

PN. A BS-379

RESEARCH GUIDE  
GUIA DE INVESTIGACION  
GUIDE DE RECHERCHE

8-19-23

CIP

Guía de Investigación CIP 30

**ESTUDIOS SOBRE EL ESTRES POR SEQUIA  
Y NECESIDADES DE RIEGO DE LA PAPA**

1994

Indira J. Ekanayake



INTERNATIONAL POTATO CENTER (CIP)  
CENTRO INTERNACIONAL DE LA PAPA (CIP)  
CENTRE INTERNATIONAL DE LA POMME DE TERRE (CIP)

Guía de Investigación CIP 30

**ESTUDIOS SOBRE EL ESTRES POR SEQUIA  
Y NECESIDADES DE RIEGO DE LA PAPA**

1994

Indira J. Ekanayake

---

CIP  
Apartado 1558  
Lima, Perú

Ubicación  
Av. La Universidad s/n  
La Molina, Lima

Fax 351570  
Tel. 366920  
Télex 25672 PE

---

## **Guías de investigación CIP (CRGs)**

En ellas se describen tecnologías que han sido desarrolladas y utilizadas por el CIP y los Programas Nacionales, a fin de promover la investigación y el intercambio de información entre científicos. Estas son actualizadas regularmente de acuerdo al avance científico.

Traducido de:

EKANAYAKE, I. J. 1989. Studying drought stress and irrigation requirements of potatoes. CIP, Lima, Peru. 40 p. (CIP Research Guide 30.)

---

EKANAYAKE, I. J. 1994. El estrés por sequía y las necesidades de riego de la papa. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú. 38 p. (Guía de Investigación CIP 30).

---

## **ESTUDIOS SOBRE EL ESTRES POR SEQUIA Y NECESIDADES DE RIEGO DE LA PAPA**

- 1 Importancia del agua**
- 2 Medición del agua en el suelo**
- 3 Medición del agua en la planta**
- 4 Mediciones micrometeorológicas**
- 5 Evaluación de los parámetros de crecimiento de la planta**
- 6 Calendario de riego**
- 7 Bibliografía**

La distribución temporal, duración e intensidad de las lluvias así como la disponibilidad de agua de regadío influyen en los rendimientos de la papa. En este documento presentamos algunos conceptos básicos sobre las relaciones entre el agua y la papa, y los empleamos en la discusión sobre la respuesta ante la sequía, la experimentación en el campo y su uso en la planificación adecuada del riego para optimizar el empleo del agua disponible. Las relaciones del agua con otros elementos agronómicos se discuten en el marco de un sistema suelo-planta-atmósfera. Igualmente, presentamos algunos de los métodos más comúnmente empleados para evaluar el estrés de agua en cada componente de este sistema. También se presenta la planificación del riego en los experimentos de campo con sistemas de riego por aspersión o por surcos.

---

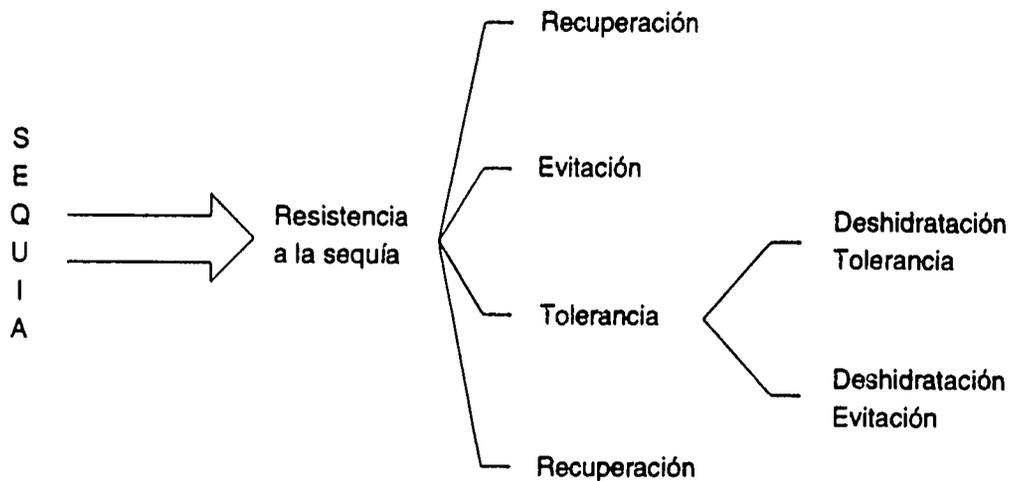
## 1 IMPORTANCIA DEL AGUA

---

La vulnerabilidad de la papa ante los déficits de agua que ocurren durante su ciclo de crecimiento, y que traen como consecuencia bajos rendimientos y mala calidad de tubérculos, pone de manifiesto el importante papel que cumple el agua. Dependiendo de factores meteorológicos, de suelo y de otra naturaleza, relacionados con el manejo del cultivo, la papa requiere entre 400 y 800 mm de agua. Allí donde se produce escasez de agua y se requiere riego suplementario es particularmente necesario incrementar la eficiencia con la que la papa emplea el agua. En las zonas tropicales cálidas el efecto del estrés del agua aumenta como consecuencia de las elevadas temperaturas. La papa presenta variabilidad genotípica para la resistencia a la sequía y algunos clones se desempeñan mejor que otros durante la sequía. Con equipo adecuado y con criterios de selección asociados a la resistencia a la sequía, se pueden seleccionar y mejorar genotipos adaptados a un medio ambiente determinado. En este documento trataré la importancia del agua en tres aspectos:

1. métodos para evaluar la situación del agua en el suelo, plantas y atmósfera;
2. métodos y parámetros empleados para evaluar la respuesta de los clones de papa ante la sequía;
3. métodos para seleccionar un programa óptimo de manejo de agua.

**Definiciones y terminología.** La adaptación de las plantas al estrés causado por la sequía se compone de cuatro mecanismos: escape, evitación, tolerancia y recuperación (Levitt, 1972). Estos componentes de la respuesta a la sequía se ilustran en la Figura 1.



**Figura 1. Naturaleza de la respuesta de las plantas ante la sequía.**

Los mecanismos de escape, permiten a la planta completar las etapas de crecimiento sensibles a la sequía durante períodos de humedad adecuada o completar el ciclo vital antes del inicio de la sequía.

La evitación es la capacidad para soportar la sequía o evitar el estrés, manteniendo un elevado potencial de agua en la planta mediante niveles elevados de absorción, gracias a un sistema radicular más extenso y mejor distribuido, al tiempo que se reduce la pérdida de agua mediante el control estomatal.

La tolerancia es la capacidad para sobrevivir a un estrés interno gracias a la tolerancia, a la deshidratación o a mecanismos de evitación.

La evitación de la deshidratación se realiza regulando la actividad a nivel celular de la tolerancia a la pérdida de turgencia, mediante el ajuste osmótico (acumulación de metabolitos) o mediante la reducción de la pérdida de agua gracias al control estomatal, enrollado de hojas y reducción del área foliar productiva.

