Se adopta el criterio de Hernández Abreu

(1997) de aplicar un coeficiente comprendido entre 1.15 - 1.2; mientras el volumen de suelo mojado sea más reducido el coeficiente aumenta.

Corrección por la localización (kl)

Se han propuesto numerosos procedimientos que corrigen la ETC por el efecto de localización. Entre ellos, se han seleccionado como más prácticos los que se basan en la fracción de área sombreada por el cultivo, y se define como la fracción de la superficie del suelo sombreada por la cubierta vegetal a mediodía en el solsticio de verano, respecto a superficie total. Para efectos prácticos se puede considerar la proyección sobre el perímetro de la cubierta vegetal (Figura 11).

$$A = \frac{\frac{\pi \times D^2}{4}}{P \times H} \quad (44)$$

Donde:

A= Fracción de área sombreada, en m²

D= Diámetro de la copa del árbol, en m

P= Espaciamiento entre plantas, en m

H= Espaciamiento de hileras de plantas, en m

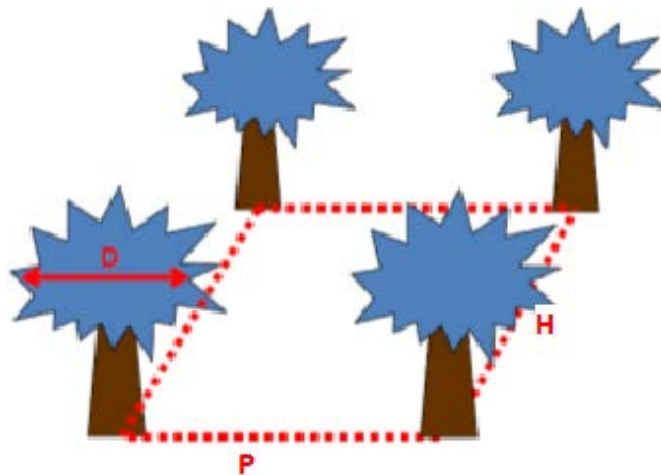


Figura 11. Fracción de área sombreada.

El coeficiente de localización se calcula como:

$$kl = A + 0.5 (1 - A) \quad (45)$$

Corrección por advección (ka)

La última corrección se realiza por el efecto de los cultivos colindantes y se aplica dependiendo de la naturaleza del cultivo y del tamaño de la zona de riego. Se toma como superficie regada, no sólo la parcela considerada, sino también las que la rodean que también estén regadas. Es un factor muy difícil de considerar, por lo que en muchos textos no aparece. Normalmente se toma de tablas o de gráficas cuando esto es posible, y no siempre lo es.

4.9. Necesidades totales de riego

Las necesidades totales son mayores que las necesidades netas, ya que es preciso aportar cantidades adicionales para compensar las pérdidas causadas por percolación profunda, por salinidad y por uniformidad de riego.

Por lo tanto, las necesidades totales o brutas de riego, para riego localizado se calculan con la siguiente ecuación:

$$N_t = \frac{N_n}{(1 - LR)(UE)} \quad (46)$$

Cuando no se considera la fracción de lavado, la ecuación anterior queda:

$$N_t = \frac{N_n}{(UE)(E_a)} \quad (47)$$

Donde:

N_t = Necesidades totales, en mm/día

N_n = Necesidades netas, en mm/día

LR = Fracción de lavado, adimensional

E_a = Eficiencia de aplicación, adimensional

UE = Uniformidad de emisión, adimensional

En riego por aspersión las necesidades totales se determinan con la siguiente expresión:

$$N_t = \frac{N_n}{E_a (1 - LR)} \quad (48)$$

Si no se considera la fracción de lavado la ecuación 44 se expresa como:

$$N_t = \frac{N_n}{E_a} \quad (49)$$

Las necesidades brutas de riego también se pueden expresar como litros/planta; para esto basta con multiplicar las necesidades brutas en mm/día, por el marco de plantación en metros cuadrados.

4.10. Necesidades de lavado

En la agricultura, el agua de buena calidad tiene el potencial para permitir la máxima producción, si se siguen prácticas acertadas en su manejo. Un agua de mala calidad causará problemas en el suelo y con el cultivo, provocando la reducción de rendimiento e incluso que no desarrollen las plantas. Un alto contenido de sales disueltas en el suelo disminuye el potencial osmótico y exige a las raíces un esfuerzo adicional para absorber agua. Esta absorción reducida de agua por parte de la planta puede dar como resultado un crecimiento reducido o lento, y la reducción de la producción. Una vez que la cantidad de sales acumuladas en el suelo sobrepasa un valor umbral, que depende del cultivo, la producción desciende linealmente con el aumento de sales en el suelo.

La estimación de las necesidades de riego se realiza mediante los componentes del balance de agua en el suelo; esto componentes se presentan en la Figura 12.

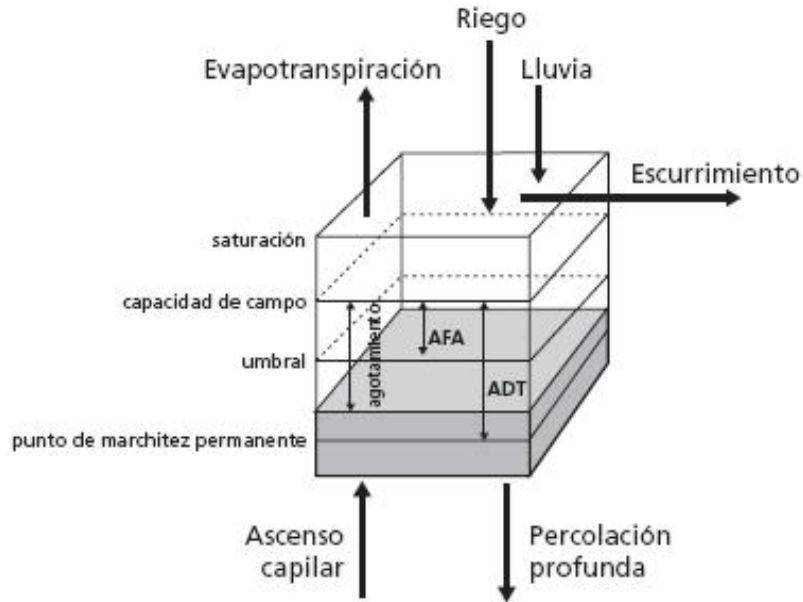


Figura 12. Balance de agua en la zona radicular

El método más práctico para controlar las concentraciones de sales, evitando situaciones desfavorables para el desarrollo del cultivo, es el lavado del suelo. El lavado se considera una práctica necesaria y debe incluirse en la determinación de las necesidades de riego de los cultivos.

Las necesidades de lavado o lixiviación se definen como la fracción de agua aplicada, que debe atravesar la zona radicular y convertirse en agua de drenaje, para mantener la salinidad del suelo a un nivel no perjudicial para el cultivo.

La planta toma la mayor cantidad del agua de la parte más superficial del suelo, por lo tanto, es de gran importancia evitar la acumulación excesiva de sales en esta zona. Para disolver y separar las sales se deberá aplicar un gasto de agua adecuado que permita la infiltración a través de la totalidad del sistema radicular. A esta cantidad de agua se la denomina fracción de lavado, y se define como la fracción del agua que penetra en el suelo y sobrepasa el sistema de raíces. La estimación de este sobreriego en riego localizado se determina con la Ecuación 50.

$$LR = \frac{CE_r}{2 \times CE_e} \quad (50)$$

Donde:

LR = Necesidades o fracción de lavado, adimensional

CE_r = Conductividad eléctrica del agua de riego, en dS/m

CE_e = Conductividad eléctrica del extracto de saturación del suelo que no produce reducción en el rendimiento del cultivo, en dS/m

Para riego superficial y por aspersion, la fórmula utilizada es la siguiente:

$$LR = \frac{CE_r}{(5 CE_e - CE_r) f} \quad (51)$$

Donde:

$$f = \text{Eficiencia de lavado} \begin{cases} 100\% \text{ Suelos arenosos (f = 1)} \\ 30\% \text{ Suelos arcillosos (f = 0.30)} \\ 85\% \text{ Resto de suelos (f = 0.85)} \end{cases}$$

El valor de CE_e depende de la tolerancia del cultivo a las sales, valores indicativos se presentan en el Cuadro 10

Cuadro 10. Tolerancia del cultivo a las sales, expresada en Conductividad Eléctrica (CE_e).

Cultivo	CE_e (dS/m)	Cultivo	CE_e (dS/m)
Cultivo extensivos		Frutales	
Cebada	8	Palma datilera	4
Algodón	7.7	Granada	2.7
Remolacha azucarera	7	Higo	2.7
Trigo	6	Olivo	2.7
Cártamo	5.3	Vid	1.5
Soya	5	Pomelo	1.8
Sorgo	4	Pera	1.7

Cultivo	CE _e (dS/m)	Cultivo	CE _e (dS/m)
Arroz	3	Manzano	1.7
Cacahuate	3.2	Naranja	1.7
Habas	1.6	Limonero	1.7
Maíz	1.7	Nogal	1.7
Lino	1.7	Durazno	1.7
Hortalizas		Ciruelo	1.5
Remolacha	4	Almendro	1.5
Brócoli	2.8	Zarzamora	1.5
Melón	2.2	Aguacate	1.3
Tomate	2.5	Frambuesa	1
Espinaca	2	Fresa	1
Pepino	2.5	Forrajes	
Col	1.8	Pasto bermuda	6.9
Maíz dulce	1.7	Cebada heno	6
Papa	1.7	Pasto Sudán	2.8
Pimiento	1.5	Alfalfa	2
Lechuga	1.3	Maíz forrajero	1.8
Rábano	1.2	Cola de zorra	1.5
Cebolla	1.2	Trébol	1.5
Zanahoria	1		
Frijol	1		

Fuente: Allen et al, 2006.

4.11. *Software existente para la determinación de Requerimiento de riego.*

4.11.1. **CROPWAT**

Existen varios software para el cálculo de “Requerimiento de riego”, por ejemplo, el programa CROPWAT 8.0 (Crop= cultivo; wat= agua) de FAO y otros que se encuentran incluidos en modelos de programación del riego como ISAREG, desarrollado por el Departamento de Ingeniería Rural del instituto superior de Agronomía, en Portugal (Pereira y Teixeira, 1992).

El programa CROPWAT 8.0 incluye una serie de características nuevas y actualizadas, éstas son:

- Entrada de datos climáticos en versión mensual, decadiaria y diaria para el cálculo de la ETo.
- Compatibilidad con versiones anteriores de tal manera que permite el uso de la información de la base de datos CLIMWAT
- Posibilidad de estimar los datos climáticos en caso de no contar con los valores medidos
- Cálculos diarios y decadiarios de los requerimientos de agua del cultivo con base en algoritmos de cálculo actualizados incluido el ajuste de los valores del coeficiente de cultivos
- Cálculo de las necesidades de agua de cultivos y la programación de riego para los cultivos y para arrozales
- Programaciones de riego ajustables e interactivas con el usuario
- Tablas de balances diarios de agua en el suelo
- Fácil guardado y recuperación de sesiones y de las programaciones de riego definidas por el usuario
- Presentaciones gráficas de los datos de entrada, requerimientos de agua de los cultivos y programaciones de riego
- Sencilla importación/exportación de datos y gráficos a través del portapapeles o de archivos de texto ASCII
- Rutinas de impresión extensivas apropiadas para todas las impresoras en ambiente Windows
- Sistema de ayuda sensible al contexto

El propósito principal de CROPWAT es el de calcular los requerimientos de agua y la programación de riego de los cultivos con base a datos introducidos por el usuario. Estos datos pueden ser directamente ingresados en CROPWAT o importados de otras aplicaciones.

Para el cálculo de los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC), CROPWAT requiere de datos de evapotranspiración (ETo). CROPWAT permite al usuario ingresar valores de ETo, o

ingresar datos de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar, lo cual permite al programa CROPWAT calcular la ETo aplicando la ecuación de Penman-Monteith. También permite el uso de archivos .PEN y .CLI provenientes de la base de datos CLIMWAT.

También son necesarios los datos de precipitación, y son utilizados por CROPWAT en el cálculo de la precipitación efectiva como datos de entrada para el cálculo de los RAC y de la programación de riego. Por último, datos de cultivos (cultivos no inundados o inundados como el arroz) son necesarios para los cálculos de los RAC, y también datos de suelo si el usuario también desea determinar la programación de riego (cultivos no inundados o arroz).

Aunque normalmente CROPWAT calcula los RAC y las programaciones para un cultivo, también puede calcular un esquema de suministro de agua, que es básicamente la combinación de los requerimientos de agua de varios cultivos, cada uno con su fecha de siembra individual (patrón de cultivo). A continuación se presenta un esbozo del software, donde se pueden observar sus funciones del mismo.

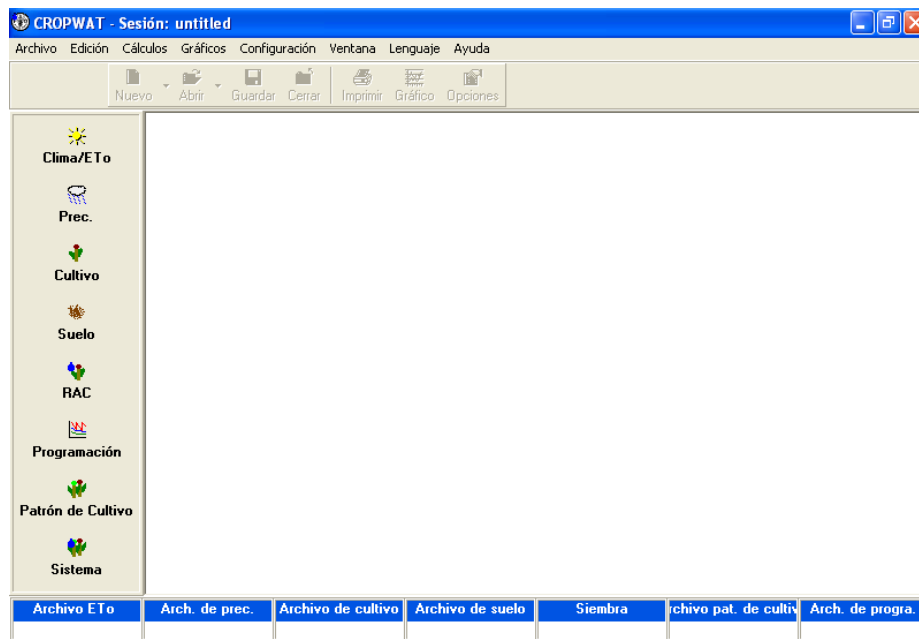


Figura 13. Esquema de la ventana principal de CROPWAT.



Figura 14. “Barra de módulos” con acceso directo (izquierda) y barra de herramientas (derecha).

La “barra de módulos” (Figura 13 y Figura 14) está ubicada a la izquierda de la “ventana principal” de CROPWAT. Los íconos de la “barra de módulos” proporcionan acceso directo a los módulos disponibles del programa CROPWAT. La “barra de Herramientas” contiene una serie de iconos que proporcionan fácil acceso a las funciones más comunes de CROPWAT que el usuario necesitará para trabajar con los módulos de CROPWAT. La funcionalidad de la “barra de herramientas” cambia según el módulo activo.

4.11.2. BLANEY

Este programa, permite calcular el requerimiento de riego de los cultivos, a partir de las ubicación del sitio (su latitud), datos de temperatura y precipitación mensual. Este se basa en la ecuación propuesta por Blaney y Criddle en 1950 (Palacios, 2002).

Operación del Programa

El programa se puede correr directamente, y por tanto tiene la extensión *exe* de ejecutable. Al correr el programa se presenta una caratula donde se indica quien lo hizo y la fecha.

Posteriormente se le indica el nombre de sitio, se indica el tipo de suelo y cultivo (tiene 27 cultivos a elegir). Luego se introducirán los datos climáticos mes por mes de la temperatura, precipitación, insolación y humedad relativa, después se indica la fecha de siembra expresada como quincena, del 1 al 24. Una vez introducidos los datos se iniciará el proceso de cálculo (Palacios, 2002).

4.11.3. DEMANDA

También existe el PROGRAMA DEMANDA que es una variante del BLANEY, solo que en lugar de calcular el requerimiento de riego de un solo cultivo, puede calcular simultáneamente el requerimiento de riego de varios cultivos en diferentes fechas de siembra, calcular los volúmenes mensuales necesarios para regarlos, también calcula la demanda porcentual mensual. El programa DEMANDA sigue los mismos pasos que la de BLANEY (Palacios, 2002).

4.11.4. REQUERI

Este programa utiliza los archivos formados por el programa CLIMA, el REQUERI tiene algunas características similares al BLANEY, ya que estima el requerimiento de riego quincenalmente, utilizando los datos de evapotranspiración potencial y precipitación generados con el programa CLIMA (Palacios, 2002).

El funcionamiento del programa es muy similar al de BLANEY, al correr el programa REQUERI aparece una pantalla de identificación con el nombre y descripción del programa, nombre del programador; sitio y fecha. Después se siguen los mismos pasos que en el programa BLANEY (Palacios, 2002).

4.11.5. RASPAWIN

Software que calcula los requerimientos de riego y calendario de riego, desarrollado por el Departamento de Irrigación de Universidad Autónoma de Chapingo (CONAGUA, 2002).

4.11.6. SPRITER

Software desarrollado por el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. SPRITER es el acrónimo de “Sistema de pronóstico de riego en tiempo real”, el cual permite determinar las láminas netas de riego de los cultivos, utilizando información climática diaria a través de estaciones meteorológicas automatizadas, así como información de las propiedades físicas y volumétricas del suelo, distribución de los cultivos establecidos, fechas de siembra y fenología de los mismos (CONAGUA, 2002).

4.12. *Sistemas de Información Geográfica (SIG)*

Hasta hace pocos años, el manejo de grandes volúmenes de datos que precisaran referenciación espacial implicaba grandes dificultades. Con la evolución de la informática, los computadores se han constituido en herramientas indispensables para el planificador y han sido un factor clave en la transformación de los métodos tradicionales de procesamiento de datos (Ocaña et. al., 2002).

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una herramienta de software que permite almacenar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica; de igual manera, integra operaciones comunes de bases de datos así como consultas y análisis estadístico, con el beneficio de la visualización y análisis geográfico que ofrecen los mapas.(Val, 2014).

En ese sentido, los SIG permiten integrar información espacial y no espacial en un sistema simple ofreciendo un marco consistente para el análisis de los datos geográficos. El objetivo general de los SIG es generar información válida para la toma de decisiones (Rosete y Bocco, 2003).

4.12.1. Elementos de un SIG

Un SIG se forma por cinco componentes o elementos y cada uno de éstos cumplen con una función para que exista entre ellos una interacción. Es decir, éstos conforman la información para que sea procesada o se realice un tratamiento, los recursos técnicos, humanos y las metodologías que se adopten en la organización o la empresa. A continuación se describen a esos componentes:

1. Hardware: El hardware es el computador donde opera el SIG. En la actualidad los SIG se pueden ejecutar en una gran variedad de plataformas, que pueden variar desde servidores (computador central) a computadores desktop (escritorio) o laptop (portátil) que se utilizan en las configuraciones de red o desconectado.

2. Software: Los programas de SIG proveen las funciones y las herramientas que se requieren para almacenar, analizar y desplegar información geográfica. Los componentes más importantes son:

- Herramientas para la entrada y manipulación de información geográfica.
- Un sistema de administración de base de datos (DBMS Data Base Management System).
- Herramientas que soportan consultas, análisis y visualización de elementos geográficos.
- Una interfaz gráfica de usuario (GUI Graphical User Interface) de manera que facilite el acceso a las herramientas anteriormente mencionadas.

En éste se implementan aplicaciones como las consultas espaciales, los lenguajes visuales para consultas espacio-temporales como lo refiere (Bonhomme, 1999) y en el caso de las consultas espaciales se puede utilizar la tercera dimensión de los objetos según Grün (1999).

3. Dato: Posiblemente los componentes más importantes de un SIG son los datos. Los datos geográficos y tabulares que se relacionan, que pueden colectarse en la empresa, en el terreno o bien adquirirlos a quien implementa el sistema de información, así como a terceros que ya los tienen disponibles. El SIG integra los datos espaciales con otros recursos de datos y puede incluso utilizar los administradores de base de datos (DBMS) más comunes para organizar, mantener y manejar los datos espaciales y toda la información geográfica.

4. Recursos humanos. La tecnología SIG está limitada si no se cuenta con el personal adecuado que opere, desarrolle y administre el sistema, y lleve a cabo los planes de desarrollo para aplicarlos a los problemas del mundo real. Entre los usuarios de SIG se encuentran los especialistas técnicos, que diseñan y mantienen el sistema para aquellos que los utilizan diariamente en su trabajo.

5. Métodos: Son los planes de un buen diseño y las normas por parte de la empresa, las cuales son modelos y prácticas de operación de cada organización. [E.S.R.I., 2001].

Para que un SIG tenga éxito, éste debe operar de acuerdo a un plan bien diseñado y estructurado y acorde con las reglas de la empresa o institución, que son los modelos y prácticas operativas características de cada organización.

Los modelos se basan en los estándares reconocidos para aspectos geográficos, que sugieren las medidas a adoptar para un determinado enfoque de aplicación y de esta manera respaldar su forma de trabajo.

Los componentes mencionados tienen como finalidad establecer la estructura de un SIG y en concordancia con ello implementar aplicaciones que apoyen la toma de decisiones como por ejemplo las consultas espaciales, reiterando que esa aplicación por sí sola no refleja la solución, sino que es interpretada por la persona responsable de decidir.

4.12.2. Referencia Geográfica

La información geográfica contiene una referencia geográfica explícita tal como la latitud y la longitud, o una referencia implícita tal como una dirección, un código postal, el nombre de un área censal, el identificador de un área boscosa o el nombre de un camino. Para crear referencias geográficas explícitas (múltiples ubicaciones) a partir de referencias implícitas (descripciones tales como direcciones) se utiliza un proceso automatizado llamado geocodificación. Estas referencias geográficas permiten localizar elementos en la superficie terrestre para ser analizados, por ejemplo, el stand de un negocio, bosques o eventos como un terremoto.

Los sistemas de información geográfica trabajan con dos tipos fundamentales de modelos geográficos, el “modelo vector” y el “modelo raster”.

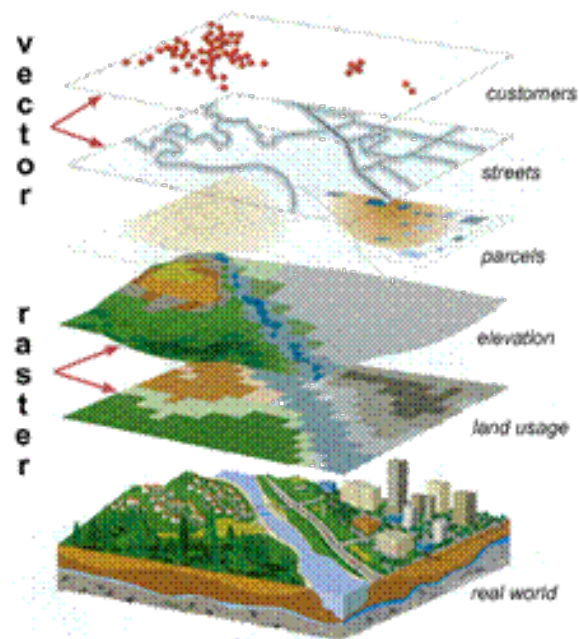


Figura 15. Modelo vector y modelo raster.

En el modelo vector, la información de puntos, líneas y polígonos es codificada y almacenada como una colección de coordenadas (x,y). La ubicación de un elemento punto puede ser descrito como una simple coordenada (x,y). Los elementos lineales tales como caminos y ríos pueden ser almacenados como una colección de coordenadas de puntos. Los elementos poligonales, por ejemplo, territorios de venta o cuencas de ríos, pueden guardarse como loops cerrados de las coordenadas. El modelo vectorial es extremadamente útil para describir elementos discretos, pero no lo es tanto para describir elementos de variabilidad continua como los tipos de suelos o el costo de accesibilidad de un hospital.

El modelo raster ha evolucionado para modelar elementos continuos. Una imagen raster está integrada por una colección de celdas (grillas) o mejor dicho, como una cartografía o una foto escaneada. Tanto los modelos raster como los vectoriales poseen ventajas y desventajas propias para el almacenamiento de datos geográficos. Los SIG modernos tienen la capacidad de manejar ambos modelos.

4.12.3. Ventajas de los SIG

Las principales ventajas de un SIG en relación con otros sistemas no digitales son la gran capacidad de almacenamiento de datos. El hecho de que almacenen y presenten en forma separada y el que puedan presentar múltiples niveles de datos, es ventajoso (Rosete y Bocco, 2003).

Los SIG permiten realizar análisis complejos de la realidad espacial rápidamente. Sin duda ésta es una de sus principales características, así como su mejor factor distintivo. Además supone una ventaja no sólo cualitativa sino también cuantitativa en la búsqueda de soluciones geográficas sea cual sea el contexto sobre el que se apliquen (Bosque, 1992).

4.13. CONCLUSIONES DE REVISION DE LITERATURA

De acuerdo con la literatura citada, de los métodos de cálculo de la E_t0 , el método de FAO Penman-Monteith, es el que produce resultados más reales con diversos cultivos y en diferentes partes del mundo, por lo que fue el método recomendado en una reunión de expertos organizada por la FAO para la determinación de la E_t0 . Esta metodología está expuesta por la FAO en su manual 56 de riego y drenaje, y es uno de los documentos más completos en su tipo que tiene un profundo fundamento teórico. De los sistemas actuales para el cálculo del requerimiento de riego, el CROPWAT, es uno de los más usados debido a su fácil manejo y los resultados que obtiene, además está basado en el método FAO Penman-Monteith.

El desarrollo de herramientas tecnológicas de software, como lo son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son muy útiles ya nos ofrecen ventajas que permiten almacenar, recuperar, analizar y desplegar información geográfica, además de integrar operaciones de bases de datos como consulta, manipulación, análisis estadístico de la información, con la finalidad de tener información necesaria que nos ayude a una mejor toma de decisiones

5. MATERIALES Y MÉTODOS.

5.1. Materiales

En el desarrollo del presente trabajo de investigación se empleó hardware, software, e información diversa como: cultivo, edáficos y capas vectoriales (shp) principalmente.

5.1.1. Hardware

Para el desarrollo del sistema se contó con equipo de cómputo de las siguientes características:

- Procesador de segunda generación Intel® Core™ i5-2430M
- 6 GB RAM
- 640 GB de disco duro

5.1.2. Software

El lenguaje de programación utilizado para la creación del programa “Requerimiento de Riego, RdR” fue C#, programación orientada a objetos (POO), desarrollado y estandarizado por Microsoft como parte de su plataforma .NET. C# es uno de los lenguajes de programación diseñados para la infraestructura de lenguaje común, que después fue aprobado como un estándar por la ECMA (ECMA-334) e ISO (ISO/IEC 23270). Se utilizó además, el paquete comercial Visual Studio C# Ultimate 2012 versión 4.5.

5.1.3. Información climática

La información de las estaciones climatológicas del estado de Aguascalientes, fue recopilada en las Normales Climatológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional de la Comisión Nacional del Agua, cuyos registros contienen en su mayoría información del periodo de 1951 a 2010.

5.1.4. Información edáfica

Del Manual para la Elaboración y Revisión de Proyectos Ejecutivos de Sistemas de Riego Parcelario (CONAGUA, 2002), se obtuvo la información general referente a las siguientes

texturas del suelo: arena, arena franca, franco arenoso, franco, franco limoso, limo, franco arcillo arenoso, franco arcilloso, franco arcillo limoso, arcilla arenosa, arcilla limosa y arcilla. De cada una de ellas se incluyeron las siguientes características: Capacidad de Campo (CC), Punto de Marchitamiento Permanente (PMP) y Densidad Aparente (DA).

5.1.5. Cultivos

La información referente a cultivos que está disponible en el documento “Requerimiento de Riego”, se tomó del Manual de Riego y Drenaje 056 emitido por la Organización de las Naciones Unidas (FAO, 2006), e incluye la siguiente información: coeficiente del cultivo (K_c), periodo vegetativo, profundidad radicular y agotamiento crítico.

