

¿CUÁNDO Y CUÁNTO REGAR? RELACIÓN CON DOS PROBLEMÁTICAS VITALES PARA LA HUMANIDAD: LA PROVISIÓN DE ALIMENTOS DE MANERA SOSTENIDA Y EL ACCESO Y USO DEL AGUA.

M. Sc. Ramón Tomás Turruelles Hidalgo¹, M. Sc. Idania Rodríguez Martínez²

1, 2 Universidad de Matanzas “Camilo Cienfuegos”, Vía Blanca Km.3½, Matanzas, Cuba.
ramon.turruelles@umcc.cu

Resumen

El presente trabajo constituye una revisión bibliográfica sobre los principales aspectos relacionados con la explotación y uso eficiente del recurso agua sin afectar la sostenibilidad alimentaria, manteniendo el rendimiento esperado en los cultivos y protegiendo el recurso suelo, enfrentando las consecuencias del cambio climático de manera resiliente en cada sistema de producción. El análisis parte de reconocer los retos del siglo XXI; la alteración de la demanda y de la disponibilidad de agua por efecto del cambio climático y la modificación de las pautas de precipitación y de los ciclos de almacenamiento a escala de cuenca. Se propone una adecuada planificación del régimen de riego para los cultivos, que responde a las interrogantes planteadas; ¿cuándo y cuánto regar?

Palabras claves: *Recurso agua; régimen de riego; evapotranspiración.*

Introducción

La agricultura bajo riego es una de las actividades en las que la preocupación por hacerla “sostenible”, se torna cada vez más evidente. Esta preocupación radica en que la agricultura de regadío se relaciona con dos problemáticas vitales para la humanidad que son inseparables y que son cada vez más críticas: la provisión de alimentos de manera sostenida y el acceso y uso del agua.

En cuanto al manejo del agua de riego, se han desarrollado diferentes recomendaciones para modernizarlo y hacerlo más eficiente. Además de la introducción de adelantos tecnológicos, se ha prestado en los últimos años bastante atención al campo de la gestión del agua, principalmente en su dimensión institucional, buscando implementar reformas innovadoras que aseguren instituciones eficientes.

Nociones en torno a la sostenibilidad de actividades económico-productivas, se dirigen a dos aspectos principales que parecen ser mutuamente dependientes: por una parte se busca que las actividades productivas y sobre todo sus resultados económico/financieros/medioambientales (ingresos, beneficios, impactos) sean duraderos en el tiempo y por otra parte que los recursos base (en el caso de la agricultura; el suelo y el agua) no sean deteriorados y mantengan su capacidad productiva.

Los sistemas de producción agrícola bajo riego producen efectos en suelos y aguas subterráneas. Las variaciones en la cantidad de agua de riego producen sobreexplotación de acuíferos, erosión y/o anegamiento. Por otra parte, la mala calidad del agua utilizada para riego produce salinización, sodificación y contaminación de suelos y aguas subterráneas, y también puede presentar toxicidad para los cultivos.

El agua se recicla constantemente como consecuencia de la evaporación, producida por la energía solar, que se precipita en forma de lluvias y alimenta el caudal de los ríos que retornan a los cuerpos donde se evaporó el agua inicialmente. De este ciclo constante, el agua destinada al consumo humano y las actividades agropecuarias básicamente procede de la lluvia.

El agua es el recurso más importante; ya que las plantas, los animales y el ser humano dependen de su existencia; pero las aguas dulces existentes, que pueden usarse de forma económicamente viable y sin generar grandes impactos negativos en el ambiente, son menores al 1% del agua total del planeta. Por otro lado, el crecimiento demográfico, el aumento de los regímenes de demanda y la contaminación del líquido, han mermado el volumen per cápita disponible. Esta disminución de consumo de agua obliga a la sociedad, para la protección de los patrones de vida, aplicar criterios de conservación y de uso sustentable del agua.

La mayor parte del agua consumida por el hombre se destina a usos consuntivos, a la irrigación, al ganado y al uso doméstico. La agricultura emplea más del 70% del agua utilizada en el mundo (FAO, 2006). Esta baja eficiencia, convierte a la agricultura en el sector donde se pueden adoptar los mayores cambios tecnológicos que permitan compensar las mermas per cápita antes mencionadas.

Según Planos Gutiérrez, et al. (2015), en un análisis de los impactos del cambio climático y medidas de adaptación en Cuba; en los escenarios futuros del agua, el sector de los recursos hídricos será uno de los más severamente afectados, lo que tendrá una implicación muy grande en otros recursos y sectores. Este sector sufre y a una gran tensión, dado los cambios manifiestos en el clima.

Como base para una mejor adaptación en la gestión del agua, se requiere: la reevaluación detallada del volumen de agua aprovechable; la revaluación de la hidrología de las obras hidráulicas existentes; la revitalización de un sistema hidráulico con muchos años de explotación; la adecuada deposición de los residuales contaminantes; elevar el reúso del

agua; la erradicación de las numerosas pérdidas en la red de suministro desde las fuentes y las redes intradomiciliarias; y hacer los cambios tecnológicos necesarios para elevar la eficiencia de la operación del sistema hidráulico en las fuentes y en sus destinos finales (Gutiérrez, 2015). En el futuro se ampliará la competencia existente entre la disponibilidad de agua y la creciente demanda humana.

La adaptación del sector hídrico al cambio climático ha sido principalmente preventiva. Existe un paquete de acciones de alcance político y de gestión, encaminado a introducir o a ampliar soluciones para este reto.

La agricultura se desenvolverá en un ambiente afectado por el aumento de la frecuencia e intensidad de las sequías, la aridización del clima, la disminución de la evapotranspiración real de los ecosistemas y un pronunciado déficit hídrico. La productividad primaria neta y la densidad potencial de biomasa decaerán; se acortará progresivamente la duración en días de las fases fenológicas de cultivos importantes y la duración total de los ciclos de cultivo; y los rendimientos potenciales decrecerán. Los escenarios combinados de elevación de las temperaturas, el descenso de las precipitaciones, la disminución del potencial hídrico y de la calidad del agua, acompañados por la reducción de las áreas agrícolas debidas al retroceso de la costa y la migración de los ecosistemas costeros, conllevarán a impactos superiores sobre la producción agrícola total y la cría de animales, que el estimado por el impacto directo del aumento de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones.

El cuándo regar y cuánto regar son dos de las tres preguntas básicas que se hacen en el área de riego. Para contestarlas es preciso conocer el requerimiento de agua por las plantas y las características de los suelos, para ello se deben de estudiar los procesos de evaporación, transpiración y evapotranspiración; así mismo se requiere caracterizar los tipos de suelos a regar.

Desarrollo

Se estima que el volumen total de agua en la Tierra es de aproximadamente 1 400 millones de km³ de los cuales sólo el 2,5 por ciento, es decir, alrededor de 35 millones de km³, corresponde al agua dulce, cuyo mayor volumen se acumula en los polos, en Groenlandia y en depósitos muy profundos. De tal manera que solo el 0,01% de toda el agua del planeta, aproximadamente 200 mil km³, es aprovechable para el uso humano, al proceder de lagos, ríos, humedales y cuencas subterráneas poco profundas (PNUMA, 2003). Por otra parte, la distribución de este volumen de agua es muy heterogénea y desigual, existiendo regiones y países con gran abundancia y otros con muy escasos recursos hídricos, lo cual ha conducido incluso a graves conflictos (Díaz Duque, 2009).

