

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

SISTEMA PARA PROGRAMAR Y CALENDARIZAR EL RIEGO DE LOS CULTIVOS EN TIEMPO REAL

MIGUEL SERVIN PALESTINA

T E S I S:

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

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

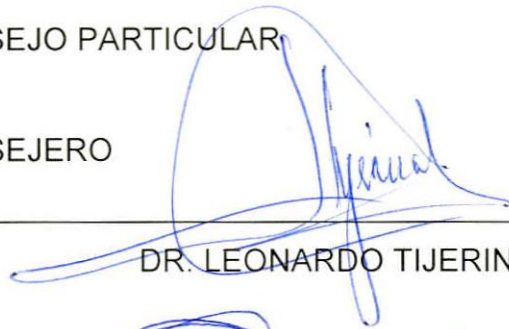
2015

La presente tesis titulada: **Sistema para programar y calendarizar el riego de los cultivos en Tiempo Real** realizada por el alumno: **Miguel Servin Palestina** 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



DR. LEONARDO TIJERINA CHÁVEZ.

ASESOR



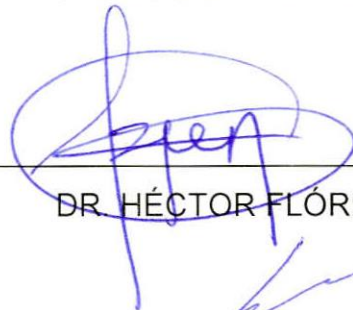
DR. GUILLERMO MEDINA GARCÍA.

ASESOR



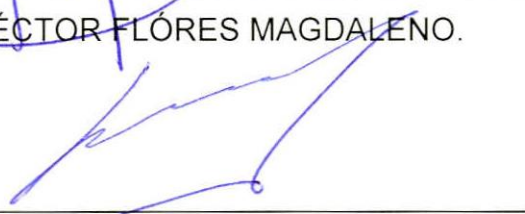
DR. ÓSCAR PALACIOS VÉLEZ

ASESOR



DR. HÉCTOR FLÓRES MAGDALENO.

ASESOR



MC. FELIPE PEDRAZA OROPEZA

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO MARZO 2015

SISTEMA PARA PROGRAMAR Y CALENDARIZAR EL RIEGO DE LOS CULTIVOS EN TIEMPO REAL

Miguel Servin Palestina
Colegio de postgraduados, 2015

La actividad agrícola consume más del 80 por ciento del agua disponible a nivel mundial, se considera como una gran consumidora de los recursos hídricos, esto se debe al desperdicio de agua que se presenta, aun en sistemas tecnificados; esto debido a que se desconocen los requerimientos hídricos de los cultivos. La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: cuánto, cuándo y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua. Este estudio se centra en las dos primeras interrogantes, mediante la programación del riego, la cual es una técnica que consiste en determinar la cantidad de agua y el momento en que han de regarse los cultivos; este es un instrumento fundamental para lograr un uso eficiente del agua. Regularmente el riego se realiza sin soporte técnico con base únicamente en la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarlo de una manera adecuada. El objetivo de esta investigación fue desarrollar un sistema en línea para que los usuarios de riego del estado de Zacatecas estimen las demandas de agua de los cultivos (Ajo, Chile, Frijol y Maíz) y programen sus riegos en tiempo real. El programa resuelve el balance de agua en el suelo mediante la estimación previa de cada uno de sus componentes de pérdida y ganancias de agua, es decir mediante un balance hídrico climático; con el uso de datos climáticos obtenidos de la red de 36 estaciones agroclimáticas automatizadas distribuidas en el Estado. Lo que permite estimar el consumo de agua a través del tiempo, y determinar el calendario de riegos de los cultivos, el programa se ejecuta vía internet y fue codificado en lenguaje PHP que, junto con HTML, permite crear sitios WEB dinámicos.

Palabras clave: Evapotranspiración, Balance hídrico, Agua-suelo, Estaciones climáticas, Cultivos,

SYSTEM PROGRAMMING AND IRRIGATION SCHEDULES CROP IN REAL TIME

Miguel Servin Palestina
Colegio de postgraduados, 2015

The agriculture consumes more than 80 percent of the water available worldwide, is considered as consume a lot of water resources, this is due to water wastage that occurs, even in technically advanced systems; this because the water requirements of crops are unknown. The irrigation technology raises three basic questions: how much, when and how to irrigate crops for maximum efficiency and water productivity. This study focuses on the first two questions, by irrigation scheduling, which is a technique that consists in determining the amount of water and the time to be irrigated crops; this is an essential tool for efficient water use. Regularly watering is done without support based solely on the user experience, why greater systematization and dissemination of techniques available to do it in a proper way is required. The objective of this research was to develop an online system for irrigation users of Zacatecas consider water demands of crops (Garlic, Chile, Bean and Corn) and program their irrigation in real time. The program solves the water balance in the soil by previous estimate of each of its components lost profit and water, ie by a climatic water balance; obtained using climate data network 36 agroclimatic automated stations distributed in the state. Allowing estimating water consumption over time and determining the timing of irrigation of crops, the program runs via internet and was coded in PHP language along with HTML to create dynamic Web sites.

Key words: Evapotranspiration, water balance, water-soil, weather stations, Crops

DEDICATORIAS

Al ser supremo que está por encima de lo inexplicable. Ya que muchas veces no me explico cómo me han llegado tantas oportunidades en la vida.

A mi esposa (Jessi) por ser una base muy sólida que sostiene a nuestra familia, a mi hijo (Tristán) que se aferró a la vida y me enseñó que hay que **luchar** hasta el final, a mi hija (Sarai) que es una niña echa ternura que me ha enseñado a pensar con el **corazón**, al pequeño Said, una motivación más para luchar con el corazón; ustedes son mi motor para alcanzar mis sueños, los amo.

A mis padres Pomposa y Genaro, que han sembrado carácter para tomar con serenidad cada situación de mi vida, y por enseñarme la diferencia entre lo que está bien y está mal.

A mis hermanos (Genaro y Alfredo) que están orgullosos de mí y que me han dado todo su apoyo incondicional.

A mis suegros y compadres que me han dado todo su apoyo y consejos.

A mis amigos por acompañarme en algunos pasajes de mi vida y por sus enseñanzas.

A las personas que no creen en mí, gracias por no ignorarme.

AGRADECIMIENTOS

Al Colegio de postgraduados y especialmente al programa de Hidrociencias, personal académico y administrativo por el apoyo y facilidades otorgadas durante mi permanencia.

Deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y al Colegio de Postgraduados por haberme dado la oportunidad de continuar con mi formación académica.

Agradezco al instituto nacional de investigaciones agrícolas forestales y pecuarias (INIFAP) por darme la oportunidad de formarme como investigador y como profesionista pero principalmente como persona.

Un especial agradecimiento al mi profesor consejero. Dr Leonardo Tijerina Chávez por sus cursos y gran orientación en el trabajo de investigación.

Al Dr. Guillermo Medina García y a su equipo de colaboradores del programa de Agroclimatología y Modelage. INIFAP-Zacatecas, especialmente al Lic. Israel Casas Flores por su colaboración en la codificación de sistemas.

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México. Fuente: Sánchez et al. (2006). | 3 |
| Figura 2. Curva generalizada del coeficiente de cultivo Kc. Fuente: FAO (1977). | 24 |
| Figura 3.- Curva de Kc de frijol (Agrimet) | 25 |
| Figura 4.- Curva de Kc de maíz (Agrimet)..... | 26 |
| Figura 5.- Curva de Kc de Ajo y Cebolla (Agrimet)..... | 26 |
| Figura 6. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo..... | 29 |
| Figura 7. Localización del CEZAC INIFAP. | 34 |
| Figura 8. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas. | 35 |
| Figura 9.- Componentes de una red de estaciones agroclimaticas Adcon | 36 |
| Figura 10.- Diagrama de flujo del sistema en linea para calendario de riego | 41 |
| Figura 11. Pantalla de inicio del sitio de internet del Campo Experimental Zacatecas. | 42 |
| Figura 12. Pantalla de aplicaciones de monitoreo agroclimático | 43 |
| Figura 13. Pantalla de inicio a SIPRO-RIEGO | 43 |
| Figura 14. Pantalla de registro de nuevos usuarios | 44 |
| Figura 15. Selección de la estación agroclimática para consulta de datos. | 45 |
| Figura 16. Datos de entrada | 49 |
| Figura 17. Mapa para ingreso de coordenadas..... | 49 |
| Figura 18. Mensaje de registro | 50 |
| Figura 19. Parcelas del usuario agregadas..... | 50 |
| Figura 20. Reporte de riego | 51 |
| Figura 21. Gráfico de balance de humedad en el suelo. | 51 |
| Figura 22. Reporte completo del balance de agua en el suelo..... | 52 |
| Figura 23.- Clasificación por índice de sequía en Zacatecas | 60 |
| Figura 24.- Curva de coeficiente de cultivo de maíz..... | 62 |
| Figura 25.- Modelos de Kc para chile..... | 64 |
| Figura 26. Sistema de medición y control con sensores meteorológicos..... | 66 |
| Figura 27. Estación de radio UHF A733 addWAVE (Adcon) | 67 |
| Figura 28. Sensor SEN-R Combisensor Temp / H.Relativa Adcon TR1 | 68 |
| Figura 29. Sensor de precipitación RG1 Pluviómetro, 200 cm ² , 0,2 mm | 69 |
| Figura 30. Sensor de velocidad del viento PRO - 60m..... | 71 |
| Figura 31. Sensor de radiación solar SP-LITE de Kipp & Zonen. | 72 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Kc para diversos cultivos (FAO 1977). | 24 |
| Cuadro 2.- Valores de (kc) para diferentes etapas fenológicas del cultivo. | 27 |
| Cuadro 3.- Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces..... | 28 |
| Cuadro 4. Constantes de humedad por tipo de suelo. | 33 |
| Cuadro 5. Modelos de Kc para diversos cultivos..... | 39 |
| Cuadro 6.- Etapas de desarrollo acumuladas de algunos cultivos en Zacatecas. | 58 |
| Cuadro 7.- Coeficiente medio y final de algunos cultivos en Zacatecas. | 58 |
| Cuadro 8.- Evapotranspiración y coeficiente de cultivo (FAO-56) | 60 |
| Cuadro 9.- Modelos de Kc por grupo de estaciones agroclimáticas | 61 |
| Cuadro 10. Modelos de Kc obtenidos con información de FAO (1977). | 62 |
| Cuadro 11.- Valores de (kc) para diferentes etapas fenológicas ajustados. | 63 |
| Cuadro 12. Modelos de Kc con información de Bravo et al (2006)..... | 63 |

CONTENIDO

| | |
|---|-------------|
| DEDICATORIAS | V |
| AGRADECIMIENTOS | VI |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | VII |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | VIII |
| CONTENIDO | IX |
| I. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| II. JUSTIFICACIÓN | 2 |
| III. OBJETIVOS | 2 |
| IV. HIPÓTESIS | 2 |
| V. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 5.1. EL RIEGO EN MÉXICO | 3 |
| 5.2. PROGRAMACIÓN DEL RIEGO | 4 |
| 5.2.1. Programación del riego con parámetros climáticos | 4 |
| 5.2.2. Programación en función de la humedad del suelo..... | 6 |
| 5.2.3. Programación en función de indicadores de estrés hídrico de los cultivos . | 6 |
| 5.3. HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES UTILIZADAS PARA LA PROGRAMACIÓN DEL RIEGO EN LOS CULTIVOS | 7 |
| 5.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN..... | 9 |
| 5.4.1. Evaporación..... | 10 |
| 5.4.2. Transpiración | 10 |
| 5.4.3 Factores que afecta la Evapotranspiración | 11 |
| 5.5. EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA..... | 13 |
| 5.6. PRECIPITACIÓN EFECTIVA | 19 |
| 5.7. CARACTERÍSTICAS DEL CULTIVO..... | 21 |
| 5.7.1. Etapas de crecimiento del cultivo | 21 |
| 5.7.2. Coeficiente del cultivo | 23 |
| 5.7.3. Evapotranspiración del cultivo..... | 27 |
| 5.7.4. Profundidad radicular | 28 |
| 5.7.5. Abatimiento de humedad aprovechable como criterio de riego | 29 |
| 5.8. CONSTANTES DE HUMEDAD DEL SUELO..... | 31 |
| 5.8.1 Capacidad de campo | 31 |

| | |
|---|-----------|
| 5.8.2. Punto de marchitamiento permanente | 32 |
| 5.8.3. Humedad aprovechable | 33 |
| VI. MATERIALES Y MÉTODOS | 34 |
| 6.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO | 34 |
| 6.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA | 34 |
| 6.2.1. Descripción de la red de estaciones | 35 |
| 6.2.2. Lenguajes de programación utilizados | 38 |
| 6.2.3. Método de balance hídrico climático | 38 |
| 6.2.4. Diagrama de flujo | 41 |
| VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 42 |
| 7.1. DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN | 42 |
| 7.2. DATOS DE ENTRADA | 45 |
| 7.3. REPORTES E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS | 52 |
| VIII. CONCLUSIONES | 54 |
| IX. LITERATURA CITADA | 55 |
| ANEXOS | 58 |
| A: GENERACIÓN DE MODELOS PARA ESTIMAR EL KC | 58 |
| B: VALIDACIÓN DE LOS MODELOS DE KC | 64 |
| C: DESCRIPCIÓN DE LA ESTACIÓN Y SENSORES | 66 |

I. INTRODUCCIÓN

La actividad agrícola consume más del 80 por ciento del agua disponible a nivel mundial. En USA este valor es de 60 por ciento, donde los sectores doméstico e industrial consumen el 25 y 15 por ciento respectivamente (Fourth World Water Forum, 2006). En México los porcentajes correspondientes son 77 para uso agrícola, 17 y 6 para uso doméstico e industrial respectivamente, con 6.3 millones de hectáreas bajo riego en las que la eficiencia global es menor al 50 por ciento (Sánchez y Catalán, 2006).

La menor disponibilidad de agua observada en las presas del país, en consecuencia de la incertidumbre climática en los últimos años, ha generado una sobreexplotación de los acuíferos subterráneos. Así, de los 653 acuíferos del país, 101 se encuentran sobre explotados con tasas de abatimiento anual de hasta 3.5 metros (CNA, 2010; Sánchez, 2005). Esta situación clama por el establecimiento de estrategias para ejercer un mayor control en la administración de los recursos hídricos. Entre estas estrategias destaca la tecnificación del riego, la cual implica la incorporación de técnicas y métodos más racionales y cuantitativos para ejercer mayor control en la ejecución de esta importante práctica agrícola.

La tecnificación del riego plantea tres preguntas básicas: cuánto, cuándo y cómo regar los cultivos para obtener máxima eficiencia y productividad del agua. La presente investigación se centra en las dos primeras interrogantes, es decir, en la cuantificación de las demandas hídricas de los cultivos de Chile, Maíz, Frijol y Ajo; y la determinación del momento oportuno para la aplicación de los riegos en tiempo real. Las respuestas a estas preguntas constituyen lo que se conoce como el programa o calendario de riegos; para esta tarea se desarrolló un sistema en línea para dar respuesta a dichas interrogantes.

La programación de los riegos de estos cultivos en Zacatecas normalmente se ejecuta sin soporte técnico alguno con base únicamente a la experiencia de los usuarios, razón por la cual se requiere una mayor sistematización y difusión de las técnicas disponibles para realizarla de una manera adecuada.

II. JUSTIFICACIÓN

El aumento de la conciencia colectiva de la importancia del agua como vehículo del desarrollo de todas las actividades económicas y sociales, junto con la creciente demanda de este recurso para el resto de las actividades de la sociedad y unas exigencias mayores de la calidad medio ambiental por parte de los ciudadanos, hace que el riego sea señalado como una de las principales causas de desperdicio de este recurso.

Dentro de este entorno, muchas veces se olvida de cuáles son las funciones del riego en zonas con recursos hídricos escasos y una irregular distribución de las lluvias a través del tiempo. En México normalmente en la mayor parte de las zonas agrícolas, la aportación del agua a través de las precipitaciones es muy inferior al consumo potencial de este elemento que tienen los cultivos. La magnitud de estas deficiencias justifica que el agua sea el factor determinante de la producción agrícola y de toda la industria agroalimentaria que de ella depende, representando un factor básico en el reequilibrio del territorio.

Esta importancia tanto económica como social, no excluye que la agricultura de regadío tenga que hacer todos los esfuerzos necesarios en mejorar la eficiencia en el uso del agua y, de esta manera, dar respuesta a planteamientos más globales de los recursos hídricos y a la creciente demanda de agua para finalidades no agrícolas.

III. OBJETIVOS

-Desarrollar un sistema en línea para calcular las demandas de agua y calendarizar el riego de algunos cultivos en el estado de Zacatecas.

-Proveer de información básica a usuarios del riego, de técnicos e investigadores sobre las demandas de agua y programación del riego de los cultivos en tiempo real en el estado de Zacatecas.

IV. HIPÓTESIS

Mediante la aplicación de los principios físicos que determinan el balance de agua en el suelo es posible construir un algoritmo y un sistema en línea para estimar el consumo de agua y programar el riego de los cultivos.

V. REVISIÓN DE LITERATURA

5.1. El riego en México

En la última década, la agricultura bajo riego en el país contribuyó con el 55% del valor total de la producción agrícola (Banco Mundial, 2006), con un rendimiento por hectárea 3.4 veces mayor que el de las áreas de temporal (FAO, 2005). En las cuentas nacionales la producción agrícola de los sistemas con riego representa el 2.78% del PIB nacional y, aporta el 54% del valor de la producción de trigo, hortalizas y alfalfa y, el 70% de las exportaciones (CNA, 2012). México ocupa el sexto lugar a nivel mundial en términos de superficie con infraestructura de riego.

Los problemas asociados con la disponibilidad y aprovechamiento del agua afectan tanto a la agricultura de riego como a la de temporal. De los 6.3 millones de hectáreas bajo riego, sólo 450 mil cuentan con alta tecnificación y el resto opera bajo métodos tradicionales de irrigación con eficiencias no mayores al 50 por ciento (Sánchez *et al.*, 2002). Por su parte, el 68 por ciento de los 14 millones de hectáreas de temporal operan bajo condiciones de riesgo debido a la incertidumbre climática. Otro problema añadido a la disponibilidad del agua es la salinidad de los suelos, En México el 10% (630 mil ha⁻¹) de la superficie de riego esta bajo esta condición (Sanchez (2005) y Umail (1993)). Por otro lado el alta demanda evapotranspirativa y la escasa precipitación pone al país en un escenario de incertidumbre por el déficit hídrico. (Figura 1).

