


A Hass avocado tree is the central focus, with its dark green, glossy leaves and several ripening avocados. The ground is covered with a layer of dry grass and mulch. Several parallel black drip irrigation lines run across the foreground, indicating a modern agricultural setup. The entire image has a dark green color overlay.

## CAPÍTULO VIII

# Manejo del riego en aguacate Hass



**E**l suelo, la planta y la atmósfera constituyen un sistema continuo. La planta conduce el agua del suelo hacia las estomas, liberándola a la atmósfera, en un proceso llamado *transpiración*, el cual permite el ascenso de agua en las plantas, desde el suelo hasta las hojas, en respuesta al gradiente de potencial hídrico entre la atmósfera y la hoja, en tanto que el agua se mueve desde las zonas con mayor potencial hídrico hacia las zonas con menor potencial. Al darse simultáneamente la evaporación de agua desde la superficie del suelo, se ha definido el término *evapotranspiración* (ET) como el agua que regresa a la atmósfera desde las hojas de las plantas cuando es transpirada y la evaporada desde la superficie del suelo (Ferreyra & Sellés, 2011).

La evaporación, la transpiración y la evapotranspiración son fundamentales para estimar los requerimientos de riego y para programarlo. Para determinar las necesidades de riego, es necesario estimar la evapotranspiración del cultivo (ETC) con mediciones directamente en el campo o utilizando datos meteorológicos. Las mediciones directamente en el campo son muy costosas y se utilizan sobre todo para calibrar los métodos que estiman la ET con datos climáticos.

Hay muchos factores que influyen en la magnitud de la ETC, como el tipo de suelo, el nivel de humedad, las prácticas culturales y el material genético. El conocimiento de la ETC es fundamental para establecer un manejo eficiente del riego, a partir de la aplicación

de la cantidad de agua (volumen) y la frecuencia del riego, ajustado a los requerimientos del cultivo. Un manejo adecuado del riego permite que la planta exprese su potencial productivo, con la obtención de altos rendimientos, haya mayor estabilidad de la producción entre cosechas y mejore la calidad de la fruta. Además posibilita un uso racional del agua mediante una gestión sostenible del recurso hídrico y la implementación de sistemas de riego eficientes (Puppo & García-Petillo, 2010).

Con el objetivo de tener herramientas tecnológicas que permitan instalar un sistema de riego eficiente y lograr la máxima eficiencia de aplicación (EA) —el porcentaje de agua aplicada que permanece en la zona radical y que está disponible para las plantas—, es necesario contemplar aspectos agronómicos, hidráulicos y energéticos en relación con los requerimientos del cultivo y las características particulares de cada zona productora y cada finca (estudio de agua, suelo, clima, orografía y topografía).

## Diseño agronómico

Consiste en relacionar las características del cultivo (la edad y la profundidad efectiva radical) y del suelo (la textura, la estructura, la profundidad, el drenaje y la materia orgánica), así como las variables climáticas (la precipitación, la evaporación, la temperatura, la humedad relativa, el brillo solar y la velocidad del viento) con el sistema de riego elegido, para poder determinar la cantidad de agua que la instalación deberá soportar en las épocas de máxima demanda y los parámetros de riego. En síntesis, estos son el caudal de los emisores y el número de emisores por árbol, el tiempo de riego e intervalo entre riegos en el periodo de máximas necesidades y el caudal por unidad de superficie. Asimismo, esto permite realizar un primer planteamiento en cuanto a la posible sectorización de la explotación para lograr una buena eficiencia de la aplicación del riego (EA) en toda la superficie regable (figura 38).



### Características climáticas

Precipitación, evaporación, temperatura máxima, media y mínima, brillo solar, humedad relativa y velocidad del viento registrados en estaciones climatológicas convencionales o automáticas.



### Características del cultivo

Edad del cultivo, etapa fenológica, profundidad efectiva radicular, coeficiente del cultivo (Kc).



### Características del suelo

El pH del suelo, humedad del suelo (CC y PMP), textura, estructura, materia orgánica, profundidad radicular máxima y drenaje.