El agua desempeña un papel crucial en la producción regional y mundial de alimentos. Por una parte, más de un 80% de las tierras agrícolas del mundo depende de la lluvia; en esas regiones, la productividad de los cultivos depende únicamente de una precipitación suficiente para satisfacer la demanda evaporativa y la consiguiente distribución de humedad

del suelo (FAO, 2006). Allí donde esas variables están limitadas por el clima, como sucede en las regiones áridas y semiáridas, en los trópicos y subtropicos, y en las regiones de tipo mediterráneo de Europa, Australia y América del Sur, la producción agrícola es muy vulnerable al cambio climático (FAO, 2006). Por otra parte, la producción mundial de alimentos depende del agua, no sólo en forma de precipitación, sino también, fundamentalmente, en forma de recursos hídricos disponibles para el riego. De hecho, las tierras de regadío, que representan sólo un 18% de las tierras agrícolas mundiales, producen 1.000 millones de toneladas de cereales al año, que representan aproximadamente la mitad del suministro mundial total; ello se debe a que los cultivos de regadío producen, en promedio, entre 2 y 3 veces más que los cultivos dependientes de la lluvia (FAO, 2006).

Mientras que un déficit excesivo de agua se traduce en vulnerabilidad de la producción, un exceso de agua puede tener también efectos no deseados sobre la productividad de los cultivos, ya directamente (por ejemplo, afectando a las propiedades del suelo y dañando el crecimiento vegetal), ya indirectamente (por ejemplo, impidiendo o retrasando las necesarias labores agrícolas). Los episodios de precipitación intensa, la humedad excesiva del suelo y las crecidas interfieren en la producción de alimentos y en los medios de subsistencia rurales a nivel mundial (Rosenzweig *et al.*, 2007).

Además de ser una necesidad en los procesos de preparación de los alimentos, el agua, que influye de manera determinante en la productividad de los cultivos y en la producción de alimentos, desempeña un papel crítico en relación con la seguridad alimentaria. En el mundo hay todavía 850 millones de personas mal alimentadas (FAO, 2003). Durante los próximos decenios, las presiones socioeconómicas darán lugar a una mayor competitividad entre las necesidades de riego y la demanda de los sectores no agrícolas, que podría reducir la disponibilidad y calidad de los recursos hídricos necesarios para la alimentación. Al mismo tiempo, durante este siglo el cambio climático puede reducir aún más la disponibilidad de agua para la producción mundial de alimentos, a consecuencia de los cambios medios proyectados de la temperatura y de los regímenes de precipitación, y del aumento previsto de la frecuencia de fenómenos extremos tales como las sequías o las crecidas (Rosenzweig y Tubiello, 2007).

Durante el siglo XXI, la alteración de la demanda y de la disponibilidad de agua por efecto del cambio climático afectará notablemente a las actividades agrícolas, a la seguridad alimentaria, a la silvicultura y a las pesquerías. Por una parte, un cambio en la relación entre la evaporación y la precipitación modificará la demanda de agua de las plantas, tomando como referencia la ausencia de cambio climático. Por otra parte, la modificación de las pautas de precipitación y de los ciclos de almacenamiento a escala de cuenca alterará la disponibilidad estacional, anual e interanual de agua para los ecosistemas agrícolas (FAO, 2006). En la mayoría de las regiones del mundo, los cambios del clima intensifican la demanda de riego, debido a los efectos conjuntos de una disminución de la lluvia y de un aumento de la evaporación vinculado al aumento de las temperaturas.

Por último, podría ser importante reconocer que en los próximos decenios los sistemas de producción y los recursos hídricos estarán configurados de manera determinante por la interacción concurrente de los dinamizantes socioeconómicos y climáticos. Por ejemplo, el aumento de la demanda de agua de riego para usos agrícolas dependerá tanto de la variación de las condiciones climáticas como de una mayor demanda de alimentos por una población en crecimiento; además, la disponibilidad de agua para la productividad forestal dependerá tanto de los dinamizantes climáticos como de los impactos antropógenos más importantes, particularmente la deforestación en áreas tropicales. En la cuenca amazónica, por ejemplo, la deforestación y la fragmentación creciente pueden desencadenar sequías graves que rebasarían con mucho la señal climática, incrementando así el riesgo de incendios forestales como ya ha estado ocurriendo en solamente 19 años del presente siglo.

Los impactos del cambio climático sobre las necesidades de agua de riego podrían ser grandes. Algunos estudios recientes han cuantificado además los impactos del cambio climático sobre las necesidades de riego a nivel regional y mundial, con independencia de los efectos positivos de una mayor concentración de CO₂ sobre la eficiencia de uso del agua destinada a los cultivos. Considerando los impactos directos del cambio climático sobre la demanda evaporativa de los cultivos, aunque en ausencia de impactos causados por el CO₂, (Döll, 2002) estimó un aumento de las necesidades netas de riego de los cultivos (es decir, descontando las pérdidas por transpiración) de entre un 5% y un 8% en todo el mundo de aquí a 2070, con una mayor intensidad de las señales a nivel regional (por ejemplo, +15%) en el sureste de Asia.

Según estudios realizados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL -PNUMA, 2009), desde la perspectiva de la sostenibilidad del desarrollo, interesa no sólo el nivel absoluto de la disponibilidad de agua por habitante, sino también y sobre todo la dinámica de cambio de este indicador, que en la mayor parte de los países de la región registra un marcado descenso. Es también ilustrativo analizar la proporción del recurso utilizado en relación con el total disponible.

El potencial hídrico de Cuba asciende a 38,1 km³, de los cuales 31,6 km³ (73,4%) corresponden a las aguas superficiales y 6,5 km³ (26,6%) a las aguas subterráneas. De este potencial solo son aprovechables 24 km³ y de ellos están disponibles 13,6 km³, con una mayor incidencia en las aguas superficiales (67%) (García Hernández, 2007) citado por Díaz Duque, 2016. El desarrollo hidráulico cubano ha posibilitado utilizar el 57% de los recursos hídricos aprovechables, mediante la creación de la infraestructura técnica pertinente para incrementar en 200 veces la capacidad de embalse del país y lograr que el 96% de toda la población tuviese acceso al agua potable y el 95% al saneamiento (Díaz Duque, 2016). Aproximadamente el 59,7% del total de agua planificada para todos los usos en Cuba se utiliza en la agricultura, pero no más del 50% de esa agua se convierte directamente en productos agrícolas (González Robaina *et al.*, 2014).

La Estrategia Ambiental Nacional 2007-2010, identificó por vez primera a la carencia de agua como uno de los principales problemas ambientales de Cuba, aun cuando el desarrollo

hidráulico cubano había elevado las capacidades de embalse a más de 9 600 millones de metros cúbicos desde 1959 . En tal sentido la EAN expresa: "... subsiste la carestía de agua para suplir todas las necesidades económicas, sociales y ambientales, agravado esto por la ocurrencia de fenómenos naturales (sequía prolongada, variaciones en el régimen estacional, etc.) y otros inducidos por causas antrópicas (intrusión salina, sobreexplotación, contaminación, etcétera) " citado por Díaz Duque, 2016.