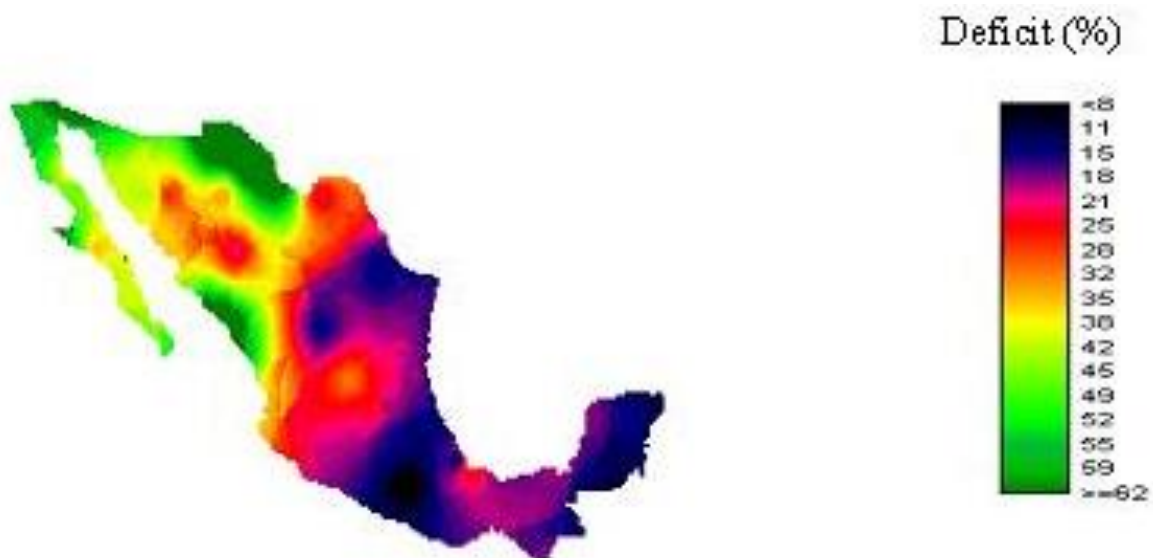


Figura 1. Déficit evapotranspirativo en México. Fuente: Sánchez et al. (2006).

5.2. Programación del riego

Es una técnica que permite determinar el nivel óptimo de riego de acuerdo a las interacciones específicas de suelo, cultivo, clima y manejo agronómico (Ortega y Acevedo, 1999). La programación del riego es un proceso de decisión orientado a determinar las cantidades de agua por aplicar y las fechas de aplicación de cada riego para minimizar deficiencias o excesos de humedad en el suelo que pudieran causar efectos adversos sobre el crecimiento, rendimiento y calidad de los cultivos. Con la programación adecuada del riego se pueden lograr objetivos múltiples como ahorrar agua, disminuir costos por ahorro de energía y mano de obra, minimizar estrés hídrico y maximizar rendimiento, así como maximizar calidad, rentabilidad o ingreso.

Toda programación de riego responde a dos preguntas fundamentales: ¿Cuánto y cuándo regar?, es decir, debe permitir conocer las dosis y frecuencias de riego. Salvo en algunas instalaciones en las que estas decisiones se toman en forma automática, lo normal es que se haga una programación anticipada, según la experiencia y conocimiento del agricultor, suponiendo que el año se comportará como un año promedio. Después, a lo largo del ciclo del cultivo, los parámetros de riego se van actualizando en función de información actual: factores climáticos, desarrollo del cultivo, disponibilidad de agua (Maldonado, 2000).

En la programación de riego la tendencia es que cada vez intervengan menos factores subjetivos y se logre mayor eficiencia en el manejo del agua. Siguiendo esta tendencia se han desarrollado distintos métodos para programar los riegos, los cuales pueden agruparse en tres categorías: parámetros climáticos, medidas de humedad del suelo y medidas de estrés hídrico de las plantas (FAO, 1989). En el orden en que se han citado, los métodos van de menos a más rigurosos. Desgraciadamente, la facilidad de aplicación de los métodos va en orden inverso.

5.2.1. Programación del riego con parámetros climáticos

Este método consiste en realizar un balance hídrico en el perfil del suelo, tomando en cuenta, por una parte, las aportaciones de agua del riego y la lluvia, y por otra, la demanda evapotranspirativa del cultivo.

Para realizar una estrategia de riego mediante balance hídrico climático (BHC) es necesario conocer no solo las características del suelo, sino también la

medición de todas las variables necesarias para el cálculo de la Evapotranspiración (ET_o) y de la precipitación efectiva (Pe).

Para un volumen dado de suelo durante un cierto periodo de tiempo, la diferencia entre la cantidad de agua añadida y la cantidad de agua perdida, es igual a la variación del contenido de humedad ($\Delta\theta$) en dicho volumen de suelo y puede expresarse como:

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

Donde V_{ent} es el volumen de agua que entra al suelo y V_{sal} el que sale. Cuando las entradas exceden las salidas, la variación de contenido de humedad es positiva y en caso contrario, negativa.

Las ganancias o entradas de agua más importantes son la precipitación (P) (incluidas condensaciones por rocío o encharcamiento) y el riego (R).

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

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

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

La escorrentía supone una pérdida de agua desde la superficie del suelo hacia otros lugares y en ocasiones, puede suponer una ganancia de agua si ésta fluye hacia nuestro volumen de suelo desde zonas adyacentes. El valor del drenaje por percolación profunda hacia el exterior de nuestro volumen de suelo, aunque normalmente es positivo, puede tomar signo negativo en el caso que hubiera ascenso capilar de agua desde un nivel freático somero. Por su parte, la evapotranspiración representa la suma de la evaporación directa desde la superficie del suelo y la transpiración de la vegetación.

Cuando se realiza el balance de agua del suelo, es necesario considerar todos estos aspectos. Así pues, el balance de agua para un volumen dado de suelo, en cualquier escala, pasando desde plantas individuales hasta cuencas hidrológicas, puede representarse como:

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

Dónde: $\Delta\theta$ es el cambio del contenido de agua en el suelo durante el período de tiempo considerado, R es la cantidad de agua aplicada con el riego, P la precipitación o lluvia, E Esgurrimiento de agua, D Drenaje de la zona de raíces y ET la evapotranspiración o consumo de agua.

5.2.2. Programación en función de la humedad del suelo

Este método tiene la ventaja, con respecto al método de parámetros climáticos, que incluye los posibles aportes del agua almacenada en el suelo, además que elimina los errores en el cálculo de ET (Evapotranspiración), en la elección del Kc (Coeficiente de cultivo). En efecto, si el suelo está seco es que se está regando poco y si está demasiado húmedo, se está regando en exceso (Martin 2010). Uno de los métodos más seguros y fáciles de manejar para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo es el Time Domain Reflectometry (TDR)

El TDR es una técnica electrónica que se utiliza para medir el contenido volumétrico de agua en el suelo (Topp et al., 1980). Hay varios modelos y marcas comerciales pero el principio es el mismo y consiste en aplica una señal de voltaje a una línea de transmisión (varilla de metal) que se ubica en el suelo. El tiempo que requiere la señal de voltaje para viajar de la fuente al fin de la línea de transmisión y regresar de nuevo, está en función del contenido de humedad.

5.2.3. Programación en función de indicadores de estrés hídrico de los cultivos

Este método se basa en mediciones micro meteorológicas y de temperatura del follaje. Se fundamenta también en el uso de indicadores del estrés hídrico en las plantas como el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y los grados día estrés (SDD). Sin duda es un procedimiento con un gran potencial, ya que la planta realiza una integración de todos los factores que determinan sus necesidades de agua. Sin embargo, requiere de equipo de medición especializado (Martin 2010).

Un indicador muy utilizado es el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel y el déficit de presión de vapor. (Giuliani et al., 2001).

5.3. Herramientas computacionales utilizadas para la programación del riego en los cultivos

En las últimas décadas la tecnología y la informática ha tomado una importancia muy relevante en todas las áreas del conocimiento y la agronomía no es la excepción. Esta importancia en la agricultura radica sobre el uso de nuevas tecnologías tanto para la producción como para cosechar los cultivos de nuestros campos agrícolas.

Por lo tanto esta tecnología va acompañada del desarrollo de sistemas computacionales, diseño de instrumentos y construcción de maquinarias capaces de tecnificar las labores agrícolas, en una parcela, predio, unidad de riego o incluso en una cuenca o región hidrográfica.

En la actualidad contamos con muchos sistemas computacionales como aplicaciones o software, programas informáticos para la gestión de parcelas, ranchos y cultivos. Estas aplicaciones obedecen al hecho de liberar al hombre de la realización de tareas repetitivas y de la posibilidad de dar un giro al modo de trabajar y de hacer más eficiente las labores o servicios.

Estas aplicaciones son muy útil para llevar un control de las rotaciones de cultivos, siembras, cosecha pos-cosecha y gestión de los recursos hídricos entre otras actividades.

En lo que se refiere a la gestión de recursos hídricos los sensores y estaciones agrometeorológicas automatizadas juegan un papel muy importante ya que ha permitido un ahorro de agua sustancial por medio del pronóstico de riego en tiempo real en algunos países en comparación con las recomendaciones generales.

El pronóstico de riego en tiempo real es una metodología que permite conocer cuándo y cuánto regar de acuerdo a los requerimientos hídricos específicos de los cultivos, que se estiman por medio de modelos del sistema agua-suelo-planta-atmósfera que son alimentados con información meteorológica recibida en tiempo real de estaciones agrometeorológicas automatizadas instaladas

en campo, de información de las características del suelo y de los parámetros fenológicos y fisiológicos de los cultivos.

El uso de programas de computadoras para ayudar en la programación del riego fue introducido en los años setenta. Sin embargo, sólo recientemente con la introducción de las computadoras personales con procesadores rápidos es que su uso ha comenzado a ganar amplia aceptación. Se pueden utilizar diversos métodos para determinar el uso de agua en el cultivo y ayudar a los agricultores a programar el riego. (Martin 2010).

Para esta tarea se citan algunas aplicaciones utilizadas para realizar calendarios de riego.

CROPWAT 8.0

CROPWAT 8.0 para Windows es un programa de computación que puede ser usado para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y de sus requerimientos de riego en base a datos climáticos y de cultivo ya sean existentes o nuevos. Además, el programa permite la elaboración de calendarios de riego para diferentes condiciones de manejo y el cálculo del esquema de provisión de agua para diferentes patrones de cultivos (CROPWAT 1993).

DRiego Ver 1.0.

DRiego Ver 1.0. es una aplicación desarrollada por el CENID-RASPA de INIFAP que provee de información básica a usuarios del riego sobre las demandas de agua y programación de riego para diferentes cultivos en los distritos de riego del país. El algoritmo utiliza un método que se fundamenta en las temperaturas máximas y mínimas, precipitación y radiación solar para calcular las demandas; a si propone un calendario de riego en función de la información proporcionada. Este calendario de riego es producto de un balance de agua en el suelo y de la información climática promedio de 20 años en cada distrito de riego (Servin 2007).

Sistema Irriga®

Es un software que integra manejo y monitoreo del riego, creado y desarrollado por la UFSM-Brasil en colaboración con el Instituto nacional de investigación agropecuaria (INIA). El Sistema Irriga toma en cuenta en su recomendación el cultivo, sus fases de desarrollo y sus interacciones con el clima y el suelo. Y tiene como objetivo presentar una herramienta para el uso eficiente del agua de riego en los cultivos en Brasil. www.irriga.proj.ufsm.br.

S E P O R ver 2.1

Servicio de Programación y Optimización del Uso del Agua de Riego **S E P O R** es un sistema desarrollado por la comisión nacional de riego del gobierno de Chile. El objetivo de este programa es entregar las herramientas necesarias a los agricultores, técnicos y profesionales para optimizar la gestión del recurso hídrico a nivel predial, utilizando tecnologías de punta en la programación del riego. http://www.sepor.cl/sistema_uar.php

5.4. Evapotranspiración

Evaporación se define en el glosario de Meteorología como: “el proceso físico por medio del cual un líquido o sólido es transferido al estado gaseoso”. La evaporación del agua a la atmósfera ocurre desde cuerpos de agua como océanos, lagos y ríos así como del suelo y de la vegetación húmeda. Gran cantidad del agua se evapora de la superficie de las plantas, sin embargo, es agua que ha pasado a través de la planta entrando por la raíz, después a través del tejido vascular hasta las hojas u otros órganos y saliendo de la planta al aire libre vía las estomas y superficies cuticulares. El proceso de evaporación del agua que ha pasado a través de la planta es llamado transpiración. La evaporación del suelo y transpiración de las plantas ocurren simultáneamente en la naturaleza, y no hay ningún camino fácil para distinguir entre los dos procesos. Por lo tanto la **evapotranspiración** se define como la pérdida de humedad de una superficie por **evaporación** directa junto con

la pérdida de agua por **transpiración** de la vegetación y se expresa en milímetros por unidad de tiempo.

5.4.1. Evaporación

La evaporación es el paso de moléculas de agua de la fase líquida a la fase gaseosa (vapor) y depende sobre todo de la temperatura del agua. También influye la salinidad y la cubierta superficial, es decir, la diferencia de presión en las diferentes capas del suelo. La condensación es el proceso contrario (paso de moléculas de agua en fase gaseosa a líquida) y depende de la presión parcial del vapor de agua. Cuando la presión de vapor en el aire es muy baja, la vaporización supera a la condensación y se produce una evaporación neta. Esto hace que aumente dicha presión de vapor, Si no hay algún mecanismo que elimine vapor, la presión parcial de vapor seguirá aumentando hasta que la condensación iguale a la vaporización. En ese momento, el aire está saturado y a la presión de vapor correspondiente se le llama de saturación, (Reid y Sherwood, 1968).

El calor de vaporización es la cantidad de energía necesaria para evaporar una unidad de agua. Esta depende de la temperatura del aire y está dada por:

$$\lambda = 597.5 - 0.564 T \quad 5)$$

Dónde: λ = Calor de vaporación de agua (lang/cm), T =Temperatura del aire (°C)

5.4.2. Transpiración

La mayor parte del agua evaporada por las plantas es agua que ha pasado a través de las mismas, absorbida por las raíces, pasando por los tejidos vasculares y saliendo por los estomas de las hojas, aunque a veces también ocurre por medio de la cutícula. Esta evaporación de agua por las plantas es denominada transpiración. El agua absorbida por las raíces cumple las siguientes funciones: incorporación a su estructura (1%), transporte de alimentos, eliminación de sales y enfriamiento (Allen et al 2006).

La transpiración es controlada por muchas variables ya que depende de los siguientes aspectos dinámicos de la actividad de la planta (Allen et al 2006):

a) Las diferentes especies vegetales pueden transpirar cantidades muy diferentes de agua en función de la naturaleza de las aberturas de evaporación que tienen las hojas denominadas estomas, sobre todo por su tamaño, densidad, localización o exposición.

b) La estación del año, que determina si las plantas tienen hojas y por cuánto tiempo.

c) La hora del día, que altera el balance de la radiación, los ritmos de fotosíntesis y crecimiento de la planta, y la actividad de las estomas. Por la noche la transpiración es del orden del 5-10% de la tasa de transpiración diurna.

d) El estado de crecimiento de la planta, dado que las plantas consumen mucha más agua en estado de crecimiento activo o periodos de construcción de biomasa, o cuando el sistema radicular ha alcanzado el máximo de expansión y eficiencia. Para ciertas especies vegetales el máximo de evapotranspiración tiene lugar cuando ha conseguido cubrir toda la superficie del suelo.

e) Los factores meteorológicos también influyen en la apertura de los estomas, dándose la circunstancia de que con fuertes vientos, sobre todo si son cálidos, las estomas se cierran, como mecanismo para no perder grandes cantidades de agua. Por el contrario, en casos de gran humedad ambiental, las plantas pueden seguir eliminando agua incluso en forma líquida para permitir el movimiento de la savia.

f) Las propiedades del suelo, por supuesto, también condicionan la cantidad de agua disponible para la planta, siendo un factor limitante a tener en consideración, de manera que, en función de las propiedades hidrodinámicas del suelo, las plantas van a ser capaces de extraer más o menos cantidad del agua retenida por el suelo

5.4.3 Factores que afecta la Evapotranspiración

La cantidad de agua consumida por un cultivo durante todo su ciclo se relaciona directamente con su rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1996). El valor de la ET en un momento dado depende de factores climatológicos como la temperatura y humedad del aire, radiación solar y velocidad del viento. Enseguida se describe brevemente cómo afectan estos factores climatológicos a la evapotranspiración (Allen et al 2006).

Radiación solar: Es la fuente de la evapotranspiración y está determinado por la cantidad de energía disponible para evaporar el agua. La radiación solar es la más importante fuente de energía en el planeta y puede cambiar grandes cantidades de agua líquida en vapor de agua. La cantidad potencial de radiación que puede llegar a una superficie evaporante viene determinada por su localización y época del año. Debido a las diferencias en la posición del planeta y a su movimiento alrededor del sol, esta cantidad potencial de radiación es diferente para cada latitud y para las diversas estaciones del año. La radiación solar real que alcanza la superficie evaporante depende de la turbidez de la atmósfera y de la presencia de nubes que reflejan y absorben cantidades importantes de radiación. Cuando se determina el efecto de la radiación solar en la evapotranspiración, se debe también considerar que no toda la energía disponible se utiliza para evaporar el agua. Parte de la energía solar se utiliza también para calentar la atmósfera, el suelo y la planta.

Temperatura. Influye en la velocidad con que se difunde el vapor de agua de las hojas a través de las estomas, en general cuanto más alta es la temperatura para un gradiente dado, más alta es la velocidad de difusión. El calor sensible del aire circundante transfiere energía al cultivo y entonces ejerce un cierto control en la tasa de evapotranspiración. En un día soleado y cálido, la pérdida de agua por evapotranspiración será mayor que en un día nublado y fresco.

Humedad relativa. Mientras que el aporte de energía del sol y del aire circundante es la fuerza impulsora principal para la evaporación del agua, la diferencia entre la presión de vapor de agua en la superficie evapotranspirativa y el aire circundante es el factor determinante para la remoción de vapor. Áreas bien regadas en regiones áridas secas y calientes, consumen grandes cantidades de agua debido a la gran disponibilidad de energía y al poder de extracción de vapor de la atmósfera. En cambio en regiones húmedas tropicales, a pesar de que el ingreso de energía es elevado, la alta humedad del aire reducirá la demanda de evapotranspiración.

Viento. El efecto del viento sobre la evapotranspiración dependerá del alto grado del viento y de la turbulencia del aire. Un aumento en la velocidad del viento, dentro de ciertos límites significa una mayor evapotranspiración, La demanda

evapotranspirativa es alta bajo condiciones de viento caliente y seco debido a la sequedad del aire y de la cantidad de energía disponible como radiación solar directa y calor latente. Bajo estas circunstancias, mucho vapor de agua puede ser almacenado en el aire mientras que el viento puede promover el transporte del agua permitiendo que se retire mayor cantidad de vapor de agua. Sin embargo, puede decirse que la evapotranspiración aumenta relativamente más, por los efectos de una brisa suave (0 a 3 km/hora), que por vientos de gran velocidad.

5.5. Evapotranspiración de referencia

Varios métodos se utilizan para estimar la evapotranspiración de referencia Eto. Muchos métodos se revisaron y evaluaron por Jensen *et al.* (1990). Los más exitosos son los métodos combinados que utilizan la energía radiante absorbida, el viento y déficit de presión de vapor en la atmosfera. Varios estudios demostraron que el modelo combinado de Penman-Monteith funcionó consistentemente mejor que los otros. Este modelo incluye más factores que influyen en la pérdida de agua del cultivo que los otros modelos, y se espera por lo tanto que proporcione mejores estimaciones.

A continuación se describe el método FAO Penman-Monteith (Allen et al., 2006) para el cálculo de la evapotranspiración de referencia (ETo) que es una combinación de la ecuación original y de las ecuaciones correspondientes a las resistencias aerodinámica y del cultivo.