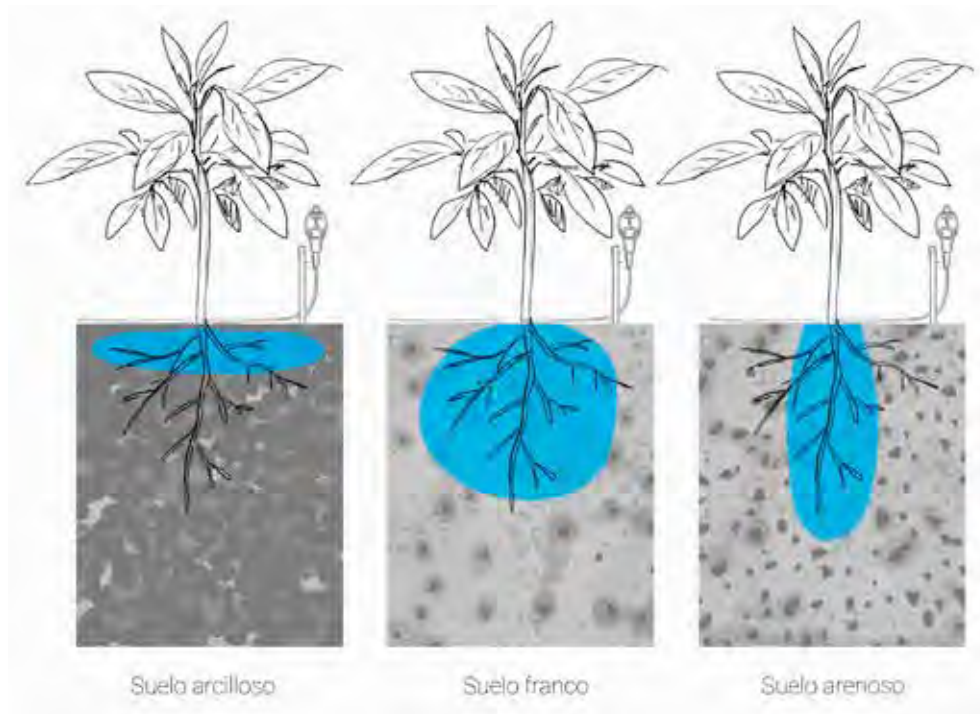
**Figura 38.** Principales características para tener en cuenta para el diseño agronómico de un sistema de riego.

Fuente: Elaboración propia

Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán y Ana María Trejos

Para decidir el caudal del gotero, así como su distanciamiento de otros y el tiempo en el que se alcanza la profundidad efectiva radical, es conveniente realizar una prueba de bulbo húmedo. En riego localizado aparece el término *bulbo húmedo* para designar los puntos del suelo que se mojan y donde se desarrollan las raíces. La textura del suelo va a determinar cómo se desplaza el agua y, en consecuencia, la forma y el tamaño del bulbo húmedo (figura 39 ). En el bulbo húmedo se desarrolla el sistema radical de las plantas.

**Figura 39.** Formación de bulbo de humedecimiento en zona de raíces.



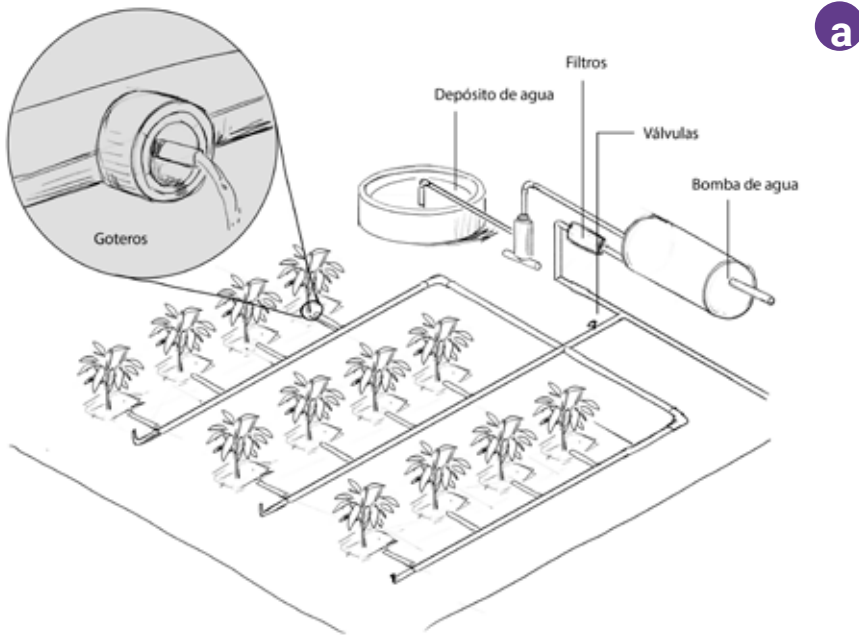
Fuente: Elaboración propia.

En el estudio se realizaron pruebas de bulbo húmedo en las localidades de Herveo (Tolima), Rionegro (Antioquia) y Morales (Cauca), y se encontró que el gotero de 8 L/h es el que más se ajusta a los requerimientos y el tipo de suelo, pues a los 45 minutos de riego se alcanzó la profundidad efectiva del cultivo en las tres localidades, lo cual significa que el tiempo de riego no debe exceder esta duración, para no perder agua por infiltración.