5.1.6. Otros

Información vectorial

- *Estaciones meteorológicas de la República Mexicana*, con información general de cada estación en su base de datos asociada. En el caso de aquellas que se ubican dentro del estado de Aguascalientes, contienen además los registros históricos disponibles de las variables climatológicas.
- *Parcelas del Distrito de Riego 001 Pabellón*. Contiene la delimitación parcelaria del distrito.
- *Estados de la República Mexicana*. Contiene la delimitación política de los estados.
- *Municipios de la República Mexicana*. Contiene la delimitación política de los municipios de la República Mexicana..

Imágenes

- *Imagen del Distrito de Riego 01 Pabellón*. Formato ecw pancromática, con resolución de 0.6m.

5.2. Métodos

La metodología para el desarrollo del programa que se realizó para el cálculo del requerimiento de riego fue la siguiente:

5.2.1. Elección de la fórmula a emplear en los cálculos de Evapotranspiración de referencia E_{t_0} .

Para el cálculo de la E_{t_0} se seleccionó el método de Penman-Monteith, cuya expresión se encuentra descrita en el apartado 4.3.1 del presente documento (ecuación 1), y presenta las siguientes ventajas (CONAGUA, 2002):

- Modelo físicamente basado.
- Incorpora parámetros fisiológicos del cultivo.
- Incorpora parámetros aerodinámicos.
- Probado intensamente en varias localidades alrededor del mundo.
- Buena aproximación para estimar la evapotranspiración de referencia para pasto.

5.2.2. Determinación de la precipitación efectiva (PE)

La PE dentro del sistema, se puede calcular por uno de cuatro métodos a elegir:

- a) USDA. Su expresión se encuentra en el apartado 4.5, ecuaciones 33 y 34.
- b) FAO. Se presenta en el apartado 4.5, ecuaciones 35 y 36.
- c) PORCENTAJE FIJO. El sistema permite estimar la Precipitación Efectiva a partir de la indicación de un porcentaje fijo definido por el usuario, en cuyo caso la expresión sería la siguiente.

$$PE = P * K \quad (52)$$

Donde:

P = Precipitación media mensual (mm).

PE = Precipitación efectiva (mm).

K = Porcentaje fijo (adim).

d) PERSONALIZADA, para esta opción el sistema permite al usuario asignar valores específicos a las variables X, a, b, a' y b' de la siguiente ecuación:

Si $P > X$ mm por mes

$$PE = a P + b \quad (53)$$

Si $P < X$ mm por mes

$$PE = a'P + b' \quad (54)$$

Donde:

P = Precipitación media mensual (mm).

PE = Precipitación efectiva (mm).

X = Valor límite de precipitación (mm).

a, y a' = Coeficientes de la precipitación (adim.).

b, y b' = Valores constantes de precipitación (mm).

5.2.3. Requerimiento y Calendario de Riego

El requerimiento de riego se estimó a partir de la diferencia entre la Precipitación efectiva (PE) y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). Para la elaboración del Calendario de Riego se utilizó el método analítico, que consiste en establecer un balance de las entradas, que son los riegos y las salidas representadas por el requerimiento de riego y el cambio de almacenamiento de agua en el suelo, a la profundidad radicular del cultivo para un suelo dado, ver ecuación 55 (Martínez, 2010).

$$HA_i = HA_{i-1} + PE_i - Etc_i + R_i \quad (55)$$

Donde:

HA_i = Humedad almacenada en el día i (mm).

HA_{i-1} = Humedad almacenada en el día i-1 (mm).

PE_i = Precipitación efectiva ocurrida en el día i (mm).

Etc_i = Evapotranspiración del cultivo en el día i (mm).

R_i = Riego en el día i (mm).

5.2.4. Programación del sistema

Para la creación del sistema “RdR” se eligió el lenguaje de programación C#, y se utilizó para ello el paquete comercial Visual Studio C# Ultimate 2012 versión 4.5.

Puesto que el lenguaje C# se basa en la Programación Orientada a Objetos (POO), se trató en todo momento de cumplir con las características que de acuerdo con Ríos (2005), dicha programación debe reunir:

- Identificar claramente las clases y su jerarquía.
- Uso del polimorfismo.
- Definición clara en cada clase de sus métodos.
- Encapsulamiento de la información.
- Desarrollo modular.
- Excepciones y Concurrencia.
- Asociación entre Objetos.

Diseño y arquitectura

Interfaces. Para la creación de interfaces en “RdR”, el diseño se basó en el programa CROPWAT, dada su estructura, que de manera sencilla presenta

Creación del Ambiente de Sistema de Información Geográfica (SIG). Se empleó MapWindow que es un sistema de fuente abierta de información geográfica (SIG) y una interfaz de programación de aplicaciones (API) distribuido bajo la licencia pública de Mozilla (MPL), construido sobre el Microsoft Dot Net Framework 2.0.

Bases de Datos. La información se integró con el sistema usando la tecnología SQLite, gracias al cual es posible manipular la información sin necesidad de un sistema gestor de bases de datos, lo que aumenta la independencia del programa, además de ser del dominio público.

Programación

Se realizaron los algoritmos de acuerdo a las metodologías seleccionadas, y con base a éstos se desarrolló el código fuente para realizar los cálculos necesarios para el adecuado funcionamiento del sistema.

Pruebas de Funcionamiento

Una vez creado el sistema para el cálculo del “Requerimiento de Riego”, se verificó paso a paso que cada parámetro determinado fuera correcto, mediante la correspondiente depuración de errores. Así como el adecuado funcionamiento de interfaces.

6. RESULTADOS

6.1. Estructura general de la programación del sistema “RdR”.

En la Figura 16 se presenta un esquema del diagrama de flujo del programa que se desarrolló, donde se observan los pasos a seguir dentro del mismo para la determinación del Requerimiento de riego.

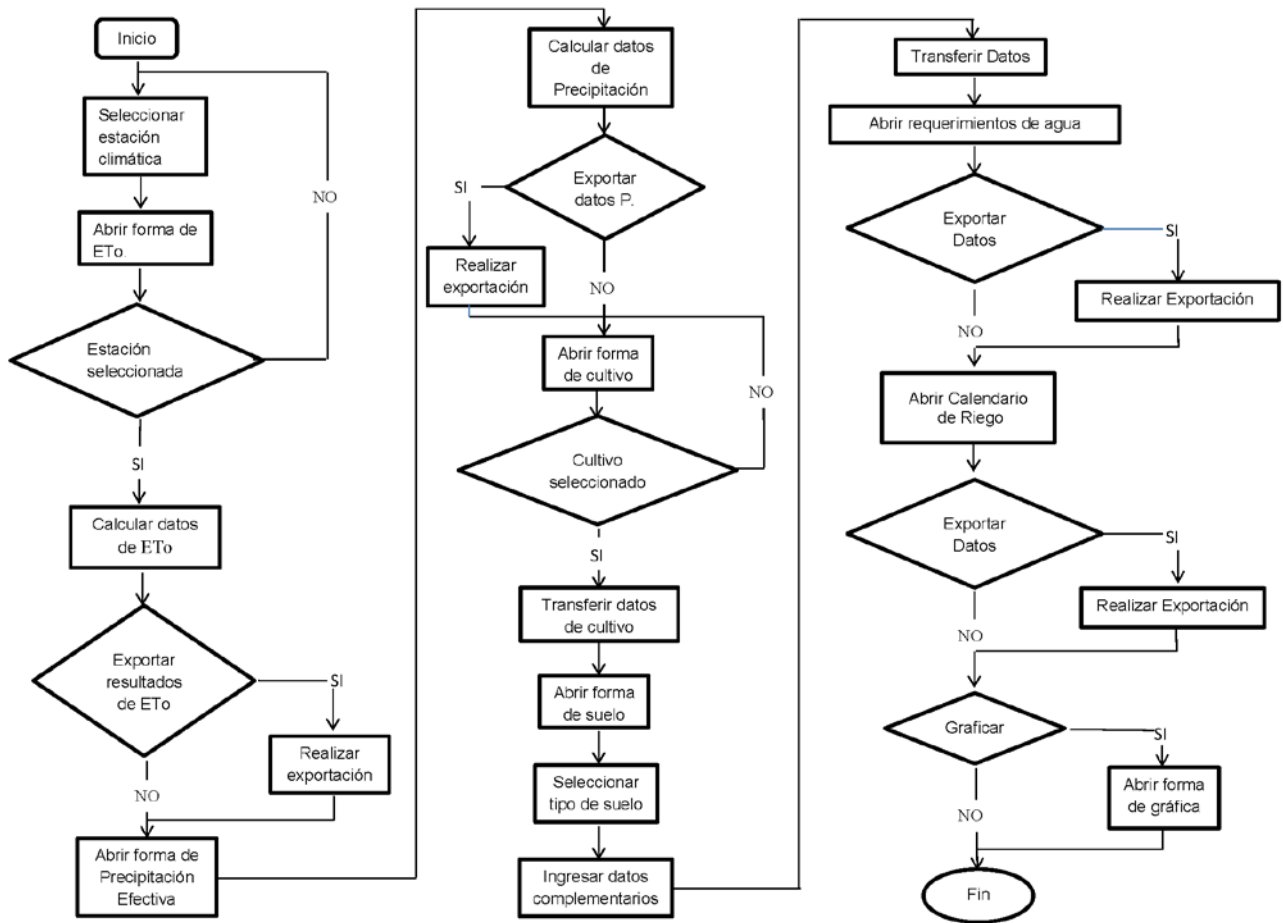


Figura 16. Diagrama de Flujo del programa “Requerimiento de Riego”.

6.2. Base de datos asociada

En la Figura 17 se muestran las bases de datos que han sido recopiladas y suministradas al sistema para su disposición en las diferentes fases del cálculo de requerimiento de riego.

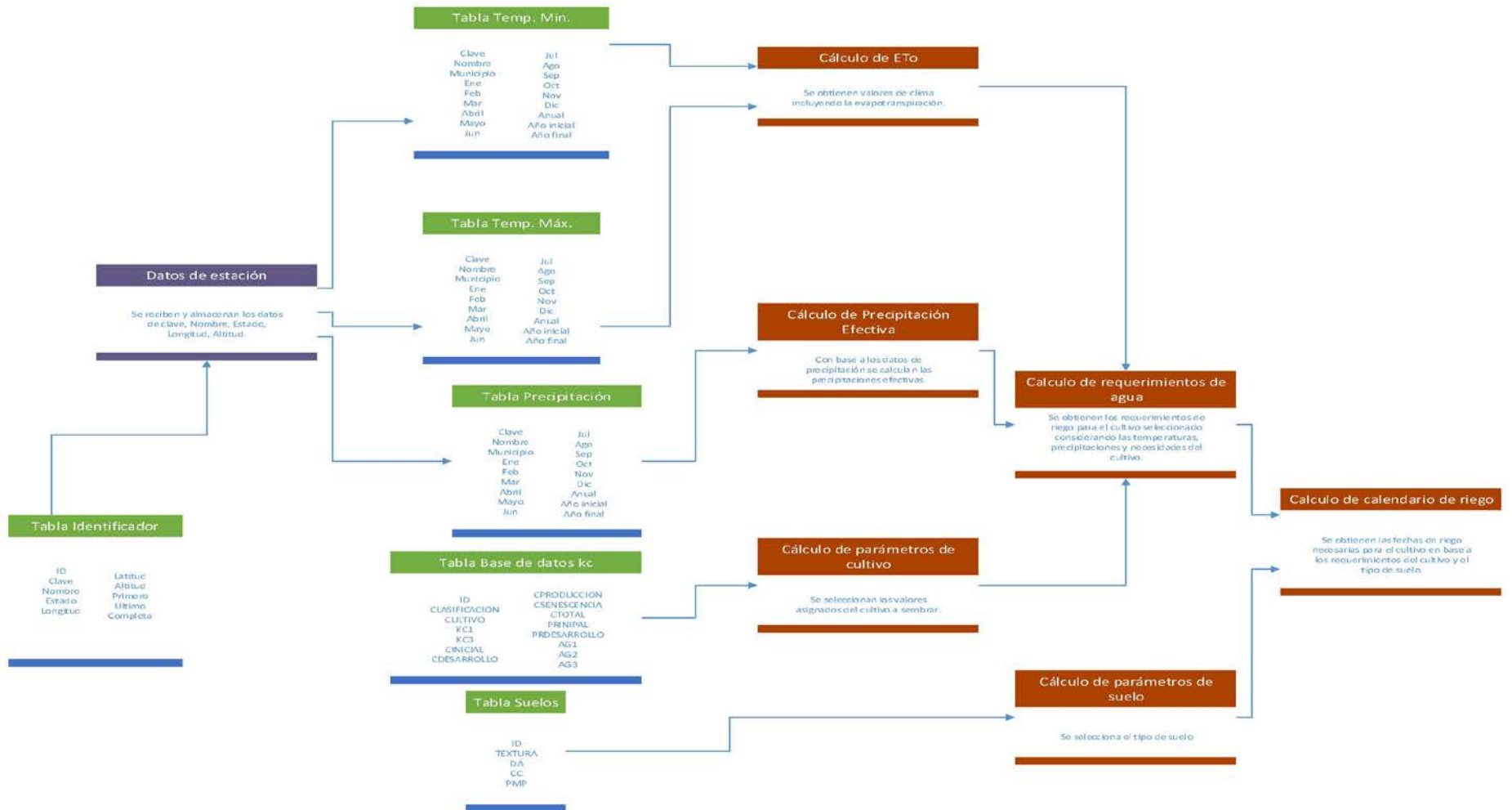


Figura 17. Bases de datos contenidas dentro del programa “Requerimiento de Riego”.

Como se menciona previamente en el apartado 5.2.4, las bases de datos necesarias se integraron al sistema usando la tecnología SQLite. La base de datos de cultivo y tipo de suelo se puede modificar dentro del sistema por medio del módulo de “Agregar” en el menú “Archivo”. Respecto a la base que contiene la información de las estaciones climatológicas, ésta puede ser modificada por sustitución de la existente, a condición de que tenga exactamente las mismas características y atributos, sin embargo el sistema no contiene un módulo para su sustitución automática, por lo que en caso de ser necesario ésta debe realizarse previo conocimiento de la estructura del mismo.

Respecto a la base que contiene la información de las estaciones climatológicas, ésta no se puede modificar dentro del sistema, solo se puede por sustitución de la existente, a condición de que tenga exactamente las mismas características y atributos, Para modificar se requiere contar con los conocimientos de la estructura del mismo y se puede hacer por medio de la generación de un shape de puntos en coordenadas geográficas, el cual deberá llamarse “estaciones.shp”, en donde cada punto representa una estación climática y su tabla de atributos deberá contener la información general de la estación tal como: Estado, Clave, Nombre, Longitud, Latitud, Altitud, Fecha del primer registro, Fecha de último registro y porcentaje de datos. Luego deberá generarse el archivo “varclimat.db”, el cual es una base de datos en donde se colocará la información de las variables climáticas correspondientes a las estaciones climáticas del shape, este archivo se podrá generar a través de Navicat o MySQL. Los archivos “estaciones.shp” y “varclimat.db” generados, deberán sustituirse por los actuales, que se encuentran en la carpeta de “Vectores” y “Documentos” respectivamente.

6.3. Requisitos, componentes del software e instalación del RdR

Requisitos para el uso del sistema RdR. Equipo de cómputo con 3 GB memoria RAM y disco duro con 4 GB de espacio libre, sistema de 32 ó 64 bits, Net frame work de 3.5 o superior.

Componentes del desarrollo. El sistema se integra de un programa ejecutable RdR.exe y complementos, que son bibliotecas de SQLite y MapWinGis.

Instalación. Para su instalación únicamente se requiere ejecutar el archivo “SetupRdR.exe”, una vez instalado se requiere ejecutar el archivo “RdR.exe”.

6.4. Descripción del cuadro de dialogo principal del sistema RdR.

Una vez ejecutado el programa, se despliega la ventana principal del mismo, como puede observarse en la Figura 18, donde la barra de módulos se ubica a la izquierda y los íconos de la Barra de Módulos proporcionan acceso directo a los módulos disponibles.

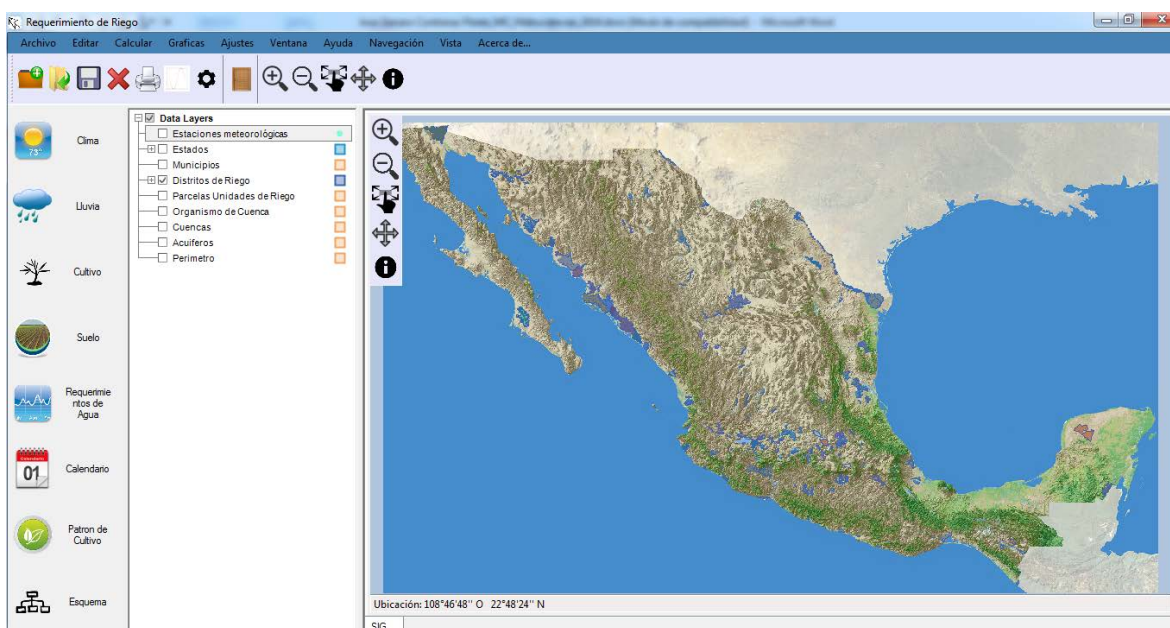


Figura 18. Ventana principal del programa “Requerimiento de Riego”.

6.5. Menú y submenús

El menú principal se subdivide en 10 sub-menús:

1. Archivo: Comandos relacionados con la creación de un proyecto nuevo, su apertura, su guardado y la salida el programa.
2. Editar: Son los comandos de edición estándar , con opciones de copiar, cortar, pegar y eliminar.
3. Calcular. Es el comando que ejecutará el proceso de cálculo de los requerimientos de riego y calendario de riego una vez que se tenga la información de E_t0 , precipitación efectiva, cultivo y suelo.
4. Gráficas. Comandos para mostrar gráficos de entrada y salida de datos

5. Ajustes. Comando que permite realizar los ajustes generales para personalizar el programa
6. Ventana. Comando para la visualización y arreglo de las ventanas.
7. Navegación. Tienen que ver con el desplazamiento y enfoque en la vista de la pantalla (acercar, alejar, límites, mover), además de Información, estructuras y documentos asociados.
8. Acerca de.. Despliega la información relativa a la procedencia del programa y la versión del mismo.

6.6. Integración de información de base de datos y shp.

La integración espacial de las Estaciones, Estados, Cuencas, y Distritos de riego (en este caso solo se incluye el DR001) y perímetro de la República Mexicana está en formato de shape, que a continuación se describen.

Datos de estaciones y su ubicación geográfica integrada al RdR

Cada estación se ubica en la capa de “Estaciones meteorológicas” a nivel Nacional como se indica en la Figura 19, en cada uno de los puntos. Y en cada punto-estación se asocia su información climatológica respectiva, además con la información descriptiva y geográfica de la misma, para este caso solo se tiene información de las estaciones climáticas del Estado de Aguascalientes.

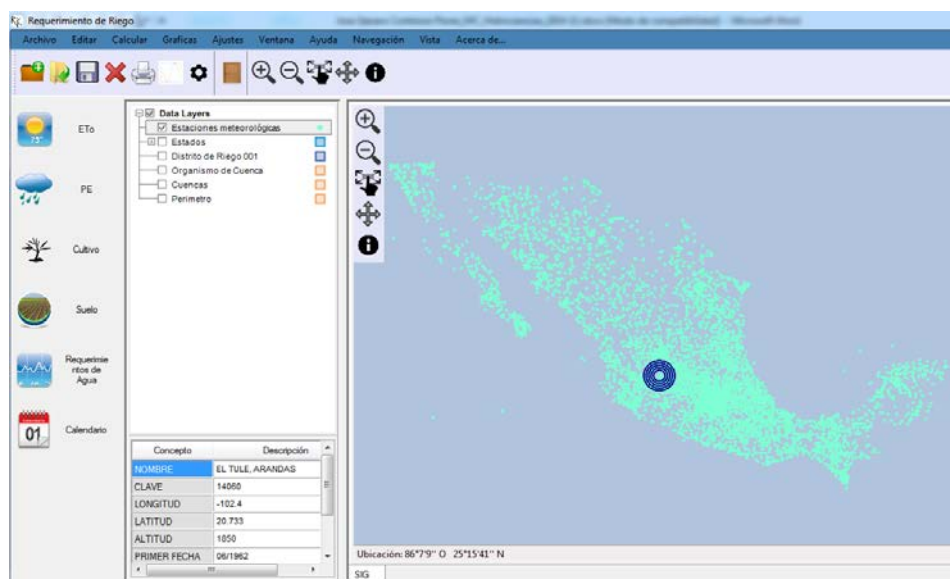


Figura 19. Información de estaciones

Integración de los límites Estatales y de la República Mexicana

Se integró la capa vectorial Estados.shp, que delimita a la división política de los Estados de la República Mexicana con su respectiva superficie en km².

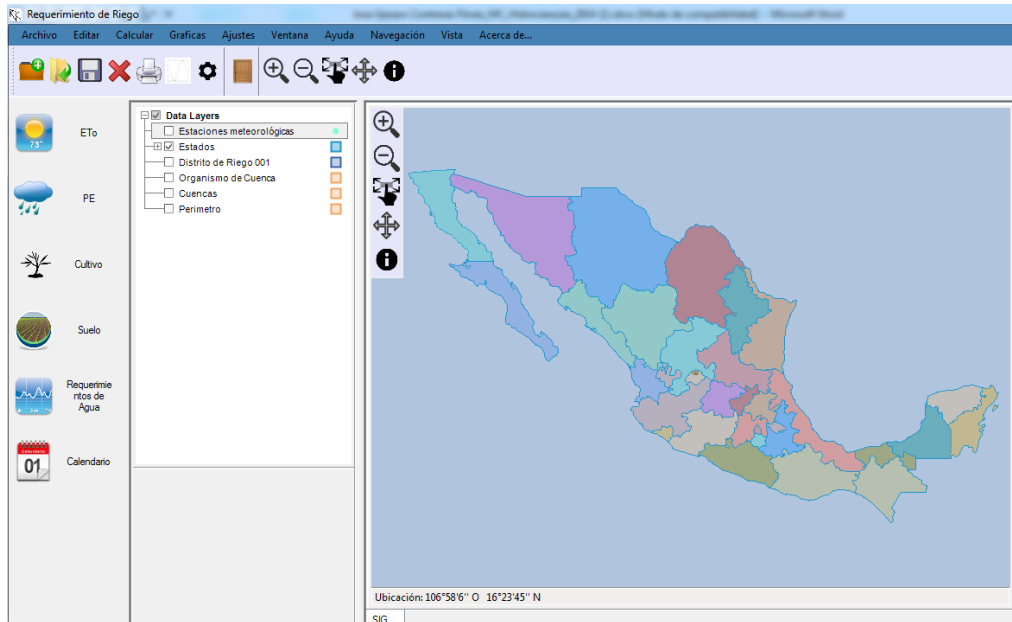


Figura 20. Información de Estados

Además se integró la capa de la delimitación geográfica correspondiente a la República Mexicana (Perímetro.shp).

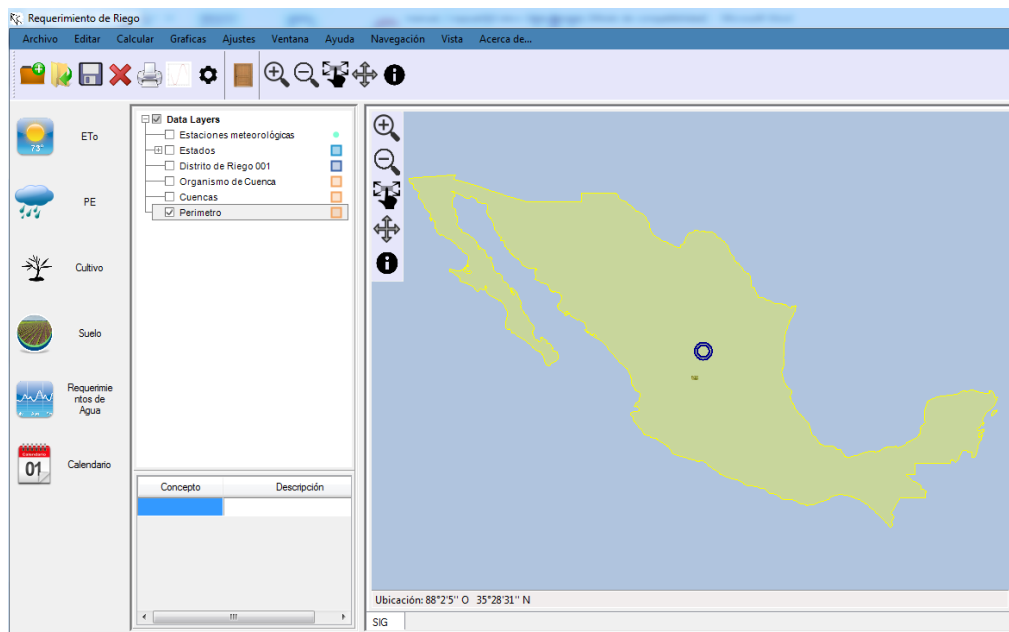


Figura 21. Información de Perímetro

Distribución espacial de las parcelas del Distrito de Riego 001.

Contiene la delimitación perimetral de las parcelas que conforman la superficie de riego del Distrito 001 Pabellón.

En el sistema se integró la capa vectorial Pabellón.shp del Distrito de Riego 001, que contiene la delimitación perimetral de las parcelas que conforman la superficie de riego del Distrito 001 Pabellón. El sistema está diseñado únicamente para cargar el shape de dicho distrito, no se cuenta con un módulo para agregar más distritos de riego, sin embargo, esto se podría considerar para versiones futuras.

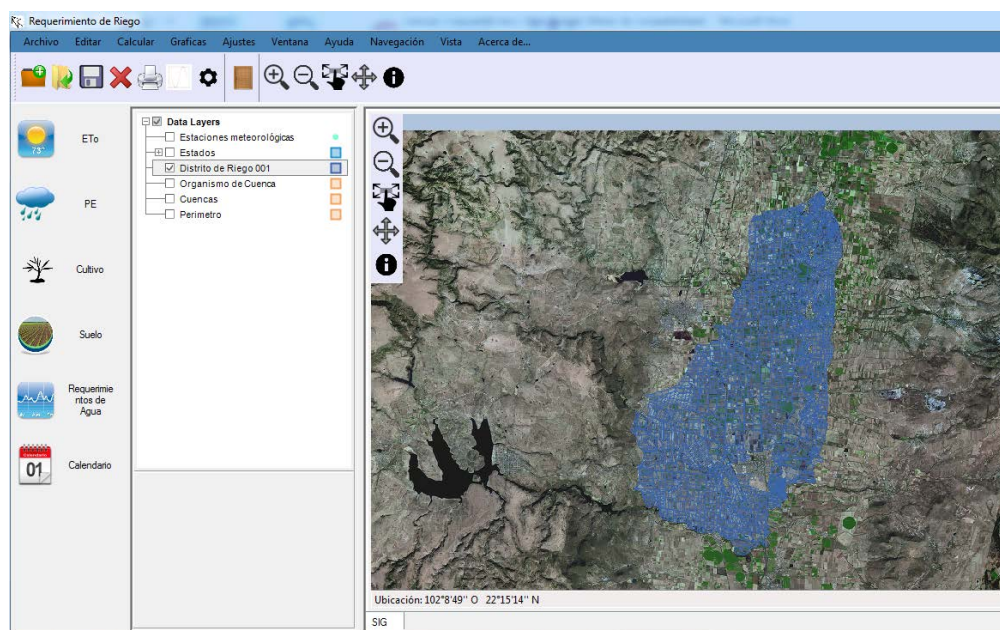


Figura 22. Información de Riego 001 Pabellón

Distribución política para la administración de Cuencas (Organismo de cuencas)

Así mismo se integro la capa vectorial Cuencas.shp que contiene el nombre del Organismo de Cuenca, según la Comisión Nacional del Agua, la clave correspondiente y la superficie que abarca dicho organismo.