Este método fue establecido luego que un panel de expertos e investigadores en riego se reunieron, organizados por la FAO en mayo de 1990, en colaboración con la Comisión Internacional para el Riego y Drenaje y con la Organización Meteorológica Mundial, con el fin de revisar las metodologías previamente propuestas por la FAO para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos y para elaborar recomendaciones sobre la revisión y la actualización de procedimientos a este respecto.

El panel de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman- Monteith como nuevo método estandarizado para el cálculo de la Eto y aconsejó sobre los procedimientos para el cálculo de los parámetros que la fórmula

incluye. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado haciendo uso de la definición del cultivo de referencia como un cultivo hipotético con una altura asumida de 0.12 m, con una resistencia superficial de 70 s m^{-1} y un albedo de 0.23 y que representa a la evapotranspiración de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente y adecuadamente regado. Este método reduce las imprecisiones de los métodos anteriores y produce globalmente valores más consistentes con datos reales de uso de agua de diversos cultivos.

El método de FAO Penman-Monteith para estimar ET_o , se deriva de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial, obteniéndose:

$$ET_o = \frac{0.408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34 u_2)} \quad 6)$$

Dónde:

| | | |
|---------------|---|---|
| ET_o | Evapotranspiración de referencia | (mm día ⁻¹) |
| R_n | Radiación neta en la superficie del cultivo | (MJ m ⁻² día ⁻¹) |
| G | Flujo del calor de suelo | (MJ m ⁻² día ⁻¹) |
| T | Temperatura media del aire a 2 m. de altura | (°C) |
| u_2 | Velocidad del viento a 2 m de altura | (m s ⁻¹) |
| e_s | Presión de vapor de saturación | (kPa) |
| e_a | Presión real de vapor | (kPa) |
| $(e_s - e_a)$ | Déficit de presión de vapor | (kPa) |
| Δ | Pendiente de la curva de presión de vapor | (kPa °C ⁻¹) |
| γ | Constante psicrométrica | (kPa °C ⁻¹) |

El cálculo de los diferentes parámetros de la ecuación se obtuvo a partir de registros de temperatura del aire y humedad relativa y de las características geográficas de la zona en estudio como la altura o la latitud:

Constante psicrométrica " γ "

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad 7)$$

Dónde:

| | | |
|---------------|---|--|
| γ | Constante psicrométrica | (kPa °C ⁻¹) |
| λ | Calor latente de vaporización | (2.45 MJ kg ⁻¹) |
| c_p | Específico a presión constante | (1.013 x 10 ⁻³ MJ kg ⁻¹ °C ⁻¹) |
| ε | Cociente del peso molecular de vapor de agua /aire seco | (0,622) |
| P | Presión atmosférica, calculada con: | (kPa) |

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \quad 8)$$

Dónde:

| | | |
|-----|-------------------------------|--------|
| z | Altura sobre el nivel del mar | (MSNM) |
|-----|-------------------------------|--------|

Pendiente de la curva de presión de saturación de vapor " Δ "

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27 T}{T + 273.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad 9)$$

Dónde:

| | | |
|----------|---|-------------------------|
| Δ | Pendiente de la curva de presión de vapor | (kPa °C ⁻¹) |
| T | Temperatura media del aire | (°C) |

Déficit de presión de vapor del aire "(e_s - e_a) "

$$e_s = \frac{e^o(T_{\max}) + e^o(T_{\min})}{2} \quad 9)$$

Dónde:

| | | |
|----------------|---|-------|
| e _s | Presión media de vapor de saturación | (kPa) |
| e ^o | Presión de saturación de vapor a la temperatura máxima y mínima | (kPa) |

Obtenida por:

$$e^o(T) = 0.6108 \exp\left[\frac{17.27 T}{T + 273.3}\right] \quad 10)$$

Dónde:

| | | |
|---|---|------|
| T | Temperatura máxima o mínima del aire según se calcule e ^o (Tmax) o e ^o (Tmin), respectivamente. | (°C) |
|---|---|------|

$$e_a = \frac{HR_{media}}{100} e^o(T_{media}) \quad 11)$$

Dónde:

| | | |
|--------------------------------------|--|-------|
| e _a | Presión real de vapor | (kPa) |
| HR _{media} | Humedad relativa media diaria | (%) |
| e ^o (T _{media}) | Presión de saturación de vapor calculado con la temperatura media del aire | (kPa) |

Radiación neta "R_n"

La radiación solar medida es la radiación incidente o la radiación de entrada. Parte de esta radiación se pierde al ser absorbida, reflejada o re-emitada por la superficie terrestre, constituyendo la diferencia entre la radiación entrante y saliente la radiación neta. Esta radiación neta "Rn" se calcula a partir de la radiación neta

de onda corta "Rns" y la radiación neta de onda larga "Rnl", ambas en MJ m⁻² día⁻¹:
 $R_n = R_{ns} - R_{nl}$.

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (12)$$

Dónde:

α Albedo o coeficiente de reflexión del cultivo (0.23)
 (para el cultivo de referencia).

R_s Radiación solar incidente medida. (MJ m⁻² día⁻¹).

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left[1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35 \right] \quad (13)$$

Dónde:

σ Constante de Stefan-Boltzmann (4.903 x 10⁻⁹ MJ °K⁻⁴ m⁻² día⁻¹).

$T_{\max,k}$ Temperatura máxima absoluta durante un periodo de 24 horas (°K).

$T_{\min,k}$ Temperatura mínima absoluta durante un periodo de 24 horas (°K).

e_a Presión de vapor real (kPa).

R_s / R_{so} Radiación relativa de onda corta (valores < 1,0):

R_s Radiación solar incidente medida (MJ m⁻² día⁻¹)

R_{so} Radiación solar en un día despejado o radiación solar máxima potencial, la cual se calcula mediante:

$$R_{so} = (0.75 + 2 \times 10^{-5} z) R_a \quad (14)$$

Dónde:

z Altura sobre el nivel del mar (MSNM).

R_a Radiación extraterrestre que a su vez viene dada por: (MJ m⁻² día⁻¹)

$$R_a = \frac{24 \times 60}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (13)$$

Dónde:

| | | |
|------------|---|--|
| G_{sc} | Constante solar | (0.082 MJ m ⁻² min ⁻¹). |
| d_r | Distancia relativa inversa Tierra-Sol, | |
| ω_s | Ángulo de radiación a la puesta del sol | (rad) |
| φ | Declinación solar | (rad) |
| δ | Latitud | (rad) |

Los valores de d_r , ω_s y δ , fueron calculados por las siguientes ecuaciones:

$$d_r = 1 + 0.033 \times \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad 14)$$

$$\delta = 0.409 \times \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad 15)$$

$$\omega_s = \frac{\pi}{2} - \arctan[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad 16)$$

Dónde:

J Día juliano del año (1 a 365)

Para el cálculo de la ETo por este método a escala diaria se ha empleado la información (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento a 2 metros del suelo y radiación solar) recogida por las estaciones meteorológicas en el lugar de estudio. Considerando las recomendaciones sugeridas por Smith (1991), Monteith y Unsworth (1990) y Campbell (1977).

5.6. Precipitación efectiva

En el mundo la fuente primaria de agua para la producción agrícola es la lluvia, que se caracteriza por su cantidad, frecuencia e intensidad. Valores que cambian en tiempo y espacio. El conocimiento preciso de estas tres principales características es esencial para planear su utilización completa (Dastane, 1978).

No toda la lluvia que cae es efectiva, una parte puede perderse por escurrimiento superficial, percolación profunda o evaporación, solo una porción de una lluvia pesada y de alta intensidad puede infiltrarse y almacenarse en la zona radical y consecuentemente la efectividad es baja. Lluvias ligeras y frecuentes interceptadas por el follaje con cobertura completa tienen una efectividad cercana al 100%. Con una superficie de suelo seco y sin cobertura vegetal, una lluvia mayor de 8 mm/día puede perderse por evaporación, lluvias de 25 a 30 mm tienen una efectividad del 60% (Serna et al 2011).

Existen varios métodos para estimar e interpretar lo que se considera como la precipitación efectiva es por eso que es difícil crear una definición que satisfaga a todas las disciplinas interesadas (Dastane, 1978). Hayes y Buell (1955) indicaron que la precipitación efectiva es la cantidad que está disponible para el crecimiento de la planta y esta cantidad es igual a la precipitación total menos la evaporación y la escorrentía. Ogrosky y Mockus (1964) definieron la precipitación efectiva como la lluvia total durante la época de crecimiento menos lo que escurra después de la saturación del suelo o riego, cuando el agua adicional se pierde por la filtración profunda o por escorrentía. Hershfield (1964) definió la precipitación efectiva "Pe" como aquella parte de la lluvia total durante la época de crecimiento la cual está disponible para encontrar los requerimientos del uso consuntivo del agua de un cultivo.

Las plantas utilizan únicamente una fracción del agua que cae en la superficie en forma de lluvia, parte de esta agua se infiltra a través de la superficie y parte fluye sobre el suelo en forma de escorrentía superficial. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo. Del total del agua que se infiltra, parte se percola por debajo de la

zona de raíces, mientras que el resto se almacena en dicha zona y se puede utilizar por las plantas a esta cantidad se le conoce como precipitación efectiva.

La precipitación efectiva se puede definir como esa fracción de la lluvia que estará realmente disponible para satisfacer al menos parte de las necesidades de agua por plantas. Este valor se puede determinar por experimentos o se estima por medio de ecuaciones empíricas.

Por otra parte (Brouwer, et al., (1985), argumentan que muchos factores influyen en la cantidad de la precipitación efectiva. Hay factores en los cuales el agricultor no puede influir como lo son el clima y la textura del suelo y aquellos en los cuales el agricultor si puede influir como la estructura del suelo.

Palacios (1989) desarrolló un modelo en base a observaciones de intensidad de precipitación en tres zonas diferentes de México, dedujo varias ecuaciones que permiten estimar la cantidad de lluvia aprovechable de una tormenta dentro de un distrito de riego. Estas ecuaciones son para utilizarse en distritos de riego, bajo la suposición de que la lluvia ocurre sin otros antecedentes; sin embargo, se puede utilizar este método para la estimación de la Pe en periodos cortos, como máximo 10 días, por lo tanto se requiere información de la lluvia diaria.

En varios lugares se han desarrollado distintos modelos para determinar localmente la precipitación efectiva. Tales ecuaciones toman en cuenta los factores como la intensidad de la lluvia, la topografía, el tipo de suelo, evaporación, clima etc.

Serna et al (2011) desarrollo un modelo empírico mediante funciones empíricas derivadas de análisis estadísticos y las condiciones climáticas de Zacatecas ya que por ser una zona árida y semiárida presenta altos valores de evaporación y se utiliza la siguiente expresión matemática para el cálculo de la Pe .

$$\begin{array}{ll} Pe = Pp * 0.75 & \text{Sí } Pp > 5\text{mm} \\ Pe = 0 & \text{Sí } Pp < 5\text{mm} \end{array} \quad 17)$$

5.7. Características del cultivo

5.7.1. Etapas de crecimiento del cultivo

En el manual 56 publicado por la FAO (*Allen et al., 2006*) menciona que a medida que el cultivo se desarrolla, tanto el área del suelo cubierta por la vegetación como la altura del cultivo y el área foliar variarán progresivamente. Debido a las diferencias en evapotranspiración que se presentan durante las distintas etapas de desarrollo del cultivo, el valor de K_c correspondiente a un cultivo determinado, también variará a lo largo su período de crecimiento del mismo. Este período de crecimiento puede ser dividido en cuatro etapas: inicial, de desarrollo del cultivo, de mitad de temporada y de final de temporada.

Etapas inicial

La etapa inicial está comprendida entre la fecha de siembra y el momento que el cultivo alcanza aproximadamente el 10% de cobertura del suelo. La longitud de la etapa inicial depende en gran medida del tipo de cultivo, la variedad del mismo, la fecha de siembra y del clima. El final de la etapa inicial ocurre cuando la vegetación verde cubre aproximadamente un 10% de la superficie del suelo. Para cultivos perenes, la fecha de siembra es reemplazada por el momento en que aparecen las primeras hojas.

Etapas de desarrollo del cultivo

La etapa de desarrollo del cultivo está comprendida desde el momento en que la cobertura del suelo es de un 10% hasta el momento de alcanzar la cobertura efectiva completa. Para una gran variedad de cultivos, el estado de cobertura completa ocurre al inicio de la floración. Para cultivos en hileras, donde en las hileras se presenta comúnmente el traslape entre las hojas.

Otra manera de definir la ocurrencia de la cobertura completa es cuando el índice del área foliar (IAF) alcanza un valor de tres. (Se define como IAF a la suma del área total de las hojas (un solo lado), por unidad de área de la superficie del suelo).

A medida que el cultivo se desarrolla y sombrea cada vez más el suelo, la evaporación se verá cada vez más restringida y la transpiración gradualmente se

convertirá en el proceso más importante. Durante la etapa de desarrollo del cultivo, el valor de K_c se corresponderá con la cantidad de la cobertura del suelo y el desarrollo de la planta. En general, si la superficie del suelo se encuentra seca, un valor de $K_c = 0.5$ se corresponderá con un valor de 25-40% de cobertura del suelo debido a los efectos del sombreado y debido al transporte en micro-escala del calor sensible desde el suelo hacia la vegetación. Un valor de $K_c = 0.7$ generalmente se corresponderá con una cobertura del suelo de alrededor de 40-60%. Estos valores variarán dependiendo del cultivo, la frecuencia del humedecimiento y de si el cultivo utiliza más agua que el cultivo de referencia del pasto, cuando se encuentra en condiciones de cobertura completa (dependiendo de la arquitectura de la vegetación y la altura del cultivo en relación con el pasto de referencia).

Etapa de media temporada

La etapa de media temporada comprende el período de tiempo entre la cobertura completa o después de que el K_c llega a su valor máximo hasta el comienzo de la madurez. El comienzo de la madurez está indicado generalmente por el comienzo de la vejez, amarillamiento o senescencia de las hojas, caída de las hojas, o la aparición del color marrón en el fruto, hasta el grado de reducir la evapotranspiración del cultivo en relación con la E_{To} de referencia. La etapa de media temporada representa la etapa mas larga para los cultivos perenes y para una gran variedad de cultivos anuales, siendo relativamente corta para los cultivos hortícolas que son cosechados frescos.

Durante la etapa de media temporada, el coeficiente K_c alcanza su valor máximo. El valor de K_c en esta etapa (K_c med) es relativamente constante para la mayoría de los cultivos y prácticas culturales. La diferencias entre el valor de K_c med con respecto al valor de referencia '1', son debidas principalmente a las diferencias en la altura del cultivo y la resistencia, entre la superficie del pasto de referencia y el cultivo agrícola, además de diferencias en las condiciones climáticas (Allen et al 2006).

Etapas de fin de temporada

La etapa final o tardía de crecimiento comprende el período entre el comienzo de la madurez hasta el momento de la cosecha o la completa senescencia. Se asume que el cálculo de los valores de K_c y ET_c finaliza cuando el cultivo es cosechado, secado al natural, alcanza la completa senescencia o experimenta la caída de las hojas.

El valor de K_c al finalizar la etapa final (K_c fin) refleja el efecto de las prácticas de cultivo y el manejo del agua. Si el cultivo es regado frecuentemente hasta el momento de su cosecha en fresco, el valor de K_c fin será alto. Si se permite la senescencia y secado del cultivo en el campo antes de la cosecha, el valor de K_c final será bajo. El estado de senescencia es generalmente asociado a una conductancia menos eficiente de los estomas debido a los efectos del envejecimiento, lo que causa una reducción en el valor de K_c .

5.7.2. Coeficiente del cultivo

Durante el período de crecimiento del cultivo, la variación del coeficiente del cultivo K_c expresa los cambios en la vegetación y en el grado de cobertura del suelo reflejada en la cantidad de agua que la planta extrae del suelo desde la siembra hasta la cosecha. Esta variación del coeficiente K_c a lo largo del crecimiento del cultivo está representada por la curva del coeficiente del cultivo. (Figura 2) Para describir y construir la curva del coeficiente del cultivo se necesitan solamente tres valores de K_c : los correspondientes a la etapa inicial (K_c ini), la etapa de media temporada (K_c med) y la etapa final (K_c fin).

Para que dicha curva esté bien definida son necesarios los valores del tiempo de desarrollo ya sea en días o como fracción del ciclo vegetativo en los puntos B, C, y D. Y la fecha de cosecha punto E que en fracción de desarrollo se representa 1. (FAO, 1977).

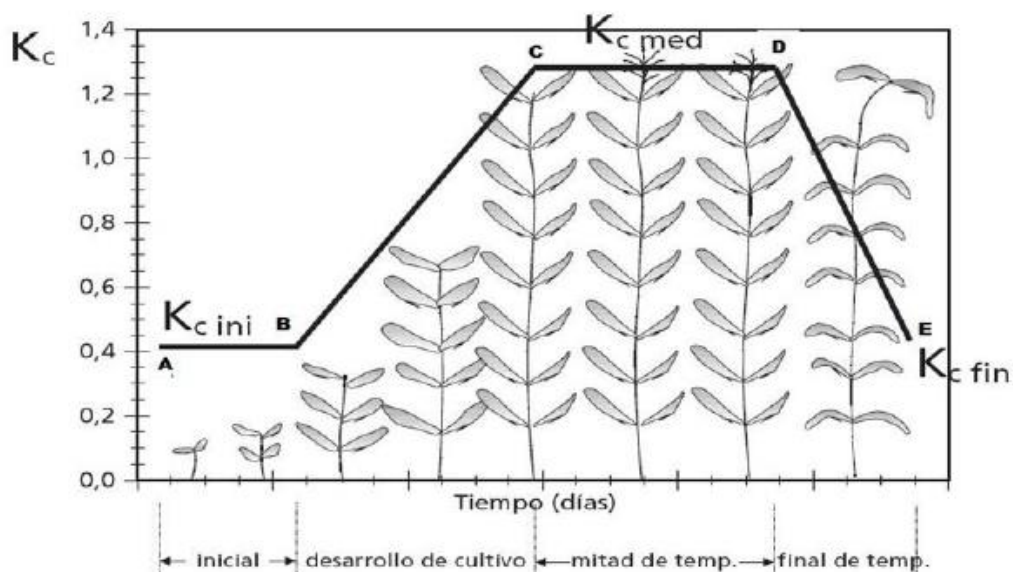


Figura 2. Curva generalizada del coeficiente de cultivo K_c . Fuente: FAO (1977).

Coeficientes del cultivo FAO (1977)

La Figura 2 muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva K_c de un cultivo. Tres valores de K_c : K_{cini} , K_{cmed} y K_{cfin} , así como la duración en días o como fracción del ciclo vegetativo total en los puntos B, C, y D. En el Cuadro 1 se presentan tales valores para varios cultivos, donde la duración del ciclo en los puntos B, C y D se expresan como fracciones acumuladas del ciclo vegetativo (FAO, 1977).