Análisis realizados por expertos del INRH, utilizando datos propios y de otros autores, exponen el comportamiento de algunos de estos indicadores para Cuba (García Fernández y Cantero Corrales, 2008): Disponibilidad de los recursos hídricos: 1 220 m³ /habitante/año. Estrés hídrico: 51%. Huella hídrica: 1 712 m³ /habitante/año. Escasez de agua: 50%. Por lo que se puede afirmar que si se evalúan estos indicadores con respecto a los convencionales para valorar la sostenibilidad en la utilización de los recursos hídricos la disponibilidad de los recursos hídricos en Cuba al ser de 1 220 m³ /habitante/año está por debajo de los 1 700 m³ /habitante/año lo que indica una situación de escasez de agua.

Como se ha podido apreciar, la situación actual y perspectiva de los recursos hídricos en Cuba puede ser catalogada como delicada, y sin duda alguna, son éstos uno de sus recursos naturales más amenazados. Su incidencia en la producción de alimentos los convierte en un factor determinante en la seguridad alimentaria y por tanto en la seguridad nacional del país.

El escenario económico en el que se desenvuelve Cuba es sumamente complejo, agravado por los evidentes impactos del cambio climático, de ahí que la ruta hacia el manejo sostenible de los recursos hídricos es y será larga y azarosa.

La eficiencia hídrica es el factor más importante en el incremento de la disponibilidad del agua para la población cubana. El riego en la agricultura representa el mayor volumen de agua consumida anualmente (65%) y sin embargo muchos los sistemas empleados, fundamentalmente en el sector privado, distan mucho de ser eficientes. La introducción del riego localizado o por goteo, empleando la información agrometeorológica, posibilitará no solo reducir el consumo innecesario de agua y elevar los rendimientos agrícolas, sino también proteger al suelo de la erosión y evitar la contaminación de los cuerpos de agua.

Es por ello que se hace vital seleccionar una estrategia de máxima eficiencia del riego que puede conducir a reducciones de agua a aplicar entre un 21,6 y 46,8%, incrementos de la productividad del agua entre 17 y 32% y de la relación beneficios/costo estimada de hasta un 3,4%. Lo anterior indica la importancia desde el punto de vista económico que puede llegar a alcanzar el uso de esta estrategia en condiciones de déficit hídrico. El conocimiento de las funciones agua aplicada por riego-rendimiento y el uso de la productividad del agua, resultan parámetros factibles de introducir como indicadores de eficiencia en el planeamiento del uso del agua en la agricultura, con lo cual es posible reducir los volúmenes de agua a aplicar y elevar la relación beneficio-costo actual (González Robaina, 2014).

¿Cómo responder a esta problemática desde el estudio de los contenidos de la asignatura Riego y Drenaje en la formación de los profesionales encargados de gestionar la producción de alimentos?

Partir de las definiciones básicas relacionadas con el clima y el cultivo para una adecuada programación del riego, conociendo que esta es una metodología que permite determinar el nivel óptimo de riego a aplicar a los cultivos. Ésta consiste en establecer la frecuencia ¿cuándo regar? y tiempo de riego ¿cuánto regar? de acuerdo a las condiciones edafoclimáticas de la zona donde está desarrollándose el o los cultivos. Una apropiada programación del riego permite optimizar el uso del agua y maximizar la producción y calidad de los productos agrícolas. Para programar el riego es esencial estimar, tanto el agua que consumen los cultivos o su evapotranspiración, como la cantidad de agua que puede almacenar el suelo explorado por las raíces del cultivo.

La evaporación es el agua perdida en forma de vapor por el terreno adyacente a la planta, por la superficie del agua o por la superficie de las hojas de las plantas y está en función de la radiación solar, latitud, estación del año, hora del día y nubosidad. También está en función de la temperatura del aire, presión de vapor, viento y presión atmosférica. Los factores que afectan principalmente la evaporación, son: climáticos (principalmente la radiación solar) y superficie evaporante

La evaporación

Por otra parte a la pérdida de agua de las plantas en forma de vapor se le conoce como transpiración.

Tipos de transpiración:

Raíces ---> xilema ---> mesófilo de las hojas -----> estomas (transpiración estomática)

Raíces --> xilema --> corteza del tallo -----> epidermis (transpiración cuticular)

La transpiración está en función de factores climáticos: viento, humedad atmosférica, temperatura y radiación solar.

El término evapotranspiración, es la cantidad de agua utilizada por las plantas para realizar funciones de transpiración más el agua que se evapora de la superficie del suelo en el cuál se desarrollan. Entonces es necesario establecer la diferencia entre evapotranspiración y uso consuntivo, aunque los dos términos sean aproximadamente lo mismo, el uso consuntivo además considera al agua utilizada para la construcción de los tejidos.

$Et \cong UC = \text{uso consuntivo} = \text{agua que se evapora del suelo} + \text{agua transpirada por las plantas} + \text{agua utilizada para la construcción de los tejidos.}$

La evapotranspiración puede estar afectada por los siguientes factores: Hídricos (Disponibilidad y calidad del agua de riego, método de riego, eficiencia de riego, drenaje), Edáficos (Propiedades físicas y químicas del suelo como: textura, estructura, materia orgánica, salinidad, profundidad, fertilidad, estratificación), Vegetales (Variedad, especie, ciclo de cultivo, edad, características morfológicas de los estomas) y Climáticos (Temperatura, humedad relativa, precipitación, viento, radiación solar). Las características del clima que afectan la cantidad de agua que necesitan las plantas son en forma más esquemática las que se explican a continuación; la radiación, la temperatura, el viento y las precipitaciones:

Radiación. A mayor radiación o luminosidad mayor evaporación, por lo tanto los riegos deben ser más frecuentes.

Viento. A mayor velocidad del viento, el suelo se seca más rápido y las plantas transpiran más, requiriendo riegos más frecuentes.

Temperatura. En los días calurosos, las plantas transpiran más y los riegos deben ser más frecuentes.

Humedad del aire. Mientras más seco es el aire, las plantas pierden más agua y los riegos deben ser más frecuentes.

Precipitaciones. Influyen directamente en la cantidad de agua que necesitan las plantas. Para los efectos de riego, un criterio práctico menciona que son útiles sólo las lluvias sobre 15 mm. Es decir, si cae una lluvia de 20 mm, se considera como riego sólo 5 mm.

En resumen, los días con temperaturas altas, vientos fuertes y aire seco, provocan mayores pérdidas de agua desde el suelo y mayor consumo por las plantas, por lo que los riegos deben ser más frecuentes. Al contrario, los riegos deben ser más distanciados si los días son más frescos, con vientos suaves, temperaturas más bajas y aire húmedo.

Por otra parte, existen numerosos factores propios de cada cultivo que influyen en la cantidad de agua que necesitan para un óptimo desarrollo, siendo los más importantes el sistema radicular y el follaje.