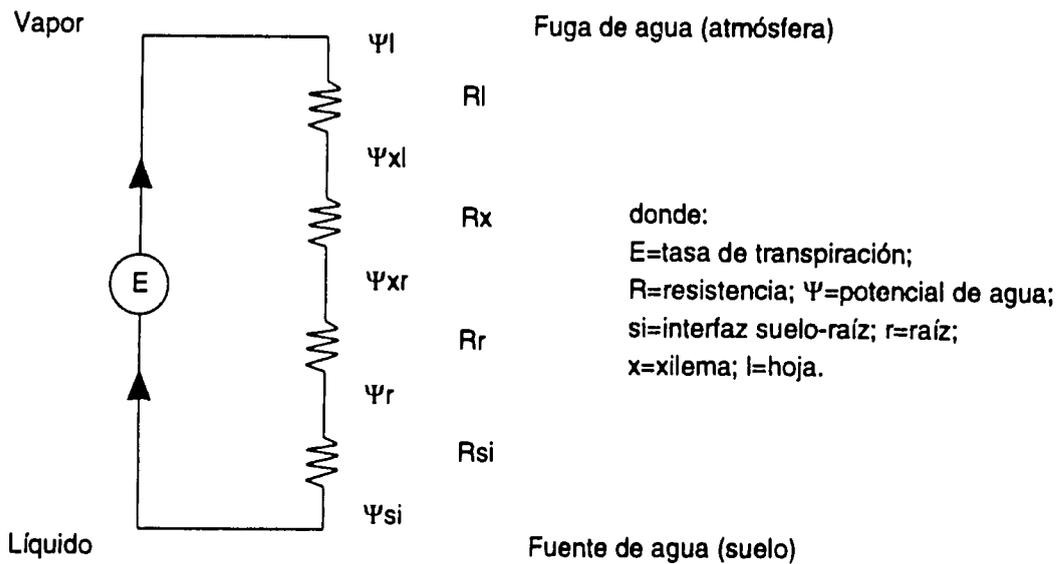
La tolerancia a la deshidratación se logra a nivel de la actividad celular por ajuste osmótico y por resistencia a la degradación de membranas y a la desnaturalización de las proteínas.

---

La recuperación es la capacidad para continuar con los procesos de crecimiento luego de la sequía, gracias al riego o lluvia.

El transporte de agua en la planta de papa ha sido definido para un sistema suelo-planta-atmósfera (Van den Honert, 1948). El movimiento del agua y las resistencias que encuentra se representan mediante una analogía del flujo de la electricidad, donde el flujo ( $Q$ ) es una función de la caída de potencia a lo largo de la vía ( $aw$ ) y de las resistencias ( $R$ ), como se muestra en la Figura 2. El transporte consiste en el movimiento del agua desde el suelo a la superficie de la raíz, la absorción de agua por la raíz, el flujo de la raíz a las hojas, y la pérdida de agua hacia la atmósfera desde la superficie de transpiración de las hojas.

La disponibilidad de agua en el suelo para el crecimiento de la planta depende del contenido de humedad del suelo, de las características de retención de humedad del suelo, de la conductividad hidráulica del suelo, y de la zona y profundidad de enraizamiento. La tasa de absorción de agua por las raíces depende de la magnitud de la diferencia del potencial de agua entre la raíz y el suelo, de las resistencias entre la raíz y el suelo, del número de raíces, y de la actividad radicular. El agua se mueve en la planta a través del xilema, a lo largo de un gradiente de potencia determinada por la demanda de la transpiración. A su vez, la transpiración depende del déficit de saturación en el aire y de la disponibilidad de agua en el suelo. La acción estomatal es el principal mecanismo mediante el cual la planta controla la tasa de transpiración.



**Figura 2. Resistencias y potenciales en un sistema suelo-planta-atmósfera.**

La tasa de flujo ( $Q$ ) es determinada por el potencial de agua y la resistencia

$$Q = \Psi/R \tag{1}$$

de cada parte del sistema. Por ejemplo, en la interfaz suelo-raíz, la tasa de flujo es:

$$Q = (\Psi_{si} - \Psi_r)/R \tag{2}$$

**Efecto del estrés por sequía.** El perjuicio que causa la sequía en la papa se ha descrito como consecuencia de: 1) reducción del follaje productivo (escasa emergencia, escasa expansión foliar); 2) reducción de la tasa de fotosíntesis por unidad de área foliar; y, 3) reducción del período vegetativo o senectud precoz (bajo índice de área foliar) (van Loon, 1981).

El estrés por sequía en cualquier etapa de crecimiento durante la estación de crecimiento puede reducir el rendimiento de tubérculos de papa. La emergencia, la iniciación y el desarrollo de tubérculos son, sin embargo, las etapas de mayor vulnerabilidad. La disminución en el rendimiento se debe al escaso número de tubérculos bien logrados y a la mala distribución de su tamaño.

---

La sequía también afecta la calidad de los tubérculos, pues produce grietas durante el crecimiento, tubérculos alargados o ahusados, debido a la maduración alternada con recremento de la cobertura foliar y a la expansión celular cíclica de los tubérculos. Asimismo, una sequía transitoria causa mayor número de tubérculos deformes que una sequía continuada.

---

## 2 MEDICION DEL AGUA EN EL SUELO

---

La medición del contenido de agua del suelo es importante en los estudios sobre la sequía dentro de un sistema suelo-planta-atmósfera. Existen varios métodos para medir el agua del suelo, pero los que describo aquí son:

- Contenido gravimétrico de agua del suelo.
- Potencial mátrico del suelo.

En el pasado los estudios sobre sequía pusieron énfasis en la importancia de medir la condición de agua de la planta. Actualmente se da énfasis a un enfoque que abarca todos los componentes de las relaciones del agua en un sistema suelo-raíz-planta, para el control del estrés por sequía en los cultivos.

**Contenido gravimétrico de agua del suelo.** Para determinarlo, tomar muestras del suelo a diferentes profundidades empleando un tubo de extracción de muestras de suelo. Por lo general, se toman muestras de los siguientes perfiles: 0-15 cm, 15-30 cm, 30-45 cm y 45-60 cm. En algunos suelos puede ser deseable tomar muestras a profundidades de 90 cm, en función del grado de pérdidas por percolación profunda y escorrentía, y de las características del perfil del suelo. Se mide el peso fresco (PF) de las muestras de suelo y se colocan éstas en el horno a 100 °C, por 3 ó 4 días, para obtener el peso seco (PS), o hasta que no se observen más cambios de peso. El contenido de agua del suelo (por peso) se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Contenido de agua del suelo (\%)} = [(PF-PS)/PS] \times 100 \quad (3)$$

Este método es simple, pero demanda mucho tiempo. Asimismo, la variabilidad espacial constituye un problema, puesto que no se pueden tomar repetidas muestras en un mismo lugar. Para lograr una exactitud del contenido volumétrico de agua del orden de  $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  y una desviación estándar de  $0,03 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , se requieren unas 20 muestras, lo que pone de manifiesto cuánto tiempo demanda este método (Campbell y Campbell, 1982).

---

**Potencial mátrico del suelo (PMS).** Este potencial puede medirse empleando tensiómetros de suelo. Se trata de un método fácil y rápido para cuantificar la humedad del suelo. Los tensiómetros son recipientes porosos llenos de agua acoplados a un manómetro de válvula al vacío. El suelo ejerce una fuerza de succión contra el agua contenida en el recipiente. Mientras más seco esté el suelo, mayor será la fuerza. La fuerza de succión o potencial mátrico del suelo puede leerse directamente en el tensiómetro en unidades de presión (bares o pascales).