# Diseño hidráulico

El diseño hidráulico tiene como finalidad definir las dimensiones, la ubicación y el funcionamiento de los componentes del sistema de riego. Esto incluye determinar las longitudes y diámetros de las distintas tuberías que componen el sistema (tubería de conducción principal y secundaria, y líneas terciarias), con la finalidad de lograr una uniformidad de caudal mayor del 90 % y que la velocidad en las tuberías de la red no sea mayor de 2 m/s en todos los sectores y subunidades. Con ello se realiza el trazado y se dimensiona la red de transporte y distribución (figura 40).

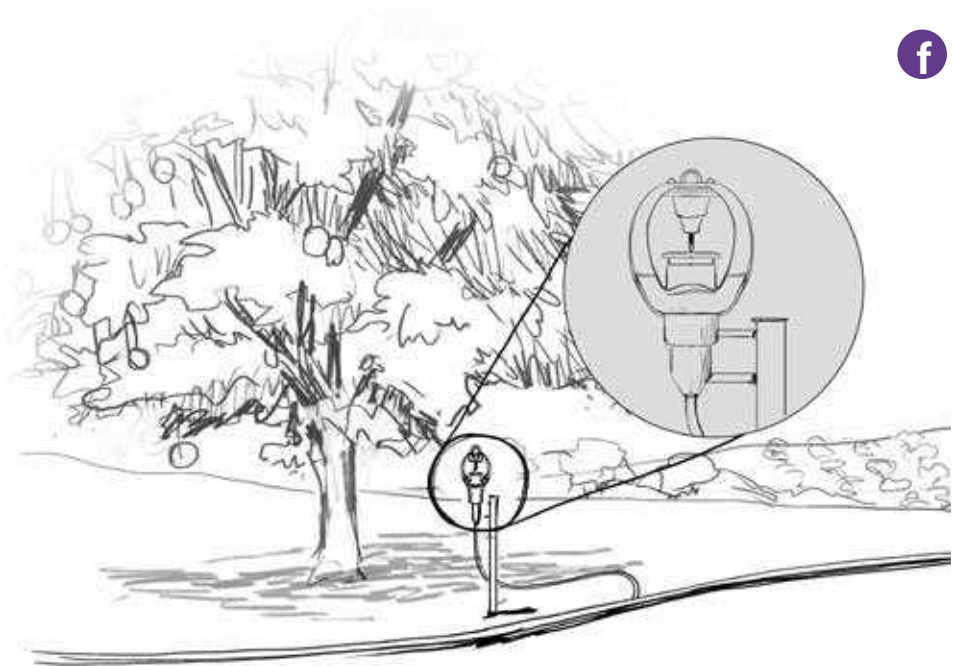


**Figura 40.** Diseño hidráulico y componentes de un sistema de riego localizado.

a. Esquema de un sistema de riego. b. Cabezal de riego y fuente de agua; c. Tuberías de conducción; d. Cabezal de campo; e. Góteros; f. Esquema de un microaspersor.

Fuente: Elaboración propia.

Fotos: Luis Carlos Grajales Guzmán y Diana Yaritza Dorado Guerra



## Componentes de un sistema de riego localizado

Como parte del diseño hidráulico de un sistema de riego localizado, se identifican los componentes principales para su correcto funcionamiento y garantizar la eficiencia en la aplicación del agua que sugiere este tipo de riego. A continuación, se enumera cada uno de los componentes.

### Cabezal de riego

Se ubica después de la fuente de potencia (bomba) y está compuesto por el sistema de impulsión, el sistema de filtrado y el equipo de fertirrigación (opcional).

### *Sistema de impulsión*

Se compone de una o más bombas, accionadas por un motor eléctrico o por combustible, dependiendo del acceso a la red eléctrica. Su función es impulsar el agua desde la fuente hídrica (río, lago, pozo), hacia la red de conducción y hasta los emisores de riego ubicados en las plantas. El dimensionamiento de la fuente de potencia dependerá de la superficie por regar y de la diferencia de cotas entre la fuente de agua y el punto más alto del huerto, con el fin de suministrar el caudal necesario, con la presión requerida por el sistema de riego.

### *Sistema de filtrado*

Existen diversos equipos de filtrado, como el hidrociclón, los filtros de arena, el filtro de anillos y el filtro de malla; su uso depende de la calidad del agua de riego y del tipo de emisor utilizado. En el caso del riego localizado (goteo o microaspersión), es importante implementar un sistema de filtrado adecuado para disminuir las pérdidas de presión y la desuniformidad del riego por obturaciones debido a partículas que se transporten en el agua.