Cuadro 1. K_c para diversos cultivos (FAO 1977).

| Cultivo | Punto | Fracción de ciclo vegetativo | Coeficientes del cultivo | |
|---------|-------|------------------------------|--------------------------|------------|
| | | | K_{cini} | K_{cmed} |
| Ajo | B | 0.11 | K_{cini} | 0.70 |
| | C | 0.28 | K_{cmed} | 1.00 |
| | D | 0.78 | K_{cfin} | 0.75 |
| Chile | B | 0.19 | K_{cini} | 0.60 |
| | C | 0.44 | K_{cmed} | 1.05 |
| | D | 0.81 | K_{cfin} | 0.60 |
| Frijol | B | 0.18 | K_{cini} | 0.40 |
| | C | 0.45 | K_{cmed} | 1.10 |
| | D | 0.82 | K_{cfin} | 0.55 |
| Maíz | B | 0.2 | K_{cini} | 0.60 |
| | C | 0.47 | K_{cmed} | 1.05 |
| | D | 0.8 | K_{cfin} | 0.45 |

Coeficientes de cultivo Agrimet

Agrimet, es una red basada en estaciones agrometeorológicas automatizadas, ubicadas en las zonas agrícolas de riego en el noroeste de Estados Unidos y se dedican a la modelación regional del uso de agua en los cultivos, la investigación agrícola, monitoreo de heladas, y manejo integrado de plagas y manejo de la fertilidad. Administradas por la Universidad Estatal de Washington.

Agrimet divide la curva del cultivo en 21 puntos, que van de 0 a 200% de la etapa de crecimiento. El valor cero representa típicamente emergencia de la planta, 100% representa normalmente la cubierta completa; y 200% representa la cosecha. Para formar la curva utiliza la fecha de inicio, fecha de cobertura completa y fecha de cosecha. A continuación se presenta la información de las curvas de coeficiente de cultivo utilizados por Agrimet Figura 5, 6 y 7.

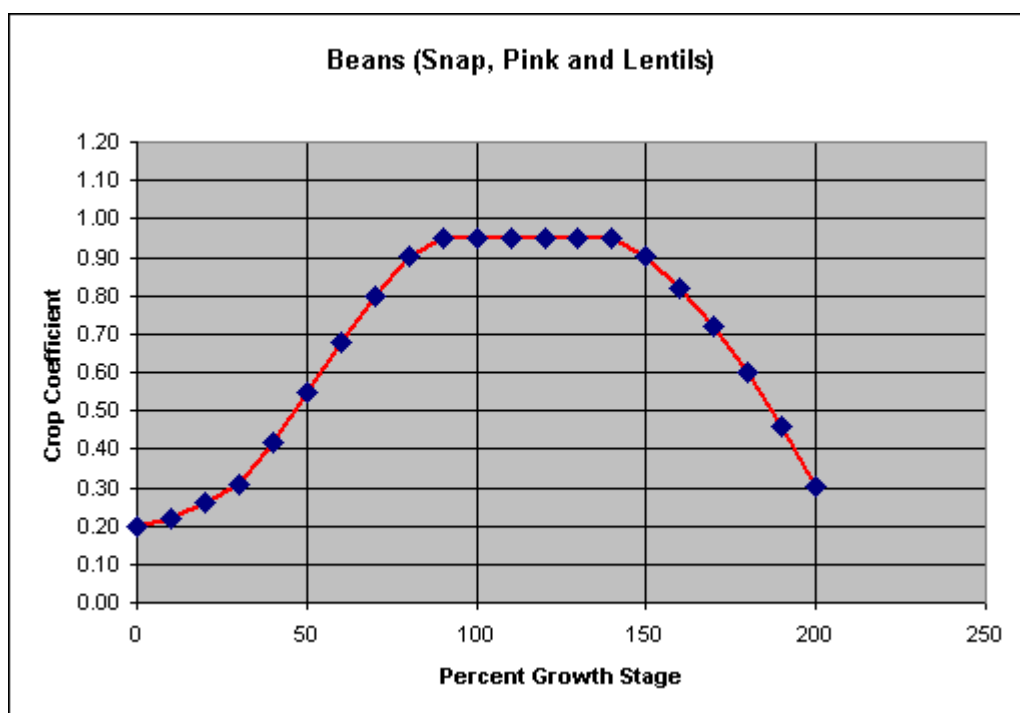


Figura 3.- Curva de Kc de frijol (Agrimet)

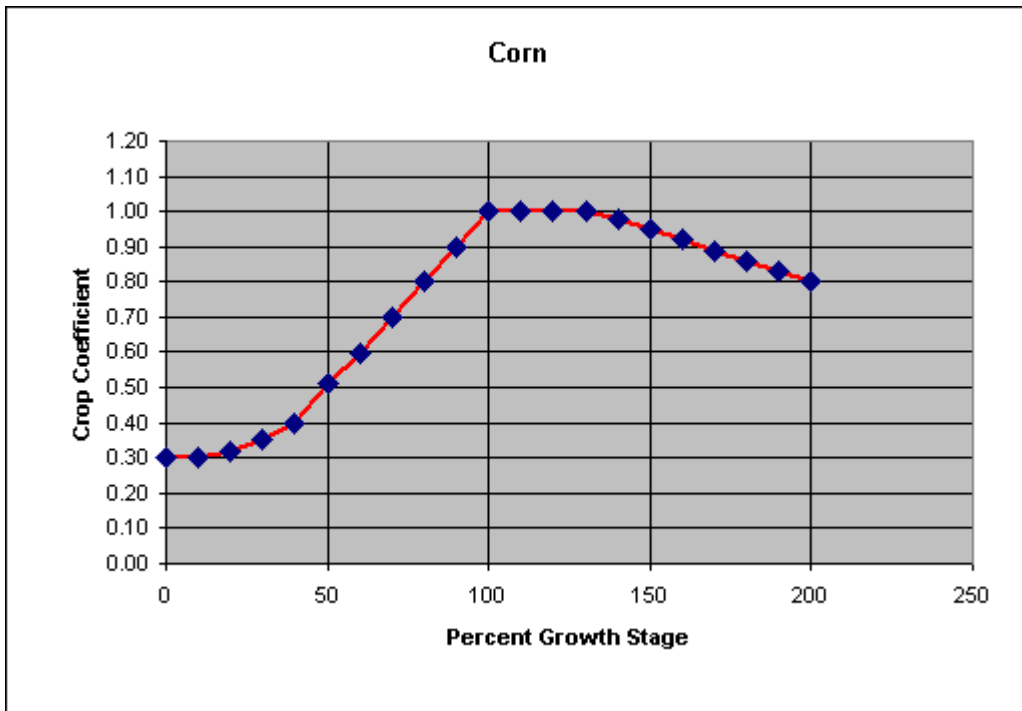


Figura 4.- Curva de Kc de maíz (Agrimet)

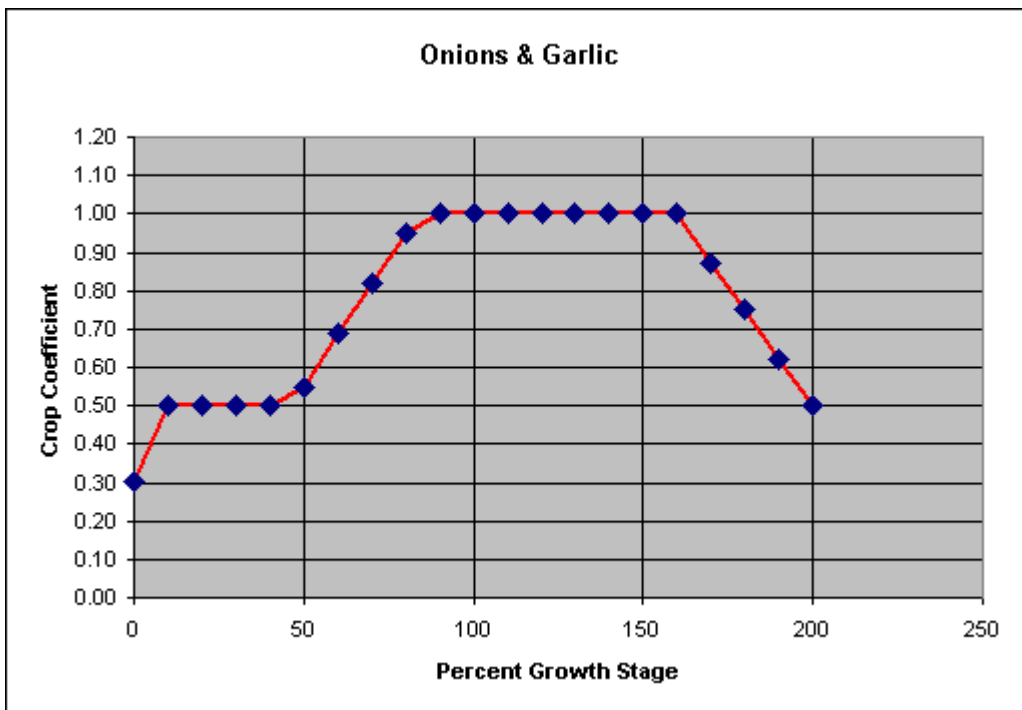


Figura 5.- Curva de Kc de Ajo y Cebolla (Agrimet)

Coeficientes del cultivo locales

Bravo et al (2006) Reporto los coeficientes de los principales cultivo establecidos en el estado de Zacatecas, Que son el resultado de varios años de investigación, ajustados de acuerdo a las condiciones ambientales y desarrollo de los cultivos en la región.

Cuadro 2.- Valores de (kc) para diferentes etapas fenológicas del cultivo.

| Etapa fenológica del cultivo | | | | |
|------------------------------|-------------|-------------|-----------------------|-------------|
| Cultivo | Crecimiento | Desarrollo* | Crecimiento del fruto | Senescencia |
| Chile | 0.4 | 0.75 | 0.85 | 0.6 |
| DDT** | 0 - 40 | 40 - 90 | 90 - 120 | 120-150 |
| Ajo | 0.3 | 0.6 | 0.8 | 0.6 |
| DDS*** | 0-80 | 80-120 | 120-180 | 180-210 |
| Frijol | 0.4 | 0.7 | 0.9 | 0.6 |
| DDS | 0-40 | 40-70 | 70-110 | 110-130 |
| Maíz | 0.4 | 0.7 | 1 | 0.8 |
| DDS | 0-40 | 40-80 | 80-120 | 120-150 |

*Etapa desde desarrollo hasta floración y formación de fruto

**Días después del trasplante

***Días después de siembra

5.7.3. Evapotranspiración del cultivo

El conocimiento de la Evapotranspiración del Cultivo (ET_c) es la clave para cuantificar el requerimiento de riego de los cultivos y está en función de las condiciones meteorológicas, del grado de desarrollo vegetativo y bajo condiciones de disponibilidad de agua, y representa las necesidades hídricas potenciales de un cultivo, se calcula por medio del producto del coeficiente del cultivo (K_c) y la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_o) (Allen et al., 2006).

$$ET_c = K_s * K_c * ET_o \quad 18)$$

Donde ET_c es la evapotranspiración del cultivo (mm dia^{-1}) K_c es un coeficiente de cultivo adimensional y ET_o es la evapotranspiración de referencia

(mm día⁻¹) y K_s es un coeficiente adimensional por efecto del agua residual almacenada en el suelo, por ser una zona de riego y se prevé que la plantas no se someta a estrés hídrico su valor es 1.

Los efectos de las características que distinguen al cultivo de referencia están incorporados en el coeficiente del cultivo K_c que es específico de cada cultivo y depende de su estado de desarrollo y resistencia aerodinámica por lo cual varía en el tiempo y expresa el grado de similitud entre la superficie vegetal del cultivo y el cultivo de referencia. Sus valores se obtienen empíricamente a partir de datos experimentales (Doorenbos y Pruitt, 1977; Annandale y Stockle, 1994).

5.7.4. Profundidad radicular

En la programación del riego siempre es importante conocer la profundidad radical. La profundidad del suelo de la que un cultivo extrae agua, corresponde a la profundidad efectiva de sus raíces, para un cultivo dado, esta profundidad varía con la etapa de desarrollo. Las raíces no extraen el agua uniformemente del perfil del suelo explorado. En un suelo uniforme los patrones de extracción de humedad varían de acuerdo con el cultivo, y las condiciones de humedad del suelo.

La profundidad efectiva de un suelo es el espacio en el que las raíces de las plantas comunes pueden penetrar sin mayores obstáculos, con vistas a conseguir el agua y los nutrimentos indispensables. Tal información resulta ser de suma importancia para el crecimiento de las plantas. La mayoría de las últimas pueden penetrar más de un metro, si las condiciones del suelo lo permiten.

La profundidad de la raíz (P_r) en función del tiempo también es un aspecto importante, ya que conforme aumenta su profundidad también aumenta el perfil de suelo que hay que humedecer en el cuadro 3 se muestra las profundidades máximas para algunos cultivos.

Cuadro 3.- Rangos de profundidad máxima efectiva de las raíces

| Cultivo | Profundidad radicular máxima (m) |
|----------------|---|
| Chile | 0.7-1.0 |
| Maíz | 1.0-1.7 |
| Frijol | 0.6-0.9 |
| Ajo | 0.3-0.5 |

En las plantas el 40 % del agua extraída se absorbe en el primer cuarto de profundidad y en el segundo cuarto el 30%, de forma que un 70 % del agua absorbida se extrae en la mitad más superficial de la zona radicular. El agua se agota con mayor rapidez en las capas más superficiales, cuando se agota ésta la planta extrae el agua de capas más profundas, para ello necesita desarrollar su sistema radicular. Conviene, en consecuencia, reponer el agua absorbida en la zona superficial que es donde el sistema radicular alcanza mayor desarrollo y donde mayor es la extracción.

5.7.5. Abatimiento de humedad aprovechable como criterio de riego

La aplicación de un riego se realiza cuando el contenido de humedad del suelo disminuye hasta un valor crítico (θ_c) que determina el grado de estrés hídrico máximo al que se somete el cultivo. Por lo regular, este valor se estima en la escala de la humedad aprovechable, donde el punto de marchites permanente (θ_{PMP}) y capacidad de campo (θ_{CC}) representan el cero y 100 por ciento de la humedad aprovechable (HA) respectivamente. Se utiliza una fracción o porcentaje de abatimiento máximo de la humedad aprovechable FAM:

$$\theta_c = \theta_{CC} - \frac{FAM}{100} (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) \quad (19)$$

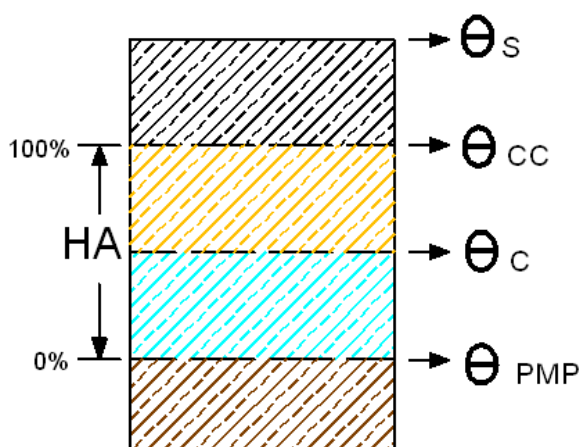


Figura 6. Representación gráfica de la humedad aprovechable del suelo.

Según la ecuación del balance de agua en el suelo (Ecu. 20), el contenido de agua del suelo en un día particular, θ_i , se estima con base en el contenido de agua del día previo, θ_{i-1} , y el resto de los términos de la Ec. (4) estimados para el día actual, a excepción de la escorrentía, no considerada aquí:

$$\theta_i = \theta_{i-1} + R_i + Pe_i - ETc_i - D_i \quad 20)$$

Donde:

| | | |
|----------------|---|-------------------------|
| θ_i | Contenido de agua del suelo en un día particular | (mm día ⁻¹) |
| θ_{i-1} | Contenido de agua del día previo | (mm día ⁻¹) |
| R_i | Riego del día particular | (mm día ⁻¹) |
| P_i | Precipitación efectiva del día particular | (mm día ⁻¹) |
| ET_i | Evapotranspiración del cultivo del día particular | (mm día ⁻¹) |
| D_i | Drenaje de un día particular se considera "0" | (mm día ⁻¹) |

Luego se compara θ_i con θ_c para decidir si se aplica un riego o no. Si θ_i es menor que θ_c , entonces el cultivo debe regarse el día siguiente, si no, se actualizan cada uno de los términos de la Ec. (20) para el día siguiente y se compara nuevamente θ_i con θ_c . La cantidad de agua por aplicar R , comúnmente denominada como lámina de riego (L_r), puede calcularse como el producto de HA y FAM , o bien como:

$$L_r = (\theta_{cc} - \theta_c) Pr \quad 21)$$

Dónde: Pr es la profundidad radicular (m).

El θ_c . Para los sistemas de riego por goteo no son relevantes y se asume valores no mayores de 30% de abatimiento ya que de no ser así el riego por goteo pierde sus bondades de frecuentes y ligeros. Para riego por gravedad en hortalizas se maneja abatimientos de 45-55% y Maíz se maneja hasta 65%, ya que después

de estos valores el estrés toma un papel predominante en el consumo de agua por la planta.

5.8. Constantes de humedad del suelo

El suelo es un medio poroso definido como un cuerpo natural formado de partículas minerales no consolidadas e intemperizadas mezcladas algunas veces con residuos de materia orgánica provenientes de plantas en descomposición diferenciados en horizontes de morfología definida debido a las fuerzas del intemperismo que cubre una capa de gran parte de la superficie de la tierra y soporta a la vegetación en grado variable.

El suelo constituye el segmento clave del trayecto para el movimiento del agua dentro del ciclo hidrológico. El escurrimiento superficial y los niveles del agua en el suelo, son influenciados por su capacidad de almacenamiento. El almacenamiento del agua en el suelo es el factor más importante para determinar el manejo del riego y el uso del agua por las plantas. A continuación se describen los estados del agua en el suelo.

5.8.1 Capacidad de campo

La capacidad de campo (θ_{CC}) de un suelo es usualmente descrita como el contenido de agua después que el drenaje de agua por flujo gravitacional es tan pequeño que llega a ser relativamente estable. Esta situación generalmente ocurre algunos días después que el suelo haya sido totalmente humedecido por lluvia o riego.

La capacidad de campo se determina simplemente vertiendo agua en la superficie del suelo y dejándola drenar por unos cuatro a 10 días (dependiendo del tipo de suelo), previniendo la evaporación de la superficie. Las muestras de suelo son luego recolectadas con barrena para su medición gravimétrica y el contenido de agua es expresado en bases volumétricas. Determinado de esta manera, el valor de capacidad de campo es reproducible si se tiene en cuenta no muestrear en zonas de transición. Debido a que la capacidad de campo es afectada por la

estructura del suelo, las determinaciones de laboratorio no son siempre indicadores confiables del valor de campo.

5.8.2. Punto de marchitamiento permanente

El punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) es el contenido de agua del suelo que ocurre cuando la planta se marchita y no recupera su turgencia por más que se riegue.

Briggs y Shantz (1912) enfatizaron primero la importancia de esta constante de agua en el suelo, denominándola como coeficiente de marchitez. Ellos efectuaron mediciones en varios tipos de plantas y encontraron que todas se marchitaron en alrededor del mismo contenido de agua del suelo.

Richards y Wadleigh (1952) encontraron que la mayoría de las plantas cultivadas tienen potenciales osmóticos en el rango de -14 a -18 bares, de tal manera que para propósitos prácticos el contenido de agua en -15 bares es un valor generalmente usado como la mejor aproximación del contenido de agua en el suelo en el punto de marchitez permanente.

Estimación indirecta de la función de retención y las constantes de humedad del suelo.

La determinación de la función de retención es una tarea lenta y costosa, razón por la cual rara vez se dispone de dicha información. Es por esto que se han desarrollado algunos modelos para predecir la función de retención a partir de propiedades del suelo más fácilmente medibles y disponibles. El análisis de amplias bases de datos medidos en laboratorio y campo han permitido, en las últimas décadas, el establecimiento de relaciones funcionales denominadas "Pedotransfer functions" (PTF) para predecir la función de retención en función de datos básicos del suelo como la distribución de sus partículas por tamaño o textura, contenido de materia orgánica y densidad aparente (Bouma, 1989).