En general, los tensiómetros se colocan a diferentes profundidades en el perfil del suelo, preferiblemente adyacentes unos a otros. Por ejemplo, en los estudios con papas, se colocan a profundidades de 15; 30 y 45 cm. Después de un período de equilibrio de unas 24 horas, se pueden hacer mediciones por lectura directa en el tensiómetro. Suele hacerse una lectura diaria y una antes de cada riego. Las lecturas de PMS pueden realizarse de manera continua a lo largo de toda la temporada.

El empleo de tensiómetros demanda mantenimiento periódico para conservar una columna continua de agua entre la fase agua-suelo y la columna de agua en el instrumento. Asimismo, debe señalarse que los tensiómetros son funcionales sólo en el intervalo de estrés del suelo de 0 a -0.8 Mpa (o de 0 a 2.9 pF, dependiendo del tipo de suelo). Otra desventaja de estos tensiómetros es que miden el potencial mátrico del suelo sólo en las inmediaciones de la unidad, de manera que se necesitan varias unidades para obtener un promedio espacial. Como regla general, para medir el estrés de agua del suelo se instalan tensiómetros en cada tratamiento y repetición.

---

### 3 MEDICION DEL AGUA EN LA PLANTA

---

El estrés por deficiencia de agua en la planta se puede medir con varios métodos en muestras representativas de hojas. Los métodos son:

- Contenido relativo de agua
- Potencial de agua de la planta
- Respuesta estomatal
- Fotosíntesis
- Grado de sequía
- Actividad hormonal/bioquímica

**Contenido relativo de agua.** La respuesta de las plantas al estrés por agua puede cuantificarse midiendo el contenido relativo de agua (CRA) de una muestra de plantas. El CRA foliar mide el contenido relativo de agua respecto al de turgencia total.

$$\text{CRA (\%)} = (\text{PF} - \text{PS})/(\text{PT} - \text{PS}) \quad (4)$$

donde:

- PF = peso fresco de la muestra de hojas;  
PT = peso turgente de la muestra de hojas; y,  
PS = peso seco de la muestra de hojas.

Se toma una muestra al azar de tres hojas de cada planta. Inmediatamente después se cortan de cada hoja 10 a 15 discos de 1 cm<sup>2</sup> y se determina el peso fresco. Se someten a una inmersión prolongada (aproximadamente 12 horas) en agua destilada, y se obtiene el peso turgente. Se colocan las muestras en un horno por 48 horas a 65 °C hasta alcanzar un peso constante y se determina el peso seco. Para hacer comparaciones, con las mismas muestras se puede calcular el déficit de saturación de agua (DSA), que es el recíproco del CRA.

---

**Potencial de agua en la planta.** El estrés de la planta por falta de agua puede describirse en términos de la situación de la energía libre específica total del agua en la planta o potencial de agua, en unidades de presión. El potencial de agua ( $\Psi$ ) tiene dos componentes: el potencial osmótico o de soluto de la solución celular ( $\Psi_s$ ) y la presión potencial debida a la presión ejercida por las paredes celulares ( $\Psi_p$ ) que se emplean para describir el estrés celular:

$$\Psi = \Psi_s + \Psi_p \quad (5)$$

Esta expresión es equivalente a la expresión clásica:

$$DDP = PO - PT \quad (6)$$

donde: DDP = déficit de presión de difusión; PO = presión osmótica; y, PT = presión de turgencia.

El potencial hídrico es uno de los parámetros más sensibles que uno puede determinar en el campo, empleando el método de cámara de presión (Scholander *et al.*, 1965). Este método es muy empleado gracias a su rapidez, confiabilidad y nula sensibilidad a la temperatura en el campo.

En condiciones ideales, para la medición, de cada clon se escoge al azar un mínimo de dos hojas de la misma edad, tratamiento y repetición. Cada una de las hojas se cubre con una bolsa de polietileno, se escinde con todo su pecíolo, se sella la bolsa y se coloca en el soporte de la bomba de presión. Después de exponerlo a alta presión de gas de nitrógeno a una tasa de flujo de unos 0.2 MPa por minuto, presión a la cual la savia fluye por el extremo cortado (flujo que se verifica con ayuda de una lupa manual), se registra la presión de equilibrio o potencial de agua de la hoja (MPa).

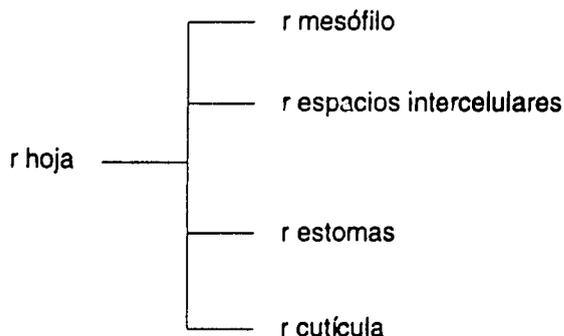
Para el inexperto es difícil distinguir el verdadero punto final de uno falso. Los puntos finales falsos ocurren cuando el gas de nitrógeno escapa a través de los espacios intercelulares causando un fuerte burbujeo. El punto final puede ser verificado disminuyendo la presión en 0.1 a 0.2 MPa y represurizando o empleando un pedazo de papel de seda en el extremo cortado.

---

Las lecturas de potencial de agua se realizan a mediodía cuando se pueden determinar diferencias entre tratamientos. Las lecturas de potencial de agua antes de la salida del sol (potencial de agua al amanecer) pueden ser útiles puesto que indican el grado de recuperación después de la sequía nocturna.

También pueden ser empleadas las técnicas del sicrómetro de termocupla y de la prensa hidráulica para medir el potencial de agua de la hoja. Pero la técnica de cámara de presión es más útil en las pruebas de campo.

**Respuesta estomatal.** Las tasas de transporte de agua en el sistema suelo-planta-atmósfera mencionadas anteriormente (Figura 2) resultan de una serie de resistencias y fuerzas de empuje. En el camino recorrido por el vapor de agua de la hoja a la atmósfera, existen varias resistencias (Figura 3), entre las cuales la resistencia estomatal constituye el principal determinante del grado de pérdida de agua por transpiración.



**Figura 3. Componentes de la resistencia foliar (r).**

De acuerdo con las condiciones del medio interno y externo, las plantas son capaces de regular la apertura y el cierre de los estomas y de esa manera se presenta la resistencia estomatal. La Figura 4 muestra estomas foliares típicos.