## **Equipo de fertirrigación**

Son los equipos necesarios para la inyección de fertilizante, el lavado de tubería o la dosificación de productos en la conducción general del riego.

## **Sistema de conducción del agua**

Se refiere a las tuberías que conducen el agua desde el cabezal de riego hasta los emisores en campo.

### **Tubería de conducción**

Lleva el agua desde el cabezal de riego hasta los módulos de riego en campo. Esta tubería puede ser en policloruro de vinilo (PVC) o polietileno. El diámetro y la relación diámetro/espesor ( $R_{DE}$ ) de la tubería principal se determinan de acuerdo con la longitud por cubrir y la presión que debe soportar el sistema.

### **Tubería lateral**

Es la encargada de distribuir el agua a los emisores de riego, goteros o microaspersores. Esta tubería generalmente es de polietileno de baja densidad, con diámetros de 16 mm o 20 mm, y su dimensión depende del caudal y la longitud de la línea de riego.

### **Cabezal de campo o módulo**

Son válvulas que se instalan en campo en las diferentes unidades de riego y suministran el agua a los laterales. Pueden ser válvulas manuales tipo bola o compuerta o válvulas de acción eléctrica con mando a distancia para sistemas de riego automatizados. En el cabezal de campo generalmente también se instala una ventosa, que consiste en una válvula que libera el aire de la tubería de riego en ese punto.

## Emisores de riego

Son los dispositivos ubicados en la tubería lateral por donde se emite el agua con un caudal y presión determinados. En riego localizado, los emisores de riego pueden ser goteros o microaspersores.

### Goteros

En el mercado hay variadas opciones de goteros, cuya funcionalidad y escogencia dependen del cultivo, el diseño agronómico del riego, la cantidad y calidad de agua por aplicar, la presión de trabajo, entre otros aspectos. Los más utilizados son los goteros de laberinto, que constan de un conducto largo por el cual pasa el agua en flujo turbulento y poseen baja sensibilidad a los cambios de temperatura y a los taponamientos. Estos goteros vienen insertados a la manguera (lateral) desde la fábrica, con diferentes distancias entre emisores (0,2 m, 0,5 m o 1 m). También se utilizan los goteros tipo botón, que se instalan sobre la lateral mediante una perforación en la manguera en la que se insertan, y pueden ser desarmables, lo cual facilita su limpieza. En general, los diferentes tipos de goteros trabajan con caudales bajos, entre 1 L/h y 8 L/h, y con presiones entre 10 PSI y 30 PSI.

### Microaspersores

El agua se aplica en forma de lluvia suave desde cerca de 30 cm de la superficie del suelo mediante unos elevadores que soportan los microaspersores, de manera que se humedece un rango de superficie de 2 m a 5 m de diámetro. Los caudales están entre 25 L/h y 120 L/h. Este tipo de emisores de riego localizado se dividen en dos grupos: los microaspersores, que tienen un accesorio sobre el cual golpea el agua proveniente de la lateral y van rotando sobre su eje, y los microjets, que emiten agua en forma de chorro y son estáticos (no rotan). Los microaspersores pueden

configurarse para humedecer el suelo en ángulos de 280°, 270°, 180°, 90°, 40°, entre otros.

## Accesorios de control en la red de riego

Son dispositivos con los cuales se puede medir y controlar variables como el caudal y la presión del sistema en los diferentes puntos de control que se determinen en el diseño hidráulico del riego.

### *Medidores de presión*

Comúnmente, se utiliza el manómetro de glicerina para medir la presión del sistema en puntos de control como la salida del equipo de bombeo y la salida del equipo de filtrado, con el fin de monitorear el correcto funcionamiento del sistema de riego y evitar daños.

### *Caudalímetro*

Es un dispositivo usado para medir la cantidad de agua que fluye por la tubería de manera instantánea, aunque también es posible hacerlo de forma acumulada. Esto permite monitorear la uniformidad del riego.

En este sentido, para las zonas de estudio, de acuerdo con las características del bulbo húmedo, las propiedades físicas del suelo, la demanda y oferta hídrica de los huertos de estudio y las condiciones de los cultivos y ambientales, se instaló un sistema de riego por goteo. Los goteros instalados fueron autocompensados y antidrenantes, con un caudal de 8 L/h, para evitar que los cambios de presión generados en el sistema influyeran sobre la descarga de cada gotero. Por árbol se instalaron dos collares con diez goteros cada uno, distanciados a 1,0 m y 1,4 m del tronco y con una separación entre goteros de 0,6 m y 0,8 m, respectivamente, como se observa en la figura 41.