5.8.3. Humedad aprovechable

A la cantidad de agua retenida en el suelo entre los valores de capacidad de campo (θ_{CC}) (entre -0.1 y -0.3 bars) y punto de marchitez permanente (θ_{PMP}) (-15 bars) se le conoce como humedad aprovechable (HA). Se refiere a la máxima cantidad de agua que puede retener el perfil del suelo ocupado por las raíces de las plantas (Pr). Regularmente se estima como una lámina o espesor de agua:

$$HA = (\theta_{CC} - \theta_{PMP}) Pr \quad 22)$$

Donde θ_{CC} y θ_{PMP} se expresan en m^3 de agua por m^3 de suelo, HA y Pr en metros. El Cuadro 9 muestra valores promedio del contenido de humedad a saturación (θ_s), θ_{CC} , θ_{PMP} y HA para cada tipo de textura y a un metro de profundidad del suelo, los cuales fueron derivados de Saxton *et al.* (1986). Como puede notarse, los suelos de textura fina tienen mayor HA que los de textura gruesa Cuadro 4.

Cuadro 4. Constantes de humedad por tipo de suelo.

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

VI. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se realizó en las instalaciones Campo Experimental Zacatecas (CEZAC) del INIFAP, localizado en el kilómetro 24,5 de la carretera Zacatecas-Fresnillo.

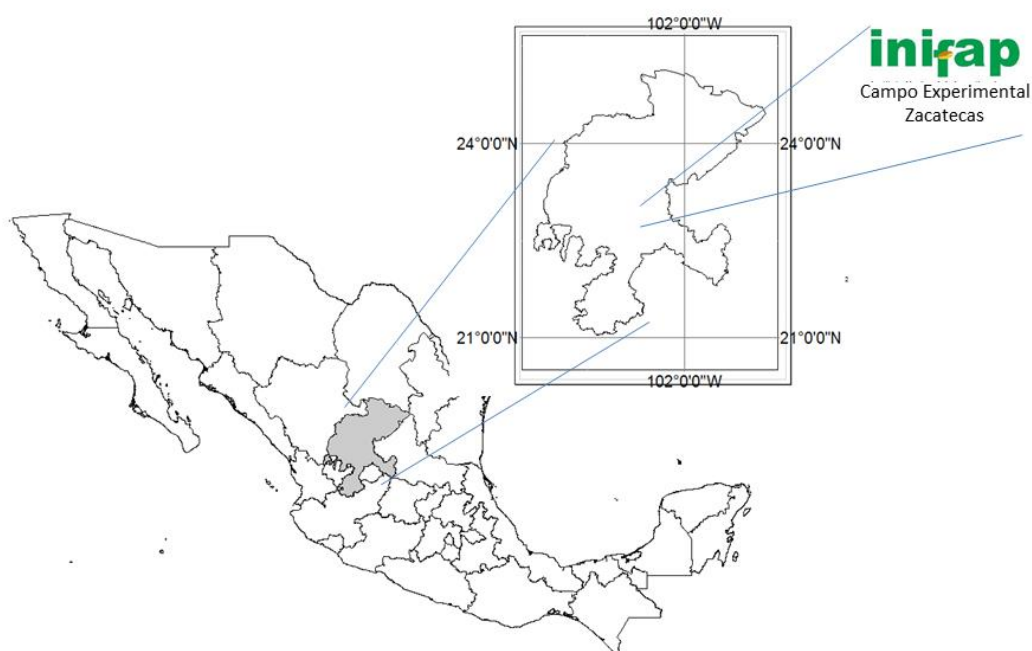


Figura 7. Localización del CEZAC INIFAP.

6.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN CLIMÁTICA

Con el propósito de tener un conocimiento de las condiciones del clima en relación con el desarrollo de los cultivos y su manejo, en el año 2002 se implementó el proyecto “Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas”, gracias al esfuerzo conjunto del INIFAP, Gobierno del Estado y Gobierno Federal a través de la Fundación Produce Zacatecas, A. C.

La red cuenta con 36 estaciones climáticas automáticas distribuidas como se muestra en la Figura 8. Cada una cuenta con sensores para medir la temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, dirección y velocidad del viento, radiación

solar y humedad de la hoja. La medición de las condiciones del estado del tiempo se realiza cada 15 minutos y los datos son transmitidos a la base central en el Campo Experimental Zacatecas (Medina *et al.*, 2007).

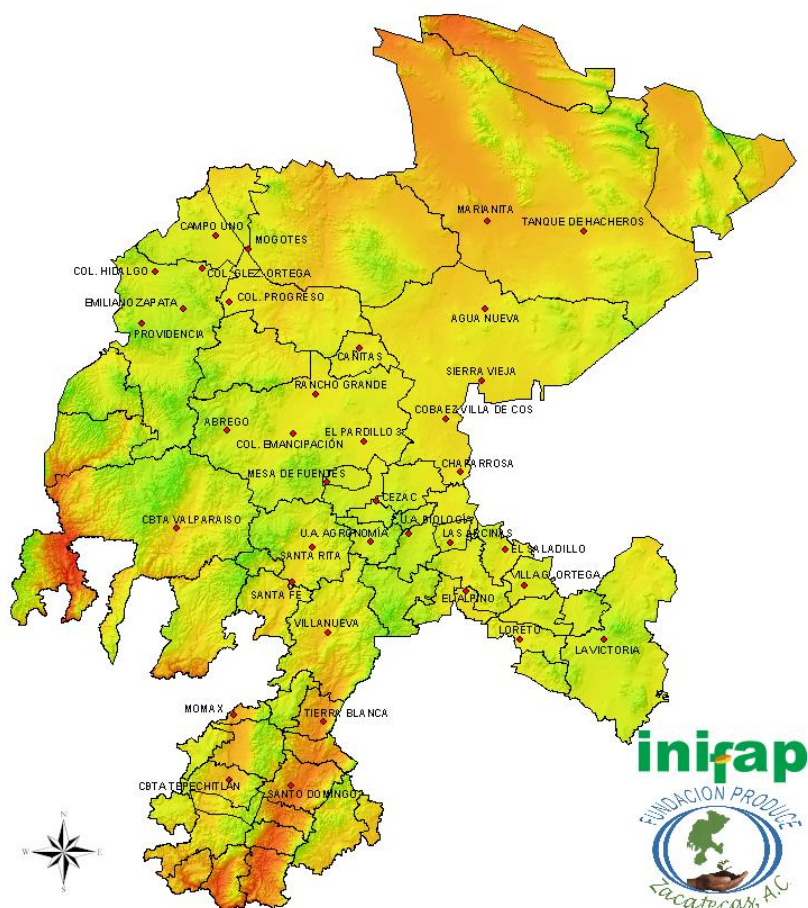


Figura 8. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas.

6.2.1. Descripción de la red de estaciones

Esta red provee al estado de Zacatecas de información meteorológica en línea y en tiempo real, mediante una plataforma Adcon que es un sistema totalmente integrado para la adquisición, transmisión, almacenamiento, procesamiento, distribución y visualización de datos climáticos Figura 9.

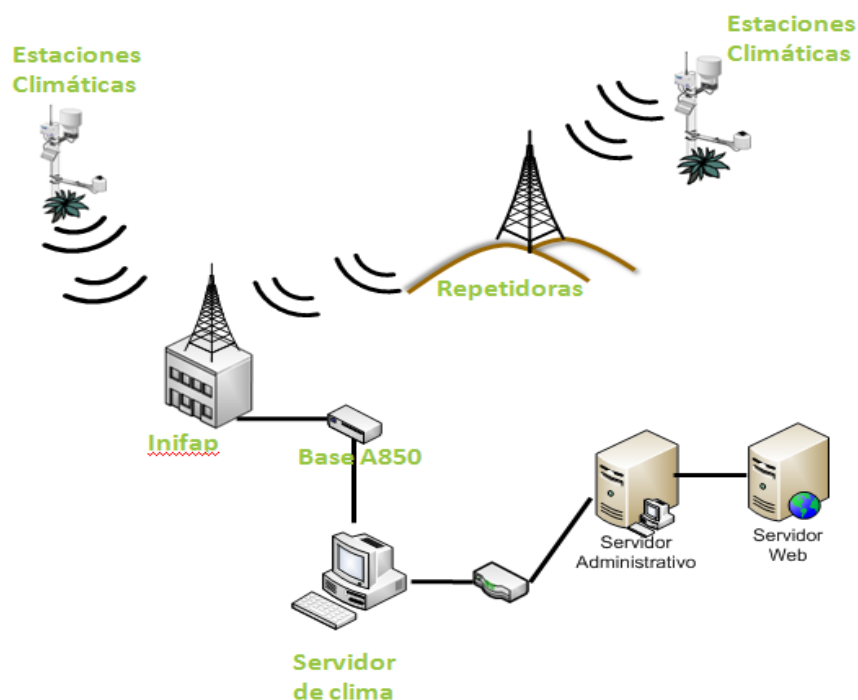


Figura 9.- Componentes de una red de estaciones agroclimáticas Adcon

El sistema de adquisición de datos de Adcon está formado por componentes hardware y software.

Los componentes hardware son:

- Computadora (PC)
- Receptor A730SD (Radio Data Logger – RDL)
- Las estaciones de medición remota (dispositivos) A730MD, addWAVE A733 y/o addIT A720
- Sensores y actuadores
- Componentes suplementarios (antenas, cables, mástiles, etc.)

El software está compuesto por:

- El programa addVANTAGE (kernel)
- Extensiones específicas para cada aplicación
- Utilidades para mantenimiento y configuración

Cada equipo envía sus datos a un servidor central donde el software addVANTAGE almacena y procesa los datos. El mismo software administra el acceso libre o público por medio del módulo rsync.

BASE ADCON 850

- Recibe los datos de las estaciones climáticas cada 15 minutos.
- Configura los sensores de las estaciones, su identificador, su ruta (si se viene por repetidoras), permite hacer pings para saber el estado de las estaciones.
- Trabaja bajo un pequeño núcleo de Linux.
- A ella se conecta el servidor de clima mediante Telnet o un configurador (desarrollado en java), que permite controlar en núcleo de Linux.

El servidor de clima:

- Contiene los programas que permiten el manejo de las estaciones climáticas.
- Configurator: Desarrollado en java, permite configurar los sensores de las estaciones, sus rutas, y datos necesario.
- addAvantage Pro: Desarrollado en java web services, permite conocer en tiempo real los datos que están mandando las estaciones gráficamente, además de que los guarda en una base de datos IBM.
- a2a: Desarrollado en java, permite crear archivos de texto por cada estación, a partir de cierta fecha, y con los datos de cada 15 minutos de la estación.
- Mediante rsync comparte los archivos de texto generados con el servidor web para ser manipulados y guardados en la base de datos postgresSQL para su publicación en internet.

6.2.2. Lenguajes de programación utilizados

El lenguaje de programación que se utilizó para el desarrollo del sistema en plataforma WEB fue PHP (*Hypertext Pre-processor*) que, junto con HTML, permite crear sitios WEB, que pueden utilizarse en cualquier computadora de escritorio o portátil conectada a internet.

PHP.- Es un lenguaje de programación muy potente que, junto con html, permite crear sitios web dinámicos. Permite la conexión a numerosas bases de datos, incluyendo MySQL, Oracle, ODBC, etc. y puede ser ejecutado en la mayoría de los sistemas operativos (Windows, Linux, Unix).

PostgreSQL.- Es un manejador de bases de datos objeto-relacional; es libre y su código fuente completo está disponible.

Javascript.- es un lenguaje de scripting basado en objetos, utilizado para acceder a objetos en aplicaciones.

Spry.- El Spry framework para Ajax está compuesto por librerías Javascript para proveer funcionalidades en el diseño Web. Los Spry de datos permiten mostrar datos desde un XML.

6.2.3. Método de balance hídrico climático

Para iniciar con el balance hídrico se requirió determinar el inicio del periodo de riego (fecha de siembra) y llevar a capacidad de campo es decir llevar la humedad aprovechable al 100% por medio de la ecuación 22 correspondiente a la humedad aprovechable (HA), donde los valores de θ_{CC} y θ_{PMP} se consultan en función de la textura del suelo (Cuadro 4).

Este será el punto de partida para iniciar el BHC que posteriormente se acumula continuamente la pérdida de agua (ETc) del día anterior, y se va restando la cantidad de precipitación efectiva (Pe) y de riego (R). Cuando la ETc acumulada es igual o mayor al θ_c (Ecu 19) se debe regar y regresar al suelo la cantidad de agua que previamente se perdió debido a la evapotranspiración. Es entonces la cantidad de agua a regar estará en función de la Ecu 21 que pasa a formar el nombre de lámina neta Ln.

Para estimar la ETc (Ecu 18) del cultivo, el programa utiliza el Kc específico de cada cultivo que reportó Bravo et al (2006) (Cuadro 2). Con fines de facilitar la codificación del sistema en línea se realizó una representación matemática por medio de modelos cúbicos para este trabajo Cuadro 5.

Cuadro 5. Modelos de Kc para diversos cultivos.

| Cultivo | Modelo | Coefficiente |
|---------|---|----------------|
| Frijol | $y = -3.4829x^3 + 4.5973x^2 - 0.8725x + 0.3786$ | $R^2 = 0.986$ |
| Maíz | $y = -3.4596x^3 + 4.6649x^2 - 0.7508x + 0.3504$ | $R^2 = 0.9943$ |
| Ajo | $y = -3.6286x^3 + 5.1760x^2 - 1.2205x + 0.2901$ | $R^2 = 0.9765$ |
| Chile | $y = -3.0109x^3 + 3.6200x^2 - 0.3941x + 0.3590$ | $R^2 = 0.9814$ |

Para definir estos modelos de Kc que se utilizaron en el programa se obtuvieron modelos polinomiales cúbicos en base a tres fuentes de información y con metodologías diferentes Anexo 1.

Con los modelos de estas las tres fuentes de información y metodologías se hizo una validación con información obtenida de trabajos de investigación y se definieron los modelos que se utilizaran Anexo 2.

Para obtener la Eto el programa consulta de la base de datos climatológicos de la estación agrometeorológica previamente seleccionada. El cálculo de la Eto se realiza diariamente de acuerdo al modelo de Penman-Monteith descrito en el Capítulo 5.5.

Por su parte la precipitación efectiva (Pe) se resta de la ETc, la cual es calculada en base a la Ecu 17 (Serna et al 2011)

Para definir el tiempo y la lámina de riego bruta (Lb) que se va a aplicar con el sistema de riego Ln se divide entre la eficiencia de aplicación (Ea) ecu 23.

$$Lb = \frac{Ln}{Ea} \quad 23)$$

Dónde: Ea es la eficiencia de aplicación (%) que es la relación entre el agua aplicada por el sistema de riego y el agua almacenada en zona de raíces considerando un rango de **0.85 a 0.95** para riego por goteo y **0.45 a 0.65** para riego por multicompuertas.

Para el cálculo de tiempo de riego (Tr), el cual depende del caudal o volumen de agua que provee el sistema de riego por unidad de tiempo. Un indicador importante es la Tasa Horaria (TH) que se refiere a la cantidad de agua en milímetros que sirve el sistema en una hora (mm/h), en el sistema de riego por goteo con cintilla, TH se estima con base al gasto del emisor (Qe) en litros por hora (lph), normalmente 1lph; al espaciamiento entre emisores (Ee) de 0.20 a 0.30 m, y entre líneas regantes ó surcos (ELr), normalmente 0.76 m (Ecu. 24). Para riego por multicompuerta se toma en cuenta el gasto de entrada a la sección de riego en litros por segundo (Ecu. 25).

$$TH_{cinta} = \frac{1/ELr * Qe}{Ee} \quad 24)$$

$$TH_{multi} = \frac{Q_{sec(lps)} * Superficie}{3600} \quad 25)$$

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

$$Tr = \frac{Lb}{TH} \quad 26)$$

6.2.4. Diagrama de flujo

La metodología antes descrita se muestra mediante un diagrama de flujo para facilitar el desarrollo de algoritmos y codificación del sistema en línea.

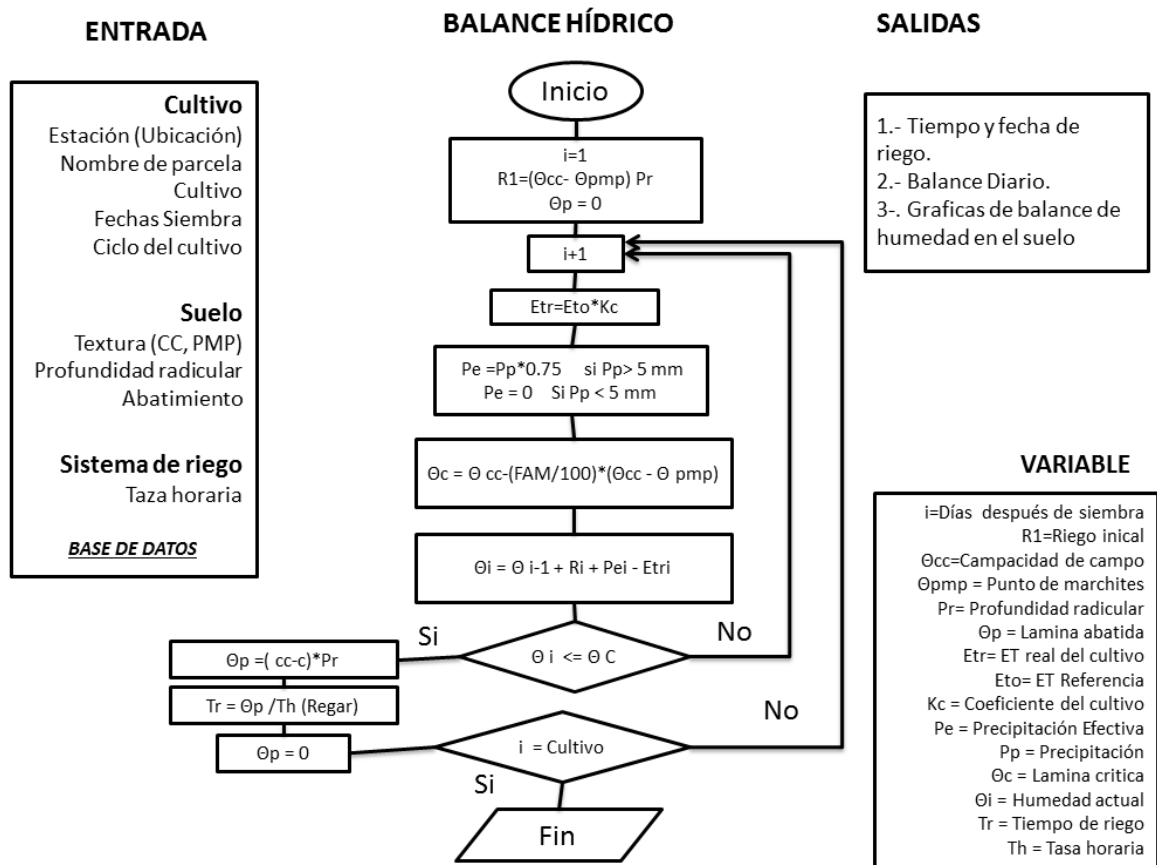


Figura 10.- Diagrama de flujo del sistema en línea para calendario de riego

VII. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.1. Descripción de la aplicación

Este sistema permite obtener de manera integral el calendario de riego que consta de fecha de riego, lamina de riego y tiempo de aplicación para cubrir los requerimientos hídricos del cultivo.