La falta de agua en el suelo o la elevada demanda evaporativa también inducen el cierre de los estomas, lo que a su vez reduce la transpiración y la deshidratación de la hoja. Una medida fisiológicamente significativa del funcionamiento de los

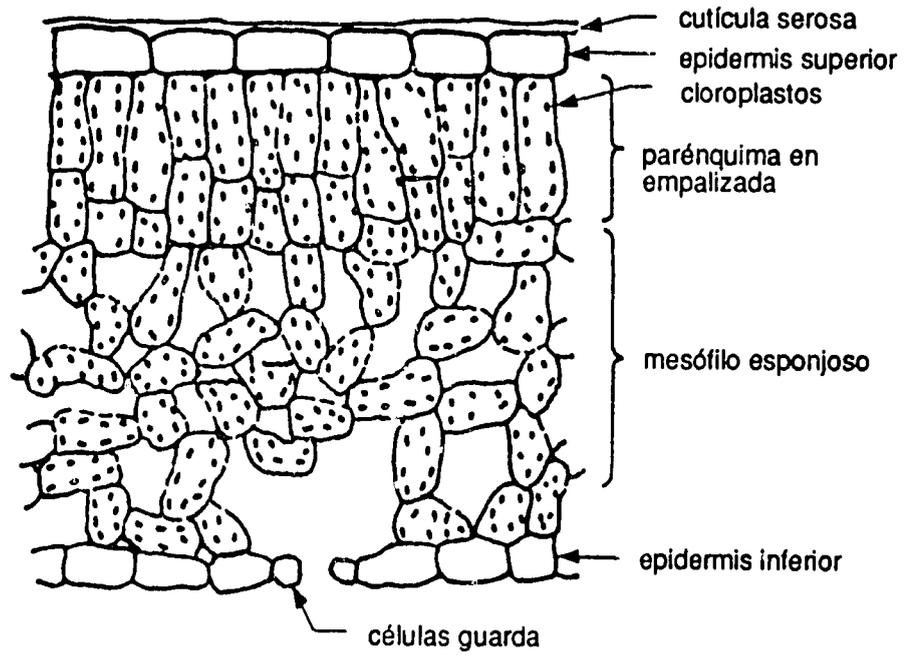
---

estomas es la resistencia a la difusión del vapor de agua. La resistencia difusiva estomatal puede medirse empleando un “porómetro dinámico” (difuso-temporal) o de estado continuo (flujo continuo). En los porómetros de tipo dinámico, se mide el incremento de humedad en una muestra de aire seco que pasa por un sensor de cubeta cerrada, acoplado a una superficie foliar por un período determinado. La cubeta puede ser acoplada al anverso o reverso de la hoja. Se puede calcular la resistencia difusiva (seg/cm) y la conductividad difusiva (recíproco de la resistencia: cm/seg) empleando una curva de calibración.

En los porómetros de estado continuo, se mide directamente la resistencia de transpiración y difusiva, derivándolas de la tasa de flujo de aire seco que pasa a lo largo de la porción foliar y que se necesita para mantener la humedad relativa del flujo de salida de aire a una tasa de flujo predeterminada.

El uso del porómetro permite evaluar diaria o periódicamente el comportamiento de los estomas mientras dure la sequía. En condiciones ideales, una sola medición en la porción epidérmica inferior de 2 o 3 hojas en el momento de mayor evaporación, por ejemplo al mediodía, indica la condición de estrés de la planta.

a)



b)

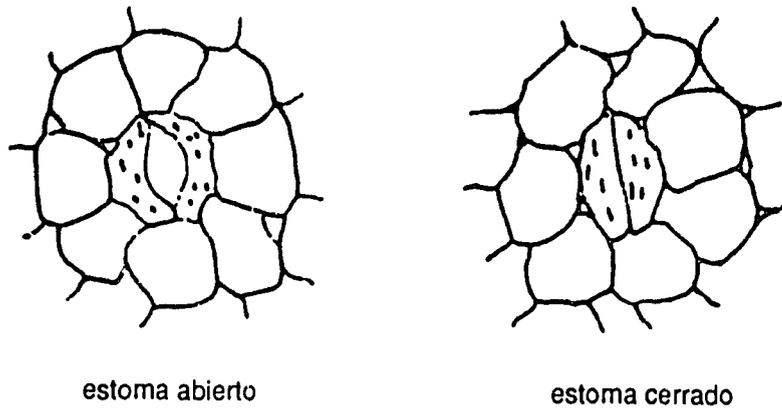


Figura 4. Sección de una hoja con estomas abiertos y cerrados. Vistas transversal (a) y de superficie (b).

---

La resistencia difusiva estomatal y epidérmica al flujo de aire seco se mide en  $\text{seg/cm}$ . Colocando la termocupla del sensor del porómetro en la superficie inferior se mide la resistencia de la superficie inferior ( $r_i$ ). La resistencia de la superficie superior ( $r_s$ ) se puede medir inmediatamente después cambiando la posición del sensor. Tras medir las resistencias inferior y superior, se puede calcular la resistencia foliar total de la siguiente manera:

$$r_t = (r_i \times r_s)/(r_i + r_s) \quad (7)$$

**Fotosíntesis.** Puesto que los estomas tienden a cerrarse durante la exposición a la sequía, también ocurre una reducción en el proceso de fotosíntesis. El flujo de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) fotosintético se mide empleando diversos tipos de analizadores infrarrojos de gas (AIRG). Se puede usar sistemas portátiles de AIRG para medir la fotosíntesis en el campo cuando hay concentraciones ambientales normales de dióxido de carbono. Estos instrumentos cuentan con una fuente de luz infrarroja, un cortador, filtros y un detector que mide los cambios en la concentración de dióxido de carbono alrededor de una cámara de hojas dentro de la cual se coloca la hoja acoplada al medidor. La fotosíntesis se mide en términos de  $\mu$  moles de  $\text{CO}_2$  asimiladas por  $\text{dm}^2$  de área foliar por segundo.

**Grado de sequía.** Los métodos presentados para medir las características fisiológicas, morfológicas y bioquímicas de la tolerancia al estrés por sequía o sus componentes, requieren el empleo de instrumentos. Un método alternativo consiste en el empleo de una tabla de calificación del grado de sequía. La evaluación visual del estrés, con ayuda de la tabla, se lleva a cabo en el campo rápida y fácilmente cuando existen fuertes correlaciones entre los indicadores fisiológicos y el puntaje asignado. Este método es apropiado para las evaluaciones de genotipos.

Los puntajes visuales se basan en la marchitez de las hojas y en la condición de la cobertura apreciada visualmente. El sistema de puntuación se describe más adelante (Tabla 1).

La recuperación después de cada riego también se puede medir empleando el mismo sistema de puntaje.

---

**Tabla 1. Escala de apreciación visual del estrés por sequía, basada en la marchitez foliar.**

---

Escala	Descripción
1	No hay estrés. Turgencia total de todas las hojas en todas las plantas.
3	30 % de las hojas están marchitas o 30 % de la población de plantas se ha marchitado.
5	50 % de las hojas están marchitas o 50 % de la población se ha marchitado.
7	80 % de las hojas están marchitas u 80 % de la población se ha marchitado.
9	Marchitez total y muerte de las plantas.

---

Durante la sequía se pueden realizar como mínimo tres evaluaciones consecutivas. Para las evaluaciones se puede emplear la escala en el momento de estrés más severo o el promedio de las tres observaciones. La calificación también se puede realizar en diferentes etapas de desarrollo, como la de crecimiento vegetativo, de iniciación de los tubérculos, la etapa de crecimiento de los tubérculos, o en relación con la programación del tratamiento de sequía.

---

**Actividad hormonal/bioquímica.** La evidencia disponible sugiere que tanto las citokininas como el ácido abscísico (ABA), juegan cierto papel en la comunicación entre la raíz y los brotes cuando se produce el estrés en la planta (Turner, 1982). Los niveles endógenos de ABA se incrementan por encima de un nivel determinado de potencial de agua de la hoja. También existe una estrecha relación entre la actividad de los estomas y la acumulación de ABA. El ABA igualmente reduce el crecimiento de las hojas y la expansión de las células. Para un estudio detallado de la fisiología del efecto de la sequía sobre el crecimiento de la papa, se deben examinar las interacciones entre las hormonas y las sustancias químicas.

