

**Universidad de Costa Rica**  
**Escuela de Agronomía**  
**Estación Experimental Fabio Baudrit Moreno**

**Fertirrigación y eficiencia de uso del agua en agricultura**

**Dr. Freddy Soto Bravo.**

Alajuela, 2019.

**Resumen.** A nivel global, la creciente demanda de alimentos asociado al crecimiento de la población y el cambio climático presagian un incremento sustancial y conflictivo en la demanda de los recursos de agua dulce entre sectores. Sin embargo, dichos recursos son limitantes, alcanzando tan solo el 1.5% de los recursos de agua total del planeta, con serias amenazas de escases, distribución, contaminación e ingobernabilidad. Actualmente, la crisis del agua (CA) es un tema que ocupa los primeros lugares de importancia mundial junto al cambio climático y la migración. Al mismo tiempo, la seguridad alimentaria, la salud, el empleo y la estabilidad social pueden ser seriamente impactados por la CA. Esto plantea la necesidad de realizar un uso eficiente del agua (UEA) dulce disponible en el mundo, donde la agricultura es el principal consumidor con un 69%. Bajo un enfoque agronómico, el UEA se evalúa como Productividad del agua (PA), ya sea como PA física en términos de rendimiento ( $\text{kg m}^{-3}$ ) o como PA económica en términos monetarios ( $\text{\$ m}^{-3}$ ). La UEA es afectada por múltiples factores tales como la especie, la genética, el clima, prácticas de cultivo y el manejo del riego. Para realizar un UEA en la actividad agrícola se requieren conocimientos y herramientas técnicas para determinar el volumen (cuánto) y la frecuencia de riego (cuándo) según los requerimientos del cultivo. El UEA se puede mejorar aplicando métodos de programación y control para determinar cuánto y cuándo regar, considerando la interacción suelo/sustrato-planta-atmósfera. Actualmente, existe la tecnología para realizar un UEA, sin embargo, esta se utiliza en muy baja escala. En esta revisión se plantean los principales métodos de programación y control del riego, y

cuales parámetros asociados al medio de cultivo, a la planta y al clima, pueden ser monitoreados para realizar un UEA.

Palabras clave: Eficiencia de uso de agua, productividad del agua, crisis del agua, evapotranspiración, control del riego.

### **Antecedentes, justificación e importancia**

Existe falta de información y concientización generalizada, acerca de la importancia que representa el uso racional del agua en nuestra sociedad. Es necesario desarrollar campañas de divulgación para informar y concientizar a la población acerca de la importancia global que reviste el UEA. Actualmente, los tres principales temas de mayor importancia global, son el cambio climático, la migración y la **crisis del agua** (CA). Esta última se ubica como el tercer problema de mayor potencial de impacto y el noveno con mayor probabilidad de que ocurra (WWAP, 2016). **La CA** está estrechamente relacionada con otros temas de importancia global como es el cambio climático, la seguridad alimentaria, el crecimiento demográfico, la degradación ambiental, la migración, la inseguridad alimentaria, los conflictos intra e inter-estatales, problemas de salud y malnutrición, y el crecimiento de construcciones urbanas, industriales y turísticas (WWAP, 2016).

Al mismo tiempo, el **crecimiento demográfico mundial** se proyecta a 9000 millones de habitantes en el año 2050 (Tilman et al., 2002), lo cual supone un incremento sustancial en la demanda mundial de alimentos y consecuentemente en la demanda de agua para su producción. Entre 1900 y 2010, la población mundial aumentó en un 340 por ciento, mientras que la extracción de agua aumentó en un 630 por ciento (FAO, 2016). La CA asociada al cambio climático, pronostican graves consecuencias en la oferta mundial de alimentos. Se estima que para el año 2050 dicha demanda se incrementará un 66% en alimentos vegetales y un 76% en alimentos pecuarios (WWAP, 2016). Estudios realizados han demostrado que la escasez de agua dulce para riego, podrían duplicar los efectos perjudiciales del cambio climático en la agricultura, debido a la reducción de los rendimientos de los principales cultivos como maíz, soja, trigo y arroz (Elliot et al., 2013).

**La gobernanza ineficiente del agua**, contribuyen a agudizar la CA a nivel global. La ausencia de políticas estatales objetivas, obstaculiza la gestión integrada del agua y favorece la ineficiencia en la distribución de los recursos hídricos. La gestión sostenible del agua para el crecimiento económico y el empleo no es solo una cuestión de disponibilidad de recursos y dinero, sino también un asunto de contar con políticas sólidas de gobernabilidad (WWAP, 2016). El cambio climático aunado a la ingobernabilidad del agua, tiene un fuerte impacto sobre la **disponibilidad geográfica y estacional del agua**, en ciertas regiones alrededor del mundo, potenciando su vulnerabilidad. Aunado a lo anterior, el incremento de la población mundial y el cambio climático genera **escases del agua** y consecuentemente mayor **competencia por el recurso hídrico**, favoreciendo la aparición de conflictos entre sectores productivos, comunales, regionales e internacionales. El cambio climático genera déficit temporal y geográfico del agua, pasando fácilmente de la abundancia a los escases y de las inundaciones a las sequías en diferentes regiones del planeta. A esto se suma el mal uso de los escasos recursos hídricos disponibles durante el periodo seco, lo cual incrementa la competencia por el consumo entre sectores y consecuentemente los conflictos sociales.

**Existe una relación directa entre CA y empleo**, donde el desempleo y subempleo presentan un alto riesgo de impacto y de probabilidad de que ocurra (WWAP, 2016). La adecuada disponibilidad y distribución de los recursos hídricos para uso agropecuario tienen un alto impacto sobre la generación de empleos directos e indirectos (OIT, 2013). Se calcula que el 95% de los empleos en el sector de la agricultura, el 30% de los empleos en el sector de la industria y el 10% de los empleos en bienes y servicios, dependen fuertemente del agua. Según este criterio, se estima que el 42% de la fuerza laboral activa total del mundo, dependen del agua (WWAP, 2016).