La raíz de la planta además de servir como anclaje al suelo, absorbe el agua y los nutrientes que necesita la planta para su desarrollo. El tamaño de la raíz depende del cultivo y de su estado de desarrollo. Hay algunos factores que limitan o alteran el desarrollo normal de las raíces como capas de suelo compactadas o pie de arado, capas de suelo muy arcillosas o demasiado arenosas, capas de piedras y aguas subterráneas. Algunos de estos problemas tienen solución: En suelos con pie de arado se puede usar un arado cincel que rompa la capa compactada; en situaciones más críticas se debe recurrir al arado subsolador. El nivel de las aguas subterráneas se puede controlar construyendo drenes profundos. Otros

problemas como las capas de arcilla o arena en el perfil del suelo no tienen solución, y se deben adaptar las técnicas de cultivo y riego a la condición del suelo.

El follaje influye teniendo en cuenta que sobre el 90% del agua que absorbe la planta vuelve a la atmósfera por la transpiración y respiración de las hojas. A mayor desarrollo del cultivo las plantas necesitan mayor cantidad de agua.

Como en las bibliografías a consultar es fácil encontrar los métodos de determinación de la evapotranspiración, no serán objeto de descripción en la presente monografía, no obstante si es necesario conocer los mismos y determinar qué métodos vamos a emplear en cada estudio de caso, de forma que permita obtener la información adecuada.

¿Cuándo regar?

El cuándo regar o frecuencia de riego se refiere al lapso de días entre riego y riego.

Los factores que influyen en la respuesta a la pregunta del cuándo regar, son principalmente:

La necesidad de agua de los cultivos

La disponibilidad de agua para el riego

La capacidad de la zona radicular para almacenar el agua

La determinación del cuándo regar está en función principalmente del porcentaje de humedad en el

suelo. Con base en este parámetro, existen métodos para determinar el cuándo regar, los principales

son:

- 1.- Métodos gravimétricos
- 2.- Métodos tensiométricos
- 3.- Bloques de resistencia
- 4.- Métodos combinados (Bioclimático)
- 5.- Métodos basados en observación de la planta (altura, color, movimiento)

El requerimiento de riego, será el valor que nos indique la cantidad de agua que habrá que aplicarse a un cultivo, tomando en cuenta la evapotranspiración y la precipitación del lugar.

Básicamente existen dos métodos para determinar el cuándo regar mediante un calendario de riego, estos son: Método gráfico y Método analítico.

Método gráfico: Para determinar las fechas de riego y el número de riegos, este método resulta útil cuando no se dispone de herramientas de cálculo. En general, es un método muy aproximado.

Metodología.

Balance Hídrico: El balance hídrico se establece para un lugar y un período dados, por comparación entre los aportes y las pérdidas de agua en ese lugar y para ese período. Se tienen también en cuenta la constitución de reservas y las extracciones ulteriores sobre esas reservas. Las aportaciones de agua se efectúan gracias a las precipitaciones. Las pérdidas se deben esencialmente a la combinación de la evaporación y la transpiración de las plantas, lo cual se designa bajo el término evapotranspiración. Las dos magnitudes se evalúan en cantidad de agua por unidad de superficie, pero se traducen generalmente en alturas de agua; la unidad más utilizada es el milímetro. Al ser estas dos magnitudes físicamente homogéneas, se las puede comparar calculando, ya sea su diferencia (precipitaciones menos evaporación), ya sea su relación (precipitaciones sobre evaporación). El balance es evidentemente positivo cuando la diferencia es positiva o cuando la relación es superior a uno. Se elige una u otra expresión en función de comodidades o de obstáculos diversos.

El estudio de los balances hídricos es complejo por el hecho de que las dos variables consideradas no son independientes. La cantidad evaporada depende evidentemente de la cantidad de agua disponible: cesa cuando el volumen de agua aportada por las precipitaciones está agotado. Esto condujo a introducir la noción de evapotranspiración potencial: la cantidad de agua que puede pasar en la atmósfera únicamente en función del estado de ésta, suponiendo que la cantidad de agua disponible no sea un factor limitante.

Es común, en el estudio de los balances hídricos, comparar las precipitaciones P y la evapotranspiración potencial ETP , lo cual permite distinguir situaciones diferentes en función de umbrales que son directamente significativos para un lugar o un período dado: Si $P < ETP$, la evaporación real será igual a P ; habrá deducción sobre las reservas, ausencia de escurrimiento; el período se denominará deficitario. Si $P > ETP$, la evaporación real será igual al ETP , habrá escurrimiento y constitución de reservas; el período se llamará excedente. Los problemas prácticos relativos a las mediciones, a los órdenes de magnitud considerados, imponen variaciones en los métodos de estudio y de presentación de los balances hídricos. Las precipitaciones son en general medidas por una densa red de estaciones de observación antiguas, bastante confiables y comparables. Las medidas de evapotranspiración potencial son posibles, con aparatos como el evapómetro de Piche (al abrigo) o el barco Colorado. Pero la red de observación no incluye los mismos caracteres de densidad, de comparabilidad y de fiabilidad que la de las precipitaciones. Cada año se dispone de nuevos dispositivos y métodos para los agricultores. Dos técnicas nuevas para la

determinación de humedad en el suelo utilizan instrumentos de medición de reflectancia en el dominio del tiempo (sondas TDR) y de capacitancia eléctrica (Sondas-C y reflectómetros que funcionan en el dominio de frecuencia [FDR, por sus siglas en inglés]).

Los instrumentos TDR funcionan bajo el principio de que la presencia de agua en el suelo afecta la velocidad de propagación de una onda electromagnética (la hace más lenta). El TDR envía una onda electromagnética a través de una guía (generalmente un par de puntas paralelas de metal) colocada en el suelo a la profundidad deseada. El TDR entonces mide el tiempo que le toma a la onda viajar por la guía hacia el suelo y regresar. Este aparato registra el tiempo y lo convierte a una lectura de la humedad del suelo. Entre más mojado esté el suelo, más tiempo le toma a la onda magnética viajar por el suelo y regresar por la guía.

Algunas ecuaciones de referencia incluyen ecuaciones basadas en alfalfa (ETr) y en césped (ETo). Existen varias ecuaciones, cada una con sus propias ventajas y desventajas. Otra ecuación usada con buenos resultados y más recientemente es la propuesta por Penman-Monteith FAO 56.

Plan de riego de una unidad agrícola: El plan de riego asegura el régimen de riego de los cultivos y es parte integrante del plan de producción de cada unidad agrícola. El objetivo principal del plan anual de la utilización del agua es hacer un balance de ésta y del trabajo para comprobar si las fuentes de abasto pueden o no suministrar el agua necesaria y para determinar la necesidad de regadores y equipos de riego.

Los planes de aprovechamiento del agua dependen de los factores siguientes:

1. Capacidad de la fuente de abasto.
2. Cantidad y número de cultivos diferentes que se regarán.
3. Tipo y estado de los suelos a regar.
4. Tecnología y estado técnico del sistema de riego.
5. Organización del trabajo en el riego.