Ha sido reportada la existencia de elevados niveles de aminoácidos como la prolina y la betaína en las hojas de diversos cultivos afectados por la sequía. Sin embargo, la imposibilidad de analizar un gran número de muestras puede impedir el empleo de estas características en los programas de selección.

---

## 4 MEDICIONES MICROMETEOROLOGICAS

---

La atmósfera es el último eslabón del sistema suelo-planta-atmósfera. La atmósfera se puede caracterizar por varios parámetros. En particular, cuando se requiere determinar las necesidades de evapotranspiración, se miden los siguientes parámetros climatológicos: temperaturas mínima y máxima, humedad relativa del aire, precipitación, velocidad y dirección del viento, radiación, evaporación y temperatura del suelo con o sin cobertura de hierba a 10; 20 y 30 cm.

**Temperatura.** Las temperaturas del aire y suelo se miden con varios tipos de termómetros como termógrafos, termómetros de líquido en vidrio, y termistores. Las termocuplas resultan particularmente adecuadas en los casos en que se requiere medir gradientes de temperatura.

**Radiación.** La radiación fotosintéticamente activa (banda de 400 a 700 nm) se mide empleando un detector de radiación y se representa como un flujo radiante que incide sobre una unidad de área ( $W/m^2$ ). Existen dos tipos de detectores de radiación: térmicos y fotodetectores.

Los detectores térmicos miden la transformación en calor de la radiación absorbida, y dependen de la energía total de la misma.

Los fotodetectores miden la liberación de electrones activada por quanta que forman parte del flujo de corriente. Detectan sólo los quanta de choque que sirven efectivamente para liberar los electrones ligados.

**Vapor de agua.** El vapor de agua se mide como humedad relativa (proporción expresada en porcentaje entre la presión de vapor efectiva y la presión de saturación de vapor a la temperatura del aire). Para la medición se emplean varios tipos de equipo: sicrometros de bulbo seco y húmedo; higrómetros gravimétricos; higrómetros de punto de rocío; termohidrógrafos; higrómetros de aire; y otros.

**Viento.** La velocidad del viento (m/seg) se mide con varios tipos de anemómetros (de taza, de tubo Pitot, anemómetros de presión de tubo y de esfera). Se suele

---

emplear anemómetros con sensores de tres y seis tazas. Las desventajas de estos anemómetros es que no rotan antes de alcanzar cierta velocidad mínima de viento que, dependiendo del modelo, varía de 0.1 a 0.4 m/seg. Si el viento es fuerte se puede dar una rotación en sentido contrario.

**Precipitación.** Se mide diariamente con válvulas de lluvia (por ejemplo, de tipo balde oscilante) y la cantidad se registra en mm por unidad de tiempo (mm/d).

Existen microregistradores de datos para introducir directamente toda la información meteorológica de los sensores a una célula de memoria, mediante una interfaz y posteriormente a una computadora. Este sistema automatizado ha permitido un gran avance en el empleo de información micrometeorológica para analizar la respuesta a la sequía.

**Evapotranspiración.** La evapotranspiración (ET) se define como el proceso mediante el cual se transfiere agua de las superficies de la planta y el suelo a la atmósfera en forma de vapor de agua y de agua líquida a través de los tejidos de la planta. La ET se expresa como transferencia de calor latente por unidad de área o su equivalente, profundidad de agua por unidad de área. Existen varios métodos para medir la evapotranspiración: el método de panevaporación y los métodos empíricos.

- Método de panevaporación. Define la evapotranspiración potencial ( $E_p$ ) como la tasa máxima a la cual se eliminaría el agua de las superficies del suelo y de las plantas, es decir la ET a la que la presión del vapor en las superficies evaporantes se encuentra en el punto de saturación.

La evapotranspiración potencial del cultivo ( $E_p$ ) se puede medir empleando un tanque de evapotranspiración clase "A" en el que se anotan periódicamente las diferencias de nivel de agua. En la práctica, la  $E_p$  también puede medirse usando un recipiente con agua, abierto y plano, con paredes de cualquier altura y forma, al que se acopla una escala milimétrica vertical.

- Métodos empíricos. Existen varias posibilidades para calcular la ET según el tipo de información micrometeorológica y los recursos disponibles. El método

---

Penman modificado define la ET como la evaporación a partir de una superficie extensa de un cultivo verde de poca altura, que da sombra total al suelo, ejerce poca o casi ninguna resistencia al flujo de agua y siempre cuenta con agua.

**Diferencial de presión de vapor.** La demanda de evaporación en el aire también puede ser representada como déficit de presión de vapor (DPV) que es la diferencia entre la presión de saturación de vapor ( $e_s$ ) y la presión de vapor del aire ( $v_a$ ), expresada en milímetros.

$$DPV = (e_s - v_a) \quad (8)$$

La presión de saturación de vapor del aire a una altura de referencia se puede calcular (Murray, 1967) como:

$$e_s = 6.1078 \exp [17.2693882 t / (t + 237.3)] \quad (9)$$

donde:  $e_s$  = mbares,  $t$  = temperatura promedio en °C.

Según Burman *et al.* (1982),  $e_a$  se puede calcular como:

$$e_a = e_s \times HR_{prom} / 100 \quad (10)$$

donde:  $HR_{prom}$  = humedad relativa promedio (%).

---

## 5 EVALUACION DE LOS PARAMETROS DE CRECIMIENTO DE LA PLANTA

---

Durante el ciclo de cultivo se pueden medir los hábitos de crecimiento de la planta y emplearlos como indicadores del estrés por sequía. Más aún, las evaluaciones de genotipos pueden basarse en el desempeño relativo de cada una de estas características del crecimiento.

**Establecimiento de la planta.** En cada tratamiento o parcela se puede realizar, dos veces por semana, un recuento del número de plantas emergidas durante un período de tres semanas a partir del momento de la siembra. Si la sequía ocurre en esta etapa, el porcentaje de emergencia proporcionará un índice de la respuesta a la sequía. Sin embargo, factores relacionados con el tubérculo mismo, como el brotamiento y el reposo, también afectan la emergencia. Si se han trasplantado plántulas o esquejes, se deben registrar datos sobre su supervivencia. La emergencia (en porcentaje) se calcula así :

$$\text{Emergencia}(\%) = \frac{\text{N}^\circ \text{ de plantas emergidas}}{\text{N}^\circ \text{ de tubérculos plantados}} \times 100 \quad (11)$$

**Tasa de alargamiento de la hoja.** Para cuantificar el efecto de la sequía se puede recurrir a la medición del crecimiento longitudinal de las hojas durante el día y la noche. En una muestra de plantas al azar, se marcan con una tarjeta las hojas que emergen del tallo principal y se mide con una regla el punto de inserción en el tallo desde la punta del foliolo terminal. Se mide periódicamente (cada día o cada hora) la longitud de la hoja y se calcula la tasa de alargamiento foliar de la siguiente manera:

$$\text{Tasa de alargamiento foliar} = (l_1 - l_2)/t \quad (12)$$

donde:  $l_1$  = longitud en el momento 1 (mm);  $l_2$  = longitud en el momento 2 (mm); y,  $t$  = tiempo (horas).