**Figura 41.** Sistema de riego instalado en campo.

Foto: Diana Yaritza Dorado Guerra

## Programación de riego

El éxito de aplicar riego depende del conocimiento de la cantidad de agua que requiere un cultivo y del momento oportuno para aplicarla, lo cual permite aumentar los rendimientos del cultivo y la calidad del fruto, además de ahorrar agua y energía. Para ello, se requiere realizar la programación del riego de acuerdo con el requerimiento hídrico del cultivo, en la cantidad y con la frecuencia adecuadas. Para programar el riego, se deben tener en cuenta las condiciones climáticas, así como las características del cultivo, el suelo y el sistema de riego que se va a utilizar (Ferreyra & Sellés, 2007).

Los requerimientos de agua de un cultivo o la ETC están en función de la ETO y el  $K_c$ , para cada etapa de desarrollo fisiológico.

Experimentalmente, la ETC se determina mediante dispositivos específicos y mediciones precisas de variables ambientales, incluido el balance de agua en el suelo. Las metodologías utilizadas en campo son 1) el balance de agua en el suelo, 2) el balance de energía y parámetros microclimáticos y 3) el método de transferencia de masa (Allen et al., 2006). Uno de los métodos utilizados para calcular los requerimientos hídricos de la planta es el balance hídrico, cuyos pasos para la programación del riego en aguacate Hass se describen en los siguientes apartados.

## Registro de variables climáticas y cálculo de la evapotranspiración de referencia

El clima define la demanda evaporativa de la atmósfera, que puede ser determinada a partir de la evapotranspiración de referencia (ETO). En consecuencia, la ETO es independiente de las características de un cultivo particular. Para determinar la evapotranspiración directamente en campo se requieren mediciones precisas del balance de agua en el suelo o de parámetros microclimáticos, con los equipos indicados, además de personal capacitado en investigación. El cálculo directo de la ETO en campo es dispendioso, pero se requiere para ajustar las estimaciones alcanzadas con métodos indirectos o modelos. Para su cálculo, se han desarrollado diferentes ecuaciones empíricas o semiempíricas, a partir del análisis de la información climática (Allen et al., 2006).

Existen estudios que comparan los métodos de campo con las diferentes ecuaciones para establecer cuál es la que más se ajusta a las condiciones locales. Algunas ecuaciones solo son válidas para condiciones específicas y no se pueden aplicar en zonas diferentes. Jensen et al. (1990) encontraron que la ecuación de Penman-Monteith y la de Hargreaves y Samani (1982, 1985) pueden ser empleadas con un buen ajuste en el cálculo de la ETO en el trópico.

Santana-Peña y Peña-Peña (2010) reportaron que las fórmulas que mejor reflejaron el comportamiento real de la  $ET_0$  en un clima húmedo en el trópico fueron las de Hargreaves y Samani (1982, 1985), Penman-Monteith y Turc (1961) y Blaney y Morin (1942). Actualmente, el método FAO Penman-Monteith se recomienda como el método estándar para definir y calcular la  $ET_0$  (Allen et al., 2006).

A la ecuación de Penman-Monteith se vinculan las características del cultivo de referencia, y la ecuación queda definida como FAO Penman-Monteith (ecuación 5).

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)}$$

Donde,

$ET_0$ : evapotranspiración de referencia (mm/día).

$R_n$ : radiación neta en la superficie del cultivo ( $MJ/m^2/día$ ).

$G$ : flujo de calor del suelo ( $MJ/m^2/día$ ).

$T$ : temperatura media del aire a 2 m de altura ( $^{\circ}C$ ).

$u_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura (m/s).

$e_s$ : presión de vapor de saturación (kPa).

$e_a$ : presión real de vapor (kPa).

$e_s - e_a$ : déficit de presión de vapor (kPa).

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $k/Pa/^{\circ}C$ ).

$\gamma$ : constante psicrométrica ( $kPa/^{\circ}C$ ).



LA FAO ha desarrollado *software* libres que utilizan el modelo de Penman-Monteith para el cálculo de la ETO, como CropWat o ETo-Calculator. El modelo requiere datos climáticos de radiación solar, temperatura del aire, humedad y velocidad del viento (Allen et al., 2006). Las variables de entrada de los programas son las siguientes:

- *Localización*: el *software* EToCalculator requiere de la ubicación geográfica (latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar) del sitio donde se desarrolla el experimento para ajustar el cálculo de la radiación extraterrestre ( $R_a$ ) y la duración máxima de la insolación (Allen et al., 2006).
- *Temperatura*: se requieren los datos de temperatura diaria (promedio), máxima y mínima. Cuando solo se tiene el promedio de la temperatura diaria, el *software* igual puede calcular la ETO, pero es posible que subestime su valor debido a que la relación entre la presión de vapor de saturación y la temperatura no es lineal (Allen et al., 2006).
- *Humedad*: el valor de la presión real (promedio) diaria de vapor ( $e_a$ ), en kilopascales (kPa), se requiere como dato de entrada para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith. En caso de que los valores de presión real de vapor no estén disponibles, es posible utilizar los datos de la humedad relativa media (%) (Allen et al., 2006).
- *Radiación*: la radiación neta diaria (promedio) está expresada en megajulios por metro cuadrado por día ( $\text{MJ}/\text{m}^2/\text{día}$ ). Estos datos no están disponibles comúnmente en forma directa, pero pueden derivarse de la radiación de onda corta (promedio) —medida con un pirómetro— o de la duración real diaria (promedio) del sol brillante (horas/día) —medida con el heliógrafo— (Allen et al., 2006).
- *Viento*: para la aplicación de la ecuación FAO Penman-Monteith, se requiere contar con la velocidad del viento (promedio) diaria en metros por segundo (m/s), medida a 2 m de altura sobre el nivel del suelo. Es importante verificar la altura a la que se mide

la velocidad del viento, pues velocidades del viento medidas a diversas alturas sobre la superficie del suelo seguramente presentan valores diferentes (Allen et al., 2006).

## Cálculo de la evapotranspiración del cultivo

La evapotranspiración del cultivo ( $E_{Tc}$ ) se define como el producto entre la  $E_{To}$  y el  $K_c$  (ecuación 6). El  $K_c$  describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección (Doorenbos & Pruitt, 1977). En la tabla 20 se presentan  $K_c$  utilizados en aguacate en diferentes zonas productoras a nivel mundial.

$$E_{Tc} = E_{To} \times K_c$$

**Tabla 20.** Coeficientes del cultivo ( $K_c$ ) determinados para aguacate

Procedencia de la investigación	$K_c$
Nueva Zelanda*	0,60-0,65
Lima, Perú**	1,125
Valle Central, Chile***	0,75

\* Kaneko et al. (2022); \*\* Vásquez et al. (2015); \*\*\* Holzapfel et al. (2017).

Fuente: Elaboración propia

## Cálculo de la precipitación efectiva

Solo una porción del agua de lluvia que cae sobre la superficie del suelo puede ser utilizada por las plantas. Hay una parte de la precipitación que se infiltra a través de la superficie del suelo y otra que fluye sobre él en forma de escorrentía superficial, dependiendo de las propiedades hidrofísicas del suelo. Cuando la lluvia cesa, parte del agua que se encuentra en la superficie del suelo se

evapora directamente a la atmósfera, mientras que el resto se infiltra lentamente en el interior del suelo (Water Science School, 2019).

Del total del agua que se infiltra, parte de ella percola por debajo de la zona de raíces, mientras que el resto permanece almacenado en dicha zona y podría ser utilizado por las plantas; a esta porción de agua se la denomina *precipitación efectiva* (PE). Esta cantidad de agua es la que estará disponible para responder a las necesidades de agua de la planta (FAO, 2000). LA PE se determina por experimentos en campo, por medio de ajustes de ecuaciones, o con ayuda de *software*, como Cropwat, diseñado por la FAO.

## Control de agua en el suelo

La humedad en el suelo es uno de los factores que más condicionan el desarrollo normal de los cultivos. Un exceso o un déficit de esta en el suelo afecta el rendimiento de la mayoría de los cultivos. Cuando el problema es por exceso de humedad, el drenaje es la solución adecuada; cuando es por defecto de esta, la alternativa es el riego (Shaxson & Barber, 2005). Tanto la proporción en que se encuentran los materiales que componen el suelo como la distribución del tamaño de poros y de agregados son fundamentales en el movimiento del agua y su retención en el suelo (Jaramillo, 2002).

El agua queda adherida a las partículas del suelo y es sometida a la acción de una serie de fuerzas que afectan su retención (Jaramillo, 2002). El movimiento del agua en el suelo se da por el potencial hídrico, que se puede considerar como “la cantidad de trabajo que es preciso aplicar para transportar reversible e isotérmicamente la unidad de cantidad de agua desde una situación estándar de referencia hasta el punto del suelo considerado” (Pizarro, 1996). El potencial hídrico o la energía con la que el agua es retenida en el suelo varían para cada tipo de suelo, de manera que tienen valores diferentes para un mismo contenido de humedad; esta relación se conoce como *curva de retención de humedad* (Jaramillo, 2002).