Para componer un plan de riego para una unidad agrícola son necesarios los materiales y datos siguientes:

1. Plan esquema del área del riego en escala de 1:25000 ó una mapificación empleando imágenes satelitales obtenidas de *Google Earth* y el uso del *Global Position System* (GPS, que contenga los límites de cada parcela, lote, distrito o plan, es decir, cada unidad agrícola debe de estar bien delimitada, así como la fuente, los canales y las cajas distribuidoras para cada parcela de riego en función de la extensión del sistema de riego. Deben señalarse en el esquema los puestos hidrométricos y los pozos de observación de los niveles de agua subterráneas. En caso de no haber planos en las escalas indicadas se utilizarán otros o simplemente un esquema.

2. Datos sobre el tipo y área ocupada, o los cultivos sembrados y su localización en las parcelas.
3. Cantidades de agua necesaria en función de los cultivos y las normas consideradas en el régimen de riego de proyecto.
4. Datos sobre la filtración en los canales y su coeficiente de utilidad y aprovechamiento útil del agua, así como la de las normas brutas.
5. Características de los suelos en cada campo y, además, la profundidad de humedecimiento, la pendiente y la técnica de riego utilizada en dicho campo.
6. Datos sobre la capacidad de los canales.
7. Números de regadores, bombas y equipos de aspersion en existencia y necesarios.

Plan de riego del sistema

Se elabora después de preparado los planes de riego de las unidades agrícolas y presentadas las solicitudes de agua. Por otra parte estas solicitudes de agua se comparan con las posibilidades de la fuente de abasto.

El plan de riego del sistema consta de 3 partes:

1. Suma de todos los planes de los consumidores (planes, tipo de entidad productiva).
2. Comparación del volumen de agua disponible por el sistema con las necesidades de agua.
3. Plan de distribución de agua dentro del sistema, para cada partidador de cada unidad agrícola.

Distribución del agua

La distribución correcta del agua absorbe especial importancia tanto en un sistema de riego grande como en una unidad agrícola. Cuando las necesidades de agua están por encima de las cantidades disponible es necesario hacer un régimen de distribución de agua para los cultivos priorizados. Se hacen cálculos económicos para ver qué medidas tomar. Algunas veces se toma la alternativa de efectuar solamente aquellos riegos que producen menos pérdidas de agua.

Cuando hay un gran déficit de agua se suele hacer, en algunos casos, un régimen de distribución de agua en tanto por ciento de las cantidades planteadas para cada consumidor y este gasto se mantiene durante todo el tiempo en los partidores. La distribución del agua dentro de la unidad agrícola se hace según las necesidades interiores.

En la práctica existen varios métodos de distribución del agua en un sistema de riego:

1. Distribución con gasto constante. Asegura un gasto determinado, constante para cada consumidor (plan, lote, etc.), durante toda la temporada de riego. Las ventajas de este método consisten en que por cada canal corre un caudal de agua constante y

su capacidad se puede reducir al mínimo, así como las pérdidas de agua. El consumo del agua dentro de la unidad agrícola puede organizarse según las conveniencias de la misma unidad. Este método es especialmente ventajoso cuando se conduce el agua por tuberías con secciones transversales mínimas.

2. Distribución por turnos. Se aplica sobre todo en los canales menores (terciarios y secundarios). Para cada lote y parcela se determina el periodo en que se deben recibir agua (horas diarias o días en la semana). Este método tiene sus ventajas y desventajas. Entre estas últimas se encuentra la de no satisfacer bien las necesidades de agua y el desperdicio de esta; además, no se tienen en cuenta las lluvias, la temperatura existente y los vientos.
3. Distribución de agua por solicitudes. Asegura el agua siempre que se requiere. Entre sus ventajas se pueden citar la correspondencia con las necesidades de agua, aunque requiere canales de mayor capacidad.

Este método también es exigente en conocimientos profundos de las necesidades reales de agua por parte de las plantas.

Para el caso del proyecto se tomara la distribución por gasto constante, ya que se tomara agua durante el tiempo que sea determinado por los regímenes de riego y delimitado por los hidromódulos calculados para dicha temporada.

Hidromódulos

Una vez establecido el régimen de riego calculado para cada cultivo se determina la jornada del hidromódulo en el cual en su primera variante de construcción suele llamarse preliminar o incompleto. Cuando se tiene terreno cultivado y terreno en rotación de cultivos con diferente régimen de riego, los gráficos del hidromódulo se construyen para todos los terrenos cultivados y en rotación.

El hidromódulo es el índice técnico-económico más importante en un sistema de riego ya que determina la capacidad máxima posible del riego de la fuente.

La programación del riego partiendo del balance hídrico se basa en conocer la humedad de dos puntos de control para cada técnica sea por muestreo gravimétrico o por cálculo de la evapotranspiración. Los puntos de control han de establecerse "antes" y "después" de la posición que tiene la técnica al inicio de un riego. En los casos que se produzcan lluvias los puntos de control se trasladan teniendo presente la posición en que quedó la técnica y desde luego en la que comenzará el próximo riego después de la lluvia.

La secuencia de cálculo es la siguiente:

- a) Calcular la evapotranspiración diaria para cada etapa de desarrollo del cultivo.
- b) Calcular de las precipitaciones caídas el agua aprovechable.
- c) Calcular la reserva de humedad inicial del suelo a partir de la fórmula:
 $W_i = 0.8 \times IR$
- d) Calcular la humedad final del día a partir de la fórmula de balance hídrico:
 $W_f = W_i + P_a + M_p - Etc$

- e) Evaluar la W_f con respecto a la reserva de humedad mínima calculada y si el valor de la W_f se acerca a menos de una norma de riego se decide el momento de regar antes de que se llegue al PMP y se caiga en un estrés hídrico en el cultivo, estas evaluaciones se realizan con una frecuencia de de 5 - 10 días en una decena.
- f) Finalmente se realiza el gráfico en el cual se indica el comportamiento calculado para cada día o decena, en el cual se especifica el momento del riego y la cantidad de agua a emplear adecuando las normas calculadas.

Método analítico: La base fundamental de este método es el de un “balance hídrico”, en el cual se analizan las entradas y salidas de agua en el suelo, éstas estarán representadas por los riegos y los requerimientos de riego de los cultivos respectivamente, a la profundidad radicular del cultivo.

El procedimiento de cálculo consiste en restar el requerimiento diario de riego del cultivo a la lámina de agua que se debe agotar en un determinado intervalo de tiempo; esto es, el número de días necesarios para agotar la lámina de riego definida. El proceso termina cuando el volumen total suministrado al suelo es aproximadamente igual al requerimiento de riego total del cultivo, y se completa el ciclo vegetativo del mismo.

Los datos mínimos requeridos para determinar las fechas de un calendario de riego por éste método son:

- ✓ del cultivo; la evapotranspiración mensual y el ciclo vegetativo,
- ✓ del suelo; la capacidad de campo (C.C.), punto de marchitamiento permanente (P.M.P.), densidad aparente (D_a) y profundidad radicular (H).

Secuencia de cálculo.

A continuación se presenta un formato para facilitar la programación de riegos por este método, y también se describe el procedimiento de cálculo para obtener los valores de cada una de las columnas.

Con estos resultados previos, iniciamos el cálculo de cada una de las columnas del formato.