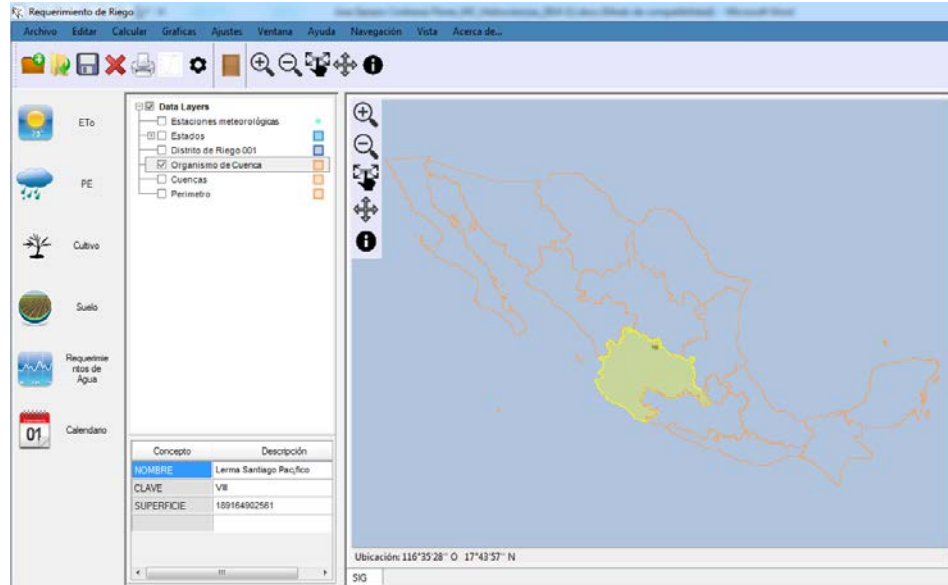


Figura 23. Información de Organismo de Cuenca

Distribución geográfica de las Cuencas

Esta capa contiene el nombre de la región hidrológica a la que pertenece la cuenca, la clave de la subregión que corresponde, el nombre de la cuenca, el nombre del estado o estados en el que se ubica la cuenca, el tipo de cuenca que corresponde, y la longitud y área expresado en km^2 que comprende. Dichas cuencas fueron determinadas por la Comisión Nacional del Agua.

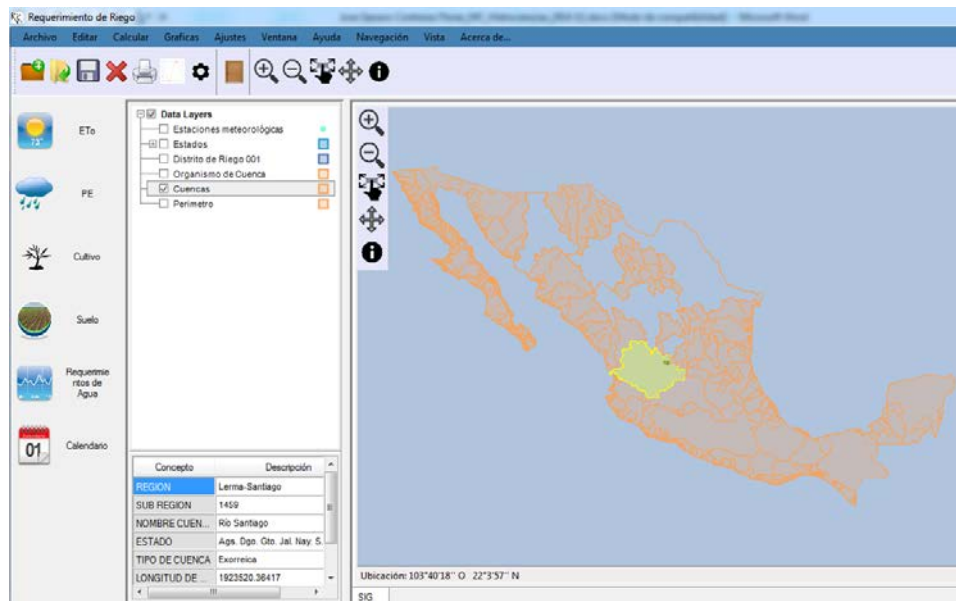


Figura 24. Información de Cuencas

6.7. Aplicación del RdR para determinar los requerimientos de riego.

El programa “Requerimiento de Riego”, es una aplicación que trabaja bajo el ambiente de “Windows” y permite al usuario tener una herramienta para generar un programa calendarizado detallado de riego.

El programa cuenta con la base de datos climatológicos de las distintas estaciones meteorológicas a nivel nacional, además de las capas de los estados, municipios, estaciones meteorológicas y del distrito de riego 001 Pabellon.

Para el cálculo de requerimiento de riego, este programa permite escoger entre una lista de cultivos, así como datos fecha de siembra, duración de las distintas etapas de desarrollo del cultivo, tipos de suelo y sus características, profundidad de raíces y cálculos requeridos para la obtención de un calendario de riego detallado apoyado de gráficas.

Los resultados que presenta el programa se dividen en dos grupos: texto y gráficos. Los resultados en texto se despliegan automáticamente y comprenden: precipitación, evapotranspiración potencial, evapotranspiración real y necesidades de riego.

Los resultados gráficos muestran, mediante líneas, áreas, el comportamiento de las variables anteriormente citadas a lo largo del tiempo; se permite además la exportación de los resultados para su utilización con alguna hoja de cálculo.

6.7.1. Composición del programa

Para la aplicación del sistema RdR, se diseñó con módulos organizados de forma secuencial, es decir el proceso de cálculo, va de acuerdo al orden en que se encuentran ubicados los módulos. Qué se inicia en el primer módulo que consiste en definir el conjunto de estaciones que están cerca de la parcela o conjunto de parcelas de interés para recuperar los datos del clima y en caso de ser varias estaciones climáticas se ponderan los datos con base en el área de influencia de cada estación sobre la parcela o parcelas de interés, posteriormente se encuentran los módulos de cálculo de la evapotranspiración de referencia (E_t0) y precipitación efectiva, luego de acuerdo al cultivo, suelo y eficiencia del método de

riego, el usuario introducirá los datos a los módulos correspondientes y finalmente se ejecutarán los módulos de cálculo del requerimiento de riego y calendario de riego.

6.7.2. Ejecución del RR

El programa RR (Requerimiento de riego) es un sistema amigable que permite su utilización a partir de cualquier ruta en la que se ubique, medio o dispositivo que lo contenga. Así, si el sistema se ubica en la unidad “C:” del disco duro de la computadora, la ubicación será “C:\Program Files\RR”. Una vez ubicada la ruta, se busca dentro de la carpeta el icono con el nombre “RR” y se da doble clic para tener acceso.

Al inicio del programa aparecerá la ventana de ingreso donde solicitará usuario y contraseña para poder ingresar, sin esta contraseña no abra forma de acceder al programa, para salirse de esta pantalla es necesario presionar “Esc”, y con la contraseña ingresada se presiona “Enter”.



Figura 25. Ventana de ingreso de contraseña.

6.7.3. Características generales

Ventana principal

Visualizador Principal del programa donde se muestra las capas del distrito de riego 001 Pabellón, las distintas estaciones meteorológicas, los estados de la República Mexicana y la delimitación de los distintos municipios a nivel nacional.

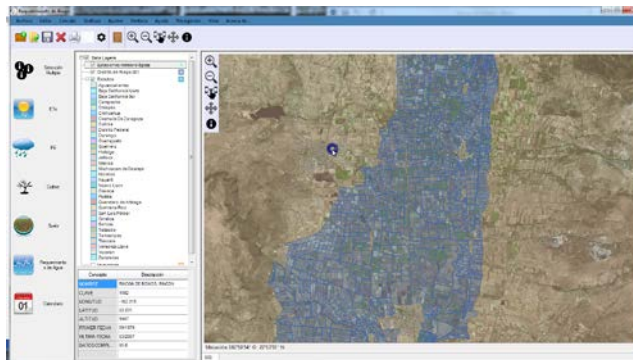


Figura 26. Ventana principal.

Barra de menú

La parte superior y parte izquierda lateral muestran las distintas herramientas disponibles para la manipulación del programa con las distintas opciones para abrir archivos existentes, guardar, salir y generar nuevos archivos. Editar la información así como las distintas opciones de gráficas, ajustes del programa.



Figura 27. Opciones y herramientas ubicadas en la parte superior.

De izquierda a derecha, el primer icono es para crear un nuevo archivo, el siguiente abre archivos, el siguiente los guarda y el cuatro es salir. El quinto icono permite imprimir, y el siguiente permite generar los gráficos, y el último icono de este grupo es el de opciones del programa.

El siguiente grupo de iconos como se indica en la Figura 28, son las herramientas de manejo del sistema de información geográfica. Que se describen su función de cada uno más adelante.



Figura 28. Herramientas para el sistema de información geográfica.

Barra de herramientas

Estas se encuentran en la parte izquierda del cuadro de diálogo principal (Figura 29), que a continuación se detalla su uso.



Figura 29. Herramientas que se ubica en la parte izquierda.

Ventana de trabajo

Para el manejo del sistema de información geográfica se tiene un cuadro de herramientas ubicado en la parte superior izquierda del visualizador del mapa siendo los dos primeros iconos para acercar y alejar, el tercer icono sirve para seleccionar límites, el cuarto se utiliza para mover el visualizar y el quinto se utiliza para mostrar información de la capa seleccionada Figura 30.

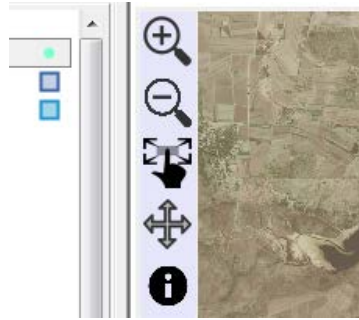


Figura 30. Herramientas para manipulación del sistema de información geográfica.

La parte central derecha se muestra las distintas capas para ser seleccionadas y ser visualizadas en el visor principal.



Figura 31. Distintas capas disponibles para ser seleccionadas.

Al seleccionar una capa, esta tendrá características específicas de la capa para su referenciación.

Concepto	Descripción
NOMBRE	RINCON DE ROMOS, RINCON
CLAVE	1082
LONGITUD	-102.315
LATITUD	22.231
ALTITUD	1947
PRIMER FECHA	09/1979
ULTIMA FECHA	03/2007
DATOS COMPL...	95.8

Figura 32. Características de la capa de estaciones meteorológicas seleccionada.

Inicio

Uso del programa

Para el inicio de los cálculos, es necesario seleccionar una estación o varias estaciones dependiendo del área de estudio, para ello se tiene la “selección múltiple” donde se agregan las distintas estaciones meteorológicas.

En esta opción se recupera la información climatológica que esta almacenada en la base de datos del RdR para cada una de las estaciones. Es importante señalar que se debe seleccionar alguna estación que esté más cerca con respecto la parcela de interés, dado que el sistema no interpola, pero si se puede ponderar con base a las estaciones circundantes, por los criterios del usuario.



Figura 33. Icono para selección múltiple de estaciones meteorológicas.

The image shows a screenshot of a software window titled 'Multiple'. The window contains a table with three columns: 'Estación', 'Nombre', and 'Porcentaje'. The first row is highlighted in blue. Below the table are two buttons: 'Aceptar' and 'Cancelar'.

Estación	Nombre	Porcentaje
1082	RINCON DE ROMOS, RINCON	0
1025	SAN F. DE LOS ROMOS(SMN)	0
1014	PABELLON (CAMPO EXP), PA	0
1039	PABELLON DE ARTEAGA,P.A.	0
1102	PABELLON DE ARTEAGA, PAB	0
1026	TEPEZALA, TEPEZALA	0
1060	SAN PEDRO VICTORIA,R.DE	0
1067	E.T.A. 241. S. J. GRACIA	0
1019	PRESA JOCOQUE, PABELLON	0
1089	PRESA 50 ANIVERSARIO, SA	0
1017	PRESA POTRERILLOS, RINCO	0
1029	ASIENTOS, ASIENTOS	0
1044	VIDEDOS EL MORO	0

Figura 34. Distintas estaciones seleccionadas.

Desarrollo de cálculos

Después de seleccionar la o las estaciones meteorológicas se procede a calcular la evapotranspiración de referencia con la información de la estación seleccionada, o la ponderada de las estaciones cercanas.

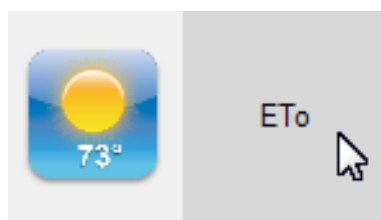


Figura 35. Icono para cálculo de Evapotranspiración de referencia.

La ventana desglosada, mostrara la información general de la estación y los datos de temperatura. El cálculo se hace simplemente presionando “calcular”, el cálculo se mostrara en la columna derecha para cada mes, no olvidar transferir a gráfica, si se requiere la representación correspondiente.

The image shows a software window titled 'ETo Penman-Monteith'. It has a menu bar with 'Archivo', 'Calcular', and 'Transferir a Gráfica'. Below the menu bar, there are input fields for 'Estado' (AGUASCALIENTE), 'Estación' (1025), 'Altitud' (1800), 'Latitud' (22.25), and 'Longitud' (-102.283). The main area contains a table with the following data:

Mes	Temp Max °C	Temp Min °C	Días del Mes	vapotranspiración de referencia (ETo) mm/día
Enero	22.9	2.5	31	3.49
Febrero	24.7	3.1	28	4.20
Marzo	28.2	5.3	31	5.27
Abril	30.9	8.2	30	6.16
Mayo	32.6	11.1	31	6.58
Junio	31.4	13.6	30	6.11
Julio	28.9	13.2	31	5.49
Agosto	29	12.9	31	5.38
Septiembre	27.7	12.1	30	4.82
Octubre	26.4	8.5	31	4.40
Noviembre	24.7	4.8	30	3.82
Diciembre	22.5	3.7	31	3.25

At the bottom of the window, there is a status bar that reads 'Cálculos realizados satisfactoriamente. 12:15:42 p.m.'

Figura 36. Ventana de cálculo de evapotranspiración.

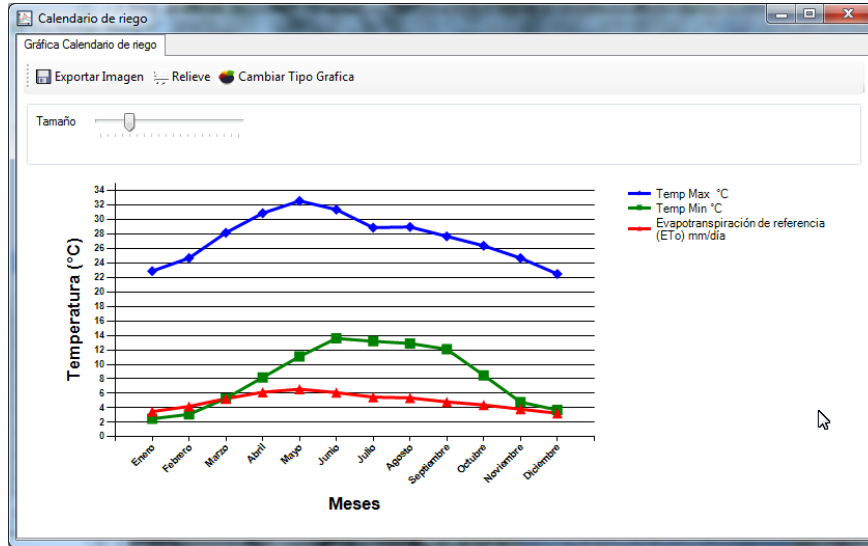


Figura 37. Grafica de la evapotranspiración de referencia y temperaturas máximas y mínimas anuales.

Una vez calculada la evapotranspiración de referencia se calcula la precipitación, presionando el icono de “calcular PE” y el resultado se desplegará en la columna derecha para cada mes con los datos de la estación meteorológica seleccionada.

Para este cálculo se utilizan cuatro métodos disponibles para que el usuario tenga disponibilidad de escoger, el método de la FAO, USDA Soil Conservation Service, porcentaje fijo, y personalizado.

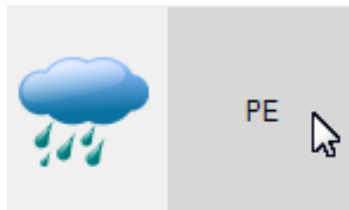


Figura 38. Icono de cálculo de precipitación efectiva.

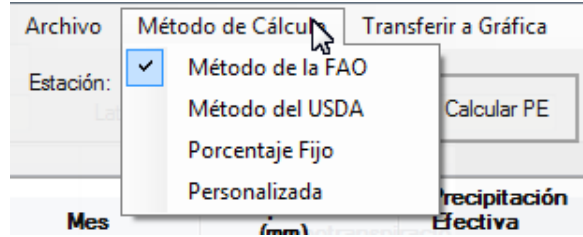


Figura 39. Distintos métodos disponibles del cálculo de la precipitación efectiva (PE).

Mes	Precipitación (mm)	Precipitación Efectiva (mm)
Enero	15.5	15.12
Febrero	8.6	8.48
Marzo	7.3	7.21
Abril	10.7	10.52
Mayo	19.5	18.89
Junio	72.5	64.09
Julio	94.5	80.21
Agosto	98	82.63
Septiembre	87.1	74.96
Octubre	31.5	29.91
Noviembre	12.6	12.35
Diciembre	15.2	14.83
Total	473	419.21

Figura 40. Diálogo donde se indica el cálculo de precipitación efectiva (PE).

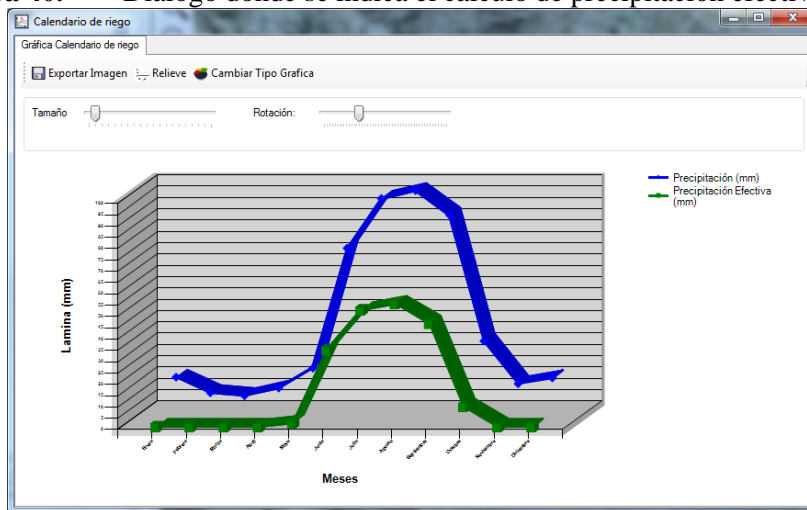


Figura 41. Gráfica de precipitación anual y precipitación efectiva expresada en milímetros.

Para proceder con los siguientes cálculos, es necesario seleccionar el cultivo y se define la fecha de siembra según sea el caso, con lo cual se cargarán las características del cultivo como los valores de Kc, los días para cada etapa del cultivo, la profundidad radicular y el agotamiento crítico. Los valores mostrados aparecerán por default pero el usuario podrá modificar estos valores de acuerdo a su criterio y con el icono inferior derecho se transferirán los valores para ser usados para los distintos cálculos.



Figura 42. Icono para selección de cultivo.

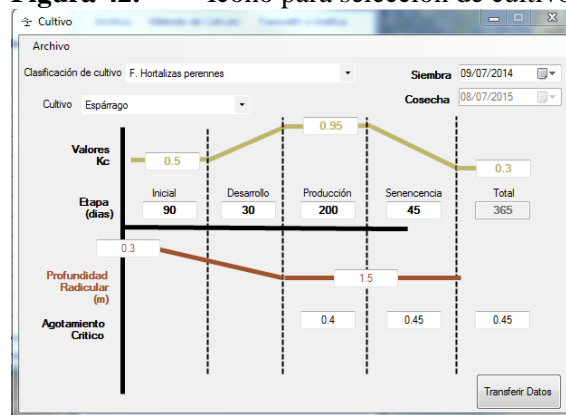


Figura 43. Cuadro para selección de cultivo y modificación de características.

Tras seleccionar el tipo de cultivo se selecciona el tipo de suelo presente en la zona de estudio. Los valores predeterminados aparecerán tras seleccionar un tipo de suelo, el usuario podrá modificar estos valores de acuerdo a su criterio y con el icono inferior derecho se transferirán los valores para ser usados para los distintos cálculos.



Figura 44. Icono para selección de suelo.

The image is a screenshot of a software window titled "Suelo". The window has a standard Windows-style title bar with minimize, maximize, and close buttons. Below the title bar, there is a menu bar with "Archivo". The main content area contains a dropdown menu for "Nombre de Suelo" with "Franco limoso" selected. Below this is a section titled "Parametros Generales De Suelo" which contains several input fields: "Textura" (Franco limoso), "CC" (0.27 cm3/cm3), "PMP" (0.13 cm3/cm3), "DA" (1.3 g/cm3), and "Lamina Aprovechable" (27.30 cm). A "Transferir Datos" button is located at the bottom right of the parameter section.

Figura 45. Cuadro para selección de suelo y modificación de características.

Con los datos de cultivo y suelo, se procede a obtener los requerimientos de riego, mostrado para distintas fechas y etapas del cultivo.

Es necesario proporcionar la eficiencia de riego la cual estará relacionada con el tipo de riego y el tiempo de riego, estos valores están por default pero el usuario las puede modificar de acuerdo a su criterio.



Figura 46. Icono de opciones de RR.

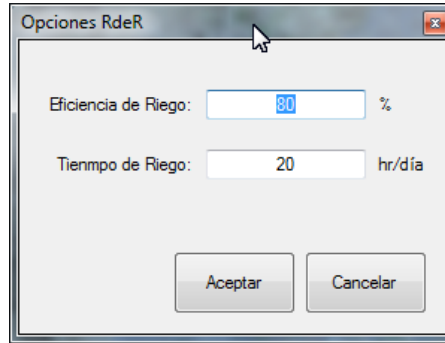


Figura 47. Opciones para modificar eficiencia y tiempo de riego.

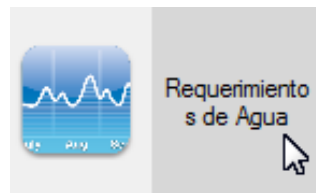


Figura 48. Icono de cálculo de Requerimiento de agua

Requerimiento de Agua

Archivo

Estación ETo: 1025 Cultivo: 43 Eficiencia de Riego: 0.8

Estación de Lluvia: 1025 Fecha de Siembra: 09/07/2014 **Recalcular**

Fecha	Día de ciclo	Etapas	Kc	Eto mm/día	Etc mm/día	Precipitación Efectiva mm/día	Requerimiento de Riego mm/día
09/07/2014	1	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
10/07/2014	2	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
11/07/2014	3	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
12/07/2014	4	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
13/07/2014	5	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
14/07/2014	6	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
15/07/2014	7	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
16/07/2014	8	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
17/07/2014	9	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
18/07/2014	10	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
19/07/2014	11	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
20/07/2014	12	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
21/07/2014	13	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
22/07/2014	14	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
23/07/2014	15	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
24/07/2014	16	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
25/07/2014	17	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
26/07/2014	18	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
27/07/2014	19	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16
28/07/2014	20	Inicial	0.50	5.49	2.74	2.59	0.16

Figura 49. Cálculo de requerimiento de riego.

Para el cálculo del calendario de riego se selecciona el icono “Calendario” (Figura 50) donde se mostraran lo valores calculados (Figura 51) a partir de las características de suelo, cultivo y valores de la estación meteorológica.

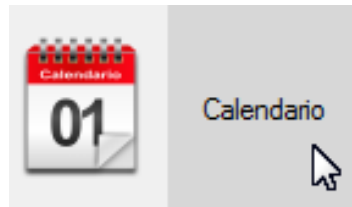


Figura 50. Icono de cálculo de calendario de riego.

The screenshot shows a window titled 'Calendario' with a menu bar containing 'Archivo' and 'Transferir a Grafica'. Below the menu bar, there are two tabs: 'Calendario de Riego' (selected) and 'Programa de Riego'. The main area contains a table with the following data:

Fecha	Profundidad de Raíz (m)	Factor de Agotamiento	Lámina Aprovechable cm	Lámina Permissible cm	Lámina Alm mm	Consumo en el periodo mm	Consumo Acumulado por Riego mm	
09/07/2014	0.31	0.30	5.68	1.70	161.62	0.00	0.00	0
10/07/2014	0.32	0.30	5.90	1.77	218.40	0.16	0.16	1
11/07/2014	0.34	0.30	6.12	1.83	218.24	0.16	0.31	1
12/07/2014	0.35	0.30	6.33	1.90	218.09	0.16	0.47	1
13/07/2014	0.36	0.30	6.55	1.97	217.93	0.16	0.62	1
14/07/2014	0.37	0.30	6.77	2.03	217.78	0.16	0.78	2
15/07/2014	0.38	0.30	6.99	2.10	217.62	0.16	0.93	2
16/07/2014	0.40	0.30	7.21	2.16	217.47	0.16	1.09	2
17/07/2014	0.41	0.30	7.43	2.23	217.31	0.16	1.25	2
18/07/2014	0.42	0.30	7.64	2.29	217.15	0.16	1.40	2
19/07/2014	0.43	0.30	7.86	2.36	217.00	0.16	1.56	2
20/07/2014	0.44	0.30	8.08	2.42	216.84	0.16	1.71	2
21/07/2014	0.46	0.30	8.30	2.49	216.69	0.16	1.87	2
22/07/2014	0.47	0.30	8.52	2.56	216.53	0.16	2.02	2
23/07/2014	0.48	0.30	8.74	2.62	216.38	0.16	2.18	2
24/07/2014	0.49	0.30	8.95	2.69	216.22	0.16	2.34	2
25/07/2014	0.50	0.30	9.17	2.75	216.06	0.16	2.49	2
26/07/2014	0.52	0.30	9.39	2.82	215.91	0.16	2.65	2
27/07/2014	0.53	0.30	9.61	2.88	215.75	0.16	2.80	2
28/07/2014	0.54	0.30	9.83	2.95	215.60	0.16	2.96	2
29/07/2014	0.55	0.30	10.05	3.01	215.44	0.16	3.11	3
30/07/2014	0.56	0.30	10.26	3.08	215.29	0.16	3.27	3

Figura 51. Calendario de riego.

En el módulo de calendario de riego, se presentan los resultados del balance diario del agua en el suelo, en donde se muestra la siguiente información:

Profundidad de raíz (m): Se muestra el valor de la profundidad de raíz de cultivo, acorde a los datos ingresados en el módulo “Cultivo”.

Factor de agotamiento (adim): Valor del agotamiento crítico de la humedad en el suelo, acorde a los datos ingresados en el módulo “Cultivo”.