A nivel global, del total de recursos hídricos del planeta, los océanos representan el 97,5%, mientras que el agua dulce representa tan solo el 2,5%. Además, el 70% de todos los recursos de agua dulce están atrapados en glaciales, nieves perpetuas y en la atmósfera (WWAP, 2016). Esta realidad, junto a la ingobernabilidad del agua y la creciente demanda de alimentos asociados al crecimiento demográfico y el cambio

climático, presagian una mayor agudización de la CA a nivel mundial. Para el año 2013, según FAO (2016), los recursos totales de agua dulce en el mundo se estiman en el orden de  $42.921 \text{ km}^3 \text{ año}^{-1}$ , de los cuales, América tiene la mayor proporción con un 45%, seguido de Asia (27.6%), Europa (15,3%) y África (9.2%). En términos de recursos de agua dulce por habitante, América tiene  $20.259 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , Europa  $8.846 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , África  $3545 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y Asia  $2.756 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . En el caso particular de Brasil, posee el 13,2% del recurso de agua dulce global y  $28.254 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  por habitante.

La producción mundial de alimentos depende de la disponibilidad de agua dulce para el riego. Según CAWMA, (2007) citado por WWAP, (2016), la agricultura de regadío representa alrededor del 40% de la producción en el 20% del área total cultivada en el mundo; mientras que Bruinsma, (2009) reporta que a nivel global la agricultura de riego representa el 43% del área total de cultivos. En el año 2014, a nivel global, la agricultura fue el principal consumidor del agua dulce total disponible, con un 69%, seguida por el sector industrial (19%) y el municipal (12%). Estos números, sin embargo, están fuertemente influenciados por pocos países que tienen una extracción de agua muy alta en comparación con otros países (FAO, 2016). De acuerdo a proyecciones realizadas por Bruinsma (2009), para el año 2050, en los países en desarrollo el área equipada para el riego podría aumentar en 32 millones de hectáreas (11%), mientras que en países asiáticos con escasas de tierras y mayor presión de aumentar el área de cultivos, agudizaría el problema por competencia de uso de agua entre diferentes sectores productivos.

Por otra parte, el aporte excesivo de agua y fertilizantes en agricultura ha sido reiteradamente asociado con la contaminación de los recursos hídricos por nitratos, fosfatos y metales pesados (Almasri, 2007; Oenema et al., 2009). La lixiviación de nitratos, representa la principal vía de contaminación de acuíferos subterráneos (Costa et al., 2002); mientras que la escorrentía superficial de nitratos y el agua que descarga desde acuíferos subterráneos contaminados, constituyen las principales fuentes de contaminación de aguas superficiales (Mayer et al., 2002) y de su consecuente eutrofización (Nyenje et al., 2010).

### **Eficiencia de uso del agua en agricultura**

Por las razones anteriores, corresponde por ética y moral, enfocar todos los esfuerzos para realizar un uso eficiente del agua (UEA) dulce disponible. La Real Academia Española (RAE), define eficiencia como la capacidad de disponer de alguien o de algo para conseguir un efecto determinado; mientras que la productividad la define como la relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía, etc. Desde esta definición, se puede afirmar que la EUA se evalúa en términos de la Productividad del agua (PA), ya sea como PA física o PA económica. La PA física se expresa en términos de rendimiento ( $\text{kg m}^{-3}$ ) y se obtiene a partir del cociente entre el rendimiento comercial o de materia seca ( $\text{kg m}^{-2}$ ) y el agua de riego usada ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2}$ ). La PA económica se refiere a la productividad del agua expresada en términos monetarios ( $\$ \text{m}^{-3}$ ), y se obtiene como el cociente entre el valor económico de la producción ( $\$ \text{m}^{-2}$ ) y el agua de riego utilizada ( $\text{m}^3 \text{m}^{-2}$ ). El valor económico que se utiliza en el numerador es el ingreso neto que se obtiene de los ingresos brutos menos los costos totales. La EUA física basada en rendimiento ( $\text{kg m}^{-3}$ ) tiene una mayor utilidad a escala de finca para fisiólogos, agrónomos y agricultores, ya que provee información esencial para mejorar el manejo del riego con el objetivo de aumentar el rendimiento; mientras que la PA ( $\$ \text{m}^{-3}$ ) incorpora una visión más macro que relaciona el agua con aspectos económicos (UNEP, 2012).

En adelante, en el presente trabajo se utilizará el término de EUA para referirse a la PA, teniendo claros los conceptos de PA física y PA económica. La variabilidad de conceptos y formas de evaluar la eficiencia de los recursos hídricos en agricultura, hace necesario estandarizar conceptos para utilizar un lenguaje común entre los diferentes sectores involucrados tales como usuarios, investigadores, fisiólogos, agrónomos y administradores de recursos hídricos e instituciones. Los conceptos PA física ( $\text{kg m}^{-3}$ ) o PA económica ( $\$ \text{m}^{-3}$ ) son utilizados como sinónimos de indicadores de EUA de riego en la mayoría de estudios agronómicos reportados en la literatura, como por ejemplo en Katerji et al., (2008) y en Fernández et al., (2007).