---

**Cobertura.** El efecto de la sequía sobre el crecimiento del cultivo se puede evaluar utilizando información sobre la cobertura. En las plantas afectadas por sequía es de esperar un retardo en el crecimiento. Es posible realizar una estimación visual de la cobertura, una vez por semana, utilizando una rejilla (Midmore, 1986). Los datos sobre cobertura dan también una estimación de la capacidad de los clones para interceptar la radiación. Se emplea una rejilla hecha a mano con un marco de madera y malla de alambre tejido. La rejilla debe tener dimensiones interiores (ancho y largo) iguales al espaciamiento entre y dentro de los surcos del sembrío, o ser múltiplo de las mismas. La rejilla normalmente utilizada está formada por rectángulos con un área de  $0.7 \times 0.3$  m para un sembrío de 0.7 m entre surcos y 0.3 m entre plantas. En cada surco, o en surcos alternos de un sembrío adecuadamente bordeado, se coloca un marcador de alambre. La rejilla se coloca hacia abajo contra el marcador y se cuenta el número de rectángulos con cobertura superior a 50 %. El registro de cobertura se hace una vez por semana, desde la siembra hasta la cosecha. La fracción de cobertura se calcula así:

$$\text{Fracción de cobertura} = (\text{N}^\circ \text{ de rectángulos}) / 30 \quad (13)$$

Con el registro de la fracción de cobertura durante la estación de crecimiento respecto de la fecha de muestreo o edad de la cobertura, y obteniendo la integral de la curva de respuesta, se calcula el número de días acumulados de cobertura foliar durante la estación para cada uno de los clones. Luego, se calcula la eficiencia de la cobertura (ECF) para un medio dado:

$$\text{ECF} = \frac{\text{cobertura acumulada (días)}}{\text{edad del cultivo (días)}} \quad (14)$$

**Rendimiento en tubérculos.** Al momento de la cosecha se cuenta el número de plantas sobrevivientes y de plantas con tubérculos en cada surco. Los tubérculos se separan en tres clases: los de menos de 3.5 cm de diámetro (no comercializables); los de más de 3.5 cm de diámetro (comercializables), y los podridos o enfermos (descarte). Luego, se obtienen los pesos fresco y seco de una muestra al azar de cada clase de tubérculos. A partir de estos datos se computan el peso fresco (PF) y el peso seco (PS) por planta y por metro cuadrado.

---

**Eficiencia del empleo de agua.** Se define la eficiencia del empleo de agua (EEA) para diferentes niveles de componentes de la planta. Según una definición a nivel celular,

$$EEA = [\Delta_c D_c (r_a + r_s)] / [\Delta_e D_e (r_a + r_s + r_m)] \quad (15)$$

donde:  $\Delta_c$  y  $\Delta_e$  son las diferencias de concentración hoja-agua de dióxido de carbono y vapor de agua;  $D_c$  y  $D_e$ , las capacidades de difusión del dióxido de carbono y del vapor de agua;  $r_a$ ,  $r_s$ , y  $r_m$ , las resistencias de la capa de frontera, estomatal e interna. Estos cálculos se pueden hacer cuando se emplean analizadores infrarrojos de gas.

La EEA para el crecimiento del cultivo también se puede calcular para cada intervalo de medición según:

$$EEA = (\text{total de agua añadida}) \times (\text{promedio de la fracción de cobertura entre momentos 0 y 1}) \quad (16)$$

donde el total de agua añadida se mide en mm.

Para un cultivo, la EEA se define como la materia seca total o la materia seca económica producida por unidad de cantidad de agua aplicada, por unidad de cantidad de agua transpirada, o por unidad de cantidad de evapotranspiración (es decir, gramos de materia seca/kg de agua). En general, este parámetro no toma en consideración el empleo de agua por la raíz. La eficiencia productiva se calcula así:

$$EEA = \frac{\text{rendimiento total en tubérculos}}{\text{suministro acumulado de agua}} \quad (17)$$

---

## 6 CALENDARIO DE RIEGO

---

Por lo general la papa debe regarse a  $-0.35$  bares, o menos, de potencial tensiométrico del suelo para mantener un micromedio bien irrigado. Asimismo, se puede reducir el grado de estrés que ejerce el suelo sobre la planta mediante una irrigación adecuada y observando las plantas y la humedad del suelo. Para un buen calendario de riego se debe tener en cuenta:

- cuándo regar,
- cuánto regar,
- durante cuánto tiempo regar.

También se debe tener en cuenta el tipo de irrigación, es decir por aspersión, surco (canal) o goteo. Los factores que afectan el establecimiento del calendario de riego son:

- características físicoquímicas del suelo y disponibilidad de agua en el suelo,
- flujo de agua del suelo hacia la planta en un continuo suelo-planta-atmósfera.

El propósito general del riego a corto plazo es mantener el potencial de agua de la planta a niveles que induzcan el crecimiento positivo.

Donde se realicen riegos periódicos, el calendario de riego se puede representar de la manera ilustrada en la Figura 5. El riego se debe hacer antes de llegar al límite superior de marchitez foliar o de la planta. Al nivel inferior de estrés, el cultivo resulta dañado de manera permanente.

En general, las mediciones de agua en el suelo se realizan a la profundidad de máxima actividad radicular (15-30 cm). Las mediciones más precisas se hacen hasta 60 cm, como se describió en una sección anterior.

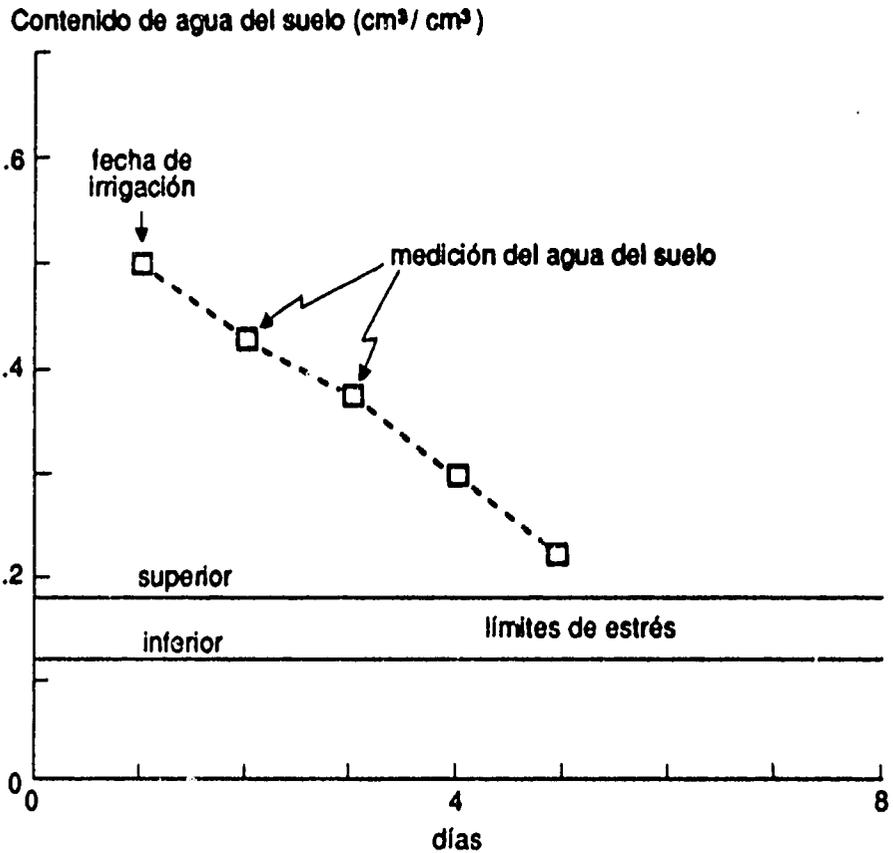


Figura 5. Representación gráfica de cuándo regar.