Lámina aprovechable (cm). La lámina aprovechable calculada en función de CC, PMP, Da y profundidad de raíz, acorde a los datos ingresados en el módulo “Cultivo” y “Suelo”

Lámina permisible: Es la lámina asociada al factor de agotamiento, es decir es la lámina de agua mínima permisible que debe haber en el suelo, una vez que la humedad del suelo llegue a este punto, debe efectuarse un riego para llevar la humedad a capacidad de campo.

Lámina Alm (mm): Es la lámina de agua que contiene el suelo en ese día.

Consumo en el período (mm). Es la lámina de agua que sale del suelo producto de la evapotranspiración del cultivo (Etc) menos la lámina que entra por la precipitación efectiva (PE), es decir el requerimiento de riego diario.

Consumo acumulado (mm). Es la lámina acumulada del consumo diario a partir del último riego.

No. De riego: Muestra el número de riego en el clico del cultivo.

Intervalo de riego (día): Muestra el intervalo de riego, es decir el número de días que hay entre un riego y otro

Lámina de reposición (mm): En caso de haber un riego, es la lámina de agua producto del riego.

Alm. Final (mm). Muestra la lámina de agua que tiene el suelo al final del día.

Caudal (lps/ha). Es el gasto por hectárea que se requiere para satisfacer el requerimiento de riego, considerando el tiempo de riego por día y la eficiencia de riego definidos.

Finalmente se muestra el cálculo (Figura 52) donde se registra la humedad del suelo (línea en color rojo) durante el ciclo del cultivo, Se observa que cuando esta llega a la línea del agotamiento crítico o humedad permisible (línea en color verde) se aplica un riego, llevando la humedad a capacidad de campo. Así mismo se muestra la humedad aprovechable (línea azul).

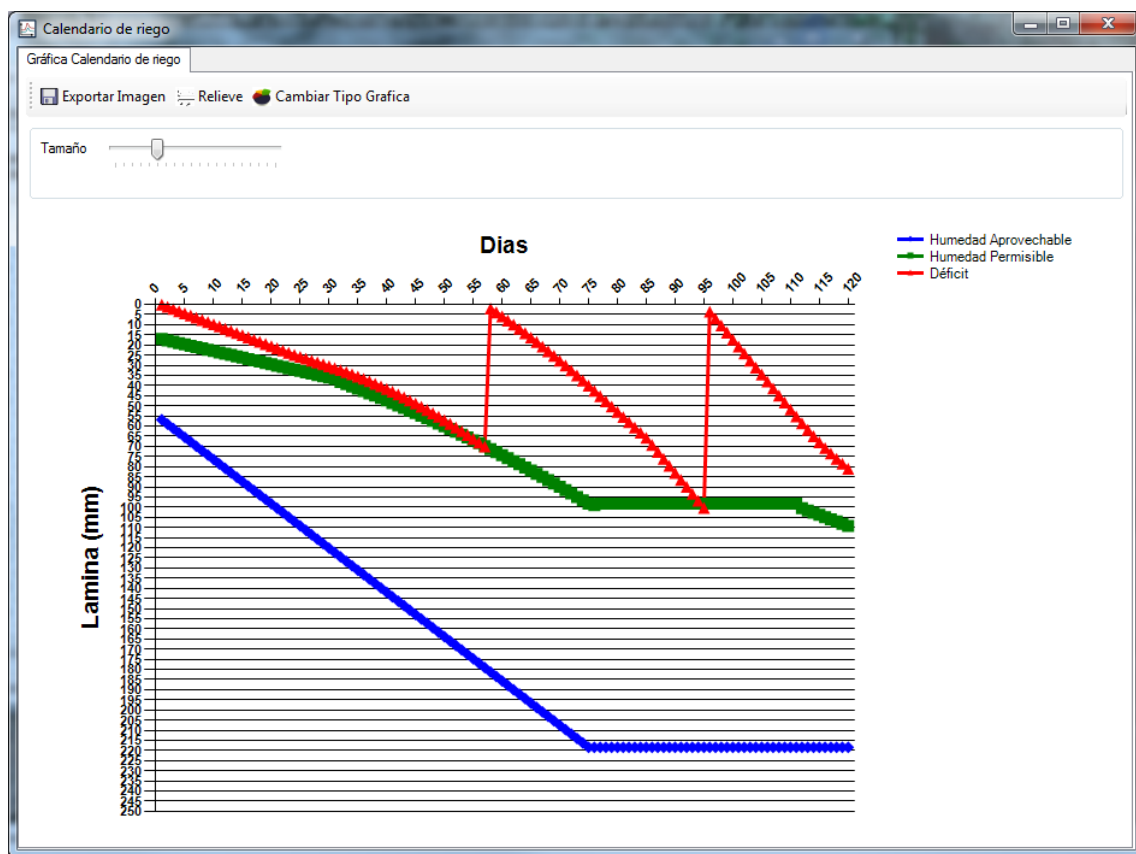


Figura 52. Gráfica de humedad aprovechable, humedad permisible y déficit durante toda la etapa de desarrollo del cultivo expresada en milímetros.

6.7.4. Ejemplo de calculo

Determinar el Requerimiento y Calendario de Riego, así como la capacidad del sistema de riego, para el cultivo de maíz en una superficie de 800 ha, en el DR 001 Pabellón, Aguascalientes.

Datos:

Ubicación:	Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes.		
Estaciones Meteorológicas:	<ul style="list-style-type: none">• 1094 - 25% de influencia en el área• 1025 - 50% de influencia en el área• 1014 - 25% de influencia en el área		
Cultivo:	Maíz producido en el DR Kc = 0.5, 1.2, 0.6 Etapa 130 días Fecha de Siembra 15 de Junio		
Tipo de Suelo:	Serie Rincon CC – 0.17 cm ³ /cm ³ PMP – 0.09 cm ³ /cm ³ DA – 1.59 gr/cm ³		
Eficiencia de aplicación:	52%		
Superficie:	800 ha		

Para la solución del problema anterior se utilizó el software “RdR” y “CropWat” con el fin de hacer una evaluación del sistema RdR.

SOLUCIÓN UTILIZANDO EL SISTEMA R_dR

Pantalla de inicio

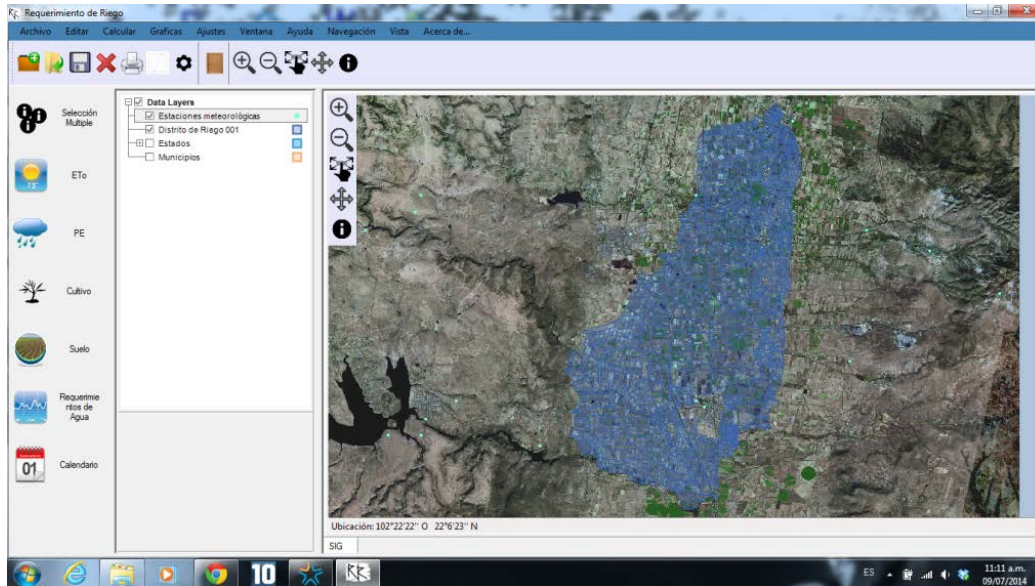


Figura 53. Vista general de la ventana de trabajo de R_dR.

En la figura anterior se puede observar el diálogo principal del programa. En la zona marcada en azul se observa las parcelas del Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes.

Paso 1.

Selección de estaciones meteorológicas.

El primer paso a seguir para el cálculo de requerimientos de riego es seleccionar las estaciones meteorológicas que influyen en la zona en la que se requiere hacer el cálculo. Para el caso del ejercicio el área de influencia es de 800 ha.

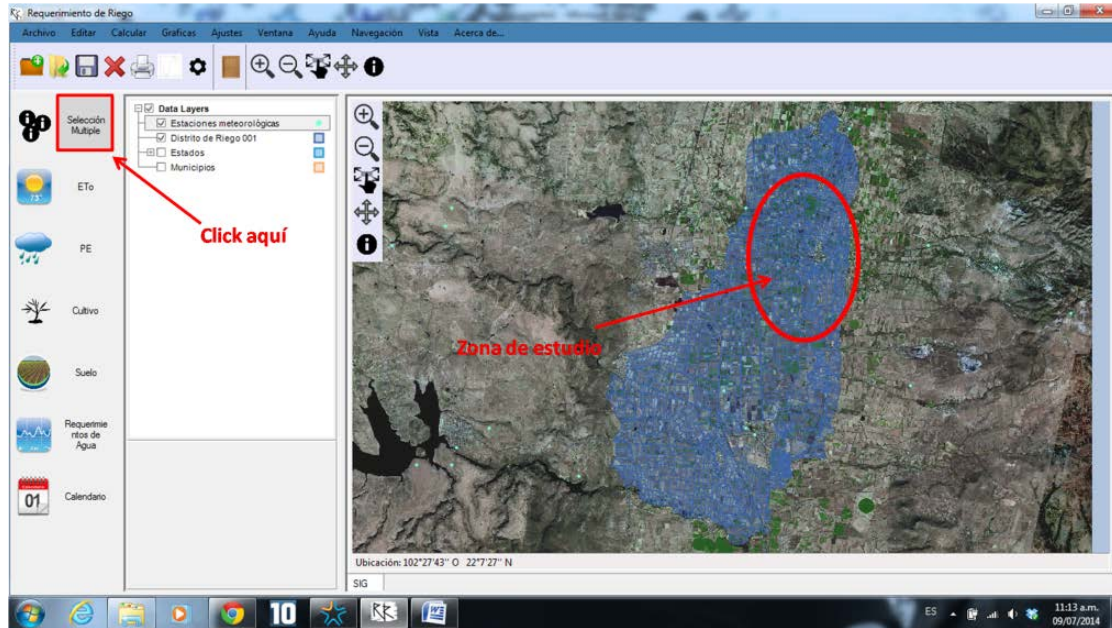


Figura 54. Vista del botón de Selección múltiple y del área de trabajo.

Una vez abierta la ventana de trabajo se procede a hacer la selección de las estaciones meteorológicas que tienen influencia en el área ya mencionada, dando click sobre las deseadas.

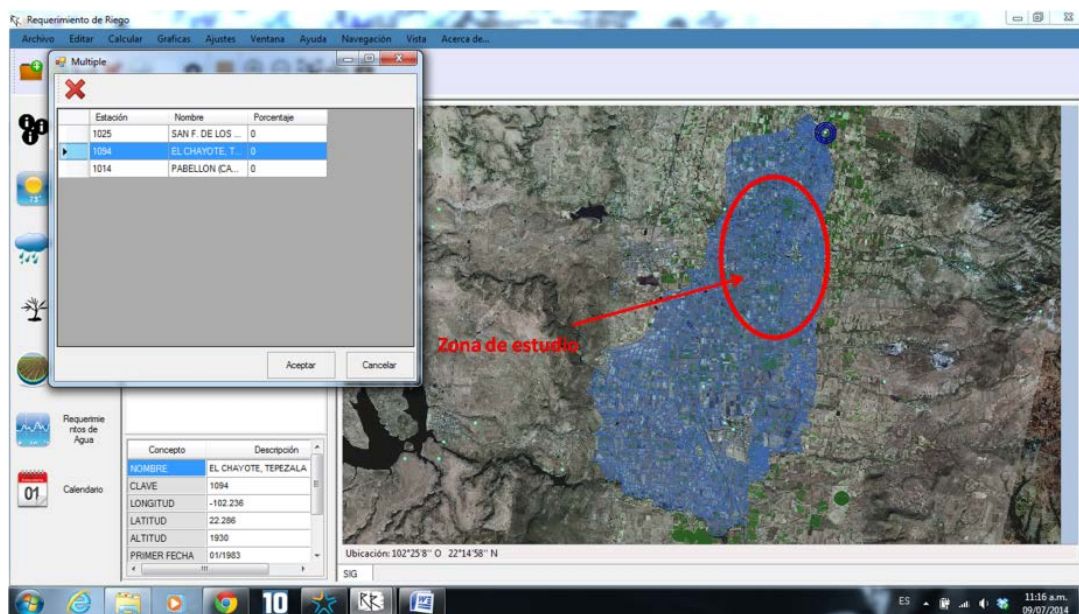


Figura 55. Vista de la Estación Meteorológica 1094.

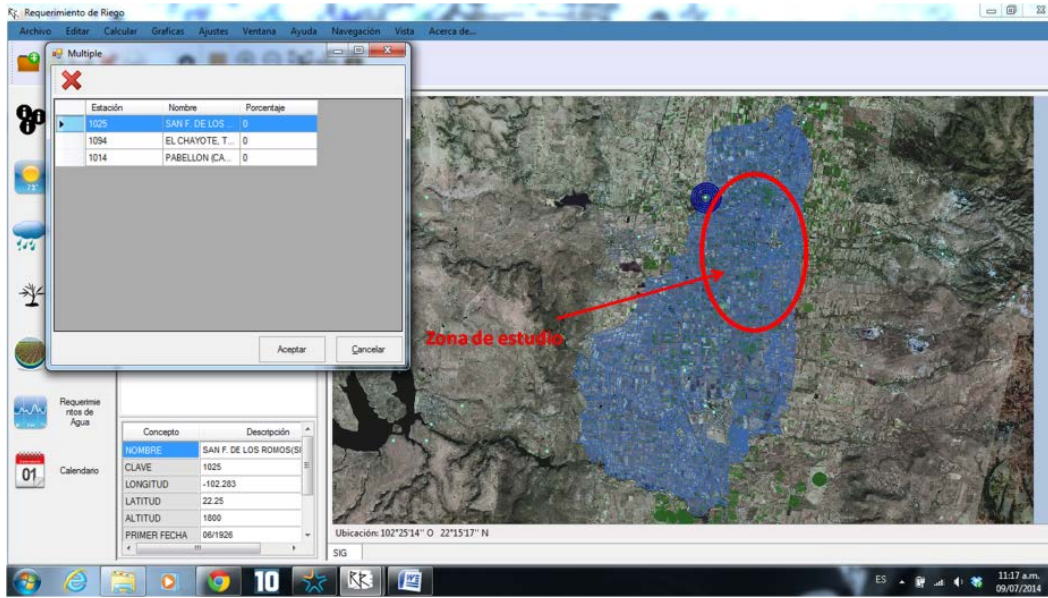


Figura 56. Vista de la Estación Meteorológica 1025.

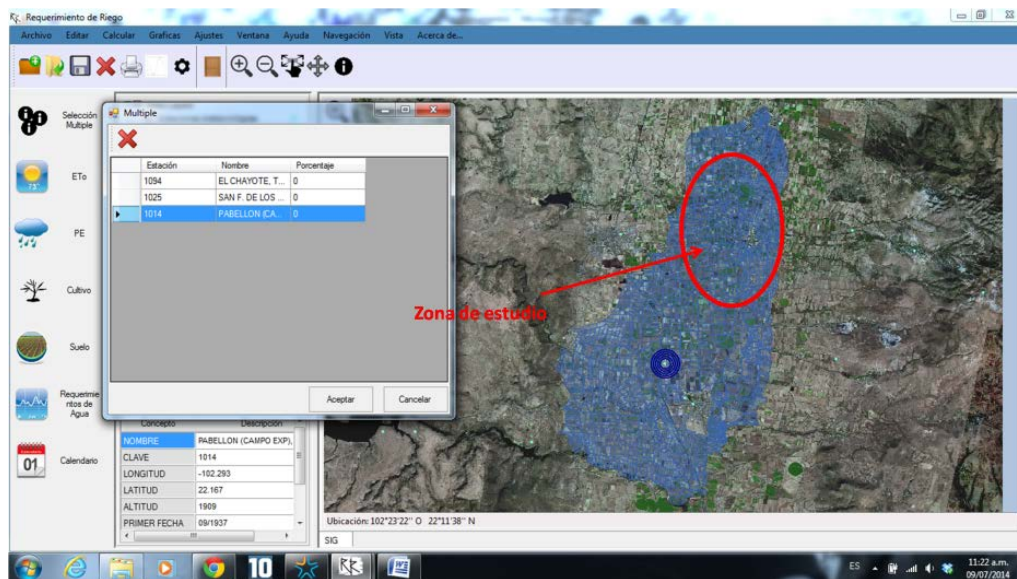


Figura 57. Vista de la Estación Meteorológica 1014.

Cuando se tenga la selección completa de las estaciones, se les indica el porcentaje de influencia para cada estación en la columna de porcentaje (Figura 58).



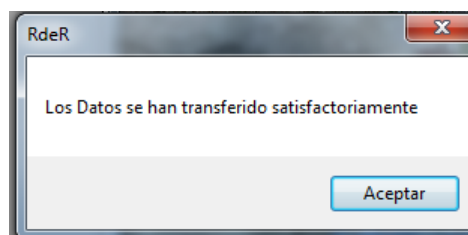
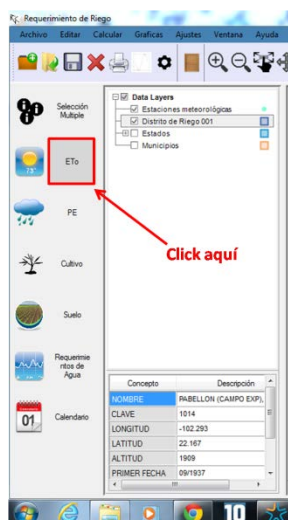
Figura 58. Vista de las estaciones meteorológicas seleccionadas y aviso de transferencia satisfactoria de datos.

Una vez que se transfirieron los datos se procede al siguiente paso.

Paso 2.

Cálculo de la evapotranspiración de referencia (ET_0).

El siguiente paso es seleccionar la opción de ET_0 dando click en el ícono, el método que usa el sistema para estimar la ET_0 es FAO Penman-Monteith.



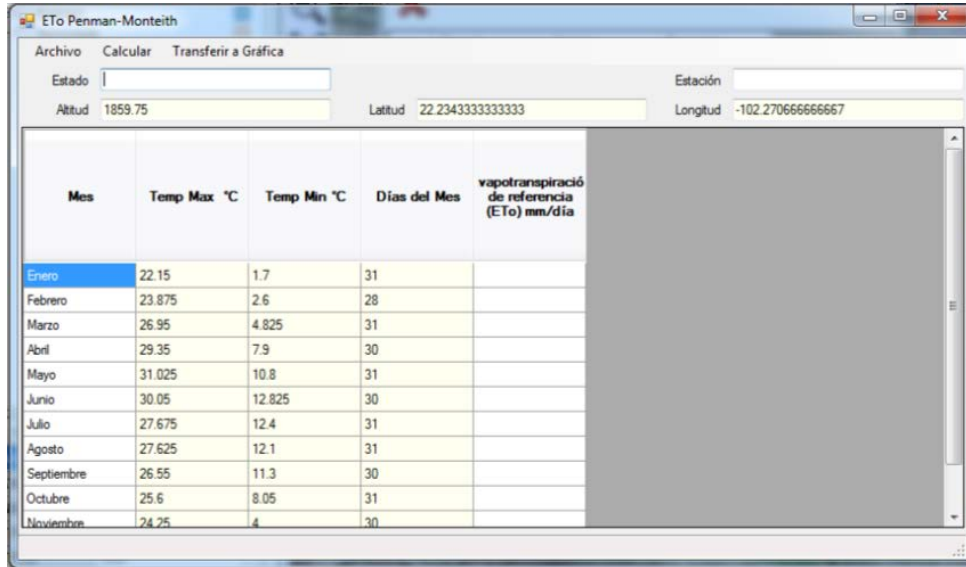


Figura 59. Vista del botón de ET₀ y ventana de ET₀.

Una vez desplegada la ventana de ET₀ se procede a calcular los datos al seleccionar la opción de “calcular”, al momento aparecen los valores de evapotranspiración de referencia, y después se le da click a la opción de “transferir a gráfica” para que se visualice.

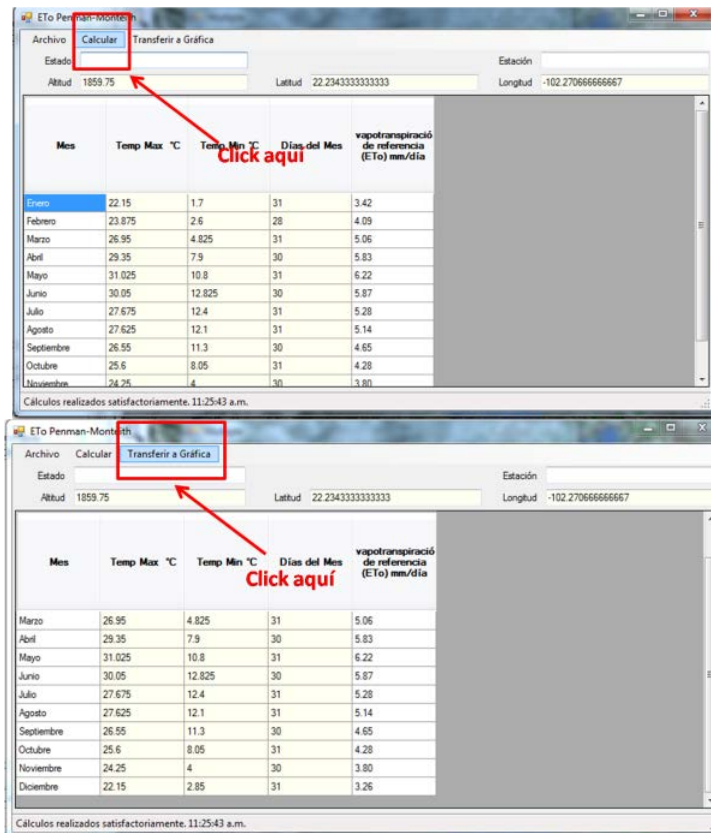


Figura 60. Vistas de la opción calcular y transferir datos de la ventana ET₀.

Una vez que ya se transfirieron los datos a la gráfica se le da click sobre el ícono de gráfica para visualizar los datos de Temperatura Máxima y Mínima.

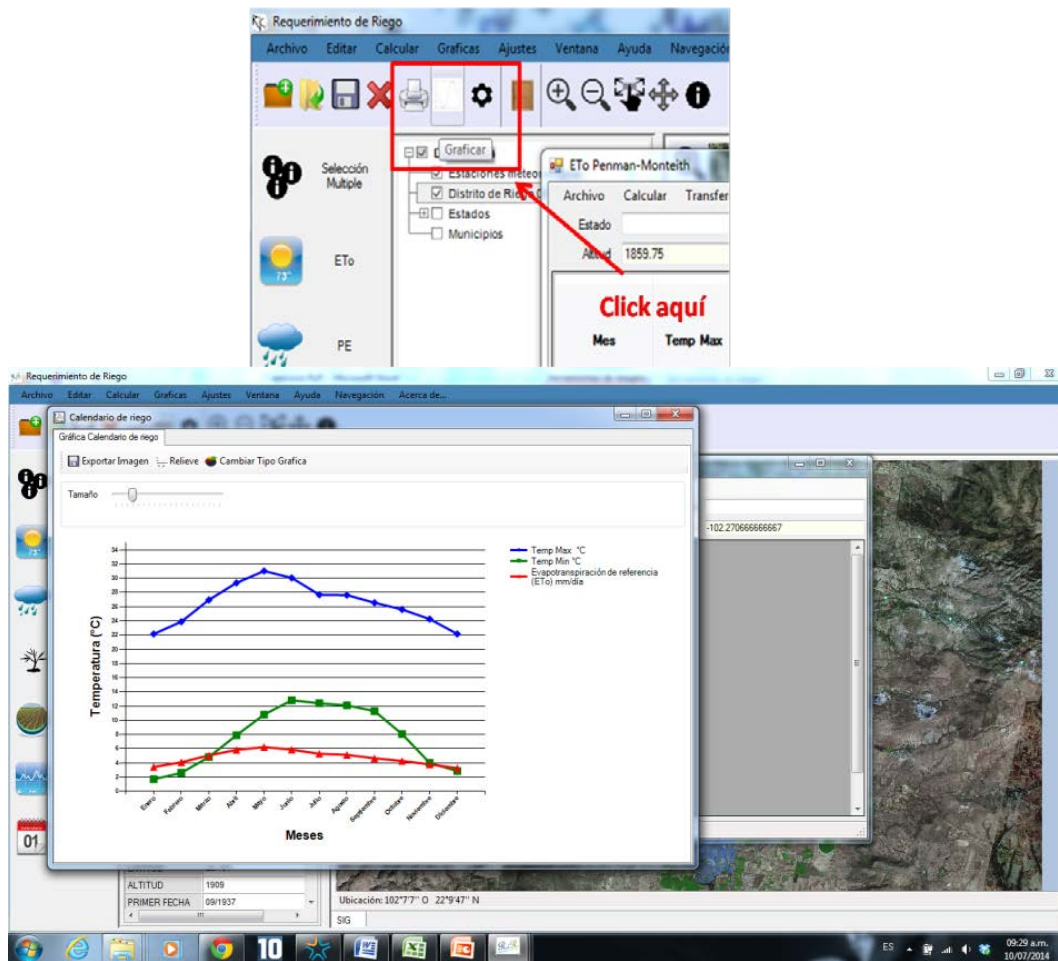


Figura 61. Vistas de la opción graficar y ventana de gráfica de ET₀.

En la ventana de gráfica hay opciones para cambiar el tipo de gráfica, así como para su exportación en formato de imagen.

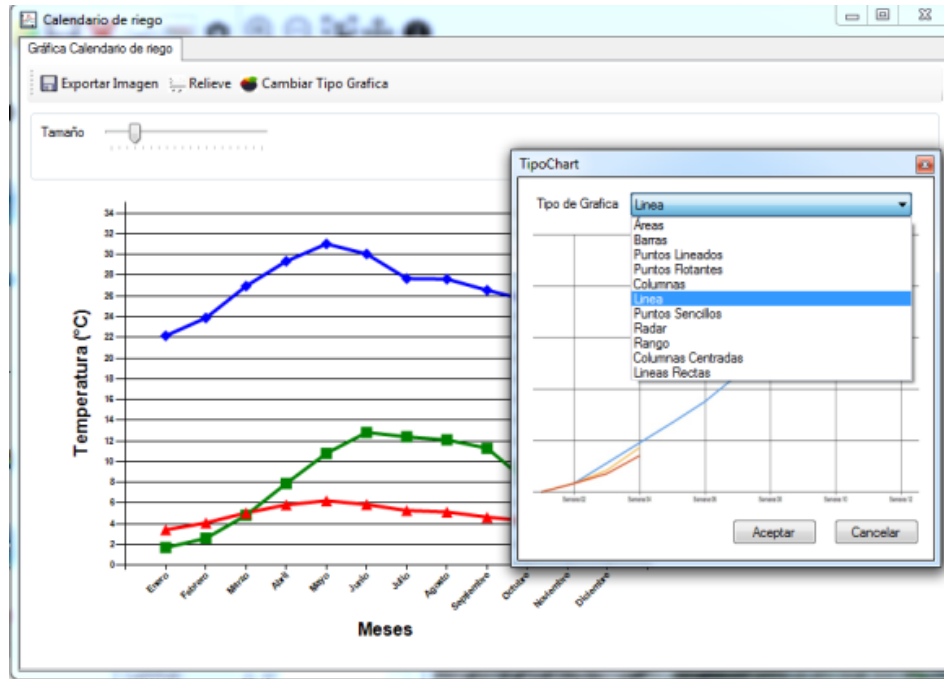


Figura 62. Vistas de cambiar grafico de la ventana de gráfica de ET₀.