La EUA se define de diferentes formas dependiendo del contexto, el sector interesado, la escala u objetivos. En una escala macro, a ingenieros en riego y agentes de instituciones encargadas de gestionar y administrar el agua, el interés se centra en

evaluar EUA respecto a captación, conducción y distribución desde la fuente hasta el destino; ya sea a nivel de cuencas hidrológicas, acuíferos subterráneos, comunal, regional y/o estatal. A nivel de cuencas fluviales en un país o región, se aplica el concepto de EUA mediante la relación entre los requerimientos de agua del cultivo y la extracción total de agua para el riego (Alexandratos, 2012). Estimaciones realizadas por Alexandratos, (2012) indican una EUA promedio global del 50 %, variando desde 25% en zonas con abundante recurso hídrico hasta 58% en regiones con escasas hídrica como en el sur de Asia, y un promedio de 42% en Latinoamérica.

En estudios con un enfoque fisiológico y/o agronómico, en la evaluación de la EUA interesa la especie, la planta, o el cultivo a nivel de finca. El término del agua utilizada en el denominador varía de acuerdo al objetivo. En estudios con orientación fisiológica, se utiliza el agua de transpiración ( $T_c$ ) o la evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), para comparar y/o evaluar la eficiencia de uso de agua entre especies y cultivos en respuesta a la genética, al manejo y al clima. Usualmente se expresa en términos de materia seca por unidad de agua ( $g L^{-1}$ )

En otros estudios con un enfoque agronómico, el término de agua utilizado puede referirse únicamente al agua de riego y/o lluvia aportada a la base de la planta o área de cultivo, la cual incluye el agua que se pierde por drenaje y escorrentía. Por otra parte, está el agua total aportada en todo el proceso de producción, que incluye el agua utilizada en la preparación del suelo, en la fitoprotección (herbicidas, agroquímicos, abonos foliares), en labores pos-cosecha y el agua drenada. Sin embargo, debido a la complejidad que conlleva la estimación de los diferentes rubros del agua total, para estimar la EUA normalmente se utiliza solo el agua aportada en riego y/o lluvia. En los enfoques fisiológicos y/o agronómicos la EUA se expresa como PA física ( $kg m^{-3}$ ) o PA económica ( $\$ m^{-3}$ ) y usualmente no se considera las pérdidas por captación, conducción y distribución.

### **Factores que afectan la eficiencia de uso de agua en agricultura**

La EUA puede ser afectada por múltiples factores que influyen directa e indirectamente sobre el rendimiento del cultivo y por tanto sobre los ingresos

económicos. Dentro de estos, se incluyen la especie, la genética, el clima, las prácticas de cultivo y el manejo del riego. La transpiración de un cultivo y la evaporación son directamente afectadas por la radiación solar, la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento. La eficiencia transpiración disminuye progresivamente conforme incrementa la radiación solar y con el consecuente incremento de temperatura y reducción de la humedad relativa. Al mismo tiempo, la asimilación de CO<sub>2</sub> presenta un patrón de disminución progresiva conforme incrementa la radiación solar, hasta un mínimo de asimilación al alcanzar el punto de saturación de luz; mientras que la evaporación y la transpiración se incrementan linealmente. Por eso los cultivos en climas frescos con radiaciones moderadas, la eficiencia de transpiración y por tanto la EUA, es mayor que en los trópicos (Stangellini, 2003).

Por tanto, para mejorar la EUA, el manejo agronómico debe adecuarse al genotipo y al clima de la región, mediante prácticas de cultivo adecuadas, con el objetivo de crear las condiciones óptimas para obtener la máxima producción. El manejo agronómico incluye prácticas de cultivo tales como entutorado, deshojas, podas, densidad de siembra y el manejo del riego y la nutrición. El clima y el genotipo junto con las prácticas de cultivo definen en gran medida las características morfofisiológicas de la planta y consecuentemente la demanda hídrica del cultivo.

Otras prácticas del manejo agronómico, tales como la **nutrición balanceada** mejora la EUA. El exceso de nitrógeno beneficia el desarrollo excesivo del cultivo, favoreciendo el autosombreo y reduciendo la radiación solar interceptada, y consecuentemente la fotosíntesis y producción. El exceso de Ca, Mg o K favorece los antagonismos y bloqueos entre dichos nutrientes, disminuyendo la productividad. Un adecuado aporte de P en etapa de establecimiento y desarrollo favorece el desarrollo del sistema radicular, lo cual mejora la eficiencia y tolerancia a la sequía. Por otra parte, en zonas y épocas cálidas una nutrición balanceada en K favorece el balance hídrico de la planta, al regular la turgencia y apertura estomática del dosel vegetal.

**La salinidad del suelo** disminuye la EUA (Katerji et al., 2008) debido al efecto osmótico sobre el potencial hídrico del suelo y consecuentemente sobre el agua fácilmente disponible para la planta. Actualmente, hay una reducción significativa del área global de suelo cultivable debido a la salinización por aportes excesivos de

fertilizantes o aguas de baja calidad. Consecuentemente, alrededor del 30% de las tierras regadas están moderada o severamente afectadas, reduciendo aproximadamente en 1-2% anualmente el área regada a causa de la salinización (FAO, 2002).

**El uso de agro-tecnologías**, tales como producción hidropónica, cultivo bajo invernadero, control de clima, sistema de riego, entre otros, permite incrementar la EUA. Algunas técnicas, como el cultivo en invernadero con riego por goteo, presentan EUA ( $\text{kg m}^{-3}$ ) muy superiores a la que presentan los cultivos a campo abierto. Fernández et al., (2007) reportaron que la EUA incrementó desde  $8.5 \text{ kg m}^{-3}$  a campo abierto en España, hasta  $45 \text{ kg m}^{-3}$  en un cultivo bajo invernadero con control de clima en Holanda; mientras que en Israel en cultivo de tomate a campo abierto la EUA aumentó de  $17 \text{ kg m}^{-3}$  a  $35 \text{ kg m}^{-3}$  en invernadero.