Col. 1.- Se indican los meses que comprende el periodo vegetativo y días del mes desde la fecha de siembra o plantación.

Col. 2.- Evapotranspiración del cultivo expresada en mm/ha/día.

Col. 3.- Precipitación caída y precipitación aprovechable a partir del cálculo del coeficiente M empleando los valores de m_1 y m_2 .

Col. 4.- Indicar en el caso de que haya que regar la norma neta parcial a aplicar.

Col. 5.- Calcular la W_i y la W_f del día o de la decena

Almacenamiento final: son las humedades que van quedando en el suelo después de un riego y de los requerimientos de humedades por período. Se inicia con el suelo a C.C. , y se

le va restando el consumo de humedad en los períodos, y vuelve a tomar el mismo valor hasta que haya otro riego de auxilio.

DIA	Eo (mm)	Kc	ET (m ³ .ha ⁻¹)	P (mm)	Pa (m ³ .ha ⁻¹)	M (m ³ .ha ⁻¹)	Wi (m ³ .ha ⁻¹)	Wf	OBS.
18	3,2	0,60	19,2				1359	1340	
19	3,2	0,60	19,2				1340	1321	
20	3,4	0,60	20,4				1321	1301	
21	3,7	0,60	22,2			330*	1180	1510	Muestreo 1180 (m ³ .ha ⁻¹)
22	3,4	0,60	20,4				1510	1490	
23	3,6	0,60	21,6				1469	1446	
24	3,3	0,60	19,8				1424	1404	
25	3,4	0,60	20,4				1404	1383	
26	3,4	0,60	20,4	12	120		1503	1483	
27	3,4	0,60	20,4				1483	1463	
28	3,4	0,60	20,4				1463	1443	
29	3,4	0,60	20,4				1443	1423	
1	3,4	0,60	20,4				1423	1403	

* 1510-1180= 330 (m³.ha⁻¹)
DOSIS O NORMA DE RIEGO

1383 + 120 = 1503 (m³.ha⁻¹)
TODA LA LLUVIA SE APROVECHO

Figura 1. Hoja de cálculos para un régimen de riego de explotación diario. Idea de los autores.

Para la realización de los cálculos necesarios para la confección del régimen de riego para un cultivo se emplea el CROPWAT v.8.0, que es una herramienta computacional para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos y la programación del riego basada en la información sobre suelo, clima y cultivo dada por el usuario que puede ser entrada directamente en el programa o importada de otras aplicaciones. El CROPWAT 8.0 presenta además una base de datos agroclimática de más de 5 000 estaciones de todo el mundo con datos climáticos mensuales patrones.

Aproximación FAO Penman-Monteith: Un panel de expertos e investigadores organizado por la FAO en 1990 en colaboración con la Comisión Internacional de Riego y Drenaje y la Organización Meteorológica Internacional para revisar las metodologías propuestas por la FAO en sus publicaciones seriadas hasta esa fecha para la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos, recomendó la adopción del método combinado de Penman Monteith como el nuevo estándar para la ETo y presentó una revisión completa de los procedimientos para el cálculo de sus parámetros.

Concepto cultivo de referencia- cultivo hipotético con una altura de 0,12 m y una resistencia de superficie de 70 s/m y un albedo de 0,23, lo cual se asemeja a la evaporación de una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme creciendo activamente y suplido adecuadamente de agua.

El método de FAO Penman-Monteith (1990) para estimar ET, es obtenida de la ecuación original de Penman-Monteith y las ecuaciones de la resistencia aerodinámica y superficial, estima la ETo expresada como:

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

Donde:

ETo – evapotranspiración de referencia [mm day⁻¹],
 Rn- radiación neta en la superficie del cultivo [MJ m⁻² day⁻¹],
 G- densidad de flujo calorífico [MJ m⁻² day⁻¹]
 T – temperatura media del aire diaria a 2m de altura [°C],
 U₂ - velocidad del viento a 2m de altura [m s⁻¹],
 e_s - presión de vapor de saturación [kPa],
 e_a - presión de vapor actual [kPa],
 e_s – e_a – déficit de presión de vapor de saturación [kPa],
 Δ - pendiente de la curva de presión de vapor [kPa °C⁻¹],
 γ - constante psicométrica [kPa °C⁻¹].

Para la realización de los cálculos existen diversas hojas de Excel, como es Eto-PM que consiste en una hoja de cálculo de Excel para computarizar las referencias de evapotranspiración mediante el uso de la ecuación FAO Penman-Monteith equation (Allen *et al.*, 1998 versión en español FAO, 2006). Además una de las más completas es la Penman-Monteith Monthly.

Ventajas de la introducción del concepto de ETo: La ETo permite aislar el efecto del clima sobre el proceso de evapotranspiración y da un valor estándar con el cual: puede ser comparada la evapotranspiración en diferentes periodos del año o en otras regiones; puede ser relacionada la evapotranspiración de otros cultivos.

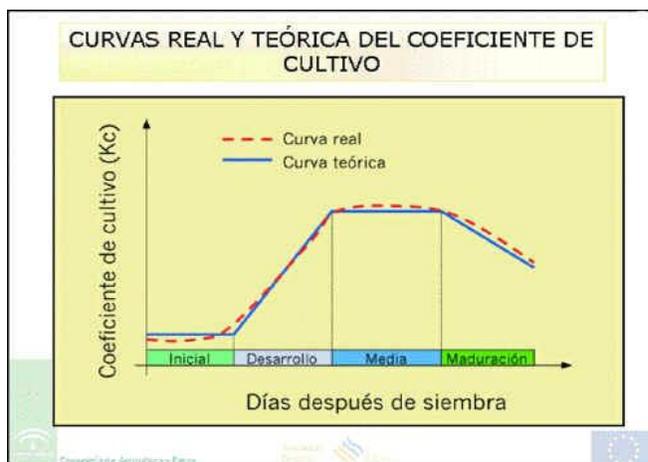
No obstante, ninguna ecuación de base climática puede predecir perfectamente la evapotranspiración en cada condición climática debido a las simplificaciones en la formulación y los errores en la medición de los datos climáticos. La ecuación de FAO Penman-Monteith es una representación simple de factores físicos y fisiológicos que gobiernan el proceso de evapotranspiración.

La mayor ventaja del uso de la aproximación FAO Penman Monteith para la estimación de ETo está en su aplicación para el uso de los coeficientes de cultivo que permiten estimar la ETc de cultivos agrícolas a partir de la fórmula:

$$K_c = ET_c / ETo$$

Aproximación de coeficiente de cultivo: En esta aproximación, las diferencias en la anatomía foliar, las características estomáticas, propiedades aerodinámicas e incluso el albedo entre el cultivo analizado con respecto al cultivo de referencia están resumidas en el coeficiente de cultivo K_c .

En los cultivos anuales normalmente se diferencian 4 etapas o fases de cultivo:



Etapa inicial: Desde la siembra hasta un 10% de la cobertura del suelo aproximadamente.

Etapa de desarrollo: Desde el 10% de cobertura y durante el crecimiento activo de la planta.

Etapa media: Entre floración y fructificación, correspondiente en la mayoría de los casos al 70-80% de cobertura máxima de cada cultivo.