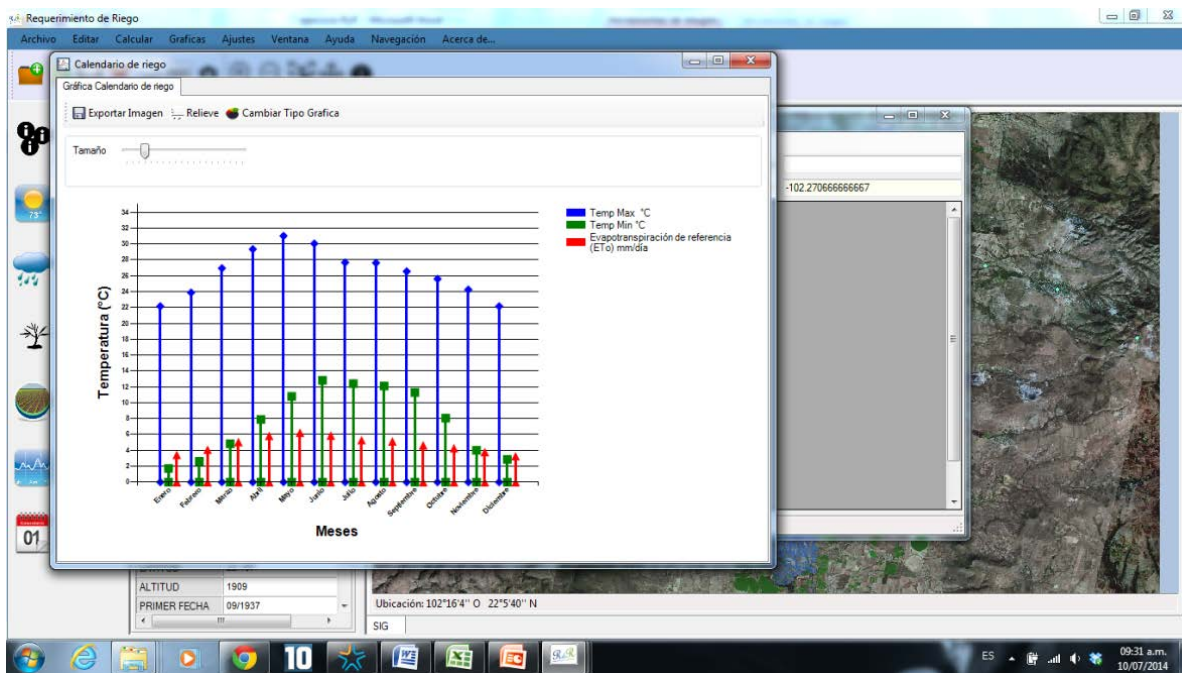


Figura 63. Vista de Gráfica con cambio de tipo de gráfico.

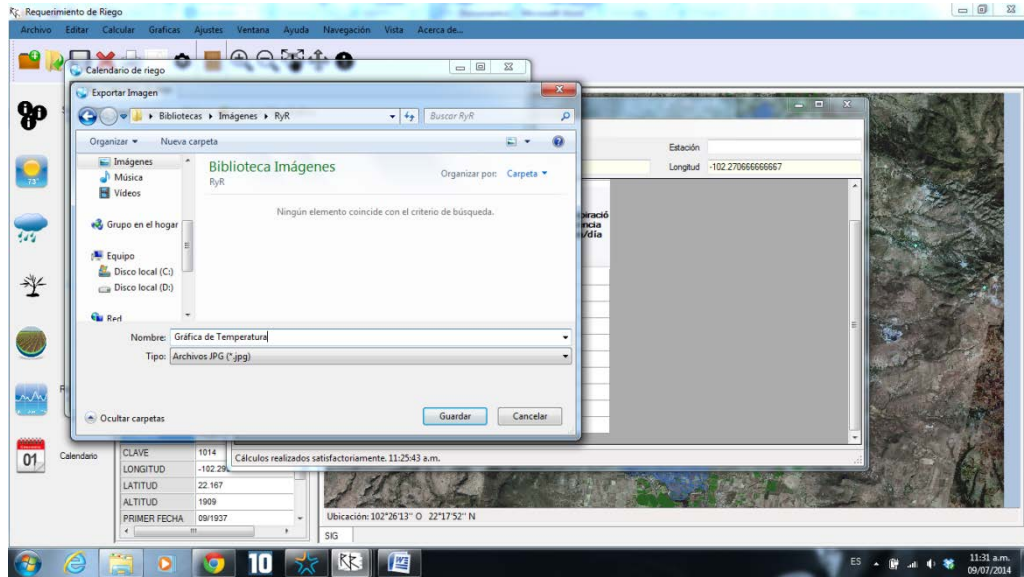


Figura 64. Vista de ventana para exportar Gráfica a imagen.

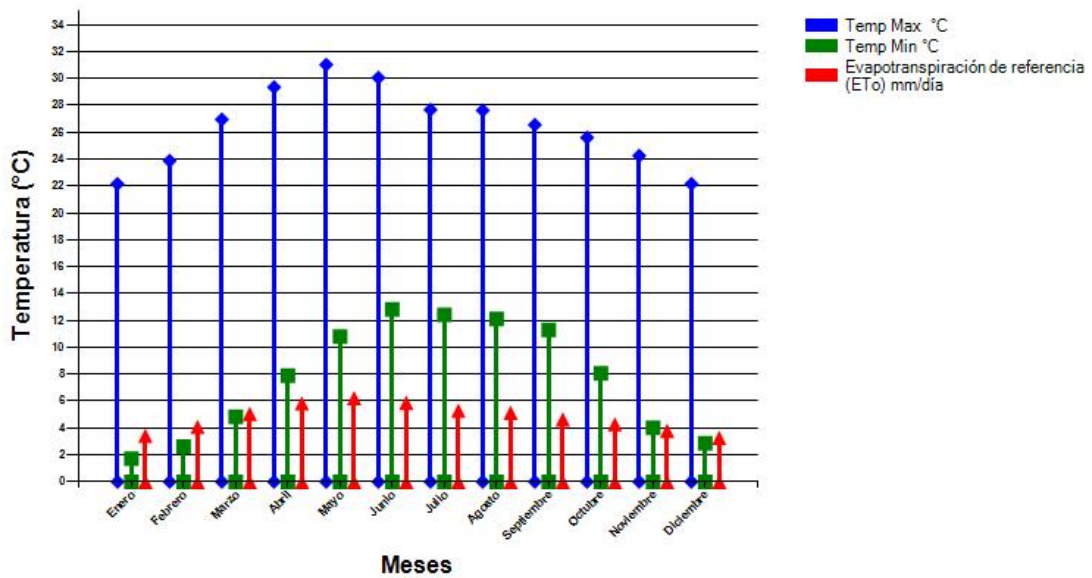


Figura 65. Gráfica exportada como imagen.

Paso 3.

Datos de precipitación (PE).

Se procede a seleccionar el ícono de precipitación (PE), que despliega la ventana con los datos de precipitación como se indica en la Figura 66.

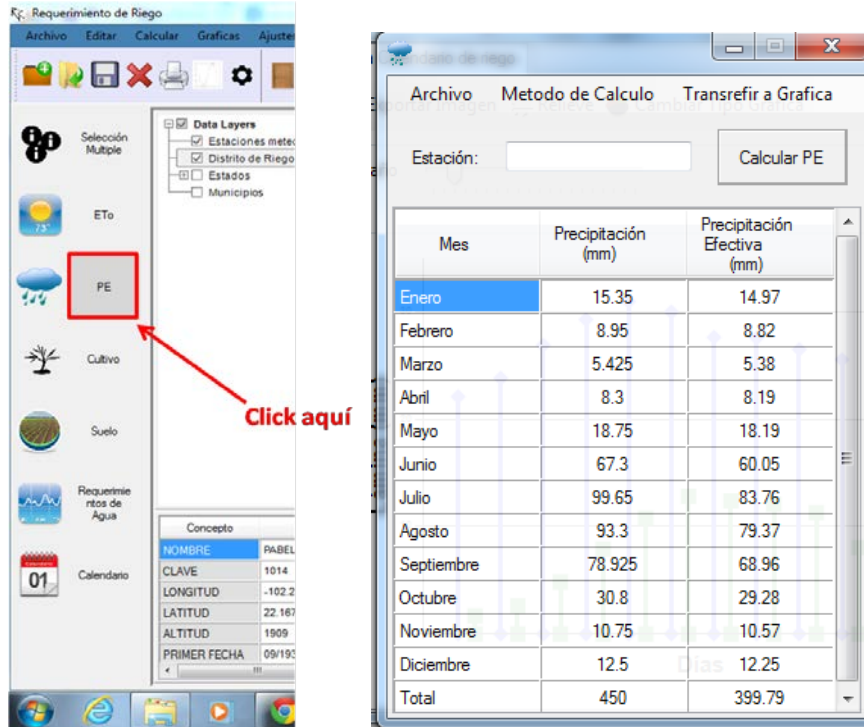


Figura 66. Vista de botón de Precipitación (PE) y ventana de PE.

Después se selecciona el método de cálculo de la precipitación efectiva, para el ejemplo se utiliza el método de la USDA, se le da click en el boton de “Calcular PE” y después al de “trasferir a gráfica” para que se visualice los resultados en forma gráfica.

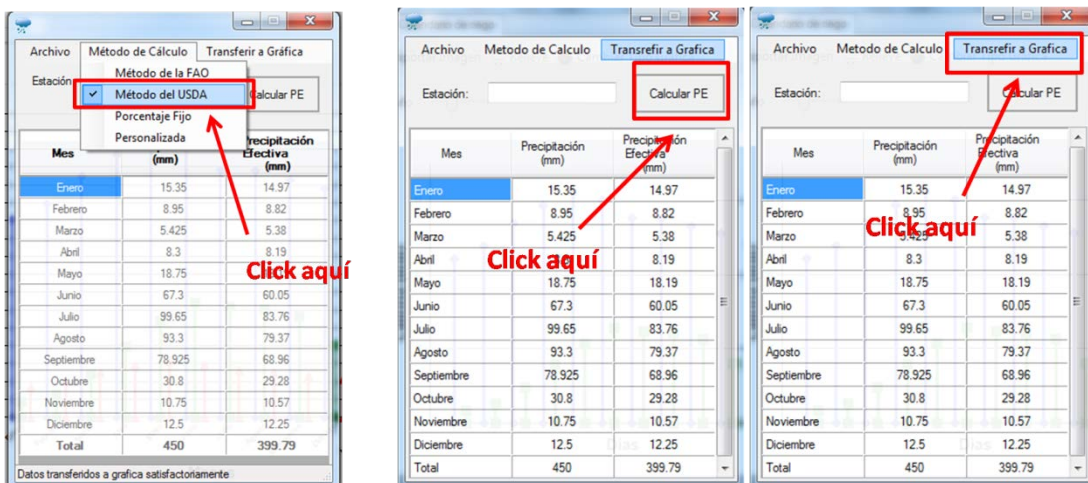


Figura 67. Vistas de método de cálculo, cálculo de PE y transferencia de datos a gráfica de la ventana de PE.

Una vez que se hizo la transferencia de datos, se presenta la gráfica de precipitación, misma que se puede exportar.

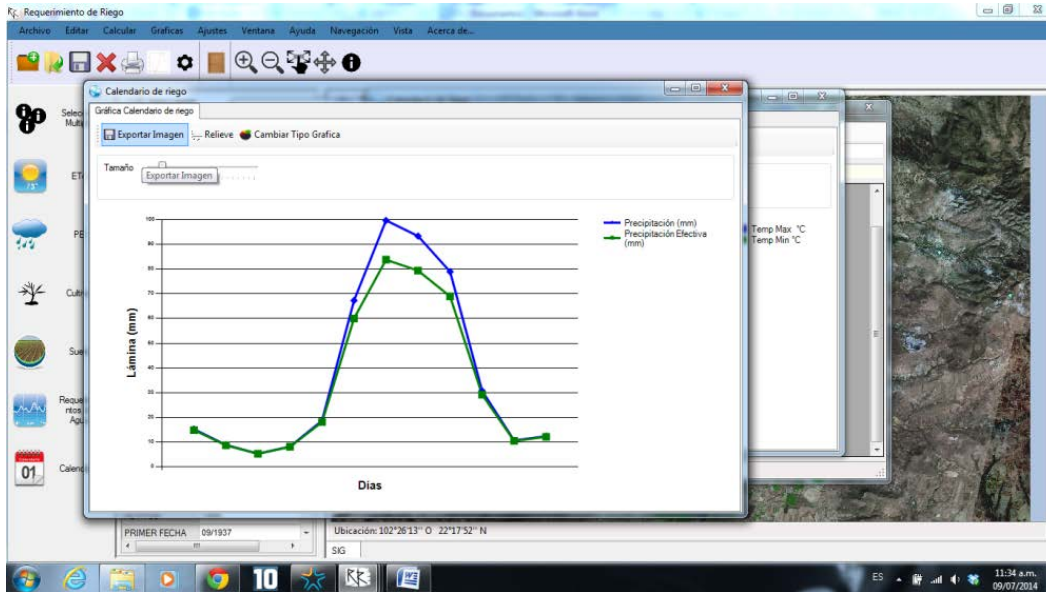


Figura 68. Representación de grafica de precipitación efectiva (PE).

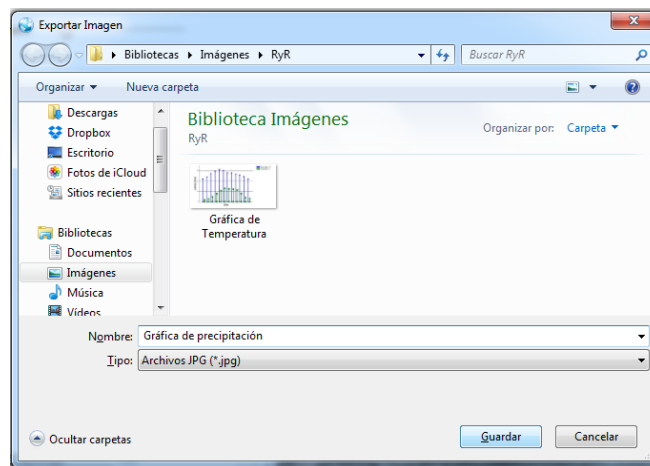


Figura 69. Cuadro de diálogo para exportar Gráfica en formato de imagen.

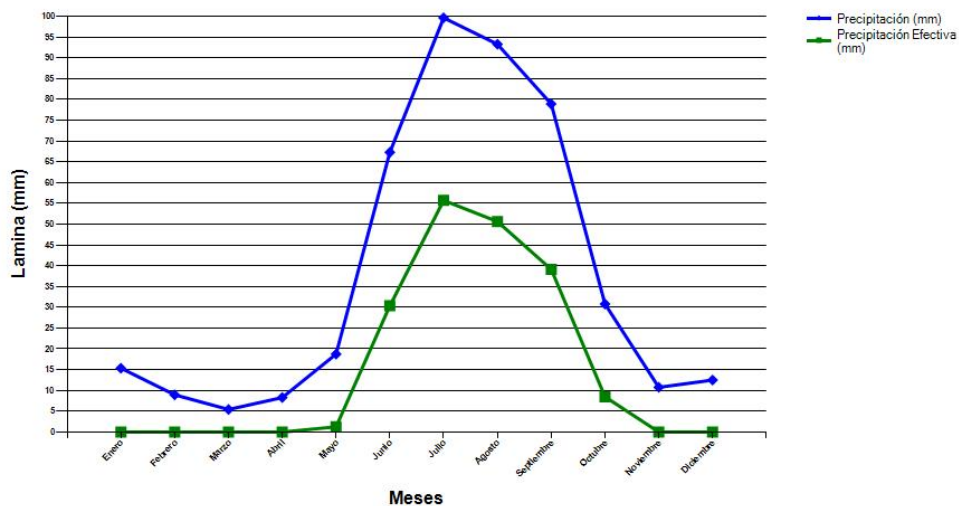


Figura 70. Vista de grafica exportada a imagen.

Paso 4.

Datos de cultivo.

El siguiente paso consiste es seleccionar el ícono de “cultivo” para desplegar la ventana de trabajo de cultivo.

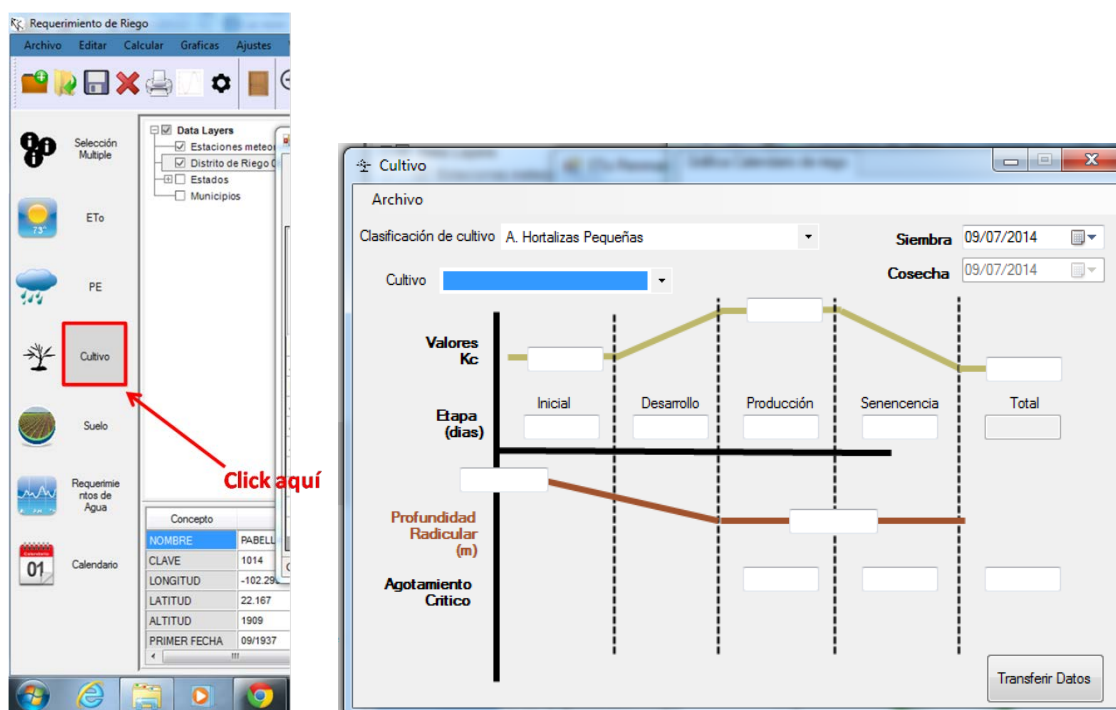


Figura 71. Vista de botón de cultivo y ventana de cultivo.

A continuación se procede a seleccionar la “clasificación del cultivo”, para nuestro caso es el de cereales, el siguiente paso es elegir el cultivo que para este ejemplo es el del maíz que se produce en el Distrito de Riego 001 Pabellón, Aguascalientes.

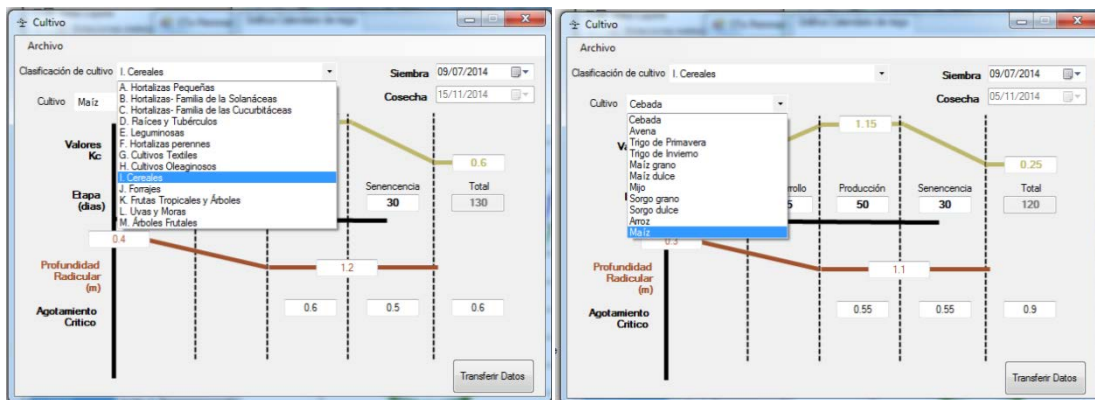


Figura 72. Vista de clasificación de cultivo y cultivo.

A continuación se definen: la fecha de siembra, la duración de las etapas fenológicas (en días), los valores de Kc, profundidad radicular (en m) y el agotamiento crítico por etapa, como se muestra en la figura siguiente. Que para el caso del ejercicio es el 15 de Junio.

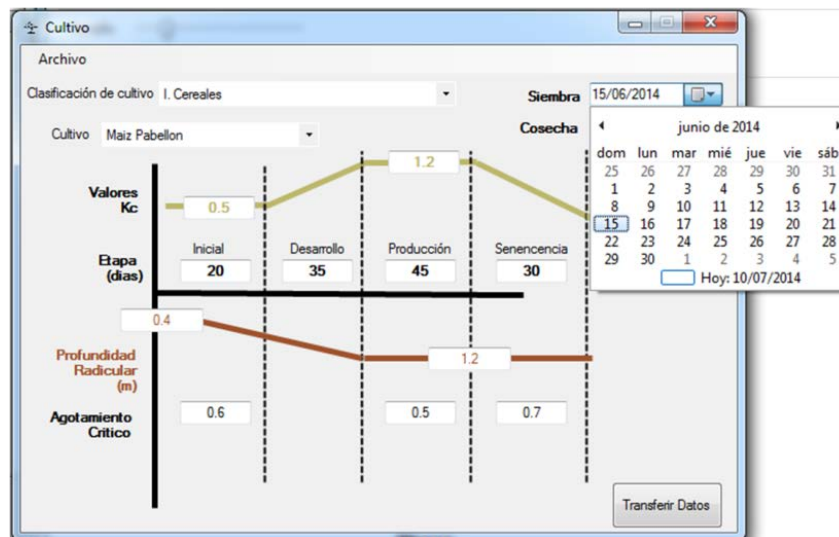


Figura 73. Vista de entrada de fecha de siembra.

Una vez hecho esto, se selecciona “transferir datos” para continuar con el siguiente paso.



Figura 74. Vista de transferencia de datos de la ventana de cultivo.

Paso 5.

Datos de suelo.

Una vez cargados los datos del cultivo a utilizar, se procede a cargar los datos de suelo, que para el caso del ejemplo es un Serie Rincón con los datos de $CC = 0.17 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, $PMP = 0.09 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ y $DA = 1.59 \text{ g}/\text{cm}^3$.

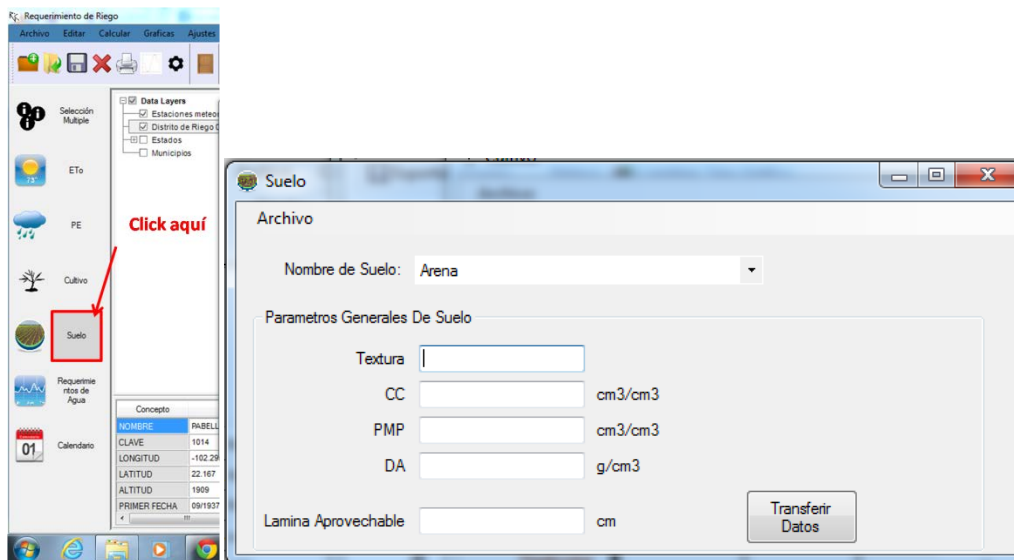


Figura 75. Vista de botón de suelo y ventana de suelo.

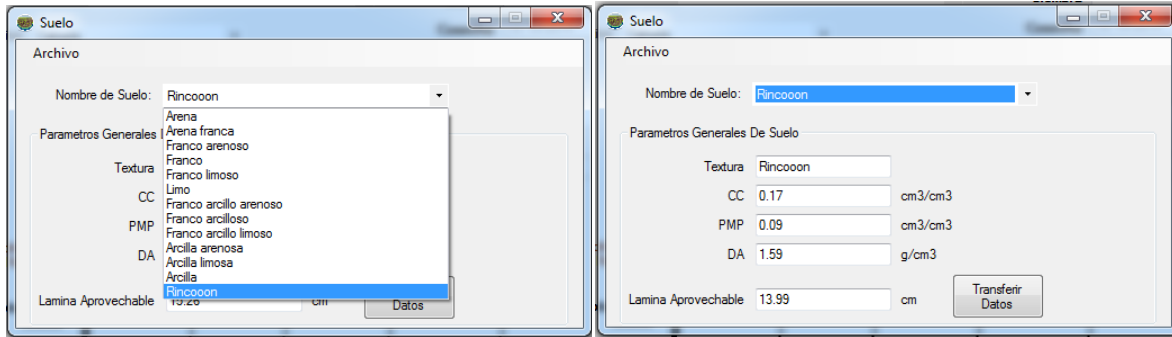


Figura 76. Vista de selección de tipo de suelo.

Una vez que se recuperó y definió la información del tipo de suelo, se procede a transferir los datos para que el programa proceda con los cálculos y tome en cuenta los datos que se le han especificado.

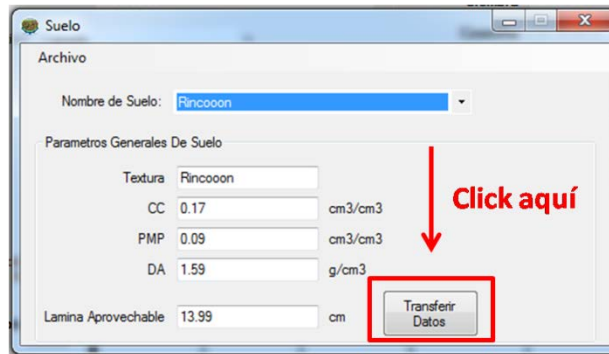


Figura 77. Vista de transferencia de datos.

Paso 6.

Requerimientos de agua

A continuación se procede a hacer el cálculo de los requerimientos de agua al seleccionar el ícono que lleva el mismo nombre.

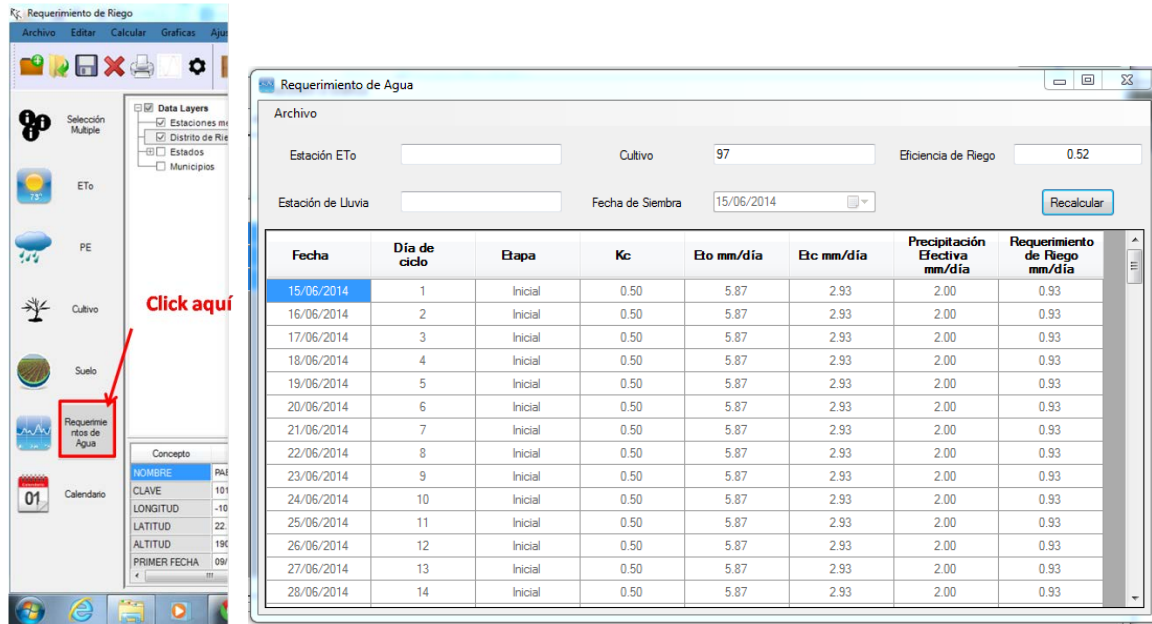


Figura 78. Vista de botón y ventana de requerimientos de agua.