**La técnica de riego influye significativamente en la EUA de los cultivos**, ya que afecta el porcentaje de área húmeda y expuesta sujeta a evaporación. En el riego por goteo solo se humedece una pequeña fracción del área cultivada, frente otras técnicas donde la superficie húmeda y expuesta a evaporación es mayor y consecuentemente la evaporación es más alta. Además, las eficiencias de riego según la técnica, son mayores en el riego localizado, con 50-70%, 60-80% y 90-95%, para las técnicas de riego por superficie, por aspersion y por goteo, respectivamente. En el año 2008, en América del sur, Centroamérica y el Caribe el porcentaje del área regada con diferentes técnicas de riego respecto al área total cultivada se distribuyó en 73%, 21% y 6% para las técnicas de riego por superficie, por aspersion y riego por goteo, respectivamente. Considerando las eficiencias de riego según técnica de riego, el aumento del uso de tecnologías de riego localizado en las próximas décadas, supondría una mejora importante en la EUA.

## **Mejora en la eficiencia de uso de agua en agricultura**

**El buen manejo del riego basado en el conocimiento y el uso de tecnologías permiten incrementar la EUA en la agricultura.** El objetivo principal de realizar un

manejo optimizado del riego es incrementar la EUA, optimizando los aportes de agua para mantener un adecuado equilibrio entre el contenido de agua fácilmente disponible y la aireación en el medio de cultivo, y reduciendo las pérdidas por evaporación y por el drenaje, sin afectar los rendimientos. Un manejo optimizado del riego, consiste en aplicar un conjunto de procedimientos técnicos y de herramientas para predecir **cuánto** volumen de riego y **cuándo** regar (frecuencia). **El cuánto**, determina los requerimientos de agua del cultivo denominado evapotranspiración del cultivo ( $ET_c$ ), expresada en mm o  $L\ m^{-2}$  por unidad de tiempo (hora, día, mes). La  $ET_c$  se determina por métodos directos e indirectos, que integran parámetros de sustrato, de clima y de planta. **El método FAO-56**, representa un método para estimar la  $ET_c$  asociado al clima y al cultivo, que considera la localización geográfica (altitud y latitud) y datos de radiación solar, temperatura, humedad del aire, y velocidad del viento. Estima la  $ET_c$  de un cultivo bajo condiciones estándar, como el producto de la evapotranspiración de referencia ( $ET_o$ ) por un coeficiente específico de cada cultivo ( $K_c$ ) (Allen et al., 1998). La  $ET_o$  se estima en función de una superficie de referencia, la cual representa un cultivo hipotético de pasto verde bien regado, con una altura uniforme de 0,12 m, creciendo activamente y cubriendo totalmente al suelo, con una resistencia superficial fija de  $70\ s\ m^{-1}$  y un albedo de 0,23 (Allen et al., 1998). La  $ET_o$  también se puede estimar por diferentes métodos a partir de datos climáticos, tales como Penman FAO-24 (Dororenbos and Pruit, 1975), tanque evaporímetro clase A y FAO-radiación solar (ALLEN et al., 1998), y Hargreaves (Heargreaves and Samani, 1985), entre otros. De todos ellos, estudios realizados han demostrado que el método Penman-Monteith FAO-56 es el más preciso. Según consulta de expertos realizada en 1990, actualmente se recomienda Penman-Monteith FAO-56 como el único método empírico estándar para la definición y el cálculo de la  $ET_o$  (Allen et al., 1998).

En el **riego por radiación solar** los requerimientos hídricos están dados en función de la energía solar incidente por unidad de área y tiempo ( $J\ m^{-2}\ s^{-1}$ ). Considera el calor latente de vaporización ( $\lambda$ ), el cual se define como la energía requerida para evaporar el agua y varía en función de la temperatura del agua. A  $20^\circ C$  son necesarios  $2,45\ MJ\ Kg^{-1}$  para vaporizar 1 litro de agua por  $m^2$  (1 mm). El valor del calor latente de vaporización varía levemente dentro de rangos normales de temperatura, por tanto

puede considerarse un valor constante de  $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ , siendo el valor de conversión de radiación ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) a  $\text{mm día}^{-1}$  de 0,408 (Allen et al., 1998). La limitante de este método es que no considera otras variables climáticas que afectan directamente la  $\text{ET}_c$ . Esto significa que en dos latitudes diferentes, es posible tener una radiación solar incidente similar con diferente temperatura, humedad ambiental y la velocidad del viento; por lo que el consumo de agua variaría. Por tal razón, no se puede generalizar una relación fija entre radiación incidente y  $\text{ET}_c$  para las diferentes regiones. Para solucionar dicho inconveniente, se integra al riego por radiación el concepto de porcentaje de agua drenada; estableciendo un porcentaje deseado de agua drenada que permite realizar ajustes en función del patrón de consumo hídrico del cultivo y las condiciones climáticas.

**El balance de agua** es un método lisimétrico asociado al medio de cultivo (suelo o sustrato), que permite realizar medidas directas de las entradas y salidas de agua en el sistema. Es una excelente herramienta ampliamente utilizada en estudios hídricos, para determinar directamente los requerimientos de agua de un genotipo dado, bajo condiciones específicas de manejo agronómico y de clima (Cadahía, 2005). El balance de agua permite determinar la  $\text{ET}_c$ , según la ecuación  $\text{ET}_c = R \pm \Delta H_v - D$ , donde el término  $\Delta H_v$  es la diferencia entre los contenidos de humedad volumétrica del sustrato al inicio ( $H_{vi}$ ) y al final ( $H_{vf}$ ) para un periodo dado, y los términos R y D representan los volúmenes de riego y drenaje para dicho período, respectivamente.