Etapa de maduración: Desde la madurez hasta recolección.

Aunque en la programación en nuestro

país regularmente se emplean tres etapas, considerando la etapa de desarrollo y etapa media como una sola.

Figura 2. Etapas de desarrollo de diferentes cultivos (FAO, 2011).

Necesidades o requerimientos hídricos del cultivo (CWR) por sus siglas en inglés (Crop Water Requirement). Definición CWR: la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración en un campo cultivado.

Bajo condiciones estándar (no afectaciones del cultivo por estrés hídrico u otras): No obstante, el término de necesidades o requerimientos hídricos CWR se refiere a la cantidad de agua que necesita ser aplicada al cultivo y la ET_c se refiere a la cantidad de agua perdida por evapotranspiración.

En el CROPWAT 8.0 el cálculo de CWR se hace por decenas y se utiliza la aproximación de K_c para estimar ET_c . Los requerimientos de agua del cultivo CWR se calculan como la diferencia entre la ET_c y la lluvia efectiva.

Precipitación efectiva: Para la producción agrícola se refiere a la porción de la precipitación que puede ser efectivamente usada por las plantas, o sea la cantidad de precipitación que queda después de considerar las pérdidas por escurrimiento superficial y por percolación del agua hacia otras zonas más profundas del perfil del suelo.

Factores que determinan la cantidad de agua efectiva infiltrada en el suelo: tipo de suelo, pendiente, cubierta vegetal. El método más efectivo para la determinación de la precipitación efectiva es el de observación de campo. La precipitación es altamente efectiva cuando no se produce escurrimiento superficial y muy poco efectiva para pequeños valores de lluvia que se pierden rápidamente por evaporación.

CROPWAT 8.0 ofrece la posibilidad de usar para el cálculo de Precipitación Efectiva cuatro métodos:

1. Porcentaje fijo de la precipitación establecido por el usuario.
2. Dependiente de los valores de Precipitación
3. Formula Empírica
4. Método del USDA Soil Conservation Service.

NECESIDADES DE RIEGO.

El riego se requiere cuando la precipitación es insuficiente para compensar la pérdida de agua por evapotranspiración del cultivo.

El objetivo primario del riego es aplicar el agua en el momento adecuado y en la magnitud adecuada.

Calculando un balance hídrico del suelo en la zona radical del cultivo sobre una base diaria de cálculo, el momento y la lámina de riego puede ser pronosticada para un ciclo de cultivo dado.

cuantificación del balance hídrico del suelo

Ecuación general:

$$\Delta S = (P + I + CR) - (D + E + ET_c)$$

Donde:

ΔS – variación del almacenamiento del agua en la profundidad considerada (para un cultivo la Z_r)

P- precipitación

I- riego

CR – ascenso capilar o escurrimiento superficial desde zonas mas altas.

E- escurrimiento superficial

D- pérdidas por drenaje o percolación a otras capas más profundas del suelo.

ET_c – evapotranspiración del cultivo

Disponibilidad del agua en el suelo para las plantas:

ADS ó TAW – reserva de agua total disponible en el perfil de suelo considerado

TAW = LSAD – LIAD = Cc - PMP

RFU ó RAW – reserva de agua del perfil del suelo fácilmente utilizable por las plantas

RAW = LSAD - LP

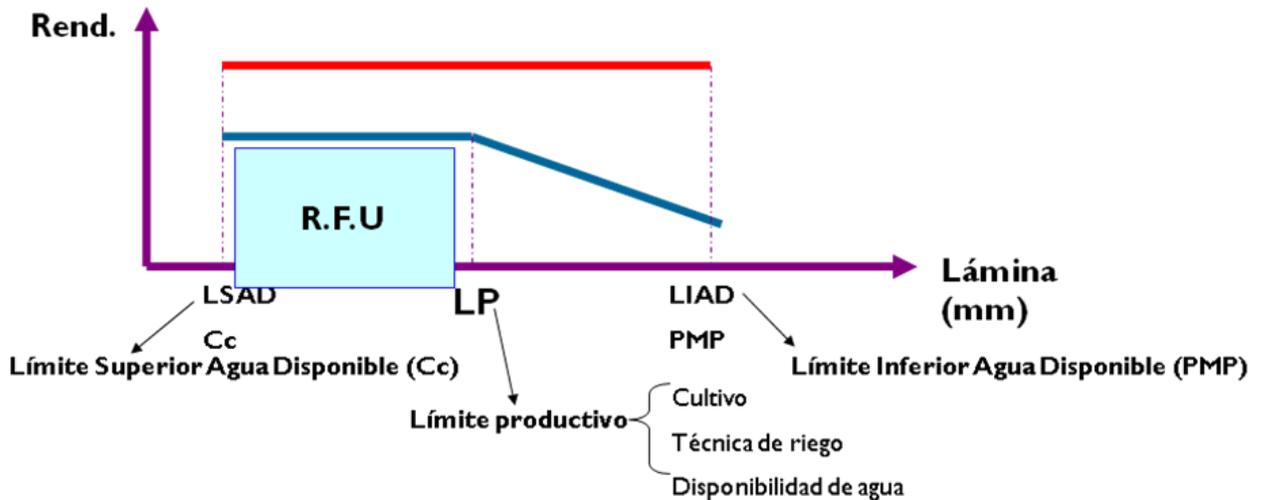


Figura 3. Esquema de la disponibilidad del agua en el suelo para las plantas (Cisneros Almazan, 2005).

Esquema de riego en función de la disponibilidad real del agua para las plantas.

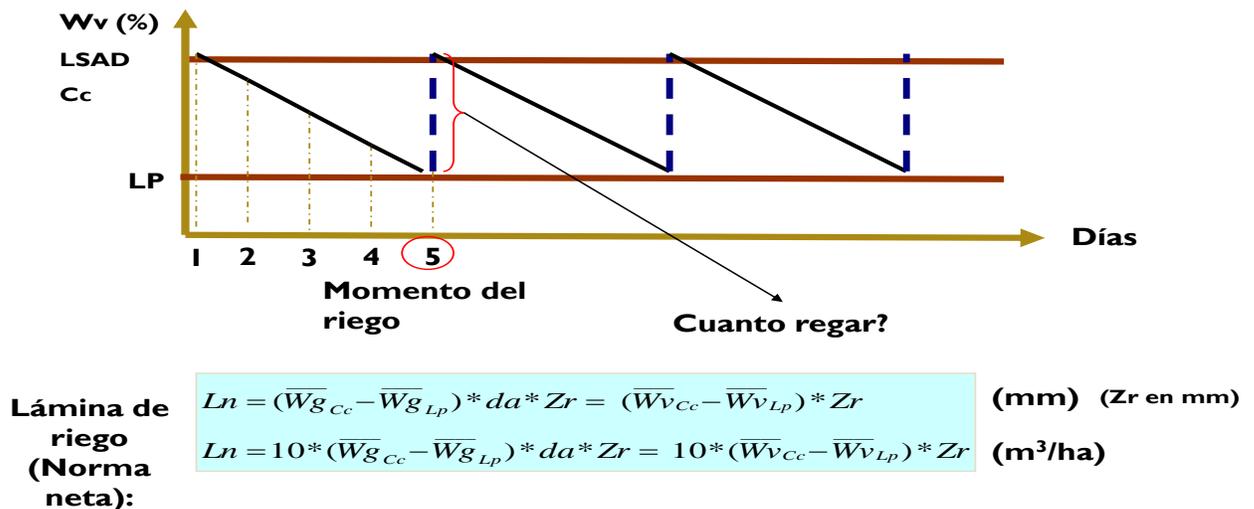


Figura 4. Esquema de riego en función de la disponibilidad real del agua en el suelo para las plantas (Idea de los autores a partir de Cisneros Almazan, 2005).