Una vez desplegada la ventana de “Requerimientos de Agua” se procede a indicar la eficiencia de aplicación (dato conocido), al seleccionar el ícono del engrane (opciones) y se indica la eficiencia del sistema, así como el tiempo de riego.

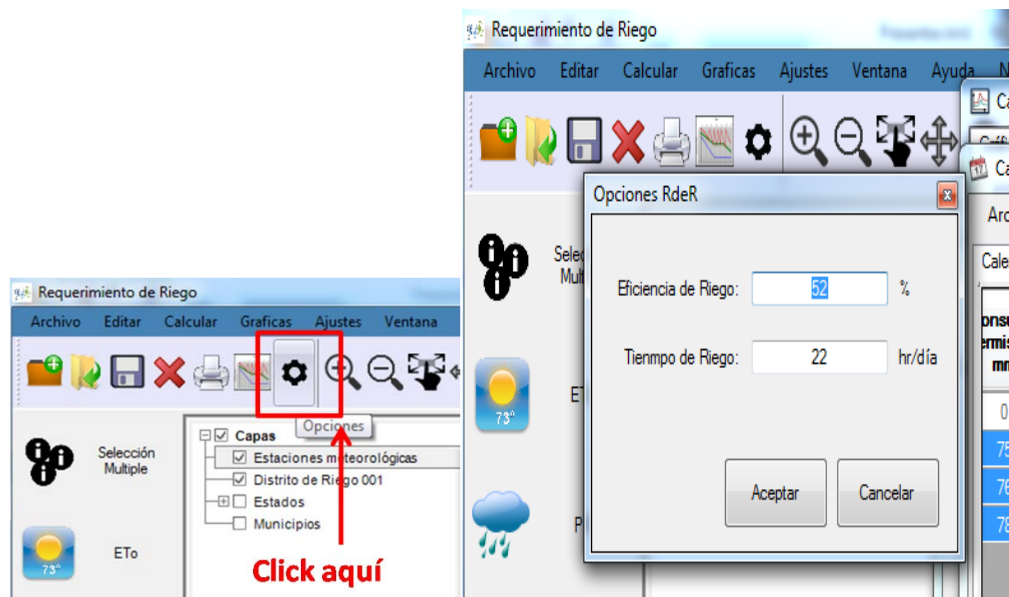


Figura 79. Vistas de botón de opciones y cambio en la eficiencia de riego.

Una vez capturados los valores de eficiencia y tiempo de riego se selecciona el botón de aceptar y se procede a recalcular el “requerimiento de agua”, como se muestra en la siguiente figura.

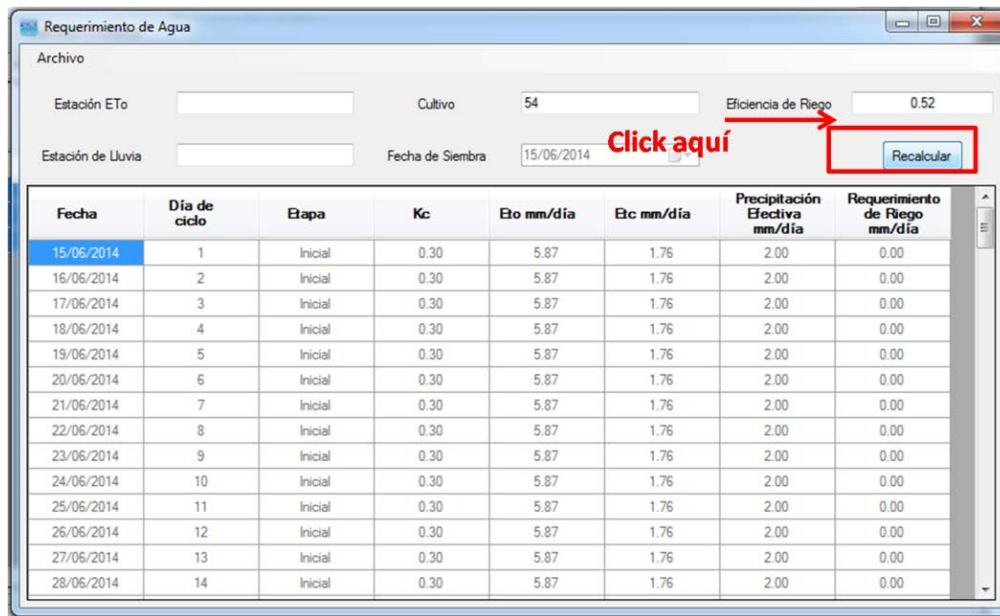


Figura 80. Vista de recalculación en la ventana de requerimientos de agua.

Paso 7.

Calendario de riego.

Una vez que se terminó el proceso de “requerimientos de agua” se procede a determinar el “calendario de riego”, al seleccionar el botón de Calendario (ver Figura 81)

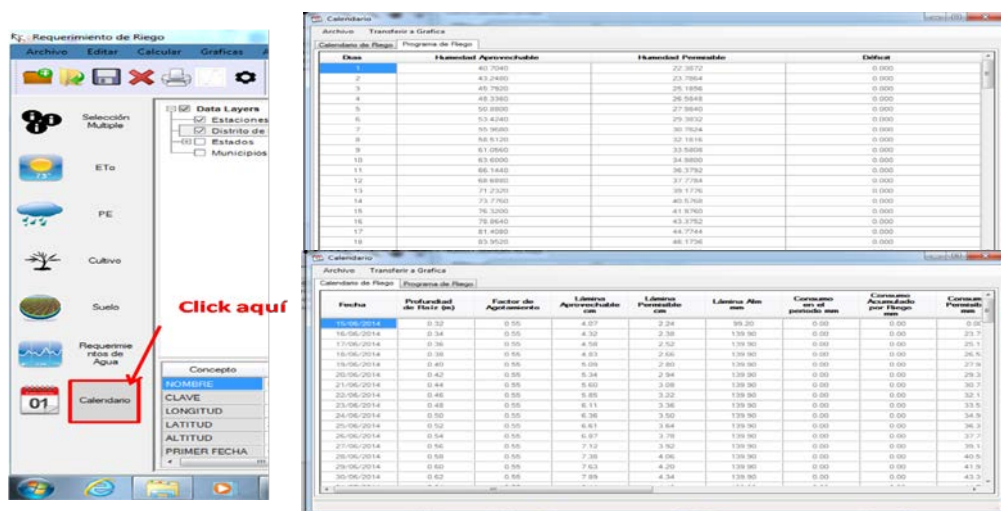


Figura 81. Vistas de botón y ventana de calendario.

En la figura anterior se puede observar que el programa R_dR arroja una ventana con dos pestañas que muestran el “Calendario de Riego” y el “Programa de Riego”. Si seleccionamos “archivo” el programa muestra en resumen los riegos como se muestra a continuación.

	Factor de Agotamiento	Lámina Aprovechable cm	Lámina Permisible cm	Lámina Alm mm	Consumo en el periodo mm	Consumo Acumulado por Riego mm	Consumo Permisible mm
15/06/2014	0.32	0.55	4.07	2.24	99.20	0.00	0.00
16/06/2014	0.34	0.55	4.32	2.38	139.90	0.00	0.00
17/06/2014	0.36	0.55	4.58	2.52	139.90	0.00	0.00
18/06/2014	0.38	0.55	4.83	2.66	139.90	0.00	0.00
19/06/2014	0.40	0.55	5.09	2.80	139.90	0.00	0.00
20/06/2014	0.42	0.55	5.34	2.94	139.90	0.00	0.00
21/06/2014	0.44	0.55	5.60	3.08	139.90	0.00	0.00
22/06/2014	0.46	0.55	5.85	3.22	139.90	0.00	0.00
23/06/2014	0.48	0.55	6.11	3.36	139.90	0.00	0.00
24/06/2014	0.50	0.55	6.36	3.50	139.90	0.00	0.00
25/06/2014	0.52	0.55	6.61	3.64	139.90	0.00	0.00
26/06/2014	0.54	0.55	6.87	3.78	139.90	0.00	0.00
27/06/2014	0.56	0.55	7.12	3.92	139.90	0.00	0.00
28/06/2014	0.58	0.55	7.38	4.06	139.90	0.00	0.00
29/06/2014	0.60	0.55	7.63	4.20	139.90	0.00	0.00
30/06/2014	0.62	0.55	7.89	4.34	139.90	0.00	0.00

Figura 82. Vista de opción “mostrar rangos” en la ventana de calendario.

Fecha	Profundidad de Raíz (m)	Factor de Agotamiento	Lámina Aprovechable cm	Lámina Permisible cm	Lámina Alm mm	Consumo en el periodo mm	Consumo Acumulado por Riego mm	Consumo Permisible mm
15/06/2014	0.41	0.60	5.27	3.16	99.87	0.00	0.00	0.00
09/08/2014	1.20	0.50	15.26	7.59	77.05	3.61	79.16	75.88
31/08/2014	1.20	0.50	15.26	7.63	76.88	3.61	79.33	76.32
24/09/2014	1.20	0.51	15.26	7.94	76.86	3.19	78.92	78.36

Figura 83. Vista del calendario de riego en la ventana calendario.

En las figuras anteriores se pueden exportar las tablas a Excel, en formato “*.csv”, como se muestra en las siguientes figuras.

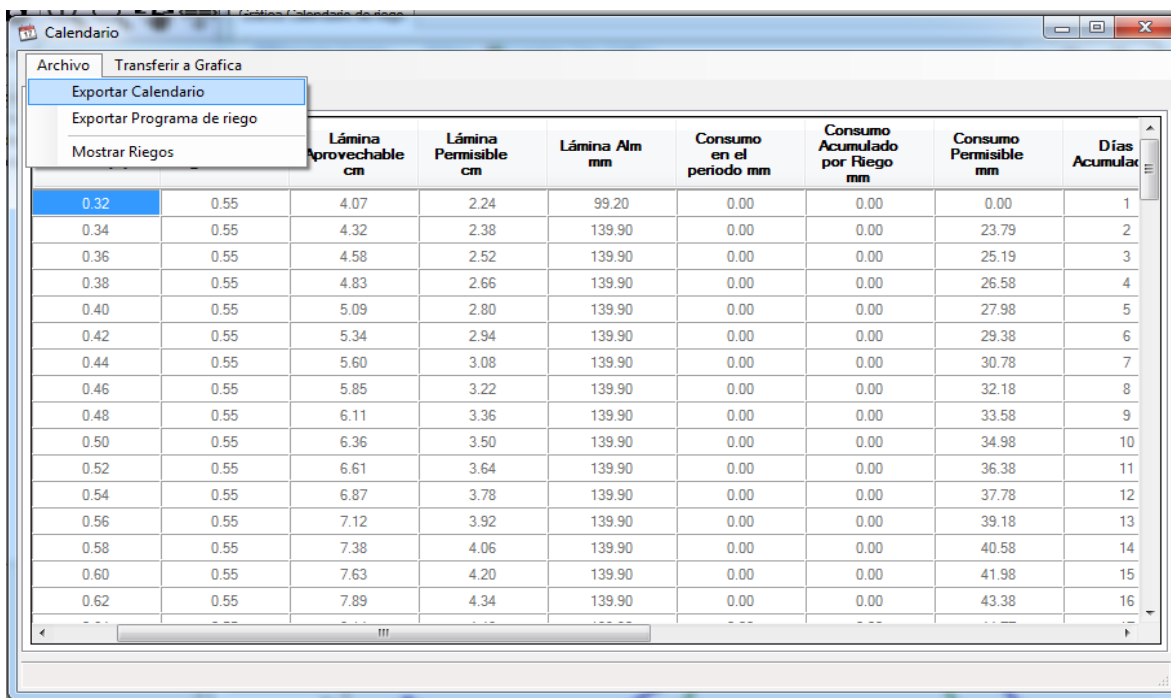


Figura 84. Vista de la opción “exportar calendario” de la ventana de calendario.

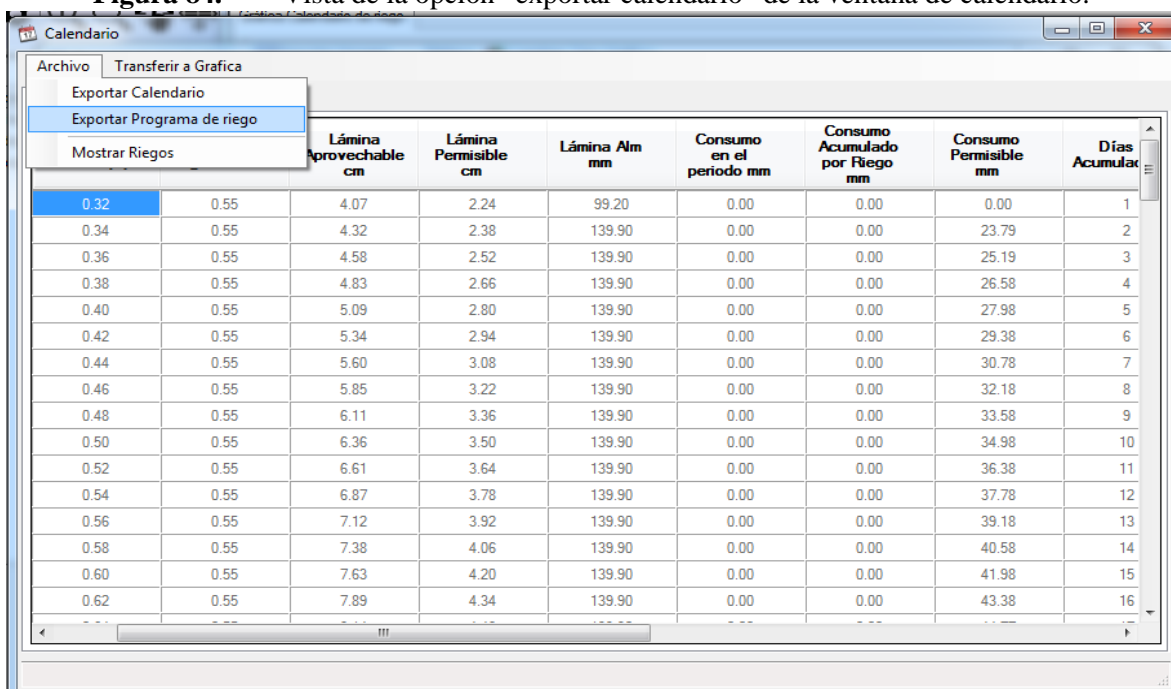


Figura 85. Vista de la opción “exportar programa de riego” de la ventana de calendario.

También se pueden transferir los resultados para obtener una gráfica con los datos obtenidos.

Dias	Humedad Aprovechable	Humedad Permissible	Déficit
1	40.7040	22.3872	0.000
2	43.2480	23.7864	0.000
3	45.7920	25.1856	0.000
4	48.3360	26.5848	0.000
5	50.8800	27.9840	0.000
6	53.4240	29.3832	0.000
7	55.9680	30.7824	0.000
8	58.5120	32.1816	0.000
9	61.0560	33.5808	0.000
10	63.6000	34.9800	0.000
11	66.1440	36.3792	0.000
12	68.6880	37.7784	0.000
13	71.2320	39.1776	0.000
14	73.7760	40.5768	0.000
15	76.3200	41.9760	0.000
16	78.8640	43.3752	0.000
17	81.4080	44.7744	0.000
18	83.9520	46.1736	0.000
19	86.4960	47.5728	0.000

Figura 86. Vista de la opción transferir datos para ver gráfica.

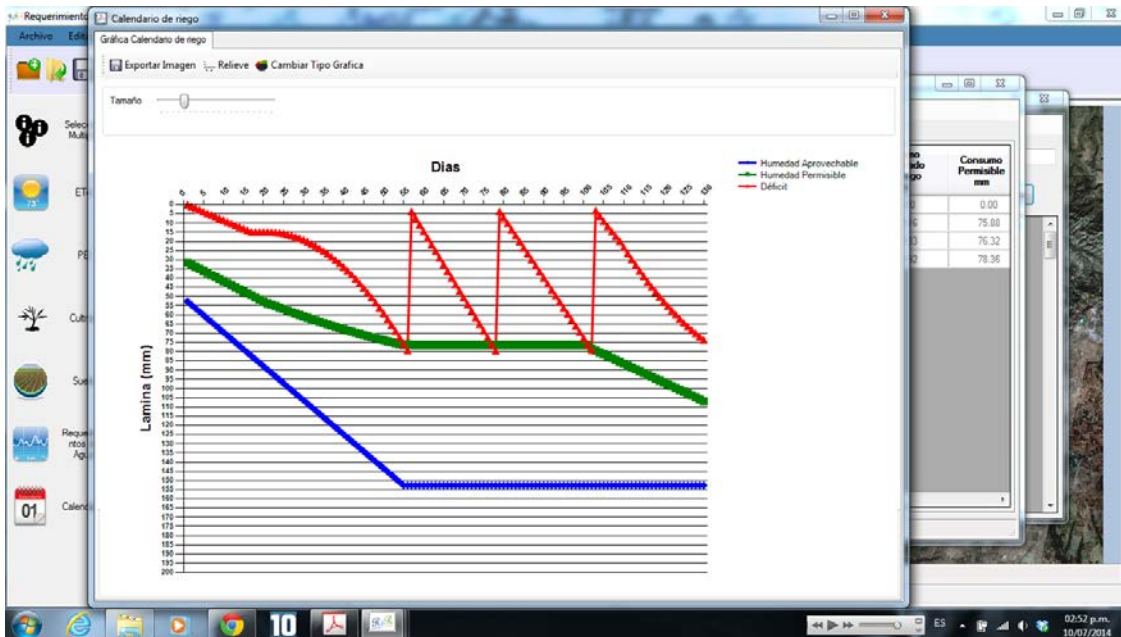


Figura 87. Vista de la ventana de grafica de calendario.

De igual manera que en las gráficas anteriores esta se puede exportar como imagen.

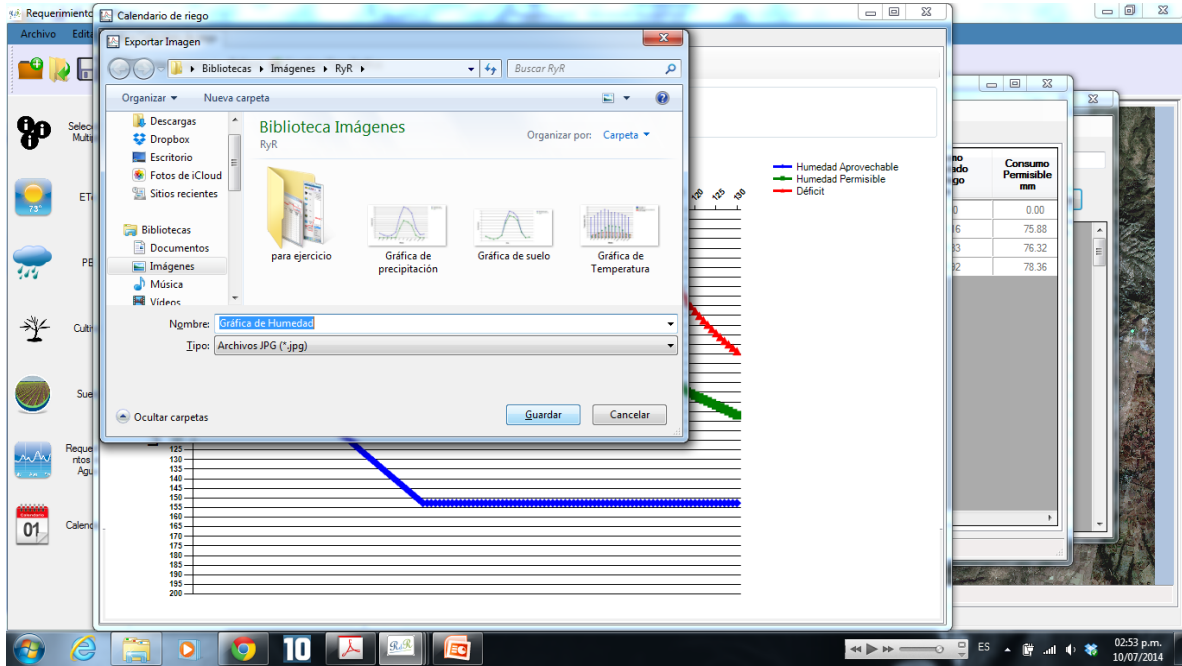


Figura 88. Vista de la opción de exportar gráfica a imagen.

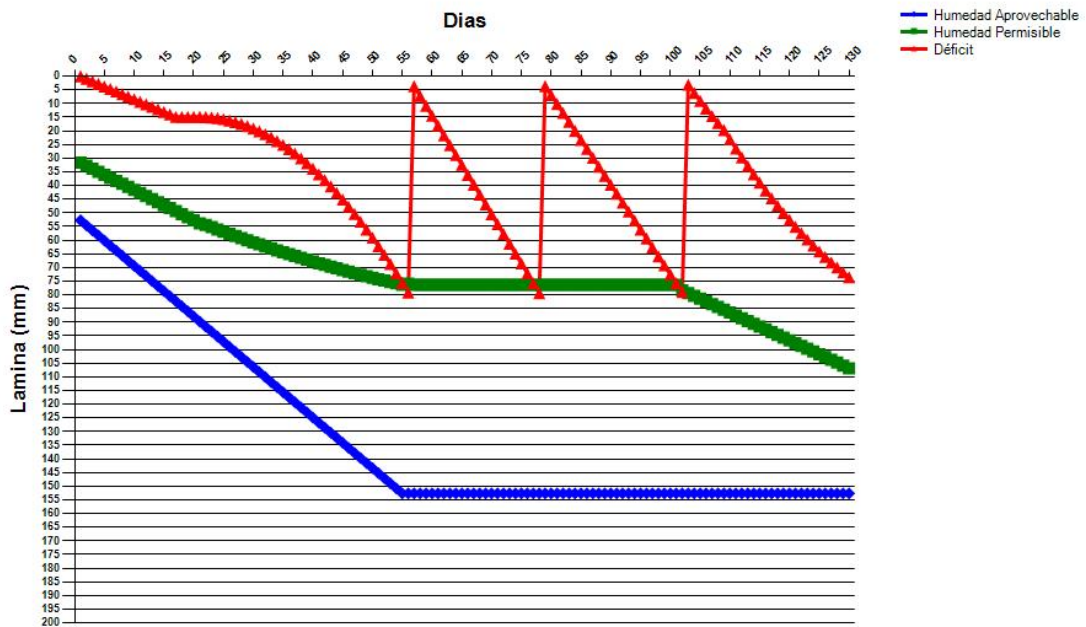


Figura 89. Grafica en formato de imagen.

Cuadro 11. Cuadro de resultados en resumen de los riegos (cantidad y fecha de aplicación).

No. Riego	Fecha	Lámina de riego (mm)	Lámina bruta (mm)	CUR (lps/ha)
1	09/08/2014	79.16	152.23	0.88
2	31/08/2014	79.33	152.55	0.88
3	24/09/2014	78.92	151.76	0.75

Calculo del gasto del sistema de riego

$Q(\text{lps}) = \text{Superficie (ha)} \times \text{CUR (lps/ha)} = 800(\text{ha}) \times 0.88 (\text{lps/ha}) = 704 \text{ lps}$

6.8. Validación de resultados

6.8.1. Cultivo de Maíz

Con el fin de verificar que los resultados obtenidos con el programa “RdR” son confiables, se realizó una comparación de los valores de requerimiento de riego mensual obtenidos con el programa “Requerimiento de Riego” contra los obtenidos con el programa CROPWAT v 8.0, para lo cual se ha seleccionado el cultivo de maíz y avena forrajera, cuya superficie de siembra resulta predominante dentro del Distrito de Riego 001 Pabellón, en el estado de Aguascalientes.

A continuación se presenta la siguiente validación de resultados para el cultivo de maíz:

1.- La información climática para el cálculo de ETo es con base en la estación meteorológica de la CONAGUA del Servicio Meteorológico Nacional y para este caso se tomó la estación ubicada en el Estado de Aguascalientes el Chayote Tepezala, clave 1094 con longitud 102°14'18"236, latitud 22.286, que está a una altitud de 1930 msnm y teniendo un registro de 24 años con datos en un 98.6% de datos completos.

Cuadro 12. Datos de la estación meteorológica el Chayote Tepezala (1904).