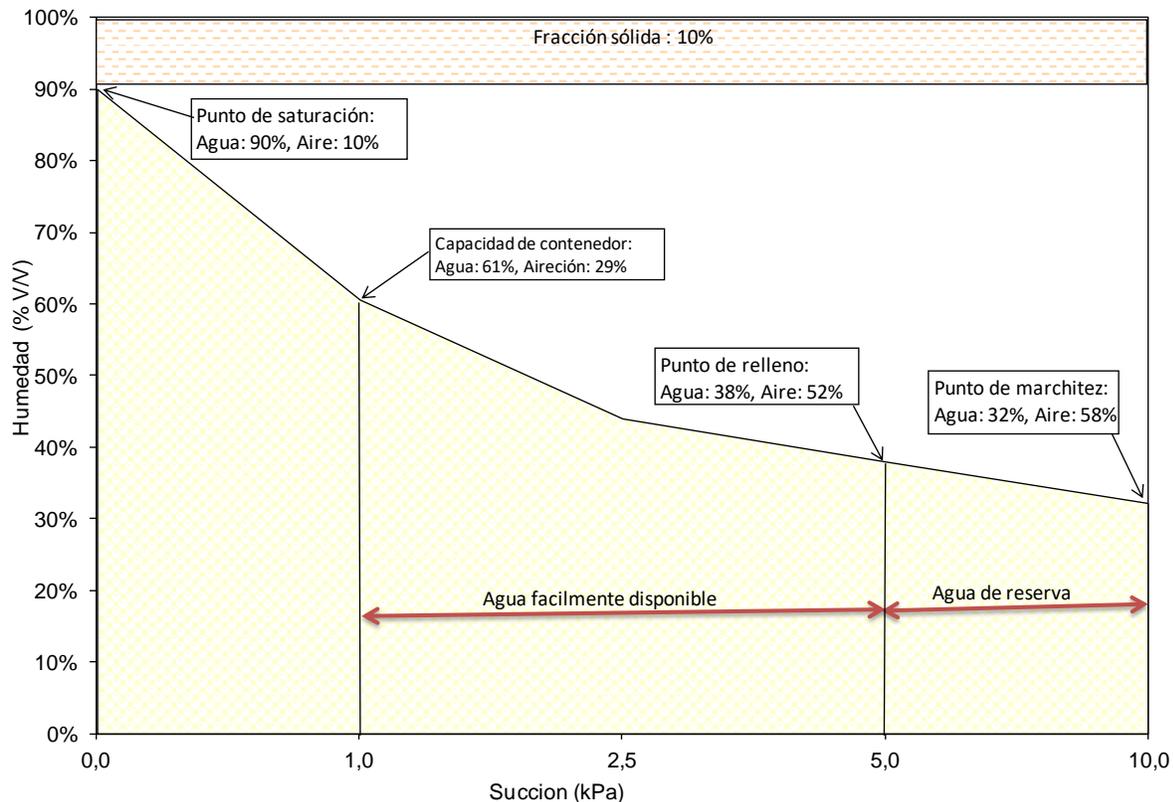
**Riego asociado al estado hídrico del medio de cultivo:** Incroci et al., (2014) y Thompson et al., (2007a y 2007b), demostraron la utilidad de este método para determinar cuánto regar en función de las características físicas del suelo o sustrato. En este método, a partir de un porcentaje de agotamiento del agua total disponible y del volumen de suelo o sustrato, se determina el volumen de agua de riego a aplicar (**cuánto**); mientras que el uso de sensores de humedad volumétrica ( $H_v$ ) o de potencial hídrico ( $\psi$ ), determinan la frecuencia entre riegos (**cuándo** regar). El objetivo es mantener un rango de  $H_v$  o de  $\psi$  dentro del cual hay suficiente agua fácilmente disponible para el cultivo (Fig. 1 y 2). Esto se basa en establecer valores umbrales de  $H_v$  o de  $\psi$  del sustrato, denominados límite inferior (**LI**) y límite superior (**LS**) de riego. El **LS** identifica el momento de parada del riego, y corresponde al contenido de  $H_v$  o al  $\psi$

en el punto de capacidad de contenedor (CC). Por otra parte, el **LI** indica **cuándo** inicia el riego y representa el mínimo valor de  $H_v$  o  $\psi$  a partir del cual se afecta el crecimiento, el desarrollo, el rendimiento y la calidad del producto (Thompson et al., 2007a y 2007b).

La diferencia entre los contenidos de humedad volumétrica en el **LS** y el **LI**, y el volumen de sustrato, permiten calcular el volumen de riego a aplicar (**cuánto**). Una vez estimado cuanto volumen de agua a aplicar, se puede programar el tiempo de riego en función del número y caudal de goteros. Por encima del **LS** se estaría aplicando excesos de agua que podrían conducir a saturación del medio de cultivo, y a consecuentes pérdidas de agua fuera del contenedor en sustrato o del perfil de suelo donde se concentran el mayor porcentaje de raíces absorbentes.

Para determinar los valores de **LS** y **LI** en el suelo y sustrato es necesario determinar mediante la curva de liberación de agua el agua disponible para la planta. En sustrato, la curva se elabora a partir de los contenidos de humedad volumétrica en muestras sometidas a presiones de succión de 1, 5 y 10 Kpa. El agua retenida en los micro y mesoporos corresponde a la capacidad total de retención de agua, conocida como capacidad de contenedor en sustrato, concepto análogo a capacidad de campo (CC) en suelo. El agua disponible para la planta, en suelo, se determina como la diferencia entre CC y punto de marchitez permanente (PMP).