La curva de retención de humedad sirve para realizar la conversión entre el contenido de humedad y la succión de humedad. El contenido de humedad es la base para los estudios de balance de agua. En la curva de retención se determina cuál es la humedad para la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente. La capacidad de campo es la máxima capacidad de retención de agua de un suelo sin presentar problemas de drenaje, y se alcanza, según la textura del suelo, entre 24 y 72 horas después de un riego pesado; esta agua está retenida en el suelo a una tensión de  $-0,1$  bar para suelos de textura gruesa. Por su parte, el punto de marchitez permanente es el punto de humedad mínima en el que una planta no puede seguir extrayendo agua del suelo y no puede recuperarse de la pérdida hídrica; se estima que este punto se encuentra a una presión de  $-15$  bar.

Es posible medir la retención de agua en el suelo o potencial hídrico, con distintos métodos; los más utilizados son los tensiómetros y los bloques de yeso. Debido a que el rango de datos de estos sistemas es limitado (entre 0 bar y 0,8 bar), los datos de humedad serían aproximados. El requerimiento hídrico, dependiendo del tipo de suelo y cultivo, puede estar por encima de la capacidad de campo, por lo que es más conveniente realizar el control de humedad instantáneo del suelo con sensores.

Monitorear la humedad del suelo ayuda a igualar los requerimientos de agua del cultivo con la cantidad aplicada con el riego, bien para que no haya pérdidas de agua excesivas por percolación profunda o por escurrimientos, bien para evitar aplicar una cantidad insuficiente. El exceso de irrigación puede incrementar el consumo de energía y los costos de agua, así como aumentar el movimiento de fertilizantes por debajo de la zona radicular, producir erosión y generar transporte de suelo y partículas de químicos a los canales de drenaje. El riego insuficiente, por su parte, puede reducir la producción de las cosechas (Enciso et al., 2007). Existen diferentes métodos para medir la humedad del suelo: gravimetría, sonda de

neutrones, sonda TDR y sonda FDR, entre otros, y cada uno plantea una serie de ventajas e inconvenientes.

Unos de los métodos utilizados para medir la humedad son los sensores electrónicos, que pueden ser:

- Tensiómetros electrónicos con punta de porcelana: indican el esfuerzo que han de realizar las raíces para extraer del suelo la humedad que necesita el cultivo.
- Sonditas eléctricas de dos o tres varillas: generan una onda electromagnética que produce un campo electromagnético entre las varillas. A partir de la frecuencia resultante, el sensor mide la capacitancia (c) y la conductancia (g) del suelo que se encuentra entre las varillas, y de esta forma determina su humedad.

## Necesidades de riego netas

Las necesidades de riego netas (NRN) se definen como la cantidad de agua necesaria para que los cultivos desarrollen su máximo potencial productivo, en función de la cantidad de agua necesaria para el desarrollo de sus procesos fisiológicos, manteniendo los otros factores de producción constantes. Al aplicar riego, se deben conocer las propiedades físicas del suelo (densidad aparente, conductividad hidráulica, profundidad efectiva, curva de retención de humedad, etc.); el comportamiento histórico de las variables climáticas para establecer los meses en los que es necesario regar y el comportamiento fisiológico del cultivo.

Para calcular las necesidades de riego es necesario leer las variables climáticas (temperatura máxima y mínima, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar) y usar sensores de humedad, temprano en la mañana, siempre a la misma hora. La NRN se define como la diferencia entre la ETC y la PE (ecuación 7), cuyo cálculo se debe realizar diariamente. Si la ETC del cultivo es mayor al aporte de precipitación, se debe regar.

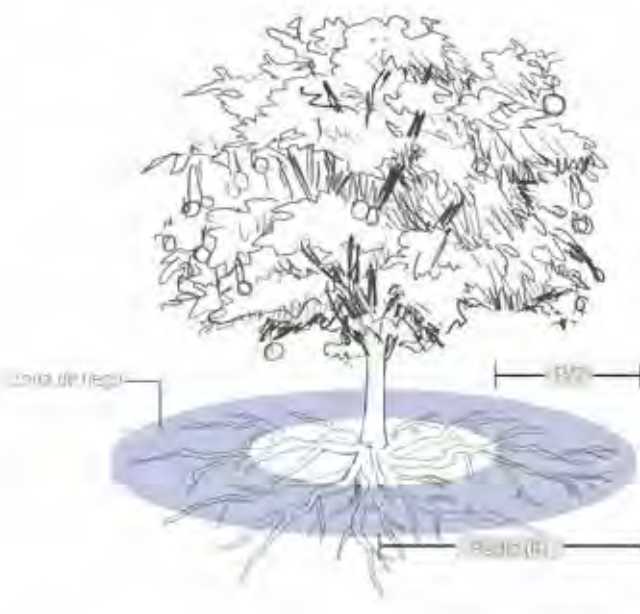
$$\text{NRN} = \text{Pe} - \text{ETc}$$

La necesidad de riego real (NRR) que se aplica depende del sistema de riego y del coeficiente de uniformidad (CU); para riego por goteo, se considera un CU del 90 %. La ecuación 8 presenta la forma como se calcula la NRR.

$$\text{NRR} = \text{NRN}/\text{CU}$$

## Volumen y tiempo de riego

Se debe encontrar el volumen de agua requerido por la planta, a partir de las NRR, teniendo en cuenta el área de humedecimiento del sistema de riego que se esté usando, para lo cual se utiliza la ecuación 9. En la figura 42 se muestra el área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo instalado en forma de anillo.