MES	TEMPERATURAS MÁXIMAS (°C)	TEMPERATURAS MÍNIMAS (°C)
ENERO	20.9	0.7
FEBRERO	22.6	1.9
MARZO	25.2	3.8
ABRIL	27.1	7.2
MAYO	28.9	9.8
JUNIO	28.6	11.1
JULIO	26.4	10.6
AGOSTO	26.0	10.3
SEPTIEMBRE	25.1	9.5
OCUTBRE	24.5	7.0
NOVIEMBRE	23.5	2.6
DICIEMBRE	21.4	1.6

El resultado del cálculo para ambos programas fue el siguiente:

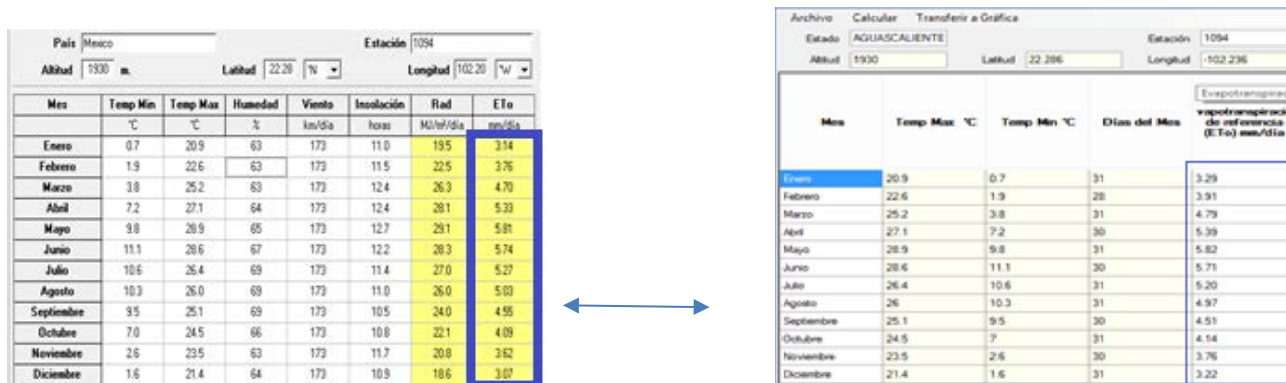


Figura 90. Comparación de cálculo de ETo. en programa CROPWAT 8.0 y RdR, cultivo de maíz

Cuadro 13. Resultados comparativos para la ETo, cultivo de maíz

MES	ETo CROPWAT (mm/día)	ETo RdR (mm/día)
ENERO	3.14	3.29
FEBRERO	3.76	3.91
MARZO	4.70	4.79
ABRIL	5.33	5.39
MAYO	5.81	5.82

MES	ETo CROPWAT (mm/día)	ETo RdR (mm/día)
JUNIO	5.74	5.71
JULIO	5.27	5.20
AGOSTO	5.03	4.97
SEPTIEMBRE	4.55	4.51
OCTUBRE	4.09	4.14
NOVIEMBRE	3.62	3.76
DICIEMBRE	3.07	3.22
TOTAL	54.11	54.71

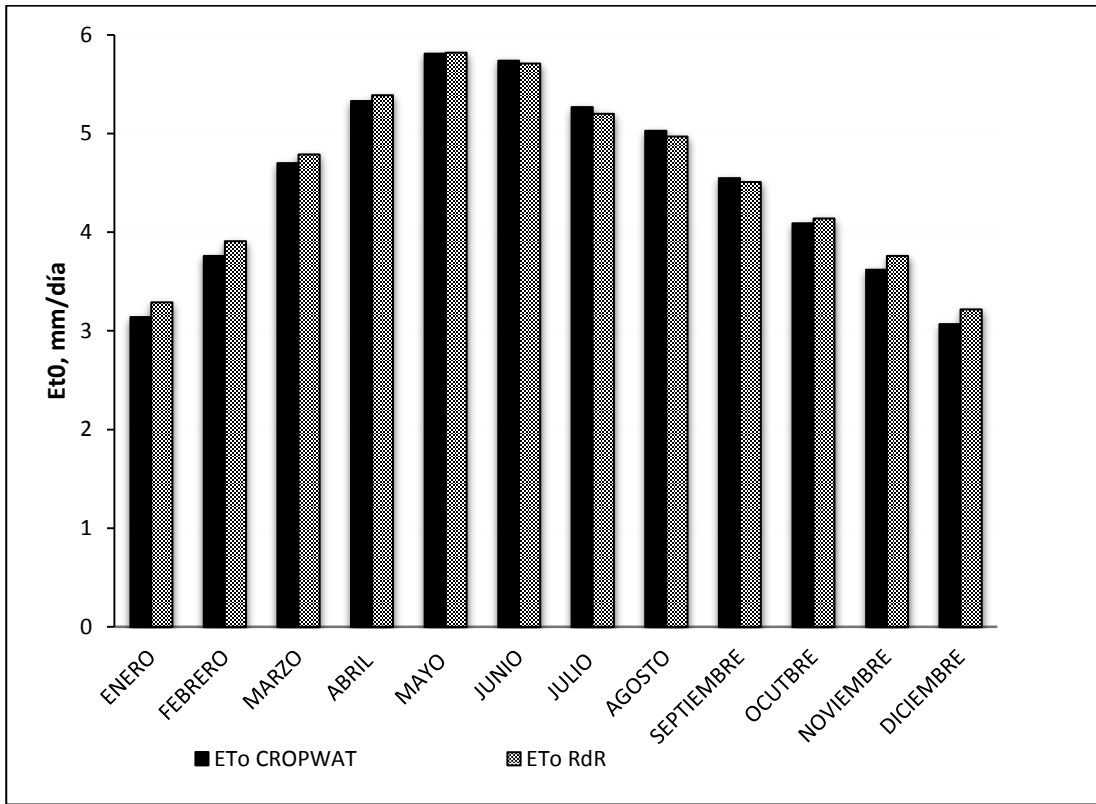


Figura 91. Gráfica comparativa para cálculo del ETo, cultivo de maíz

Para comprobar que hay una relación de linealidad entre los resultados se tiene la siguiente expresión:

$$W = \beta_0 + \beta_1 R$$

Donde

W = Eto de Cropwat, mm/día

$R = Et_0$ de RdR, mm/día

β_0 = Ordenada al origen

β_1 = Variación que se produce en W por cada unidad de incremento en R

La Hipótesis nula es:

$H_0: \beta_1 = 0$

$H_1: \beta_1 \neq 0$

Con un nivel de significancia del 5%, se rechaza H_0 si $F_{\text{calc}} > F_{\alpha, 1, n-2}$

A continuación se muestran los resultados de la regresión lineal y del análisis de varianza

Cuadro 14. Estadísticas de la regresión Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de maíz

Parametro	Valor
Coefficiente de correlación múltiple	0.99822992
Coefficiente de determinación R ²	0.99646297
R ² ajustado	0.99610927
Error típico	0.06018968
Observaciones	12

Cuadro 15. Análisis de varianza Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de maíz

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	10.2062637	10.2062637	2817.232544	1.3644E-13
Residuos	10	0.03622798	0.0036228		
Total	11	10.2424917			

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad	Inferior 95%	Superior 95%
Intercepción	-0.37876143	0.09371503	-4.04162963	0.002355045	-0.58757153	-0.169951339
Et0_RdR	1.07210998	0.02019891	53.0776087	1.36438E-13	1.027104	1.117115966

Cuadro 16. Análisis de los residuales Et0 Cropwat-Et0 RdR cultivo de maíz

Observación	Pronóstico Et0_CRW	Residuos	Residuos estándares
1	3.14848041	-0.00848041	-0.1477717
2	3.8131886	-0.0531886	-0.92681462
3	4.75664539	-0.05664539	-0.98704932
4	5.39991138	-0.06991138	-1.21821001
5	5.86091867	-0.05091867	-0.88726093
6	5.74298657	-0.00298657	-0.05204122
7	5.19621048	0.07378952	1.28578684
8	4.94962519	0.08037481	1.40053603
9	4.45645459	0.09354541	1.6300344
10	4.0597739	0.0302261	0.52669165
11	3.6523721	-0.0323721	-0.56408589
12	3.07343271	-0.00343271	-0.05981524

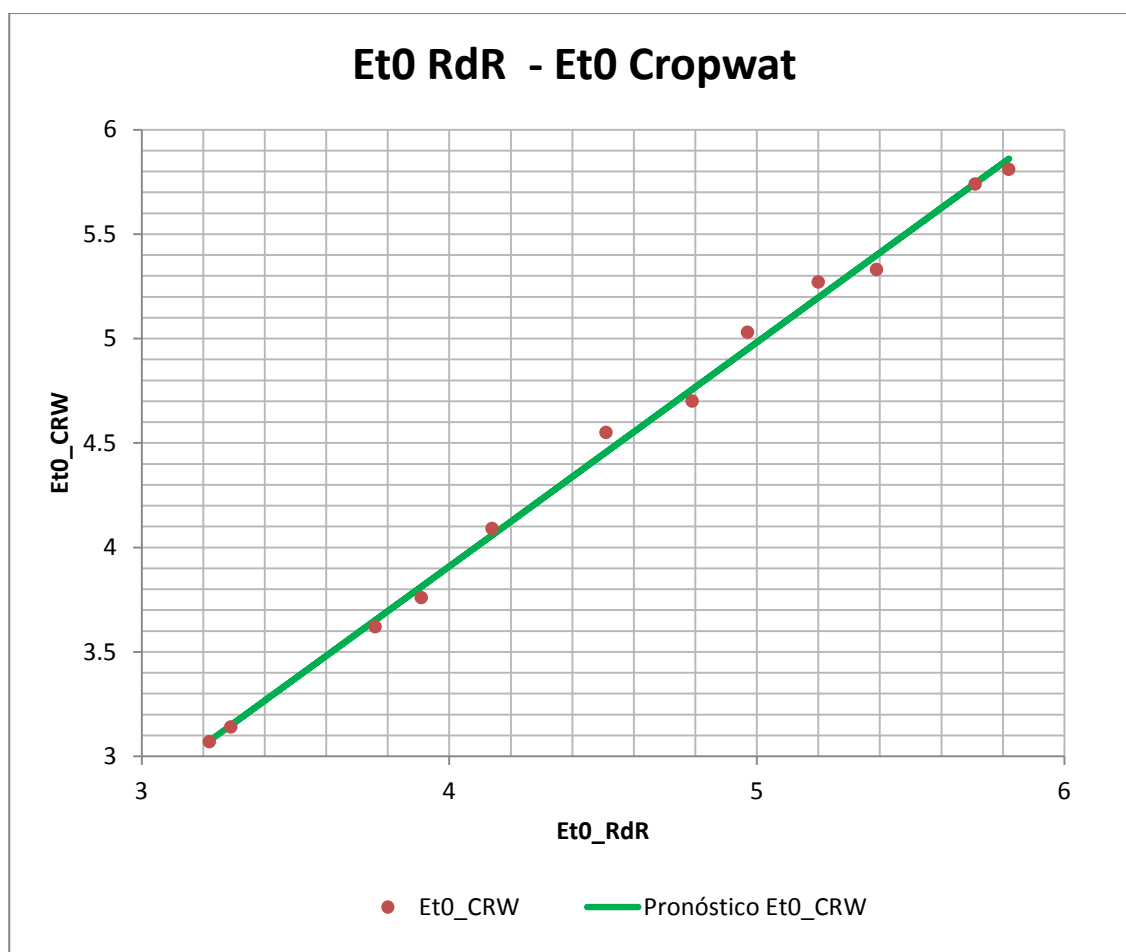


Figura 92. Gráfica Regresión lineal Et0 Cropwat – Et0 RdR, cultivo de maíz

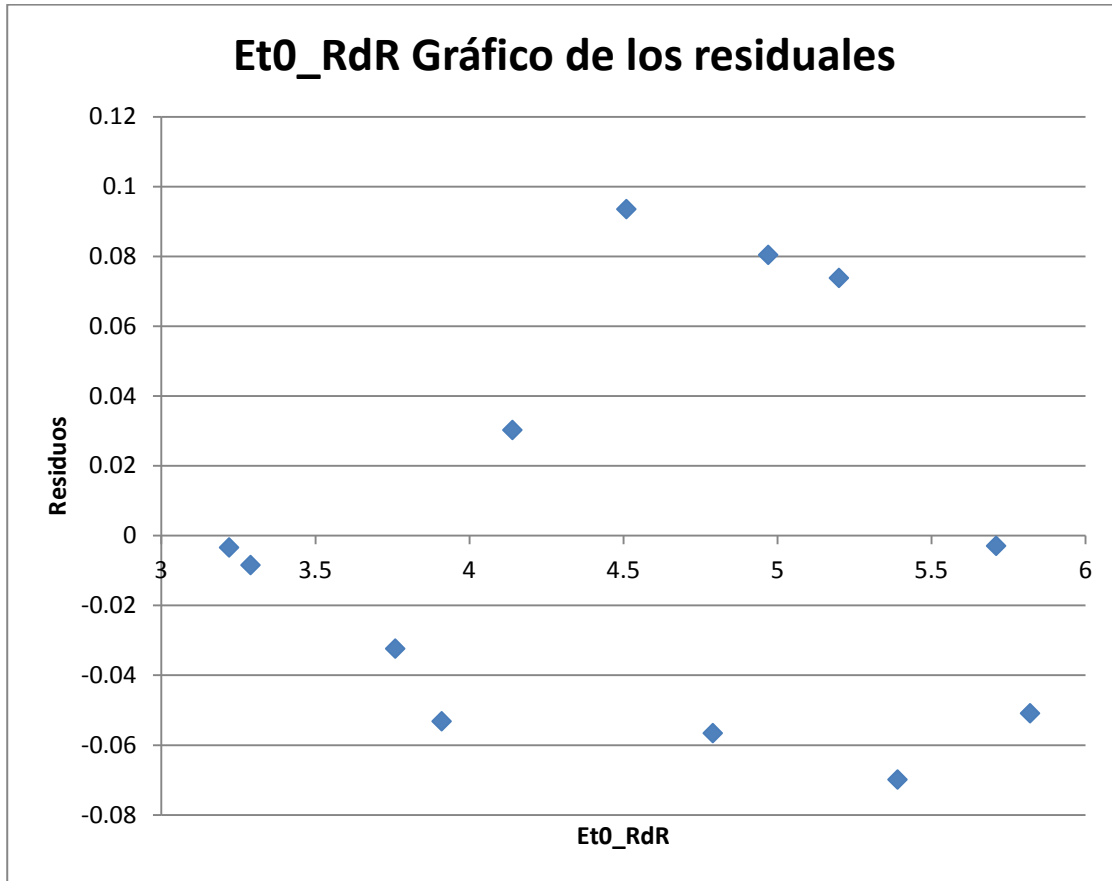


Figura 93. Gráfica Gráfico de los residuales, cultivo de maíz

De acuerdo a los resultados se tiene que $F_{\text{calc}}=2817.23 > F_{\alpha,1,n-2}=4.96$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de no linealidad.

De acuerdo al análisis de varianza presentado se concluye que los datos son iguales. Asimismo para el programa CROPWAT la suma de ETo es de 54.11 en comparación de RdR que es de 54.71 habiendo una diferencia de tan solo 0.60 unidades.

El siguiente paso es el cálculo de la precipitación efectiva, donde se requiere ingresar la estación (en este caso la 1094), el cálculo es automático para la precipitación teniendo que calcular la Precipitación efectiva (PE), los resultados se muestran en la Figura 94 y Cuadro 17.

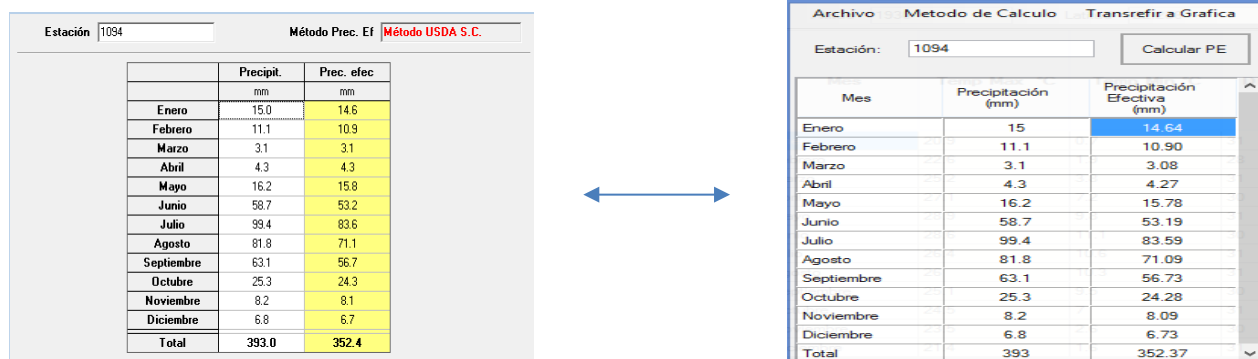


Figura 94. Cálculo de la precipitación efectiva en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz

Cuadro 17. Resultados de precipitación efectiva por programa, cultivo de maíz.

MES	Precipitación efectiva CROPWAT (mm)	Precipitación efectiva RdR (mm)
ENERO	14.6	14.6
FEBRERO	10.9	10.9
MARZO	3.1	3.1
ABRIL	4.3	4.3
MAYO	15.8	15.8
JUNIO	53.2	53.2
JULIO	83.6	83.6
AGOSTO	71.1	71.1
SEPTIEMBRE	56.7	56.7
OCUTBRE	24.3	24.3
NOVIEMBRE	8.1	8.1
DICIEMBRE	6.7	6.7
TOTAL	352.4	352.4

Como se puede ver en el cuadro, los valores de precipitación efectiva en ambos programas son iguales.

En cuanto al cultivo, los datos ingresados a los programas se tomaron del “Plan Director DR001” donde solo se da de alta el cultivo de acuerdo a ciertos parámetros que requieren los programas:

Cuadro 18. Características generales del cultivo del maíz.

Ciclo/Cultivo	Fecha de siembra	Ciclo Vegetativo (días)					KC			Prof. Raíces		Fracc. Agot		
		Inicial	Desarrollo	Mediados	Final	Total	Inicial	Mediado	Final	Ini.	Máx.	Ini	Med	Final
Primavera-verano/Maíz	15-jun	20	35	45	30	130	0.5	1.2	0.6	0.4	1.2	0.6	0.5	0.7

Fuente: Elaboración propia con datos de la Sagarpa.

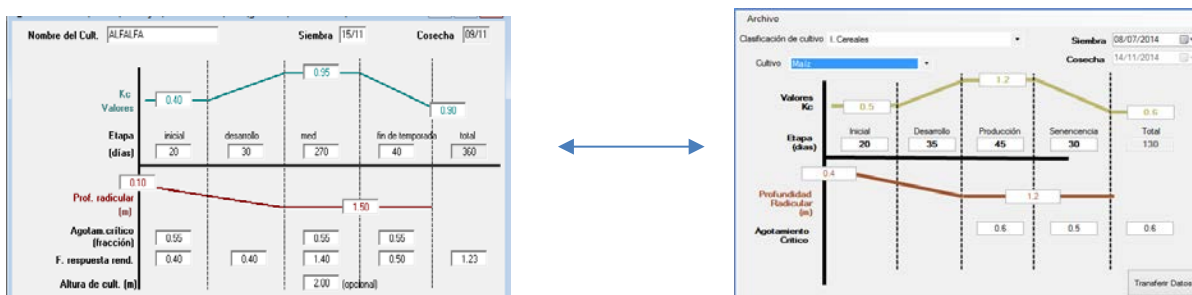


Figura 95. Ingreso de datos del cultivo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz

En lo que refiere al tipo de suelo (Cuadro 19 y Figura 96), se ingresaron los datos prevalcientes en la zona Rincón de Romos, con datos del Plan Director DR001.

Cuadro 19. Características del suelo, cultivo de maíz

Serie	Profundidad cm	Textura	CC (cm ³ /cm ³)	PMP (cm ³ /cm ³)	DA (g/cm ³)
Rincón	135	Ca	17	9	1.56

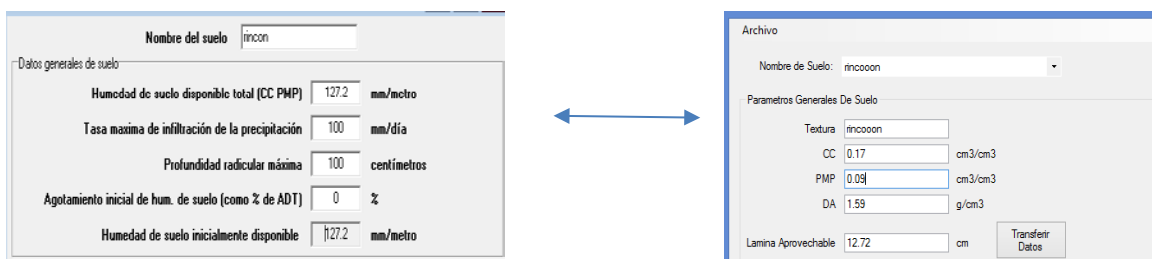


Figura 96. Ingreso de datos del suelo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de maíz.

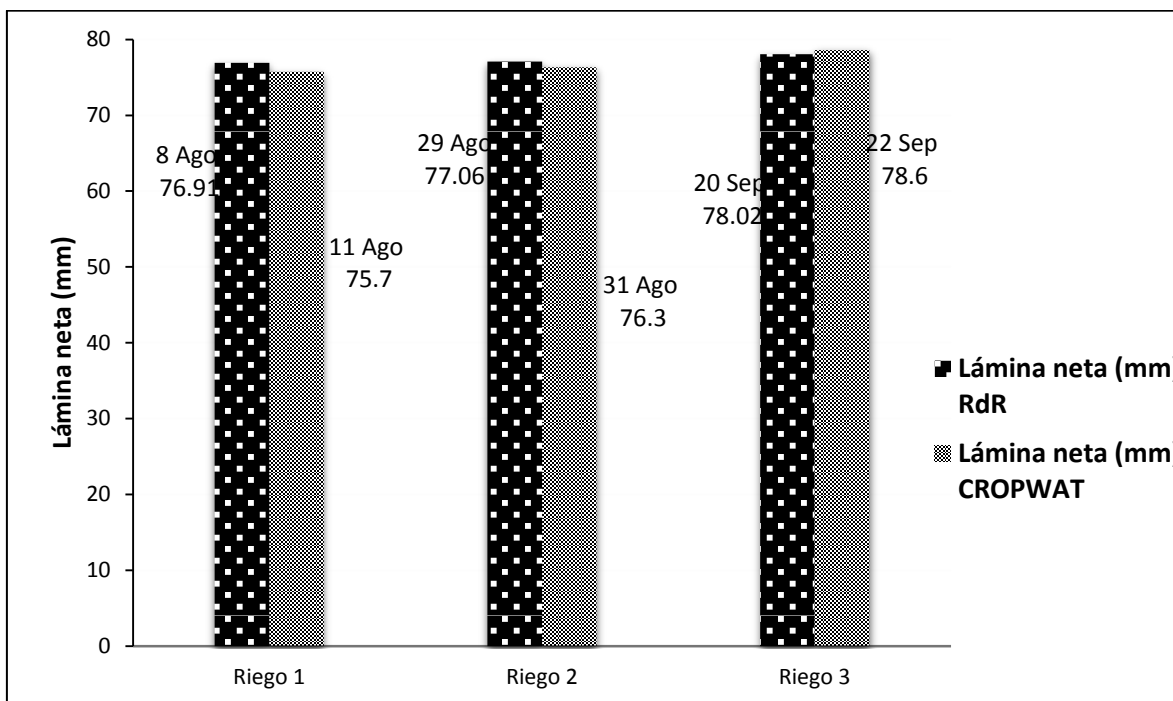


Figura 97. Gráfica comparativa de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de maíz.

Cuadro 20. Cuadro comparativo de resultados en lámina neta para ambos programa, cultivo de maíz.

Riegos	Lámina neta (mm) RdR	Lámina neta (mm) CROPWAT
Riego 1	76.91	75.7
Riego 2	77.06	76.3
Riego 3	78.02	78.6
Total	231.99	230.6

Como se puede observar en la Figura 97 y Cuadro 20, los diferencias no son significativas, por lo que se puede concluir que los valores estimados con el programa RdR, son confiables.

En la Figura 98 y Cuadro 21 se puede observar las diferencias de los resultados arrojados en cada programa, para la ETc, la precipitación efectiva y los requerimientos de riego.

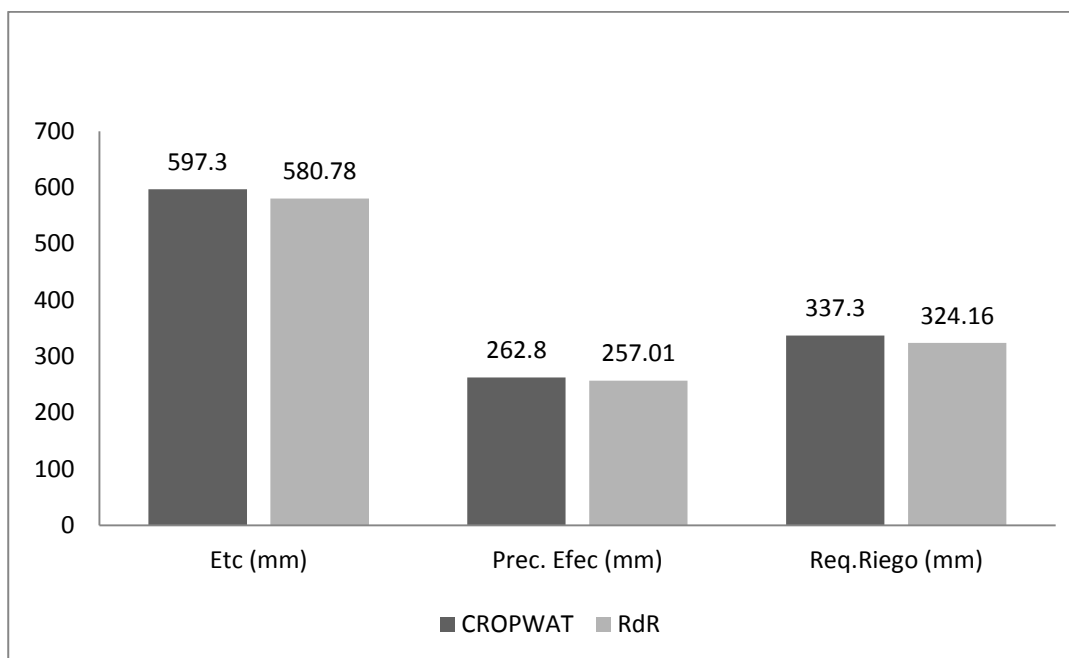


Figura 98. Grafica comparativa de resultados para cada parámetro en cada programa, cultivo de maíz.

Cuadro 21. Cuadro comparativo de requerimiento de riego por programa, cultivo de maíz.

Programa	ETc (mm)	Prec. Efec (mm)	Req. Riego (mm)
CROPWAT	597.30	262.80	337.30
RdR	580.78	257.01	324.16

6.8.2. Cultivo de Avena Forrajera.

Para corroborar con otro ejemplo la validación de resultados se presentan los resultados para una estación climática distinta a la anterior con el cultivo de avena forrajera.

1.- La información climática en el cálculo de ETo es con base en la estación meteorológica de la CONAGUA del Servicio Meteorológico Nacional tomando como referencia la estación “1102” y sus características ya mencionadas anteriormente. Ver Cuadro 12

El resultado para el ETo en ambos programas es el siguiente:

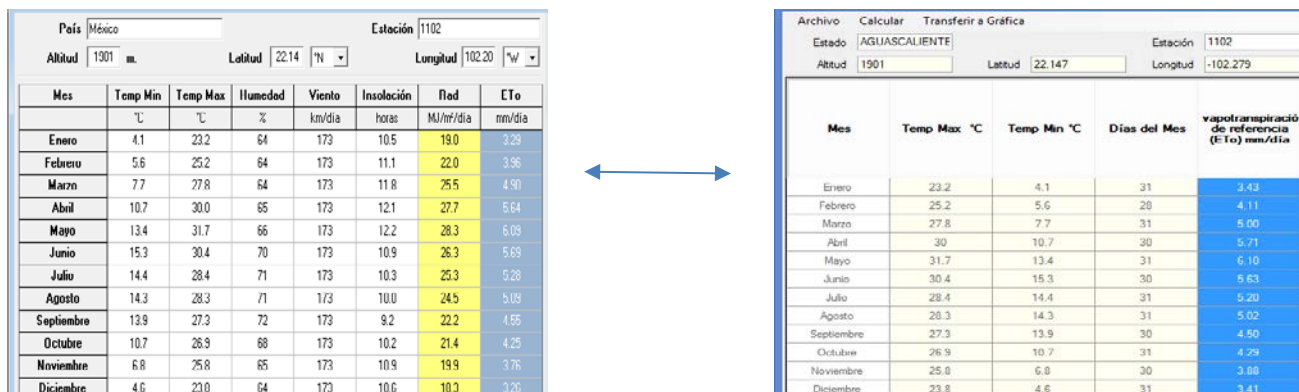


Figura 99. Comparación de cálculo de ETo. en programa CROPWAT 8.0 y RdR, cultivo de avena.

Cuadro 22. Resultados comparativos de ETo, cultivo de avena.

MES	ETo CROPWAT (mm/día)	ETo RdR (mm/día)
ENERO	3.29	3.43
FEBRERO	3.96	4.11
MARZO	4.90	5.00
ABRIL	5.64	5.71
MAYO	6.09	6.10
JUNIO	5.69	5.63
JULIO	5.28	5.20
AGOSTO	5.09	5.02
SEPTIEMBRE	4.55	4.50
OCTUBRE	4.25	4.29
NOVIEMBRE	3.76	3.88
DICIEMBRE	3.26	3.41
TOTAL	55.76	56.28

En el Cuadro 22 se reflejan datos muy similares para ambos programas. Para el programa CROPWAT 8.0 la suma de ETo es de 55.76 en comparación de RdR que es de 56.28.