En la Figura 1, para sustrato, se observa que una vez saturado (90% de agua y 0% de aire) inicia el drenaje, disminuyendo progresivamente el contenido de  $H_v$  e incrementando la aireación en el sustrato. Cuando finaliza el drenaje se alcanza el **LS** de riego, el cual corresponde al contenido de  $H_v$  a CC (1 Kpa) con un valor de 61%. Un aspecto a considerar es que a CC hay suficiente agua fácilmente disponible (23%) y una adecuada aireación del sustrato (29.4%), de acuerdo al rango óptimo (15%-30%) establecido por Ansorena, (1994). Según la figura, el **LI** para activar el riego se ubica dentro del rango de 1 y 5 kPa, sin embargo, para estimarlo con mayor precisión se recomienda determinarlo en ensayos in situ para cada cultivo.



**Figura 1.** Curva de liberación aire-agua a diferentes succiones, en un sustrato en base a de fibra de coco. Fuente: Soto, F.

La Figura 2, muestra la evolución del contenido de Hv en un suelo cultivado con tomate bajo invernadero, donde el día 28/09/03 se realiza un riego, y en adelante se suspende el riego. El día 29/09/03 se alcanza la CC (52 mm) y el día 02/10/03 se observa una considerable reducción en la extracción de agua del suelo por el cultivo, debido al agotamiento del contenido de agua en el suelo. Esto sugiere que probablemente ese día se inicia el estrés hídrico del cultivo, correspondiendo al LI o umbral de riego. No obstante, es necesario recurrir a parámetros fisiológicos de la planta para determinar con mayor precisión a que contenido de humedad volumétrica en el sustrato, en el cual se inicia el estrés hídrico del cultivo. Por ello, en este caso particular, se recomienda establecer el LI de riego en aproximadamente 48 mm, para dejar un margen como agua de amortiguamiento. Así, el volumen de agua a aplicar equivale a 4 mm (52 mm – 48 mm) en el día 02/10.

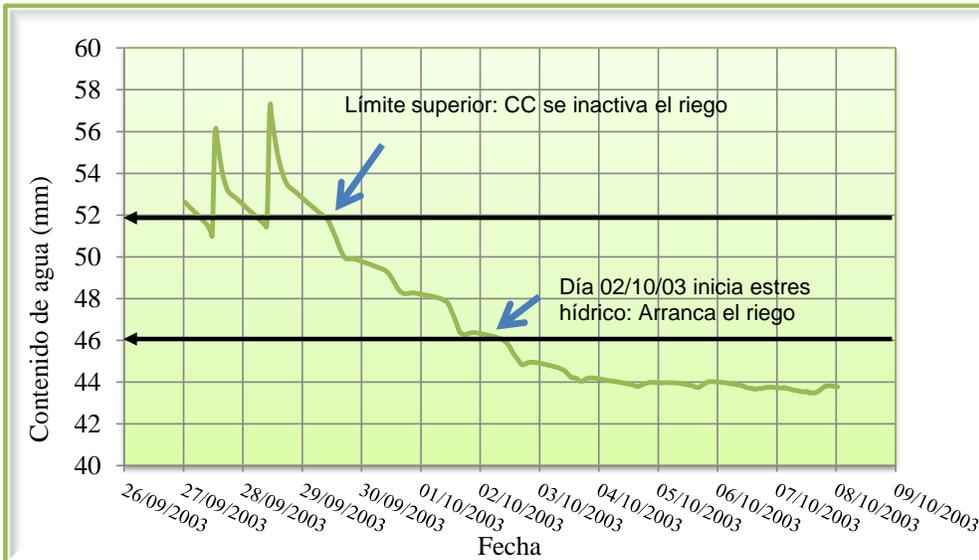


Figura 2. Contenido de agua (mm) en tomate cultivado en suelo (0-20 cm) en invernadero. Almería, España. Datos sin publicar facilitados por Thompson, 2010.

### Programación y control del riego en tiempo real

La programación y control del riego se basa en la determinación del volumen y frecuencia de riegos (cuánto y cuándo regar), considerando la interacción suelo o sustrato-planta-atmósfera. Esto se puede realizar en tiempo real, mediante monitorización continua de parámetros asociados al medio de cultivo, a la planta y al clima (Figura 3). La monitorización mediante sensores se enmarca dentro del concepto de agricultura de precisión, también conocida como agricultura inteligente, tecnología de tasa variable, agricultura intensiva basada en información, manejo del sitio de cultivo específico (Aqeel-ur-Reman et al., 2014; Cox, 2002; Lamb et al., 2008), como una alternativa para manejo del riego con precisión y mejorar la EUA en agricultura (Goumopoulos et al., 2014; Coates et al., 2013; Miranda et al., 2005; ). El manejo del riego basado en el monitoreo ha sido utilizado en diferentes cultivos de Okra (Abraham et al., 2000), en olivos (Capraro et al., 2010; Corell et al., 2014) y en algodón (Vellidis et al., 2008; Koech et al., 2014), entre otros, con resultados aceptables.