La parte fundamental del balance es la determinación de la evapotranspiración (mm) y los datos de entrada de precipitación, los cuales son obtenidos en la red de 36 estaciones agroclimáticas administrada por el INIFAP en Zacatecas. Esta base de datos es consultada por el programa en tiempo real para realizar dicho balance.

Para acceder al sistema para la programación de riegos es necesario ingresar al sitio de internet <http://www.zacatecas.inifap.gob.mx>, con lo cual aparecerá la pantalla mostrada en la Figura 11. Una vez ahí, deberá ir a la liga de “Aplicaciones de la red de monitoreo agroclimático (**Aplicaciones de la Red de Monitoreo**)” y hacer clic, aparecerá la pantalla para ingresar al sistema (Figura 12).

The screenshot shows the website interface for INIFAP Zacatecas. At the top, there are logos for SAGARPA and INIFAP. Below this is a large banner image of a field with a text box that reads "INIFAP Zacatecas" and "El Campo Experimental Zacatecas (CEZAC) inició sus actividades en el año de 1971 es uno de los 39 campos experimentales estratégicos del INIFAP." Below the banner, there are three main sections: "Red de Monitoreo Agroclimático del Estado de Zacatecas" which includes a photo of a weather station and an "ENTRAR" button; "Información" which lists services like "Boletín Mensual Reciente del año 2014" and "Pronostico de Lluvia de 2014"; and "Potencial Productivo".

Figura 11. Pantalla de inicio del sitio de internet del Campo Experimental Zacatecas.



Figura 12. Pantalla de aplicaciones de monitoreo agroclimático


En la figura 13 se muestra la página de acceso al sistema. Para utilizar esta aplicación es necesario registrarse de manera gratuita haciendo clic en , para tener un nombre de usuario y contraseña al proporcionar todos los datos de la figura 14.



Figura 13. Pantalla de inicio a SIPRO-RIEGO

Registro - Calendarización del Riego - Windows Internet Explorer

http://www.zacatecas.inifap.gob.mx/riego/registro.php

* TODOS LOS CAMPOS SON OBLIGATORIOS

Nombre:

Apellido Paterno:

Apellido Materno:

Fecha de Nacimiento: Enero Día 01 Año

Email:

Localidad:

Municipio:

Nombre de Usuario:

Clave de Usuario:

Confirmación de clave:

Figura 14. Pantalla de registro de nuevos usuarios

Una vez registrado proporcionar su nombre de usuario y contraseña hacer clic en el botón que se encuentra en la parte inferior de la pantalla de ingreso al sistema (Figura 13).

Al entrar al sistema se muestra el mapa de la red de estaciones agroclimáticas (Figura 15), donde el usuario seleccionará la estación más cercana a su predio.

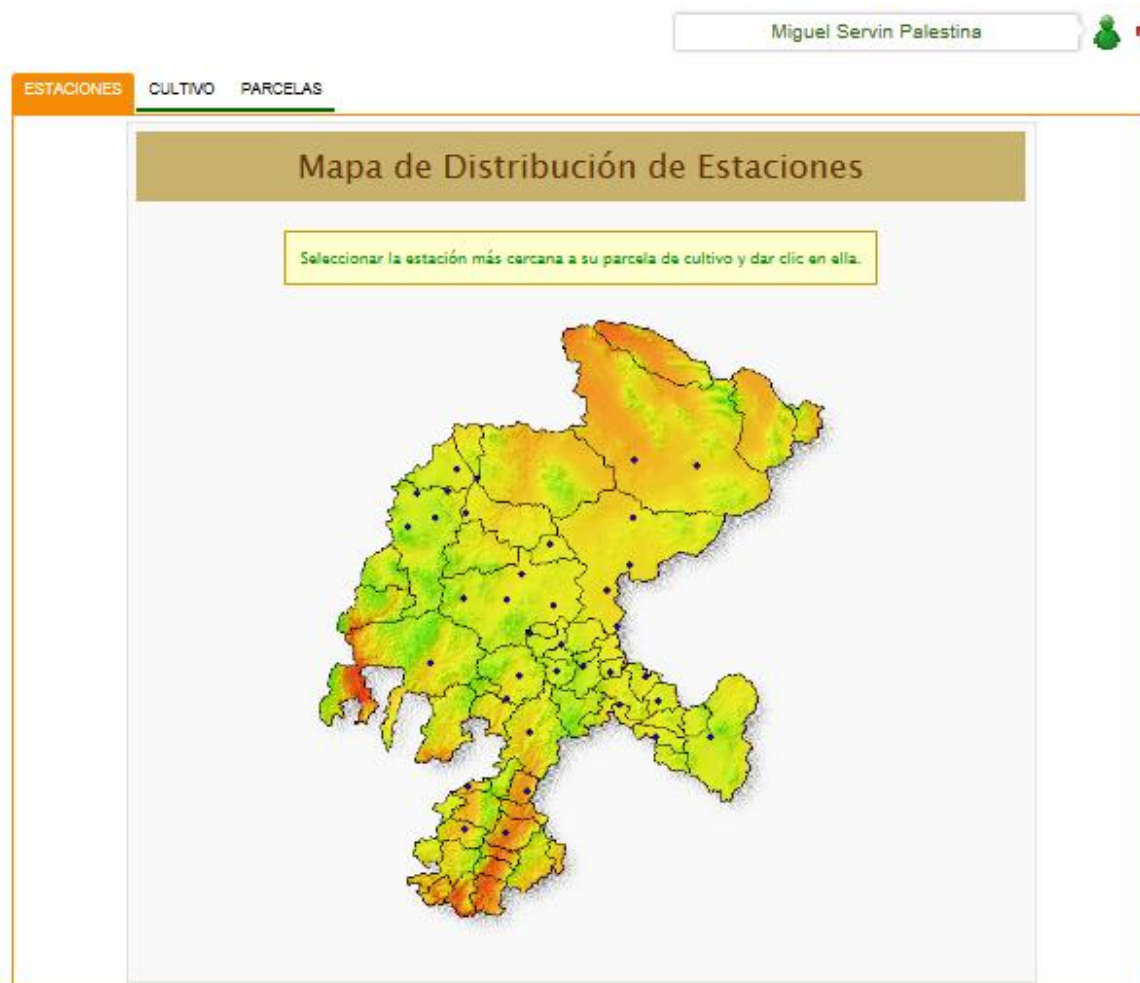


Figura 15. Selección de la estación agroclimática para consulta de datos.

A continuación se solicitarán los datos de entrada divididos en tres secciones 1) Datos generales y de cultivo 2) Datos de suelo y criterio de riego y 3) Datos sobre el sistema de riego (Figura 16). Para facilitar el uso del programa se incluyen textos de ayuda que describen conceptos y variables de entrada y salida.

7.2. Datos de entrada

Como en cualquier aplicación basada en entradas procesos y salidas la parte fundamental son los datos. Esta aplicación clasifica los datos de entrada en 3 tipos, ubicándose primero la estación agrometeorológica más cercana al sitio o predio.

Datos generales y de cultivo

Estación: En este apartado se selecciona la estación más cercana de las 36 estaciones que se encuentran distribuidas en el Estado con la finalidad de ligar la consulta de evapotranspiración de referencia (ET_r) y precipitación (P_p).

Nombre de la parcela: Este es definido por el usuario con el fin de identificar la parcela porque cada usuario cuenta con una base de datos donde se guardan los datos de cultivo, suelo y sistema de riego. Se pueden tener tantas parcelas como se necesite y tenga establecidas en campo por ejemplo “Las Margaritas Tabla 04 Chile 15/Abril/2014”

Coordenadas de la parcela: Se colocará los datos de longitud y latitud de la localización de la parcela o lo podrá ingresar manualmente o seleccionar un punto de un mapa (Figura 17).

Cultivo: En este apartado el usuario seleccionará el cultivo que quiera establecer con el fin de consultar la base de datos de los modelos de coeficientes del cultivo (k_c) para realizar los cálculos de la evapotranspiración del cultivo, ajo, chile, frijol y maíz, para esta versión del programa.

Fecha de siembra o trasplante: En este campo se selecciona la fecha de siembra en caso de ajo, frijol o maíz y trasplante en caso de chile, con la finalidad de que el sistema identifique el punto de partida para la consulta de datos climáticos y el cálculo del balance de agua en el suelo hasta el último riego o hasta la cosecha (Se solicita en día y mes).

Ciclo del cultivo: Es el tiempo que dura el cultivo en la parcela e inicia en la siembra o trasplante y termina en el último riego o la cosecha y se expresa en días. Estos datos pueden variar con la variedad y las condiciones climáticas.

Datos de suelo y criterio de riego

Textura: Es la relación del porcentaje de arena limo y arcilla y se clasifica en 12 categorías (Cuadro 4) se selecciona la textura existente en el predio y la aplicación consulta los datos de θ_{CC} y θ_{PMP} para determinar la cantidad de agua que soporta un suelo a cierta profundidad para evitar déficit o percolaciones. En esta sección el, usuario puede definir los datos de θ_{CC} y θ_{PMP} propios de cada parcela para tener mayor certeza de los cálculos, estas determinaciones del suelo se pueden realizar en el Laboratorio de análisis de suelos del CEZAC.

Profundidad radicular: Es la profundidad del suelo agrícola o la profundidad de exploración de las raíces expresada en centímetros (cm), en Zacatecas los suelos son muy poco desarrollados y presentan profundidades no mayores de 60 cm. Este dato se puede determinar realizando un pozo hasta que le sea imposible continuar excavando en la parcela que se desea regar y medir desde la superficie del suelo hasta al fondo del pozo.

Criterio de riego: esto se hace con el fin de definir la fecha de riego, considerando uno de los dos criterios que a continuación se describen.

1.- Abatimiento: Se refiere a la fracción de la humedad aprovechable del suelo que se permite consumir al cultivo entre un riego y otro (Ecu 19). Se expresa como porcentaje en el rango de 0 (θ_{CC}) a 100% (θ_{PMP}). Valores bajos de abatimiento producen riegos frecuentes con intervalos entre riegos amplios y viceversa. Con este criterio el usuario consultará en los reportes las fechas de riego resultantes y las láminas o tiempos de riego correspondientes.

2.- Por días: Si el usuario selecciona este criterio él tendrá que definir qué días por semana quiere regar y activar la casilla para que la aplicación realice los cálculos pertinentes y haga el balance. En este caso el usuario consultará el sistema en línea las láminas y tiempos de riego correspondientes a los días de la semana seleccionados para regar.

Datos del sistema de riego

En esta sección se seleccionará el tipo de sistema de riego que utilice en su predio, la aplicación considera multicompuertas o riego por gravedad y cintilla o riego presurizado que están dentro de los más comunes en el Estado. Al seleccionar el tipo de riego a utilizar se deben llenar los siguientes datos para el cálculo de la tasa horaria:

Multicompuertas.

Gasto del sistema: Se refiere al gasto en litros por segundo que entra a la parcela que se va a regar.

Cintilla.

Gasto del emisor: Este dato es el gasto en litros por hora del emisor según las especificaciones del fabricante (0.54, 0.80, 1.06 LPH), o bien para tener mejor certeza se puede realizar un aforo, la relación de volumen sobre tiempo para obtener el gasto del emisor o gotero.

Espaciamiento entre emisores: Este dato se refiere al espacio en metros que hay de gotero a gotero, siendo los de 0.2 y 0.3 m los más utilizados.

Espaciamiento entre líneas regantes: Se refiere al a la separación entre cintilla y cintilla que está muy relacionada con el espaciamiento entre surcos (0.76, 0.8 m.).

Tasa horaria: Este cálculo resulta de los datos proporcionados por tipo de riego (Ecu. 24 y 25). Si el sistema de riego es distinto a los especificados en esta aplicación, el usuario puede calcular por separado la tasa horaria de su sistema de riego e ingresarla a la aplicación para calcular los tiempos de riego.

Eficiencia de aplicación: Es la relación entre el agua aplicada por el sistema y el agua almacenada en la zona de raíces. Para un sistema de riego de 65 % de eficiencia, indica que de cada 100 litros aplicados por el sistema, 65 litros llegan a las raíces y son aprovechados por las plantas y los otros 35 litros se pierden, ya sea por evaporación o percolación profunda. Se considera que el riego por multicompuertas opera con una eficiencia de 45-65% y con 85-95% el riego con cintilla.

Superficie de riego: en este apartado se agrega la superficie en hectáreas de la parcela que se va regar.

Miguel Servin Palestina

ESTACIONES **CULTIVO** PARCELAS

Datos generales de cultivo

Estación:

Nombre de parcela:

Coordenadas del Cultivo: Latitud: Longitud:

Cultivo:

Fecha de siembra o trasplante: AÑO: MES: DIA:

Ciclo de cultivo: DIAS:

Datos de suelo y manejo de abatimiento

Textura:

Profundidad radicular: cm:

Abatimiento:

Criterio de calendarización de riego: %:

Por Día: L M W J V S D

Datos sobre el sistema de riego

Multicompuerta:

Ciclo del Sistema: h

Ciclo:

Tipo de riego: h

Espaciamiento entre empuerres: m

Espaciamiento entre líneas regantes: m

Tasa horaria: mm/hr:

Eficiencia de aplicación: %:

Superficie de riego: ha:

Figura 16. Datos de entrada

Arrastra el icono dentro del mapa para obtener la posición de tu parcela, puedes aumentar el mapa para buscar exactamente la posición.

Dir: Lat:

Lon:

Mapa Satélite

Google Datos del mapa Condiciones del servicio Informar un error en el mapa

Figura 17. Mapa para ingreso de coordenadas

Una vez proporcionados todos los datos se da clic en el botón **Guardar** para agregar los datos en su base de datos personal validados por un mensaje de registro exitoso (Figura 18).



Figura 18. Mensaje de registro

Se da clic en **Aceptar** y se muestra la base de datos de la parcela agregada (Figura 19).

inifap Sistema para programar y calendarizar el riego de cultivos en tiempo real

Miguel Servin Palestina

ESTACIONES CULTIVO **PARCELAS**

Cultivos Guardados

| Nombre parcela | Cultivo | Estacion consultada | Fecha Siembra | Tipo Riego | Calcular |
|---------------------------------|---------|--------------------------|---------------|-----------------|----------|
| Ejemplo | Chile | Trancoso, Las Arcinas | 13-04-2012 | Cintilla | |
| Goteo Chile CEZAC Abril 15 2012 | Chile | Calera, CEZAC | 15-04-2012 | Cintilla | |
| Frijol prueba | Frijol | Calera, CEZAC | 15-06-2012 | Multicompuertas | |
| racho las mag tabla 5 | Chile | Fresnillo, El Pardillo 3 | 10-04-2014 | Cintilla | |

Agregar Cultivo

Figura 19. Parcelas del usuario agregadas.

Con un clic en se mostrará la pantalla correspondiente al reporte de riego donde se presenta en forma de tabla la fecha de riego, la lámina bruta a aplicar y el tiempo de riego (Figura 20) y de manera gráfica el comportamiento de la humedad en el suelo (Figura 21).

En la pantalla de la Figura 19 podrá eliminar los registros de la parcelas dando clic en . También podrá agregar tantas parcelas como sean necesarias con un clic en **Agregar Cultivo** se mostrará la pantalla de la Figura 16 para agregar otra parcela.

Reporte de Riego

Ir Reporte Completo



| Fecha | Lámina Neta (mm) | Tiempo |
|------------|------------------|-----------|
| 2014-04-10 | 90.67 | 13 h 48 m |
| 2014-04-12 | 4.45 | 0 h 41 m |
| 2014-04-14 | 5.32 | 0 h 49 m |
| 2014-04-16 | 4.46 | 0 h 41 m |
| 2014-04-19 | 7.21 | 1 h 06 m |
| 2014-04-21 | 4.35 | 0 h 40 m |
| 2014-04-23 | 4.49 | 0 h 41 m |
| 2014-04-26 | 7.29 | 1 h 07 m |
| 2014-04-28 | 5.52 | 0 h 50 m |
| 2014-04-30 | 5.08 | 0 h 46 m |
| 2014-05-03 | 8.71 | 1 h 20 m |
| 2014-05-05 | 4.72 | 0 h 43 m |
| 2014-05-07 | 5.45 | 0 h 50 m |

Figura 20. Reporte de riego

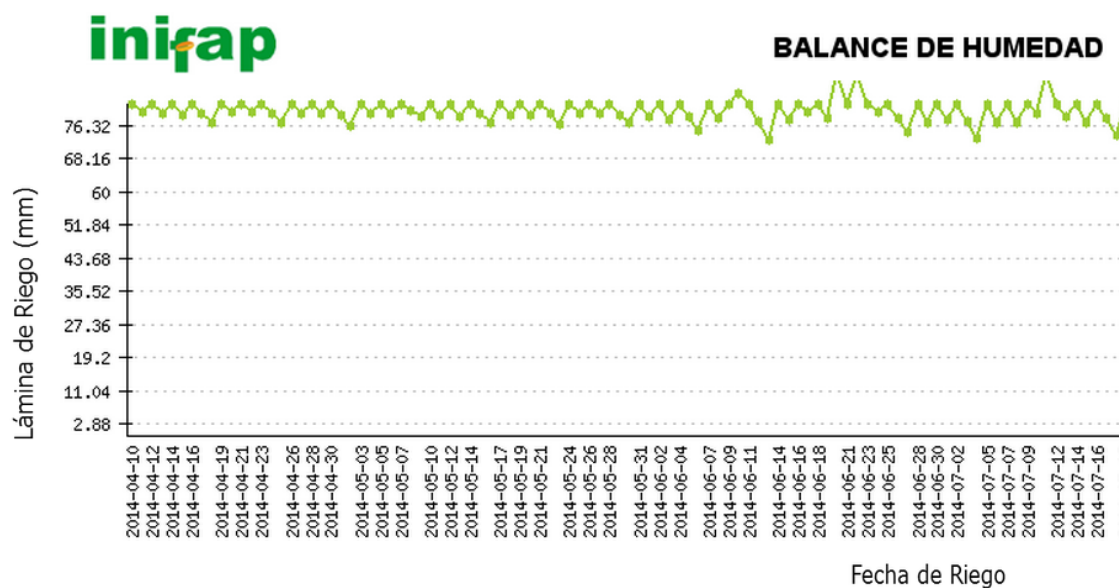




Figura 21. Gráfico de balance de humedad en el suelo.

En la pantalla mostrada en la Figura 19 también se puede editar la información contenida en cualquiera de los archivos de la base de datos personal previamente capturados dando clic en , con esto mostrará la pantalla de edición.

7.3. Reportes e interpretación de resultados

El reporte principal de esta aplicación es mostrado en las Figuras 20 y 21 iniciando con la fechas de siembra o trasplantes.

Dentro de la pantalla mostrada en la Figura 20 podrá consultar el reporte completo del balance diario de agua de riego en el suelo dando clic en  desplegando la siguiente pantalla (Figura 22).

En la primera columna se muestran las fechas para cada día del ciclo del cultivo a partir de la fecha de siembra o trasplante. Las dos siguientes columnas indican los valores de precipitación y Eto consultados de las estaciones agrometeorológicas.

La cuarta y quinta columnas muestran la Pe y Etc, respectivamente.