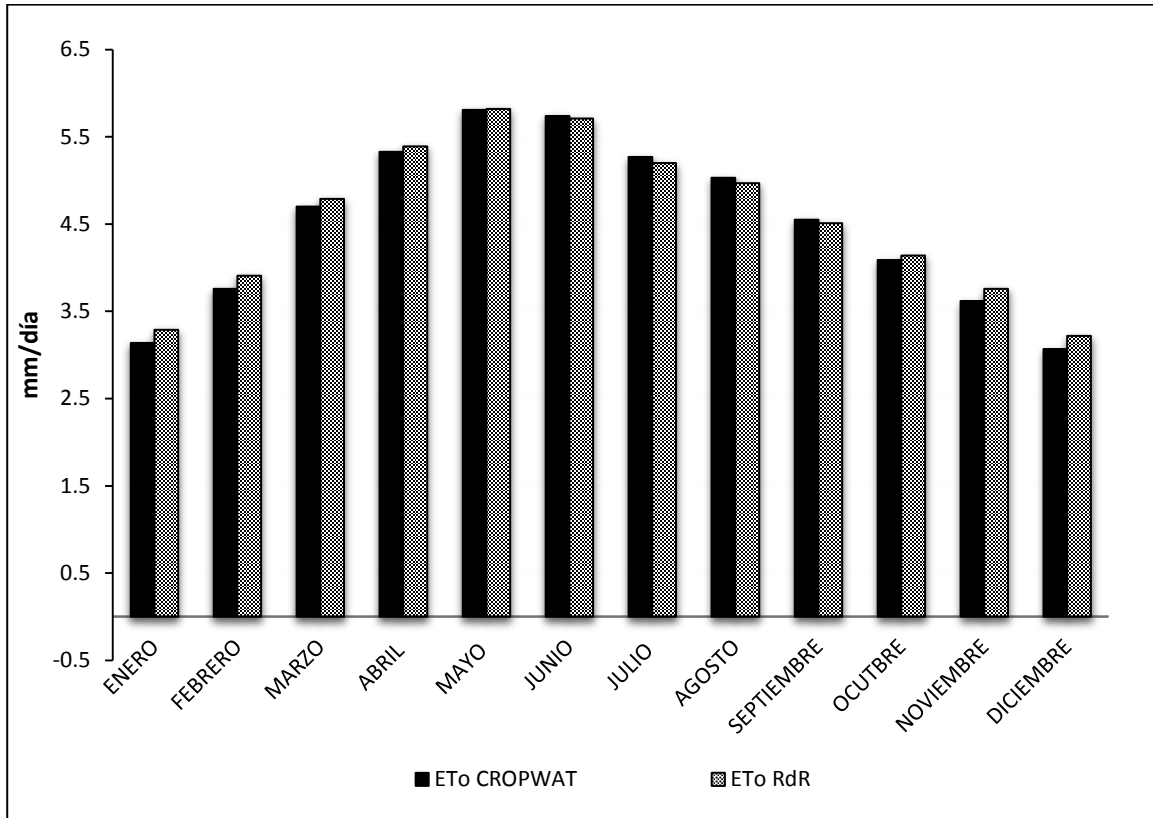


Figura 100. Gráfica comparativa para cálculo del ETo, cultivo de avena.

Para un mejor análisis en la Figura 100 se aprecia perfectamente como ambos programas arrojaron datos muy similares en cada uno de los meses de enero hasta diciembre.

Para comprobar que hay una relación de linealidad entre los resultados se tiene la siguiente expresión:

$$W = \beta_0 + \beta_1 R$$

Donde

$W = E_t0$ de Cropwat, mm/día

$R = E_t0$ de RdR, mm/día

$\beta_0 =$ Ordenada al origen

$\beta_1 =$ Variación que se produce en W por cada unidad de incremento en R

La Hipótesis nula es:

$$H_0: \beta_1 = 0$$

$$H_1: \beta_1 \neq 0$$

Con un nivel de significancia del 5%, se rechaza H_0 si $F_{\text{calc}} > F_{\alpha, 1, n-2}$

A continuación se muestran los resultados de la regresión lineal y del análisis de varianza

Cuadro 23. Estadísticas de la regresión Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.

<i>Parametro</i>	<i>Valor</i>
Coefficiente de correlación múltiple	0.99727715
Coefficiente de determinación R ²	0.99456172
R ² ajustado	0.99401789
Error típico	0.07377444
Observaciones	12

Cuadro 24. Análisis de varianza Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.

	<i>Grados de libertad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	1	9.95363999	9.95363999	1828.816518	1.1733E-12
Residuos	10	0.05442667	0.00544267		
Total	11	10.0080667			

	<i>Coefficientes</i>	<i>Error típico</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95%</i>
Intercepción	-0.34361325	0.11861914	-2.89677747	0.015921242	-0.60791317	-0.079313338
Et0_RdR	1.06402557	0.02488095	42.7646644	1.17326E-12	1.00858735	1.119463786

Cuadro 25. Análisis de los residuales Et0 Cropwat-Et0 RdR, cultivo de avena.

<i>Observación</i>	<i>Pronóstico Et0_CRW</i>	<i>Residuos</i>	<i>Residuos estándares</i>
1	3.30599445	-0.01599445	-0.22738391
2	4.02953184	-0.06953184	-0.98849425
3	4.97651459	-0.07651459	-1.08776409
4	5.73197275	-0.09197275	-1.30752381
5	6.14694272	-0.05694272	-0.80952199
6	5.6468507	0.0431493	0.61342883
7	5.18931971	0.09068029	1.28914973
8	4.9977951	0.0922049	1.31082413
9	4.44450181	0.10549819	1.49980729
10	4.22105644	0.02894356	0.41147401
11	3.78480596	-0.02480596	-0.35265205
12	3.28471394	-0.02471394	-0.35134388

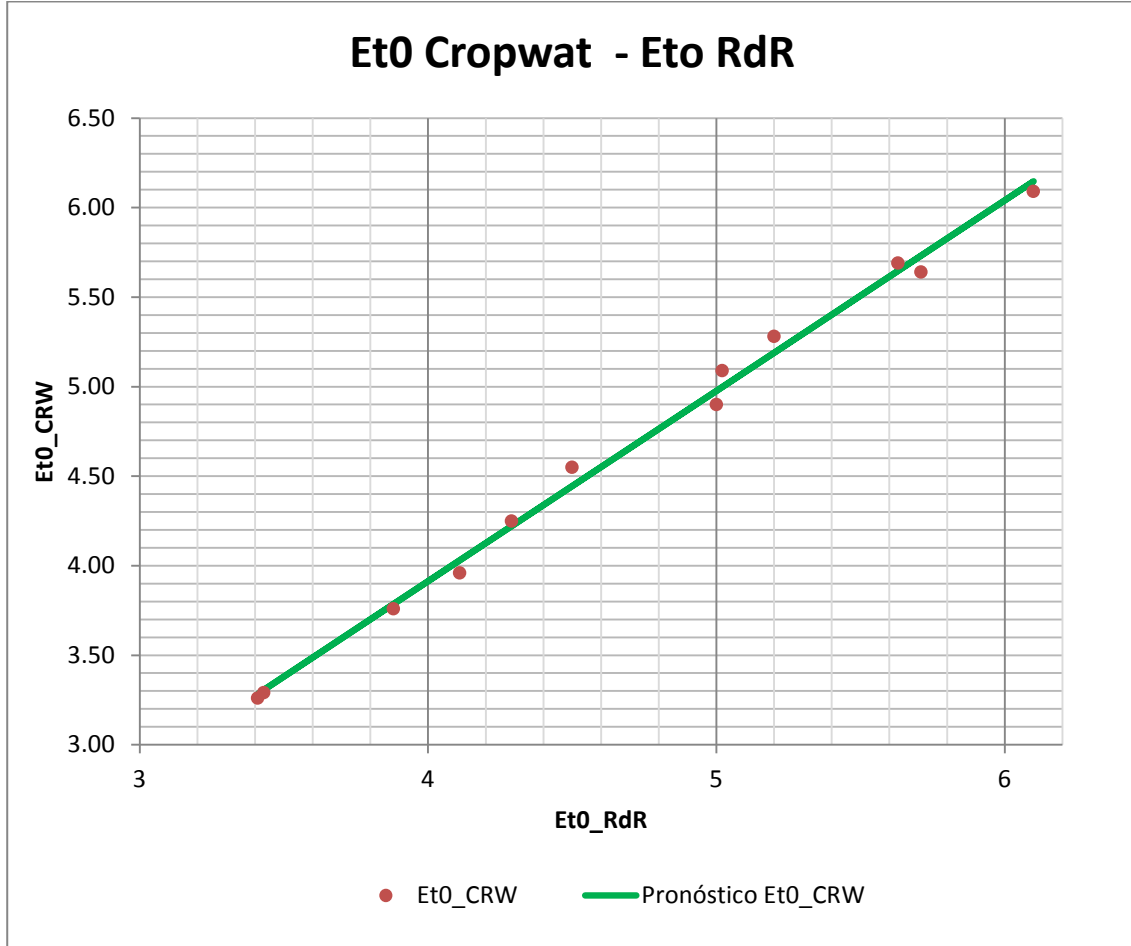


Figura 101. Gráfica Regresión lineal Et0 Cropwat – Et0 RdR, cultivo de avena.

De acuerdo a los resultados se tiene que $F_{\text{calc}}=1828.82 > F_{\alpha,1,n-2}=4.96$, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de no linealidad.

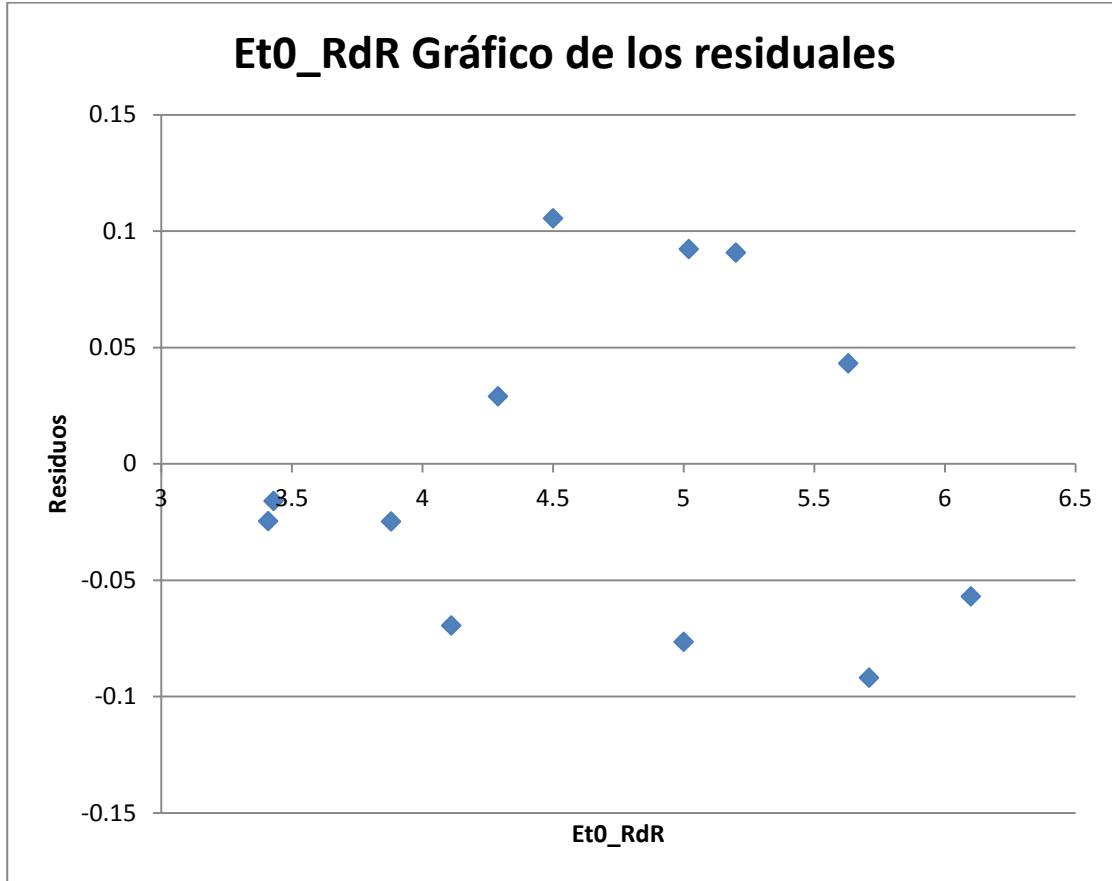


Figura 102. Gráfica de los residuales, cultivo de avena

Dando paso al siguiente cálculo de la precipitación efectiva, donde aquí se requiere ingresar la estación ya antes mencionada, la que se está manejando es la 1102, a partir de esta se calcula la P.E. como se puede ver en la Figura 103 y Cuadro 26.

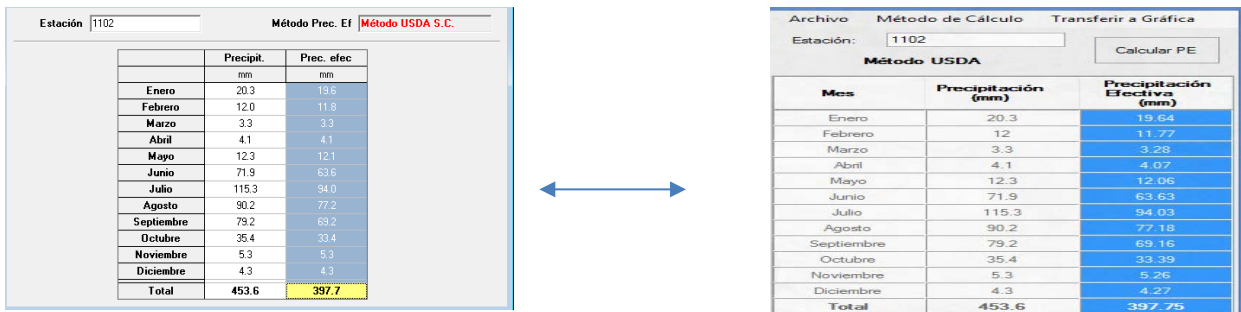


Figura 103. Cálculo de la precipitación efectiva en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha), cultivo de avena.

Cuadro 26. Resultados de precipitación efectiva por programa, cultivo de avena.

MES	Precipitación efectiva CROPWAT (mm)	Precipitación efectiva RdR (mm)
ENERO	19.6	19.6
FEBRERO	11.8	11.8
MARZO	3.3	3.3
ABRIL	4.1	4.1
MAYO	12.1	12.1
JUNIO	63.6	63.6
JULIO	94.0	94.0
AGOSTO	77.2	77.2
SEPTIEMBRE	69.2	69.2
OCUTBRE	33.4	33.4
NOVIEMBRE	5.3	5.3
DICIEMBRE	4.3	4.3
TOTAL	397.7	397.7

Se puede observar claramente en el cuadro anterior que el cálculo de las precipitaciones efectivas en ambos programas son idénticos. Por lo que se prosigue pasar al siguiente punto en uno y otro programa.

Los datos tomados para el cultivo de la avena forrajera y que se ingresaron a los programas fueron sustraídos del “Plan Director DR001” que posteriormente estos datos son tomados en cuenta para su procesamiento.

Cuadro 27. Características generales del cultivo de avena forrajera..

Ciclo/Cultivo	Fecha de siembra	Ciclo Vegetativo (días)					KC			Prof. Raíces		Frac. Agot		
		Inicial	Desarrollo	Mediados	Final	Total	Inicial	Mediado	Final	Ini.	Máx.	Ini	Med	Final
Otoño-Invierno/Avena forrajera	1-nov	20	45	30	25	120	0.4	1.15	0.35	0.4	1.0	0.6	0.5	0.6

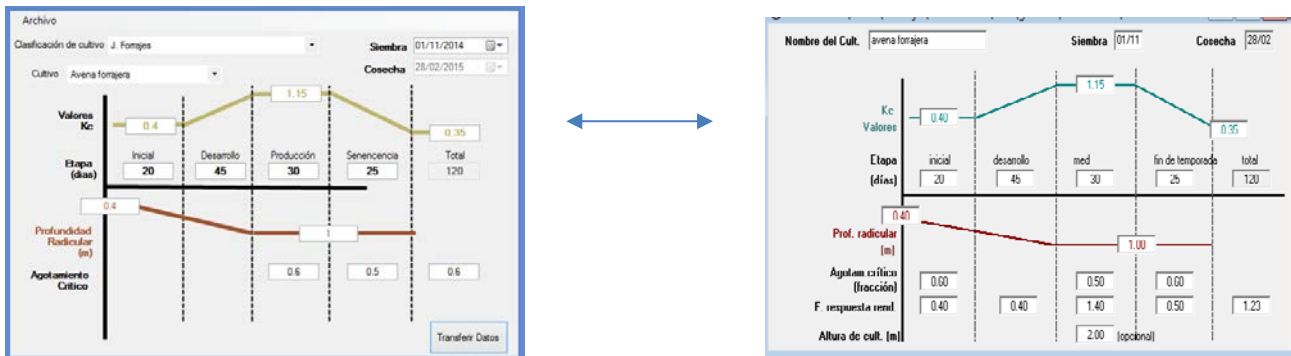


Figura 104. Ingreso de datos del cultivo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (derecha) y RdR (izquierda), cultivo de avena.

En lo que refiere al tipo de suelo (Cuadro 28 y Figura 105), se ingresaron los datos prevalcientes en la zona Rincón de Romos, también tomados los datos del “Plan Director DR001”.

Cuadro 28. Características del suelo, cultivo de avena

Serie	Profundidad cm	Textura	CC	PMP	DA	Lámina mmm/m	Conductividad mmm/hr
Rincón	135	Ca	17	9	1.56	172	26

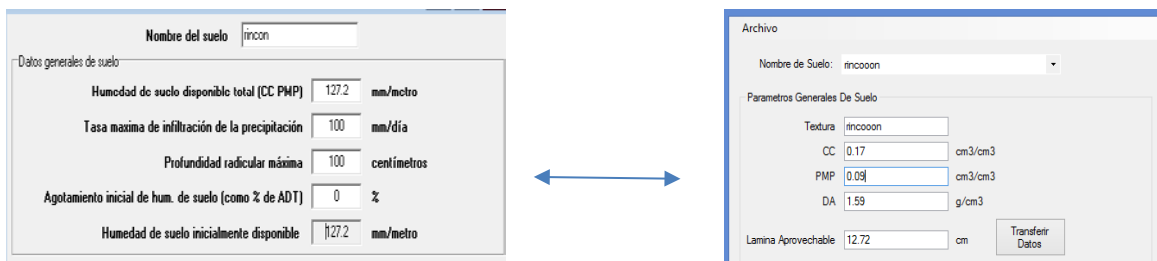


Figura 105. Ingreso de datos del suelo en ambos programas, CROPWAT 8.0 (izquierda) y RdR (derecha).

Es de notarse que cada programa nos solicita un dato diferente a ingresar sin embargo para razones de cálculo es lo mismo, por lo que en el procesamiento de datos se verificara que efectivamente estos sean los correctos.

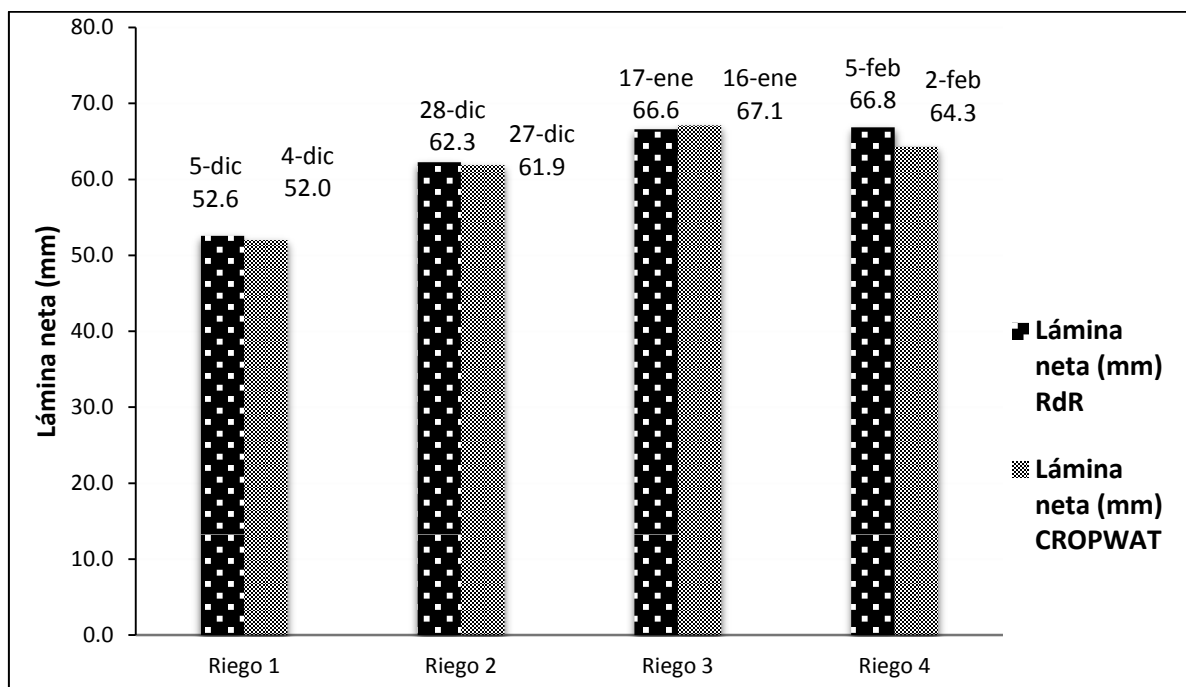


Figura 106. Gráfica comparativa de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de avena.

Cuadro 29. Cuadro comparativo de resultados en lámina neta para ambos programas, cultivo de avena.

Riegos	Lámina neta (mm) RdR	Lámina neta (mm) CROPWAT
Riego 1	52.6	52.0
Riego 2	62.3	61.9
Riego 3	66.6	67.1
Riego 4	66.8	64.3
Total	248.3	245.3

Como se puede observar en la Figura 106 y Cuadro 29, los diferencias no son significativas, por lo que se puede concluir que los valores estimados con el programa RdR, son confiables.

En la Figura 107 y Cuadro 21Cuadro 30 se puede observar las diferencias de los resultados arrojados en cada programa, para los tres valores siguientes:

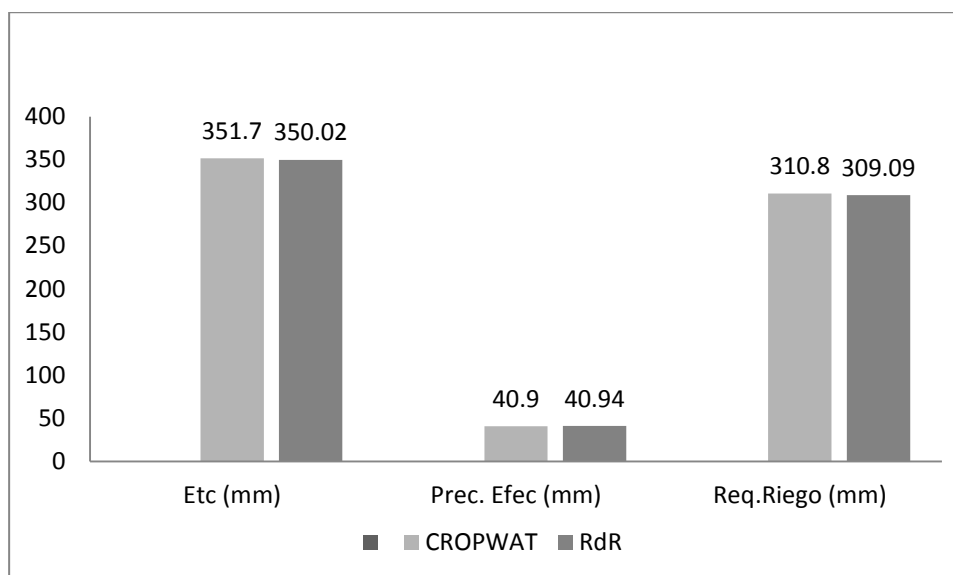


Figura 107. Grafica comparativa de resultados para cada parámetro en cada programa, cultivo de avena.

Cuadro 30. Cuadro comparativo de requerimiento de riego en cada programa, cultivo de avena.

Requerimiento de riego	Etc (mm)	Prec. Efec (mm)	Req. Riego (mm)
CROPWAT	351.70	40.90	310.80
RdR	350.02	40.94	309.09

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

Se logró la integración de la información de clima, cultivos y edáficos en el sistema “RdR” en un ambiente de información geográfica, que facilita la determinación de los requerimiento de riego, en este caso para el DR 001 Pabellón, en el Estado de Aguascalientes.

El sistema que se desarrolló “RdR” obtiene resultados confiables equivalentes al programa CropWat de la FAO dado que las pruebas de validación con el método de análisis de varianza indican que son estadísticamente iguales con un nivel de significancia $\alpha = 0.05$.

7.2. Recomendaciones

Es recomendable replicar el concepto del sistema a nivel nacional, lo que permitirá obtener resultados aplicables en cualquier lugar de México.

Es factible realizar mejoras al sistema, tales como hacer los cálculos de requerimiento de riego para un patrón de cultivos, agregar más métodos para el cálculo de la E_t0 .

El sistema puede ser parte de un programa general para el diseño de un sistema de riego, en donde los resultados obtenidos sean parte de la base para el cálculo hidráulico.

8. LITERATURA CITADA

Ahmadi, S. H. y Fooladmand, H.R. 2008. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran. Irrigation Science. Vol 26. Iran.

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. Boletín 56.Roma.

Ángeles H. J.M. y Benjamín de León M.F. 2007. Manual para diseño de zonas de riego pequeñas. Instituto Mexicano de Tecnología de Agua. Comisión Nacional del Agua. 2ª edición. Volumen II. Jiutepec, Morelos, México.

Ángeles M. V. 2002. Diseño agronómico de sistemas de riego presurizados. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Ángeles M.V., Fernández C.V.H., Ba K.M. y Díaz D.C.. 2002. Elementos básicos de riego de riego presurizado para productores: Microirrigación. Toluca, Estado de México.

Bosque S.J. 1992. Sistemas de Información Geográfica. Primera Edición. Rialp. Madrid. España.

CONAGUA. 2002. Manual para la Elaboración y Revisión de Proyectos Ejecutivos de Sistemas de Riego Parcelario. Comisión Nacional del Agua. México.

FAO. 2014. Consulta en línea en:

[http://www.fao.org/nr/water/infores_databases_cropwat.html]

Fernández C. 2002. Diseño Agronómico de Sistemas de Riego Presurizado, Metodología. Rex Irrigación, México.

Martínez E. R. 2010. Riego Localizado: Diseño y Evaluación. Primera Edición. Universidad Autónoma Chapingo. México.

Ocaña O.R.V., Mundo J. y Lusitano J. 2002. Metodología para la creación de Sistemas de Información Geográfica en transporte para la planificación y la Gestión urbana. FERMENTUM. Revista Venezolana de Sociología y Antropología, vol. 12, num 34. Mérida, Venezuela. Pp 303-320.

OjedaB. W. 2004. Calendarización del riego en tiempo real. En: Fundamentos del riego y riego por gravedad. Vol. 1. In: X curso internacional de Sistemas de Riego. Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo (UACH). México.

Palacios V.E. 2002. ¿Por qué, cuándo, cuánto y cómo regar?. Para lograr mejores cosechas. Trillas. 1ª edición. México.

Palacios R. 2011. Identificación, formulación y Evaluación social de proyectos de Inversión Pública. Sector Agricultura. Caso: Riego. Ministerio de Economía y Finanzas. Dirección General de Política de inversiones. Perú.

Pereira, L.S. and Teixeira J.L. 1993. Irrigation Water Delivery Models. Proceedings of the FAO Expert Consultation. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Roma, Italia.

Ríos P.J.I. 2005. Programación orientada a objetos en lenguajes no orientados a objetos: C, una experiencia. Scientia Et Technica, vol. XI, num. 29. Universidad Tecnológica de Pereira.Colombia. Pp 107-111.

Rosete F. y Bocco G. 2003. Los sistemas de información geográfica y la percepción remota. Herramientas integradas para los planes de manejo en comunidades forestales. Gaceta Ecológica, núm. 68. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. México. Pp 43-54.

Tijerina CH.L. 1999. Requerimientos hídricos de cultivos bajo sistemas de fertirrigación. Terra. Vol. 17. Número 3. México.

Val N.A. 2013. Cuantificación de las superficies afectadas por heladas ocurridas en el mes de febrero de 2011, en el distrito de riego 041, río Yaqui, utilizando imágenes de satélite y sistemas de Información geográfica. Colegio de Postgraduados. Postgrado en Hidrociencias. Montecillo, Texcoco. México.

X Curso Internacional de Sistemas de Riego.2004. Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Irrigación. Volumen I y II. México.

Valverde, J. 2007. Riego y drenaje. Editorial de la Universidad Estatal a Distancia (EUNED). Costa Rica.