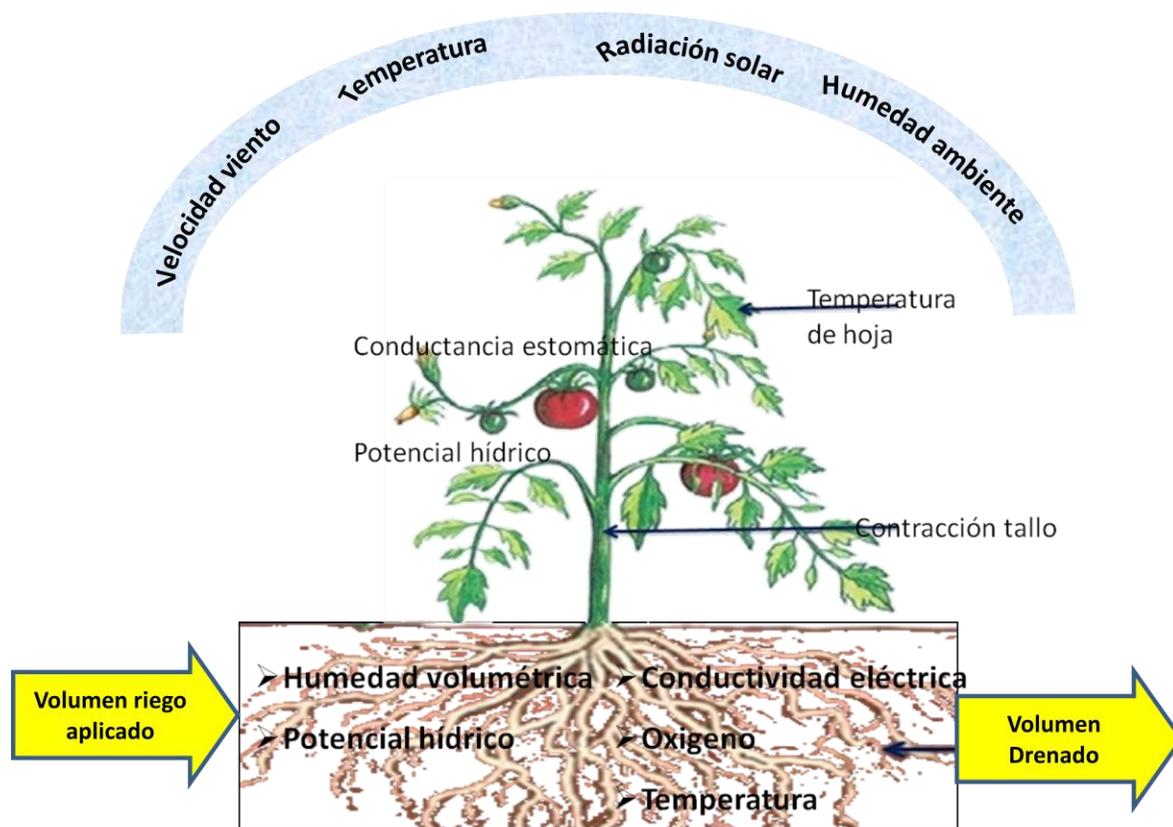


Figura 3. Parámetros **suelo-planta-atmósfera** a monitorear mediante una red de sensores para el manejo del riego en tiempo real en cultivos hortícolas.

Con el objetivo de realizar un UEA, en suelo o sustrato se debe monitorear el contenido de humedad volumétrica y el potencial hídrico, a nivel de planta la temperatura, el potencial hídrico y la conductancia estomática de la hoja; mientras que en clima se puede medir la radiación solar, la velocidad del viento y la temperatura y humedad del aire.

Actualmente, aunque existe la tecnología y bastante investigación para realizar un UEA mediante el monitoreo con sensores en tiempo real, esta se utiliza en muy baja escala. Esto se debe a que hace falta un acercamiento entre investigadores, desarrolladores y usuarios para aplicar la tecnología a nivel de finca y evitar que esta siga engrosando las bases de datos de la era de la información. Es necesario integrar grupos interdisciplinarios de investigación conformados por agrónomos y desarrolladores de software y hardware para evaluar en finca, respondiendo a las a las necesidades identificadas en interacción con los productores usuarios.

## Referencias

- Abraham, N., Hema, P. S., Saritha, E. K., & Subramannian, S. (2000). Irrigation automation based on soil electrical conductivity and leaf temperature. *Agricultural Water Management*, 45(2), 145-157.
- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy.
- Ansorena, M. J. Sustratos, propiedades y caracterización. (1994). Madrid, España. Editorial Mundi-prensa. 170 p.
- Alexandratos, N., Bruinsma, J. (2012). World Agriculture towards 2030/50. The 2012 Revision.. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO, Rome. 154 pp.
- Almasri, M.N., 2007. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review* 27, 220-242.
- Aqeel-ur-Rehman, Abbasi, A. Z., Islam, N., & Shaikh, Z. A. (2014). A review of wireless sensors and networks' applications in agriculture. *Computer Standards & Interfaces*,36(2), 263-270.
- Bruinsma, J. (2009). The resource outlook to 2050: By how much do land, water use and crop yields need to increase by 2050? 33 pp. Expert Meeting on How to Feed the World in 2050. Rome, FAO and ESDD. (Available at: <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/012/ak542e/ak542e06.pdf>).
- Cadahía, C. (2005). Fertirrigación aspectos básicos. Tercera edición. Madrid. Ediciones Mundi-Prensa. Pag. 75-89.
- Capraro, F., Tosetti, S., & Serman, F. V. (2010). Laboratorio Virtual y Remoto para Simular, Monitorizar y Controlar un Sistema de Riego por Goteo en Olivos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*,7(1), 73-84.
- CAWMA (Evaluación exhaustiva del manejo del agua en la agricultura). 2007. Agua para la alimentación Agua para la vida: Una evaluación exhaustiva de la gestión del agua en la agricultura. Londres/Colombo, Earthscan/Instituto Internacional de Gestión del Agua (IWMI). <http://www.iwmi.cgiar.org/assessment/Publications/books.htm>
- Coates, R. W., Delwiche, M. J., Broad, A., & Holler, M. (2013). Wireless sensor network with irrigation valve control. *Computers and electronics in agriculture*,96, 13-22.
- Corell, M., Girón, I. F., Galindo, A., Torrecillas, A., Torres-Sánchez, R., Pérez-Pastor, A., ... & Moriana, A. (2014). Using band dendrometers in irrigation scheduling: Influence of the location inside the tree and comparison with point dendrometer. *Agricultural Water Management*, 142, 29-37.