Miguel Servin Palestina 




Reporte de Riego

[Ir Reporte Resumen](#) 

| No. Dias | Fecha | Pre | Eto | Pe | kc | Etr | Balance | Riego | Lámina Riego(mm) | Lámina Neta(mm) | Tiempo |
|----------|------------|-----|------|------|----------------|------|---------|----------|------------------|-----------------|-----------|
| 1 | 2014-04-10 | 0 | 5.58 | 0.00 | 0.356677546167 | 1.99 | 81.60 | Riego | 81.60 | 90.67 | 13 h 48 m |
| 2 | 2014-04-11 | 0 | 5.67 | 0.00 | 0.354633494336 | 2.01 | 79.61 | No Riego | 0.00 | 0.00 | 0 h 00 m |
| 3 | 2014-04-12 | 0 | 6.69 | 0.00 | 0.352863434009 | 2.36 | 77.60 | Riego | 4.00 | 4.45 | 0 h 41 m |
| 4 | 2014-04-13 | 0 | 6.91 | 0.00 | 0.351362954688 | 2.43 | 79.24 | No Riego | 0.00 | 0.00 | 0 h 00 m |
| 5 | 2014-04-14 | 0 | 7.51 | 0.00 | 0.350127645874 | 2.63 | 76.81 | Riego | 4.79 | 5.32 | 0 h 49 m |
| 6 | 2014-04-15 | 0 | 3.96 | 0.00 | 0.34915309707 | 1.38 | 78.97 | No Riego | 0.00 | 0.00 | 0 h 00 m |
| 7 | 2014-04-16 | 0 | 6.44 | 0.00 | 0.348434897778 | 2.24 | 77.59 | Riego | 4.01 | 4.46 | 0 h 41 m |
| 8 | 2014-04-17 | 0 | 6.80 | 0.00 | 0.3479686375 | 2.37 | 79.36 | No Riego | 0.00 | 0.00 | 0 h 00 m |
| 9 | 2014-04-18 | 0 | 5.41 | 0.00 | 0.347749905737 | 1.88 | 76.99 | No Riego | 0.00 | 0.00 | 0 h 00 m |

Figura 22. Reporte completo del balance de agua en el suelo.

La sexta columna del reporte de riego indica el contenido de humedad aprovechable del suelo como resultado del balance diario de agua en el mismo. La séptima columna indica la necesidad de aplicación o no de riego para cada fecha. Se requerirá riego cuando la humedad aprovechable del suelo disminuya hasta el

nivel de abatimiento crítico establecido, o bien, cuando el día coincida con los días de la semana predefinidos como días de riego.

La octava columna del reporte de riego muestra la lámina de riego neta requerida por las plantas para realizar sus funciones fisiológicas, mientras que la novena columna señala la lámina bruta, es decir, la lámina neta afectada entre la eficiencia de aplicación del sistema de riego. Las dos últimas columnas presentan el tiempo en horas y minutos respectivamente que se debe regar la parcela de acuerdo a la tasa horaria del sistema de riego.

VIII. CONCLUSIONES

La presente aplicación computacional es una herramienta útil y precisa para que los productores de riego del estado de Zacatecas, calculen las demandas de agua de sus cultivos y programen sus riegos en línea y tiempo real. No obstante, el uso de esta herramienta es responsabilidad del usuario.

La aplicación aquí descrita representa una herramienta importante para que los usuarios de riego en Zacatecas e incorporen un mayor soporte técnico a la tarea de programar el riego de sus cultivos. El uso de esta aplicación significa también un paso más en el proceso de transferencia de la tecnología disponible. Además de los usuarios del riego, la aplicación aquí descrita puede utilizarse con fines didácticos por maestros y estudiantes para entender mejor los principios teóricos involucrados en su desarrollo; así como por investigadores para ayudar a definir posibles acciones de investigación orientadas al refinamiento de las técnicas utilizadas en la aplicación.

Recomendaciones.

El sistema desarrollado en este trabajo no contempla los sistemas de control para iniciar un riego automatizado únicamente muestra un balance diario que tendrá que ser consultado por los usuarios para realizar sus riegos manualmente. Por lo que se prevé para los siguientes trabajos incluir sistemas de control para contar con un sistema para la programación de riego automático de manera tal que se tenga un sistema de programación de riego autónomo.

IX. LITERATURA CITADA

- Allen, R.; I.S. Pereira; D. Raes y M. Smith 2006: Evapotranspiración del cultivo, 298pp., Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos, Estudio FAO Riego y Drenaje, No. 56, Roma, Italia.
http://www.usbr.gov/pn/agrimet/cropcurves/crop_curves.html Consulta 15 de Octubre del 2014.
- Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith. 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 56.
- Allen R.G., Jensen, M.E., Wright, J.L., and R.D. Burman. 1989. Operational estimates of reference evapotranspiration. Agron. J. 81:650-662.
- Annandale, J.G., and C.O. Stockle. 1994. Fluctuation of crop evapotranspiration coefficients with weather: a sensitivity analysis. Irrig. Sci. 15:1-7.
- Banco Mundial (2006). Gestión de recursos hídricos en México, el papel del PADUA en la sostenibilidad hídrica y el desarrollo rural vol.1. México, D.F.
- Bouma J. 1989. "Using soil survey data for quantitative land evaluation". Advances in Soil Science 9: 177–213.
- Bravo-Lozano, A. G.; Salinas-González, H. y Velasco-Villegas, I. 2006. Importancia del fenómeno de la sequía. In: sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México. Bravo, L. A. G.; Salinas, G. H. y Rumayor, R. A. F. (ed.). Centro de Investigación Regional Norte Centro, INIFAP. Calera de V. R. Zac. (Libro técnico Núm. 4). 180 p.
- Briggs L.J. and H.L. Shantz. 1912. The wilting coefficient for different plants and its indirect determination. USDA Bureau of Plant Industry Bull 230. U.S. Gov. Printing Office, Washington, D.C.
- Brouwer, C.; Goffeau, A.; Heibloem, M. (1985). Irrigation Water Management: Training Manual No. 1 – Introduction to Irrigation. FAO, Rome, Italy, Electronic Version.
- Campbell, G. S. (1977). An Introduction to Environmental Biophysics. Springer Verlag, N. Y. 159 p.
- Campbell Scientific, Inc. (2001). CR10X Measurement and control module operator's manual. Electronic Version. Logan, Utah. USA.
- Conagua (2012) <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo24.html> consulta realizada el 07 de enero del 2015.
- Conagua (2010) <http://www.conagua.gob.mx/atlas/ciclo21.html> consulta realizada el 12 de octubre del 2014.
- Dastane, N.G. (1978). Effective Rainfall in Irrigated Agriculture. Irrigation and Drainage. Paper No. 25, FAO, Rome, Italy, Electronic Version.
- Doorenbos J. and W.O. Pruitt. 1977. Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 24. Food and Agriculture Organization. United Nations, Rome, Italy.
- Food and Agriculture Organization (FAO). 1989. Irrigation water management: Irrigation scheduling. Training Manual No. 4. Rome Italy.
- FAO, (2005), AQUASTAT, Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura. Fourth World Water Forum. 2006. Official Delegate Publication. National Water Commission. 208 pp. Mexico.

- Hayes, G.I. & Buell, J.H. (1955). Water and our forests: trees also need water at the right time and place. *Water Yearbook*, USDA 1955: 219 - 28.
- Hershfield, D.M. (1964). Effective rainfall and irrigation water requirements. *Journal of Irrigation and Drainage*. Div. ASCE 90: IR 2: 3920: 33 - 47.
- Jensen M. E., Burman R., D. and R.G. Allen. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements. American Society of Civil Engineers. Irrigation Water Requirements Committee of the Irrigation and Drainage Division. Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70. New York. 332 p
- Jensen M.E., D.C.N. Robb. 1970. Scheduling irrigations using climatecrop- soil data. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, ASCE, 96(IR1): p 25-38..
- Khah E M, K Koukoufikis, A G Mavromatis, D Chachalis, C K Goulas (2007) The effect of different techniques on plant performance and seed quality in relation to fruit maturation and storage of different genotypes of pepper (*Capsicum annum* var. *annuum* L.). *J. Food Agric. Environ.* 5:159-163.
- Maldonado I. 2000. *Revista Tierra Adentro*. Septiembre-Octubre. pp 28-29.
- Medina G., G.; Báez G., A. D. y Ramos G., J. L. 2007. Red de monitoreo agroclimático del estado de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Norte Centro, Campo Experimental Zacatecas, México. (Desplegable informativa No. 15).
- Medina G, A Ruíz (2004) Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Zacatecas (Período 1961 – 2003). SAGARPA-INIFAPCIRNOC- Campo Experimental Zacatecas. Libro Técnico No. 3. 40 p.
- Monteith, J. L. & M. H. Unsworth (1990). *Principles of Environmental Physics*, 2nd Ed. Edward Arnold, London, UK.
- Ogrosky, H.O. & Mockus, V. (1964). Hydrology of agricultural lands. Sec. 21 in *Handbook of hydrology* by V.T. Chow. Hew York, McGraw Hill Book Co. 1 -7 9.
- Ortega F.S. y C. Acevedo. 1999. "Programación del riego usando sistemas meteorológicos automáticos" en *Curso: Riego por Aspersión y Goteo*. Universidad de Talca. Talca.
- Palacios V. E., & A. Exebio (1989). *Introducción a la Teoría de la Operación de Distritos de Riego*. Segunda Reimpresión Corregida. Centro de Hidrociencias. Colegio de Postgraduados. México.
- Richards, L.A. and C.H. Wadleigh. 1952. *Soil physical conditions and plant growth*. Ed. Am. Soc. Agron. Monograph.
- Sánchez C., I.; Estrada A., J. and González C., G. 2002. Irrigation Technology in the Irrigation Districts of México. *International Water Resources Association*. *Water International* 27: 578 - 584. U.S.A.
- Sánchez C., I y Catalán V., E.A. 2006. Sistema para la optimización de patrones de cultivo en distritos de riego del norte del país. Folleto Técnico No. 5. CENID RASPA INIFAP. 75 pp. Gómez Palacio, Dgo. México.
- Sánchez C., I. 2005. *Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Un enfoque de simulación de procesos*. Libro científico No. 2. INIFAP CENID RASPA. 272 pp. Gómez Palacio, Dgo. México.
- SAS. (1999). *SAS® Procedures Guide, Version 8*. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 1643 p.

- Saxton K., E.; Rawls W., J.; Romberger J., S. and R. I. Papendick. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Sci. Soc. Am. J. 50: 1031-1036.
- Serna-Perez, A., Zegbe, J. A. y Mena-Covarrubias, J. 2011. Rendimiento y calidad de chile seco Mirasol cultivado bajo riego parcial de la raíz. Revista Chapingo Serie Horticultura 17 (Especial 1): 19-24.
- Serna A.P., y Zegbe J.A (2012). Rendimiento, Calidad De Fruto Y Eficiencia En El Uso Del Agua Del Chile 'Mirasol' Bajo Riego Deficitario Rev. Fitotec. Mex. Vol. 35 (Núm. Especial 5): 53 - 56, 2012 Pp 53-56.
- Smith, M. (1991). Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- UNESCO, "Map of the world distribution of arid regions", MAB. tech. Notes 7, UNESCO, Paris 1979.

ANEXOS

A: Generación de modelos para estimar el Kc

Para realizar la curva de coeficiente de cultivo (Figura 2) es necesario conocer los valores de las etapas de desarrollo del cultivo, (Cuadro 6) en dicho cuadro se muestran estos valores acumulados que se obtuvieron mediante trabajos de investigación de varios años en el CEZAC del INIFAP.

Cuadro 6.- Etapas de desarrollo acumuladas de algunos cultivos en Zacatecas.

| Cultivo | B | C | D |
|---------|------|------|------|
| Maíz | 0.17 | 0.44 | 0.78 |
| Chile | 0.19 | 0.41 | 0.84 |
| Frijol | 0.14 | 0.36 | 0.82 |
| Ajo | 0.10 | 0.26 | 0.79 |

Para tener la curva en su totalidad es necesario conocer los tres valores de Kc para este trabajo se obtuvo información de tres fuentes y metodologías diferentes las cuales se describen a continuación.

1. Coeficientes de cultivo FAO-56 f(ETo)

La curva de Kc se generó a partir de los valores de los puntos B, C y D (Cuadro 6) y tres valores de Kc: los correspondientes a la etapa inicial (Kc ini), la etapa de media (Kc med) y la etapa final (Kc fin).

El Kc med y Kc fin de diferentes cultivos se obtuvieron del manual 56 de la FAO (*Allen et al., 2006*) donde se considera la humedad relativa y la velocidad de viento que está en el rango de clima árido y semi-árido Cuadro 7.

Cuadro 7.- Coeficiente medio y final de algunos cultivos en Zacatecas.

| Cultivo | Kc med | Kc fin |
|---------|--------|--------|
| Maíz | 1.05 | 0.45 |
| Chile | 1.05 | 0.6 |
| Frijol | 1.1 | 0.55 |
| Ajo | 1 | 0.75 |

El valor del K_c ini se determina en función del intervalo promedio entre los eventos de humedecimiento (riego ó lluvia) la evapotranspiración de referencia E_{To} y la magnitud del evento de humedecimiento. (Allen et al., 2006).

Para determinar la evapotranspiración de referencia E_{To} del área de estudio se realizó un mapa de distribución espacial para clasificar las 36 estaciones agroclimaticas automatizadas en 5 zonas con el fin de agrupar áreas homogéneas comunes para obtener la E_{To} promedio de cada grupo y obtener el K_c ini.

La clasificación se realizó de acuerdo a la condición de sequía propuesta por la UNESCO (1979), la cual realiza una clasificación de las zonas áridas del mundo basada en el valor de la relación entre la precipitación anual y la evapotranspiración calculada según el método estándar de Penman-Monteith y se conoce como índice de sequía "IS".

Para obtener el IS, se utilizaron los datos de precipitación promedio del mes de abril y la E_{To} del mismo mes de las 36 estaciones agroclimáticas automáticas distribuidas estratégicamente en todo el Estado.

La evapotranspiración de referencia E_{To} fue calculada con la ecuación de Penman – Monteith (Capitulo 5.5).

La base de datos se representó en un mapa espacial con ayuda del ArcGis 10.1 y se realizó la interpolación de los datos de IS para su clasificación (Figura 23). Posteriormente se obtuvo un promedio de las E_{To} de cada grupo.

La E_{To} promedio del mes de abril para cada zona se presenta en el Cuadro 8. Con esta información se obtuvo el k_c ini basado en la metodología descrita por Allen (2006) en el manual de la FAO-56 para cada grupo.

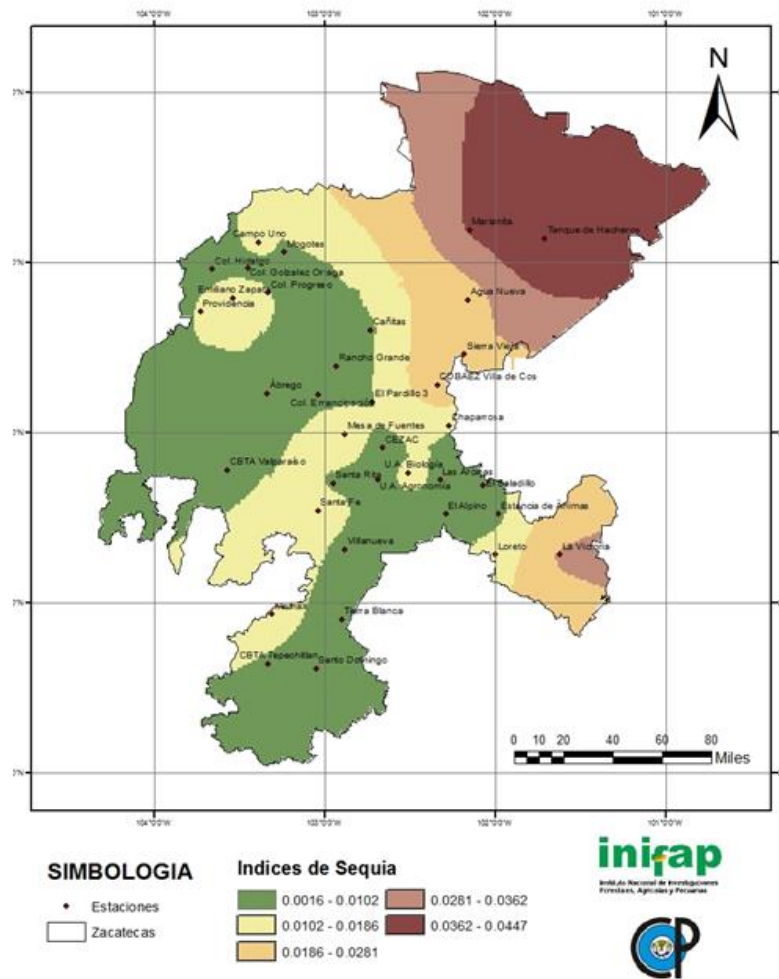


Figura 23.- Clasificación por índice de sequía en Zacatecas

Cuadro 8.- Evapotranspiración y coeficiente de cultivo (FAO-56)

| Zonas | Eto Abril | Kc_Inicial |
|-------|-----------|------------|
| 1 | 5.5 | 0.62 |
| 2 | 5.3 | 0.63 |
| 3 | 5.2 | 0.64 |
| 4 | 5.0 | 0.66 |
| 5 | 4.9 | 0.67 |

Con los valores del cuadro 6 correspondientes a las etapas de desarrollo y los valores de Kcmed y Kc fin del cuadro 7 y los valores de Kc ini del cuadro 8, que dan un total de tres puntos (X, Y) se graficó la curva de Kc para los cuatro cultivos en los cinco grupos de estaciones. Para poder representar matemáticamente la curva obtenida se obtuvieron 10 puntos a mano alzada siguiendo la curva original.

Con estos diez puntos (X, Y) se realizó una regresión con el método de mínimos cuadrados para calcular la línea que más se ajusta a los datos y la describe matemáticamente (SAS 1999).