**Figura 42.** Área de humedecimiento utilizando un sistema de riego por goteo.

Fuente: Elaboración propia

El tiempo de riego depende del volumen que se va a aplicar, así como del caudal y número de emisores por planta (ecuación 10).

$$t(\text{horas}) = \frac{V}{Q_{\text{Gotero}} \times \text{número goteros}_{\text{árbol}}}$$

## Ejemplo de programación de riego

Para programar el riego en un cultivo de aguacate, se calcula la lámina neta, así como el volumen y el tiempo de riego, con una frecuencia diaria, utilizando la siguiente información:

- Coeficiente del aguacate ( $K_c$ ) = 0,85 (Allen et al., 2006).
- Coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) para riego por goteo = 0,9.
- Área efectiva de riego ( $A$  húmeda) = 4 m<sup>2</sup>.
- Caudal de cada gotero ( $Q_{\text{gotero}}$ ) = 8 L/h.
- Número de goteros por árbol = 20.

En la tabla 21 se muestran los datos de  $P_e$  y  $E_{T0}$ .

**Tabla 21.** Valores diarios de  $P_e$  y  $E_{T0}$

Día	$E_{T0}$ (mm)	$P_e$ (mm)
1	4,0	0
2	3,6	1
3	4,0	5
4	4,4	0
5	3,8	2

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se reemplazarán los valores expuestos en las ecuaciones dadas con anterioridad, con el fin de determinar el programa de riego para el ejemplo en cuestión.

Cálculo de evapotranspiración del cultivo (ETc) (ecuación 5):

$$ETc \text{ día 1} = 4 \text{ mm} \times 0,85 = 3,4 \text{ mm}$$

Cálculo de las NRN (ecuación 7):

$$NRN \text{ día 1} = 0 \text{ mm} - 3,4 \text{ mm} = -3,4 \text{ mm}$$

Si no se repone lo que consumió el cultivo en el día 1, se debe reponer en el día 2:

$$NRN \text{ día 2} = (Pe \text{ día 2} - ETc \text{ día 2}) + \text{necesidades de riego día 1}$$

Después de reponer el agua que consumió el cultivo, se empieza el balance como el día uno.

NRR (ecuación 8):

$$NRR \text{ (mm) día 1} = 3,4 \text{ mm} / 0,9 = 3,78 \text{ mm}$$

Cálculo de volumen de riego (ecuación 9):

$$V \text{ (L)} = 3,78 \text{ mm} \times 4 \text{ m}^2 \times (1 \text{ L/m}^2) = 15,11 \text{ L}$$

Cálculo de tiempo de riego (ecuación 10):

$$t(\text{min}) = \frac{15,11 \text{ L}}{8 \text{ L/hora} \times 20} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} = 6 \text{ min}$$



Con la información dada, y después de aplicar las ecuaciones en secuencia, se obtienen los resultados que se muestran en la tabla 22. En el día uno, para suplir una demanda de 15,11 L/día/árbol, teniendo un caudal de descarga de 160 L/h repartidos uniformemente en el plato del árbol en dos anillos de riego (figura 41), se debe dejar funcionando el riego por un lapso de 6 minutos. En el día tres no fue necesario regar porque el aporte de la precipitación fue mayor a los requerimientos hídricos de la planta.

**Tabla 22.** Resultados de balance hídrico

Día	ET <sub>o</sub> (mm)	K <sub>c</sub>	ET <sub>o</sub> (mm/día)	Pe (mm)	NRN (mm)	Riego	NRR (mm)	V (L)	T (min)
1	4,0	0,85	3,40	0	-3,40	Sí	3,78	15,11	6
2	3,6	0,85	3,06	1	-2,06	Sí	2,29	9,16	3
3	4,0	0,85	3,40	5	1,60	No	0,00	0,00	0
4	4,4	0,85	3,74	0	-2,14	Sí	2,38	9,51	4
5	3,8	0,85	3,23	2	-1,23	Sí	1,37	5,47	2

Fuente: Elaboración propia