- Costa, J., Massone, H., Martínez, D., Suero, E., Vidal, C., Bedmar, F. (2002). Nitrate contamination of a rural aquifer and accumulation in the unsaturated zone. *Agricultural Water Management* 57, 33–47.
- Cox, S. (2002). Information technology: the global key to precision agriculture and sustainability. *Computers and electronics in agriculture*, 36(2), 93-111.
- Dompka, M.V., Krchnak, K.M. y Thorne, N. (2002). Summary of experts' meeting on human population and freshwater resources. En Karen Krchnak, ed., *Human Population and Freshwater Resources: U.S. Cases and International Perspective*, Yale University, New Haven, USA. 177 pp.
- Doorenbos J, Pruitt W. O. (1977) Crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper No. 24, FAO, Rome, 144 pp.
- Elliott, J. et al. 2013. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *PNAS*, December 16, 2013 DOI: 10.1073/pnas.1222474110
- FAO. (2016). Base de Datos Principal AQUASTAT, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Sitio web accedido el [28/07/2016 19:5]
- FAO. (2002). Agua y cultivos, logrando el uso óptimo del agua en la agricultura. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). Roma Italia. 28 pp.
- Fernández, M. D., González, A.M., Carreño, J., Pérez, C., Bonachela, S., 2007. Analysis of on-farm performance in Mediterranean greenhouses. *Agricultural Water Management* 89(3), 251-260.
- Goumopoulos, C., O'Flynn, B., & Kameas, A. (2014). Automated zone-specific irrigation with wireless sensor/actuator network and adaptable decision support. *Computers and Electronics in Agriculture*, 105, 20-33.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2), 96-99.
- Incrocci, L., Marzioletti, P., Incrocci, G., Di Vita, A., Balendonck, J., Bibbiani, C., ... & Pardossi, A. (2014). Substrate water status and evapotranspiration irrigation scheduling in heterogenous container nursery crops. *Agricultural Water Management*, 131, 30-40.
- Katerji, N., Mastrorilli, M., & Rana, G. (2008). Water use efficiency of crops cultivated in the Mediterranean region: review and analysis. *European Journal of Agronomy*, 28(4), 493-507.
- Koech, R. K., Smith, R. J., & Gillies, M. H. (2014). Evaluating the performance of a real-time optimisation system for furrow irrigation. *Agricultural Water Management*, 142, 77-87.

- Lamb, D. W., Frazier, P., & Adams, P. (2008). Improving pathways to adoption: Putting the right P's in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61(1), 4-9.
- Mayer, B., Boyer, E.W., Goodale, C., Jaworski, N.A., Van Breemen, N., Howarth, R.W., Seitzinger, S., Billen, G., Lajtha, K., Nadelhoffer, K., Van Dam, D., Hetling, L.J., Nosal, M., Paustian, K., 2002. Sources of nitrate in rivers draining sixteen watersheds in the northeastern U.S.: Isotopic constraints. *Biogeochemistry* 57-58, 171-197.
- Miranda, F. R., Yoder, R. E., Wilkerson, J. B., & Odhiambo, L. O. (2005). An autonomous controller for site-specific management of fixed irrigation systems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 48(3), 183-197.
- Nyenje, P.M., Foppen, J.W., Uhlenbrook, S., Kulabako, R., Muwanga, A., 2010. Eutrophication and nutrient release in urban areas of sub-saharan africa - A review. *Science of the Total Environment* 408(3), 447-455.
- Oenema, O., Witzke, H. P., Klimont, Z., Lesschen, J. P., & Velthof, G. L. (2009). Integrated assessment of promising measures to decrease nitrogen losses from agriculture in EU-27. *Agriculture, ecosystems & environment*, 133(3), 280-288.
- OIT (International Labour Office). 2013. Sustainable development, decent work and green jobs. Report 5, International Labour Conference, 102nd Session, Geneva, Switzerland.
- Stangellini, C. (2003). Agua de riego, uso eficiencia y economía. En mejora de la eficiencia de uso de agua en cultivos protegidos. Curso superior de especialización. Editado por Fernández, M., Lorenzo, P., Cuadrado, I. Almería España. Pp 25-36.
- Tilman, D., Cassman, K.G., Matson, P.A., Naylor, R., Polasky, S. (2002). Agriculture sustainability and intensive production practices. *Nature* 418 (6898), 671-677.
- Thompson, R. B., Gallardo, M., Valdez, L. C., & Fernandez, M. D. (2007a). Determination of lower limits for irrigation management using in situ assessments of apparent crop water uptake made with volumetric soil water content sensors. *Agricultural water management*, 92(1), 13-28.
- Thompson, R. B., Gallardo, M., Valdez, L. C., & Fernández, M. D. (2007b). Using plant water status to define threshold values for irrigation management of vegetable crops using soil moisture sensors. *agricultural water management*, 88(1), 147-158.
- UNEP. (2012). Measuring water use in a green economy, A Report of the Working Group on Water Efficiency to the International Resource Panel. McGlade, J., Werner, B., Young, M., Matlock, M., Jefferies, D., Sonnemann, G., Aldaya, M., Pfister, S., Berger, M., Farrell, C., Hyde, K., Wackernagel, M., Hoekstra, A., Mathews, R., Liu, J., Ercin, E., Weber, J.L., Alfieri, A., Martinez-Lagunes, R., Edens, B., Schulte, P., von Wirén-Lehr, S., Gee, D.

Vellidis, G., Tucker, M., Perry, C., Kvien, C., & Bednarz, C. (2008). A real-time wireless smart sensor array for scheduling irrigation. *Computers and electronics in agriculture*, 61(1), 44-50.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). (2016). *The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs*. Paris, UNESCO.