En el cuadro 9 se muestran los 20 modelos obtenidos para cada cultivo y grupo de estaciones, los modelos polinomiales de tercer grado fueron los que mejor ajuste mostraron con R² mayores de 95%, los modelos describen el valor de Kc (Y) en función a la fracción de desarrollo (X)

Cuadro 9.- Modelos de Kc por grupo de estaciones agroclimáticas

| Zona | Cultivo | Modelo | Coficiente |
|------|---------|---|-------------------------|
| 1 | Maíz | $y = -4.8232x^3 + 4.4376x^2 + 0.2129x + 0.505$ | R ² = 0.9958 |
| 2 | Maíz | $y = -4.7145x^3 + 4.4493x^2 + 0.0875x + 0.55$ | R ² = 0.9977 |
| 3 | Maíz | $y = -4.7533x^3 + 4.4225x^2 + 0.1640x + 0.5227$ | R ² = 0.9959 |
| 4 | Maíz | $y = -4.6309x^3 + 4.2517x^2 + 0.1603x + 0.5862$ | R ² = 0.9956 |
| 5 | Maíz | $y = -4.6737x^3 + 4.3298x^2 + 0.1200x + 0.6025$ | R ² = 0.9951 |
| 1 | Frijol | $y = -3.5120x^3 + 2.6072x^2 + 0.8674x + 0.4932$ | R ² = 0.9936 |
| 2 | Frijol | $y = -3.9375x^3 + 3.3094x^2 + 0.5791x + 0.5113$ | R ² = 0.994 |
| 3 | Frijol | $y = -3.6791x^3 + 2.8590x^2 + 0.7698x + 0.519$ | R ² = 0.993 |
| 4 | Frijol | $y = -3.9685x^3 + 3.3677x^2 + 0.5260x + 0.5442$ | R ² = 0.9908 |
| 5 | Frijol | $y = -4.0035x^3 + 3.4120x^2 + 0.4932x + 0.5647$ | R ² = 0.989 |
| 1 | Chile | $y = -3.5975x^3 + 3.0956x^2 + 0.4684x + 0.5117$ | R ² = 0.9913 |
| 2 | Chile | $y = -3.6733x^3 + 3.2850x^2 + 0.3956x + 0.5262$ | R ² = 0.9948 |
| 3 | Chile | $y = -3.5451x^3 + 3.0880x^2 + 0.4700x + 0.5345$ | R ² = 0.9942 |
| 4 | Chile | $y = -3.5334x^3 + 3.1941x^2 + 0.3495x + 0.559$ | R ² = 0.9979 |
| 5 | Chile | $y = -3.8209x^3 + 3.6684x^2 + 0.1483x + 0.5845$ | R ² = 0.9987 |
| 1 | Ajo | $y = -1.0839x^3 - 0.1247x^2 + 1.1324x + 0.7246$ | R ² = 0.9923 |
| 2 | Ajo | $y = -0.8314x^3 - 0.4219x^2 + 1.1771x + 0.7496$ | R ² = 0.9886 |
| 3 | Ajo | $y = -0.7090x^3 - 0.7442x^2 + 1.5158x + 0.6339$ | R ² = 0.9954 |
| 4 | Ajo | $y = -1.0587x^3 - 0.1136x^2 + 1.0870x + 0.7456$ | R ² = 0.9957 |
| 5 | Ajo | $y = -0.5342x^3 - 1.1300x^2 + 1.7393x + 0.6082$ | R ² = 0.9961 |

En la Figura 24, se muestra un ejemplo para maíz donde la línea continua muestra la curva de Kc (Kcini =0.62, Kcmed = 1.05, Kcfin = 0.45) para todas las etapas de desarrollo desde siembra hasta cosecha y los puntos representan una línea suavizada para obtener 10 valores de Kc (eje de las y) y valores del porcentaje de desarrollo (eje de las x) para obtener el modelo del Kc.

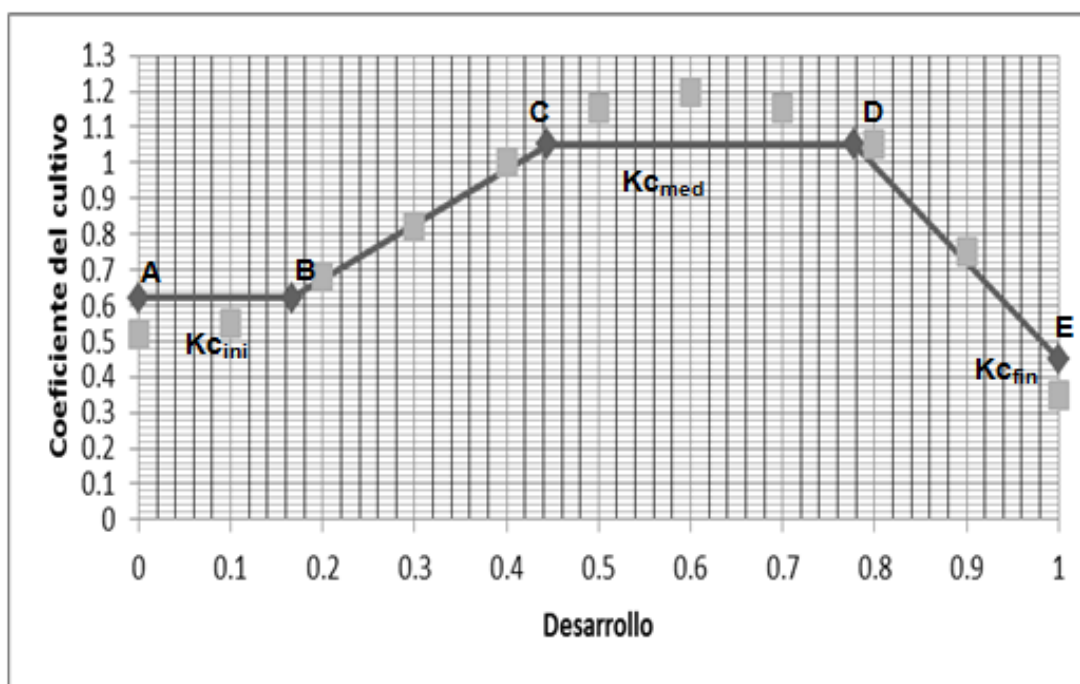


Figura 24.- Curva de coeficiente de cultivo de maíz.

2.- Coeficientes del cultivo FAO (1977)

La Figura 23 muestra que se requieren seis valores para caracterizar la curva Kc de un cultivo. Tres valores de Kc: Kcini, Kcmed y Kcfin, así como la duración en días o como fracción del ciclo vegetativo total en los puntos B, C, y D. En el Cuadro 1 se presentan tales valores para varios cultivos, donde la duración del ciclo en los puntos B, C y D se expresan como fracciones acumuladas del ciclo vegetativo (FAO, 1977).

Con esta información de igual de igual manera se graficó y se obtuvieron los diez puntos para suavizar la curva y se obtuvieron modelos para cada cultivo. Cuadro 10.

Cuadro 10. Modelos de Kc obtenidos con información de FAO (1977).

| Cultivo | Modelo | Coefficiente |
|---------|---|----------------|
| Maíz | $y = -4.1336x^3 + 4.2226x^2 - 0.1802x + 0.5390$ | $R^2 = 0.9859$ |
| Frijol | $y = -5.2797x^3 + 5.2809x^2 + 0.1387x + 0.3115$ | $R^2 = 0.9707$ |
| Chile | $y = -3.6169x^3 + 3.5478x^2 + 0.1115x + 0.5345$ | $R^2 = 0.9768$ |
| Ajo | $y = -0.5206x^3 - 0.7879x^2 + 1.4274x + 0.5934$ | $R^2 = 0.9644$ |

3.- Coeficientes del cultivo locales

En el cuadro 2. Se muestran el Kc de algunos cultivos y su correspondiente desarrollo, estos valores son el resultado de trabajos de investigación llevados en el estado de Zacatecas. (Bravo et al, 2006).

Para generar los modelos se ajustaron los datos de los DDT y DDS para obtener las etapas de desarrollo correspondientes a los puntos B, C y D (Cuadro 11).

Cuadro 11.- Valores de (kc) para diferentes etapas fenológicas ajustados.

| Cultivo | Punto | Fracción de ciclo vegetativo | Coeficientes del cultivo | |
|---------|-------|------------------------------|--------------------------|-------------------|
| | | | Kc _{ini} | Kc _{fin} |
| Ajo | B | 0.38 | Kc _{ini} | 0.30 |
| | C | 0.57 | kC _{med} | 0.60 |
| | D | 0.86 | Kc _{fin} | 0.80 |
| Chile | B | 0.25 | Kc _{ini} | 0.40 |
| | C | 0.56 | kC _{med} | 0.75 |
| | D | 0.75 | Kc _{fin} | 0.85 |
| Frijol | B | 0.31 | Kc _{ini} | 0.40 |
| | C | 0.54 | kC _{med} | 0.70 |
| | D | 0.85 | Kc _{fin} | 0.90 |
| Maíz | B | 0.27 | Kc _{ini} | 0.40 |
| | C | 0.53 | kC _{med} | 0.70 |
| | D | 0.80 | Kc _{fin} | 1.00 |

Con la información presentaba por Bravo et al (2006) de igual manera se graficó y se obtuvieron los diez puntos para suavizar la curva y se obtuvieron modelos para cada cultivo. Cuadro 12.

Cuadro 12. Modelos de Kc con información de Bravo et al (2006)

| Cultivo | Modelo | Coficiente |
|---------|---|-------------------------|
| Frijol | $y = -3.4829x^3 + 4.5973x^2 - 0.8725x + 0.3786$ | R ² = 0.986 |
| Maiz | $y = -3.4596x^3 + 4.6649x^2 - 0.7508x + 0.3504$ | R ² = 0.9943 |
| Ajo | $y = -3.6286x^3 + 5.1760x^2 - 1.2205x + 0.2901$ | R ² = 0.9765 |
| Chile | $y = -3.0109x^3 + 3.6200x^2 - 0.3941x + 0.3590$ | R ² = 0.9814 |

B: Validación de los modelos de Kc

Con los diferentes modelos obtenidos para el cálculo de Kc (Figura 25) se hicieron simulaciones con datos de ETo del año 2011 con el cultivo de chile y fecha de siembra el 15 de abril.

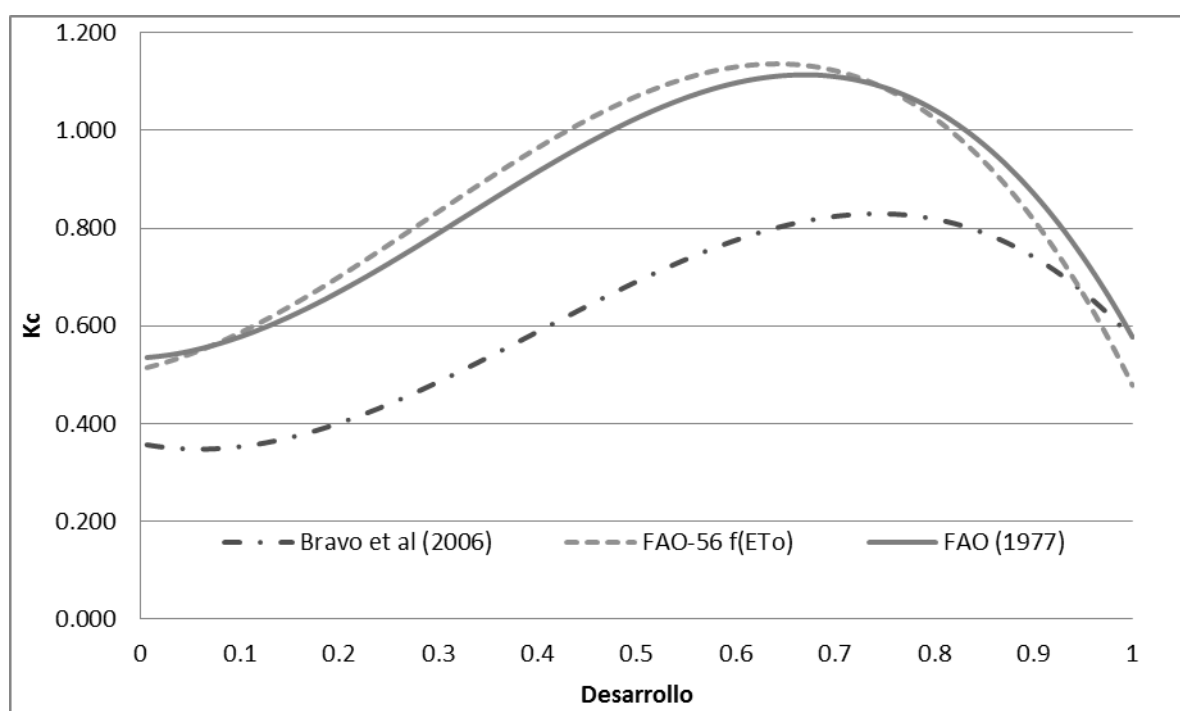


Figura 25.- Modelos de Kc para chile.

Los resultados obtenidos para la evapotranspiración de cultivo (ETc) en todo el ciclo (160 días) fueron 557.5 mm para Bravo et al (2006), 807.4 mm y 796.3 mm para FAO.56 f(ETo) y FAO (1977) respectivamente.

Serna y Zagbe (2012) reportaron volúmenes promedio de agua aplicados en tres años, en el cultivo de chile de $5010 \pm 821 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$, Khah et al. (2007), determinaron un volumen total de $5560 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ como el adecuado para obtener el mayor rendimiento comercial en riego por goteo. Calculando el volumen de agua con el uso de la metodología de balance de agua en el suelo para el año 2010 y utilizando el Kc con los modelos obtenidos se calculó un volumen de agua de $6015 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Considerando la información reportada por diferentes autores y los resultados de los datos simulados de los volúmenes utilizados y se determinó que para este sistema se utilizaran los modelos obtenidos de los datos reportados por Bravo et al (2006) ya que los dos antes mencionados sobre estimas la ETc total para el cultivo de chile.

C: Descripción de la estación y sensores

Estaciones

El sistema de medición de variables climáticas que se utilizó para el desarrollo de este trabajo (Figura 26) contó con diferentes dispositivos para medir y registrar de manera continua las variables meteorológicas que se envían a una computadora central (servidor) por medio de un transmisor de datos inalámbrico vía radio. Este sistema se integró por: programa de software de soporte, conjunto de sensores meteorológicos (temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar global). La descripción de operación e información técnica de cada uno de estos dispositivos se presenta a continuación.



Figura 26. Sistema de medición y control con sensores meteorológicos

Trasmisor de datos UHF A733 addWAVE (Adcon)

La A733 es una Unidad de transmisión remota (RTU), robusta, versátil de funcionamiento independiente y con alimentación solar, es una estación de radio ideal para la transmisión de muchos valores de sensores a largas distancias, operar en la banda de frecuencias de 430 a 470MHz, y transmite datos hasta 20 km.



Figura 27. Estación de radio UHF A733 addWAVE (Adcon)

Sensores

Este apartado describe la operación e información técnica de los sensores meteorológicos que se utilizaron en este trabajo y con ellos, se logró medir y registrar los valores de las variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar global) para la estimación de la evapotranspiración de referencia (ET_o) por el método de Penman-Monteith.

Sensor de temperatura y humedad relativa SEN-R Adcon TR1

Temperatura: La medición está basada en una resistencia eléctrica o termocople de Niquel, que aumenta o disminuye la resistencia eléctrica, en función del cambio de temperatura.

Humedad Relativa: En el caso del sensor de humedad relativa está basado en unos sensores resistivos que corresponden a una resistencia eléctrica que responde a los cambios de la humedad relativa.

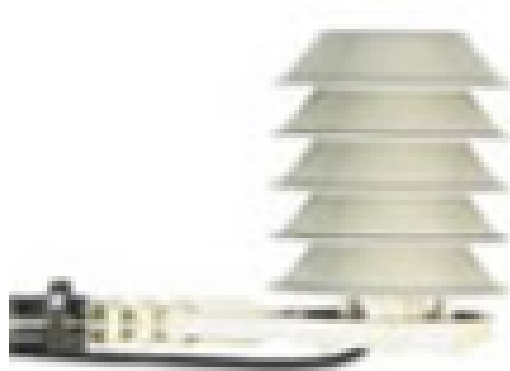


Figura 28. Sensor SEN-R Combisensor Temp / H.Relativa Adcon TR1

Datos técnicos: sensor de humedad relativa

| | |
|--------------------------------------|-------------------------|
| Rango de medición | 0 a 100% |
| Precisión | 20°C ± 2% |
| Dependencia de la temperatura | ± 0,03% / °C |
| Estabilidad | < 1% por año |
| Elemento sensible | HC101 (tipo capacitivo) |

Datos técnicos: sensor de temperatura

| | |
|--------------------------|--|
| Rango de medición | -40°C a 60°C |
| Precisión | 20°C < ± 0,2°C |
| Elemento sensible | PT1000 (DIN A) (Termoresistencia Platino) |

Sensor de precipitación RG1 Pluviómetro, 200 cm², 0,2 mm

Se utilizó el pluviómetro modelo RG1 Pluviómetro, 200 cm², 0,2 mm de Adcon (Figura 29), mide la precipitación mediante un balancín con una cucharilla graduada en 0.2 mm de agua, cada vez que llueve, el balancín se llena y baja, marcando 0.2 mm. Mientras más llueve, más veces se llena este balancín y marca más lluvia. La cantidad de agua que se recolecta se expresa en lámina de agua (milímetros de altura).



Figura 29. Sensor de precipitación RG1 Pluviómetro, 200 cm², 0,2 mm

Datos Técnicos

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| Superficie de captación: | 200 cm ² |
| Resolución: | 0.2 mm balancín o pulso |
| Intensidad: | máx. 2.4 mm./min. |
| Principio de medida: | Balancín |
| Salida electrónica: | pulso |
| Temperatura ambiente: | 0...+60 °C (sin calefacción). |
| Alimentación electrónica: | 5...24 Vcd |
| Precisión | ± 1% |
| Tipo de montaje: | Sobre un mástil de 50 mm. De diámetro |
| Peso: | 3.3 kg. |

Así mismo, el balancín oscila a volumen constante de agua con un registro eléctrico de la intensidad de lluvia caída cuando se relaciona con el tiempo. Un litro caído en un metro cuadrado alcanzaría una altura de un milímetro, y el registro del cambio del balancín es constante.

Sensor de velocidad del viento PRO - 60m / s incl. brazo de montaje

Este sensor de velocidad del viento tiene un umbral muy bajo de sólo 0,5 m / s, gracias a su cazoleta de aluminio de grandes dimensiones. Doble rodamiento de bolas de baja fricción garantizan una alta precisión y una larga vida útil. La unidad giratoria puede ser sustituida en el campo muy fácilmente. El sensor mide las velocidades de hasta 200 km / h.

Dirección del Viento: Se mide mediante un potenciómetro que registra los cambios en los grados (0 a 360), en función del viento. Normalmente toma como referencia el punto cero o Norte.

Velocidad del Viento: Utiliza un contador que registra la cantidad de revoluciones por intervalo de tiempo.

Datos Técnicos:

| | |
|------------------------------|---------------------------------------|
| Principio de medición | Magnético |
| Elemento de medición | Anemómetro 3-arm copelas, de aluminio |
| Rango de medición | 0,4 a 55,6m/s (1,44 a 200km/h) |
| Resolución | 0,1m/s |
| Precisión | ± 0,5m/s |
| Velocidad de inicio | 0,4m/s (1,44km/h) |



Figura 30. Sensor de velocidad del viento PRO - 60m.

Sensor de radiación solar (piranómetro) SP-LITE de Kipp & Zonen

Piranómetro de la empresa Kipp & Zonen (Figura 31), el cual mide la radiación solar global mediante una fotocelda de silicio montada en un difusor. El difusor contiene una resistencia que convierte la señal de μA a mV que permite que la señal del SP-LITE se mida directamente con un datalogger, el SP-LITE está calibrado para luz de día en el rango espectral de 400 a 1100 nm.

Datos Técnicos:

| | |
|--|---------------------------------------|
| Espectro: | 400 a 1100 nm |
| Sensibilidad: | $10 \mu\text{V W}^{-1} \text{m}^{-2}$ |
| Tiempo de respuesta: | < 1 s |
| Dependencia: | $\pm 0.15 \% / ^\circ\text{C}$ |
| Rango temperatura: | - 30° a + 70 °C |
| Error direccional: | < 10 % hasta a 80° |
| Dimensiones: | 55 mm. (diámetro) 34 mm. (altura). |
| Peso: | 181 g. |
| Tipo de canal en el datalogger: | diferencial o simple |



Figura 31. Sensor de radiación solar SP-LITE de Kipp & Zonen.