**Indicadores de estrés.** Las decisiones sobre el calendario de riego se basan en las características del agua del suelo o de las plantas.

*Indicadores del suelo:* cuando no se dispone de equipo se puede recurrir a la sensación física o textura del suelo como guía para decidir cuándo regar. Con la mano se hace una bola de la tierra en la zona radicular efectiva y debajo de ella y, dependiendo de la formación o fragilidad de la bola, se podrá decidir si procede aplicar o no riego.

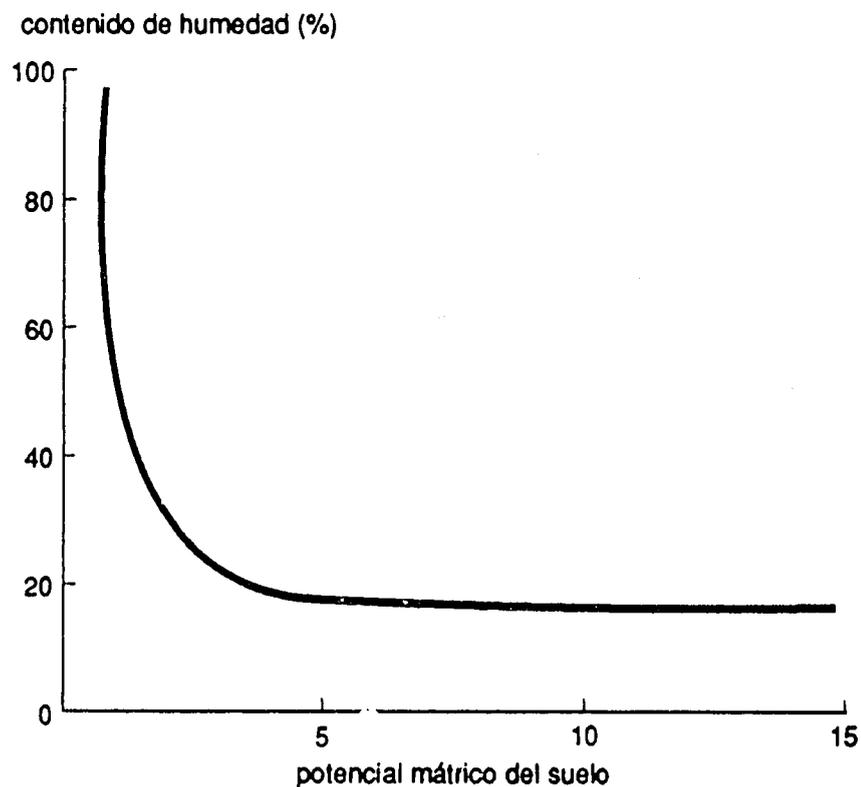
Con el método higrométrico, se calcula la cantidad que se debe aplicar de la siguiente manera:

---

$$A = [(CC-MC_1)/100] \times d_1 + [(CC-MC_2)/100] \times d_2 \dots [(CC-MC_n)/100] \times d_n \quad (18)$$

donde: A = cantidad que se debe aplicar (cm);  $d_1$  = profundidad de la capa del suelo (cm);  $MC_1, MC_n$  = contenidos de humedad del suelo en los momentos 1,n; y, CC = capacidad de campo del suelo.

Con el método del tensiómetro, se emplea una curva de humedad característica para un tipo de suelo (Figura 6). Cuando se divide el potencial tensiométrico del suelo, expresado en porcentajes por volumen de contenido de humedad convertidos a MPa, entre la densidad masal, se obtiene el contenido de humedad porcentual por peso respecto del porcentaje. Las cifras correspondientes se calculan empleando la ecuación (16).



**Figura 6. Curva típica de deshidratación del suelo.**

---

*Indicadores de plantas:* los niveles de estrés de las plantas se pueden evaluar visualmente a partir del marchitamiento, el enrollamiento y el color de las hojas. Para mayor precisión se pueden emplear mediciones cuantitativas de estrés, como el potencial de agua de la planta, pero se emplean rara vez como indicadores debido a dificultades de orden práctico (lentitud y necesidad de instrumentos) cuando se confecciona un calendario de riego en gran escala. Sin embargo, en escala experimental reducida se puede emplear el potencial de agua de la planta como un indicador rutinario para el riego. Los indicadores de plantas también deben ser empleados antes de que ocurra un retardo irreversible del crecimiento.

*Método meteorológico:* en varios métodos de distribución de agua se emplean las tasas de evapotranspiración como guías de riego. Estos métodos, aunque son completos, demandan un gran esfuerzo para medir y calcular las necesidades de riego.

**Sistemas de irrigación.** Los estudios de respuesta a la sequía dependen del método de irrigación disponible en cada lugar. El método de irrigación más adecuado para cada lugar varía según las propiedades del suelo, la topografía, el nivel de tecnificación del cultivo, el sistema de aprovisionamiento de agua, y las necesidades del cultivo y del sistema agrícola. Para la papa, los métodos más difundidos son la irrigación por surcos, mediante la cual el agua se distribuye en la superficie del suelo por pequeños canales o surcos paralelos; y la irrigación por aspersión, mediante la cual el agua que llega hasta el campo por un sistema de tuberías es esparcida empleando rociadores rotatorios.

El diseño de experimentos para determinar el efecto del estrés por sequía en la papa y la correspondiente necesidad de agua, depende del método de irrigación. En la Tabla 2 se presentan las ventajas y desventajas de los sistemas de irrigación por surcos y por aspersión.

**Elección de método.** La elección del calendario de riego depende del aprovisionamiento de agua, de la topografía, de las características y salinidad del suelo, de la disponibilidad de energía, de factores microclimáticos que influyen sobre la evapotranspiración, de características del cultivo como etapa de

---

crecimiento, profundidad de la raíz y sensibilidad de la etapa de crecimiento, del patrón y sistema de cultivos, y de la disponibilidad de mano de obra.

**Cantidad de riego.** Las necesidades de agua para irrigación (I) se definen como la cantidad de agua, aparte de la lluvia (L), que se necesita para que la producción sea económicamente rentable.

La cantidad de riego se calcula de la siguiente manera:

$$I = ET - L + O \quad (19)$$

donde: ET = evapotranspiración, O = otros requerimientos como percolado profundo, escorrentía, drenado, lixiviación y el oreo del cultivo.