Dentro del **CROPWAT 8.0** el balance hídrico del suelo se hace diario hasta la profundidad de la zona radical del cultivo y se expresa en términos de **agotamiento de la TAW** al final del día:

$$Dr = Cc - L_{Wv_{\text{actual}}}$$

El balance se calcula entonces como:

$$Dr_i = Dr_{i-1} - (P_i - RO_i)_i - I_i - CR_i + ETc_i + DP_i$$

Donde:

Dr_i – agotamiento de TAW al final del día i [mm],

Dr_{i-1} – agotamiento de TAW en el día anterior, $i-1$ [mm],

P_i - precipitación en el día i [mm],

RO_i - escurrimiento superficial en el día i [mm],

I_i – lámina de riego neta del día i [mm],

CR_i – ascenso capilar desde el manto freático en el día i [mm],

ETc_i – evapotranspiración del cultivo en el día i [mm],

DP_i - pérdidas de agua por debajo de la zona radical (si W_v actual $>$ C_c) en el día i [mm].

Las necesidades netas de riego diarias son iguales a Dr_i . Para evitar el estrés los riegos se calculan en el momento que $Dr_i = RAW = C_c - LP$ – fracción crítica de agotamiento. Para evitar la percolación la lamina de riego debe ser siempre menor o igual a Dr_i .

ESTRUCTURA GENERAL DEL PROGRAMA CROPWAT 8.0

El CROPWAT 8.0 está organizado en 8 módulos diferentes:

5 MÓDULOS DE ENTRADA DE DATOS:

1. Climate/ ET_o : para la entrada de datos medidos de ET_o o datos de las variables climáticas para el cálculo de ET_o Penman-Monteith;
2. Rain: para la entrada de los datos de lluvia y el cálculo de la lluvia efectiva;
3. Crop (dry crop or rice): para la entrada de datos del cultivo y la fecha de siembra.
4. Soil: para la entrada de los datos del suelo (solo necesario para la programación de riego);

3 MÓDULOS DE CÁLCULOS

5. CWR – para el cálculo de las Necesidades o Requerimientos de Agua del cultivo.
6. Schedules (dry crop or rice) – para el cálculo de la programación del riego.
7. Scheme – para el cálculo de la planificación del riego en un área con varios cultivos.

Ver Tutorial para el uso del CROPWAT versión 8.0 (Guía de Usuario, 2006)

Conclusiones

Los contenidos abordados posibilitan plantear la necesidad de diseñar el régimen de riego de los cultivos a partir de la concepción del ahorro mediante un uso y manejo adecuado del recurso agua y la energía. En la actualidad existen serias limitaciones con los recursos hídricos disponibles en Cuba, los cuales se encuentran heterogéneamente distribuidos en el espacio y el tiempo. Estas limitaciones son debidas tanto a factores de origen natural como antropogénicos. Las respuestas a las interrogantes de cuándo y cuánto regar es de vital importancia siempre que se aplique la metodología propuesta y una vez realizados los cálculos necesarios permite ajustar las necesidades hídricas del cultivo que se trate y con ello lograr un suministro de agua suficiente y fiable, además de aumentar los rendimientos de la mayoría de los cultivos. Con el empleo del software CROPWAT 8.0 permite calcular

la cantidad de agua requerida para compensar la pérdida por evapotranspiración en un campo cultivado a la vez que se tienen en cuenta los ingresos por precipitación aprovechable en el suelo, facilitando así un reajuste del intervalo de riego y los números de riego calculados en el proyecto.

Referencias bibliográficas

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. AND SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998.

CEPAL. Cambio Climático y Desarrollo, una reseña. Documento de Proyecto, LC/W.232, CEPAL, Santiago, Chile, 2009.

DÍAZ DUQUE, J. A. El Modelo Cubano de Sostenibilidad. Conferencia Magistral impartida en el Taller Científico Internacional por el X Aniversario del Centro de CCIA'2010 7 Investigaciones y Servicios Ambientales "ECOVIDA". Pinar del Río, 2-4 de diciembre de 2009.

DÍAZ DUQUE, J. A. Principales causas de los conflictos por los recursos naturales. Taller sobre la evaluación de la sostenibilidad. La Habana, Capitolio Nacional, 8 de julio de 2009.

DÖLL P. Impact of Climate Change and variability on Irrigation Requirements: A Global Perspective. *Climate Change* 54:269–293, 2002.

FAO. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Versión española del "FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56". Roma, 2006.

GARCÍA FERNÁNDEZ, J. M. y CANTERO CORRALES, L.. Indicadores globales para la evaluación del uso sostenible del agua: Caso cubano. *Voluntad Hidráulica*, año 46, no. 100, p. 12-19, 2008.

GARCÍA HERNÁNDEZ, J. M. Aplicación del enfoque ecosistémico a la gestión integrada de los recursos hídricos. Aproximación al caso cubano. *Revista Voluntad Hidráulica*, Año XLV, No. 99, p. 2-17, 2007.

GONZÁLEZ ROBAINA, F. Uso de las Funciones Agua-Rendimiento y la productividad agronómica del agua en la planificación del agua en cultivos de importancia agrícola en Cuba. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático* Vol. 1 num 1 2015, pag 95-114, 2014.

Guía de Usuario CROPWAT versión 8.0. 2006

PLANOS GUTIÉRREZ, E. O., GUEVARA VELAZCO, A. V., ROGER RIVERO VEGA, R., PÉREZ SUÁREZ, R., CENTELLA ARTOLA, A., FERNÁNDEZ RICHELME, A., HERNÁNDEZ GONZÁLEZ, M., SUÁREZ RODRÍGUEZ, A., HERNÁNDEZ ZANUY, A., GUZMÁN, J., MERCADET PORTILLO, A., ÁLVAREZ BRITO, A., VILLALÓN HOFFMAN, A., PÉREZ RODRÍGUEZ, A., ORTIZ BULTÓ, P., RODRÍGUEZ OTERO, C. M. Impactos del Cambio Climático y Medidas de Adaptación en Cuba. Instituto de Meteorología Loma de Casablanca S.N. Municipio Regla. La Habana, 2015.

PNUMA: GEO. Global Environment Outlook 3. Pasado, presente y futuro. En: CD-ROM GEO Reports: Analyses and Outlooks, 2003.

FAO. Publication No. 56. Irrigation and Drainage Series of FAO. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Versión en español 2006.

ROSENZWEIG, C. Y TUBIELLO, F. Metrics for Assessing the Economic Benefits of Climate Change Policies in Agriculture. Organization for Economic Co-operation and Development: OCDE, Paris, 2007.