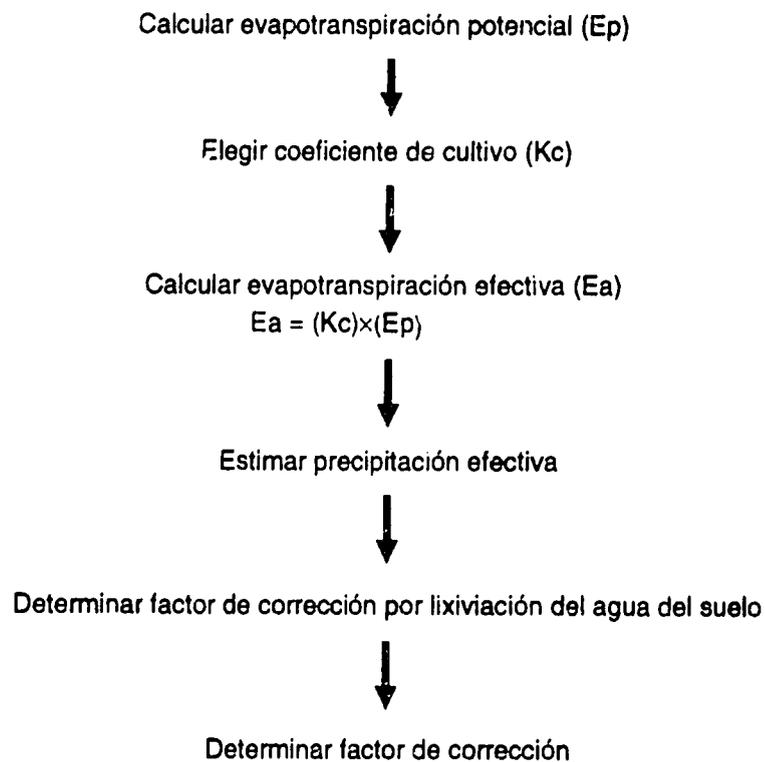
**Tabla 2. Características de los sistemas de riego por surcos y aspersión.**

Ventajas		Desventajas	
<b>Aspersión</b>			
1	Distribución uniforme del agua a ambos lados de las tuberías.	1	Velocidad y dirección del viento influyen sobre uniformidad.
2	Práctico en la mayor parte de los casos.	2	Quema las hojas si el agua tiene sal.
3	Muy adecuado para suelos con elevadas tasas de infiltración (arenosos, por ejemplo) y fuertes inclinaciones.	3	Elevada inversión inicial en equipo.
4	El radio activo de aplicación se puede regular mediante el tamaño de la boquilla y presión de agua.		
5	Adecuado en condiciones de salinidad que requieren lixiviación y control eficiente del agua.		
<b>Surcos</b>			
1	Práctico en campos de gradiente continua y uniforme en la dirección del riego. Util en pendientes de 0.5 %-1.5 %. En pendientes mayores de 2 % la erosión puede ser un problema.	1	Requiere terreno bien nivelado pero dificulta la mecanización.
2	Reduce pérdidas por evaporación y encharcamiento.	2	Pérdidas por escorrentía si las tasas de aplicación son mayores que las requeridas y si los surcos son pequeños.
3	La construcción del sistema es de bajo costo.		

---

Los pasos para determinar las necesidades de agua de riego para un sembrío de papa se presentan en la Figura 7.

La optimización del calendario de riego se puede lograr con un método de panevaporación y mediciones directas de la humedad del suelo empleando tensiómetros, para evitar con certeza el estrés de agua en la planta o el exceso de riego. También se pueden emplear otros métodos de evapotranspiración (es decir, el método Penman) que usan el enfoque de las cantidades de aprovisionamiento de agua y datos micrometeorológicos.



**Figura 7. Flujograma de requerimientos de agua de riego.**

---

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), que relaciona la evapotranspiración efectiva ( $E_a$ ) y la evapotranspiración potencial ( $E_p$ ), se estima mediante la siguiente fórmula:

$$K_c = E_a/E_p \quad (20)$$

donde:  $E_p$  es la panevaporación clase A corregida por un pancoeficiente ( $K_p$ ) (Tabla 3).

$E_a$  (mm) se calcula según:

$$E_a = I + \Delta_w \quad (21)$$

donde:  $I$  es la cantidad de agua efectivamente disponible (mm) para el cultivo:

$$I = I_{rr} + L - D - C \quad (22)$$

donde:  $I_{rr}$  = aprovisionamiento para riego;  $L$  = lluvia;  $D$  = drenaje;  $y$ ,  $C$  = pérdida por escorrentía.

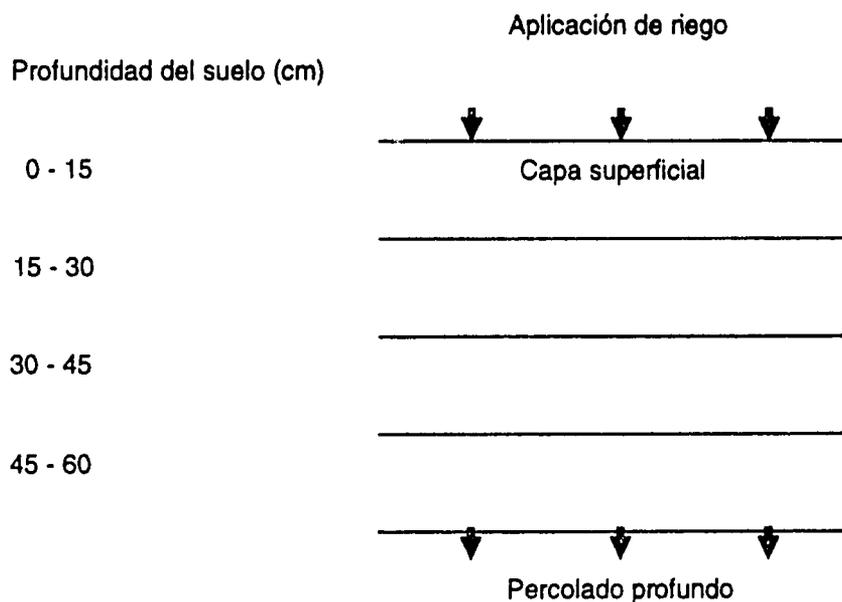
$$\Delta_w = (W_{t_0} - W_{t_1}) \times DB \times Pr \quad (23)$$

donde:  $\Delta_w$  = cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (mm) entre dos riegos consecutivos;  $W_{t_0}$  y  $W_{t_1}$  = porcentaje de humedad del suelo en muestras sucesivas en los momentos  $t_0$  y  $t_1$ ;  $DB$  = densidad masal del suelo ( $g/cm^3$ );  $y$ ,  $Pr$  = profundidad del perfil de suelo (mm).

**Tabla 3. Valores de Kp para datos de panevaporación de Clase A bajo diversos factores de panubicación y clima (Doorenbos y Pruitt, 1977).**

		Panposición						
		En cultivo verde rápido			En área seca de barbecho			
Viento m/d	Distancia a favor (m)	HR prom. (%)			Distancia a favor (m)	HR prom. (%)		
		baja <40	media 40-70	alta >70		baja <40	media 40-70	alta >70
Ligera <175	1	0.55	0.65	0.75	1	0.7	0.8	0.85
	10	0.65	0.75	0.85	10	0.6	0.7	0.8
	100	0.7	0.8	0.85	100	0.55	0.65	0.75
	1000	0.75	0.85	0.85	1000	0.5	0.6	0.7
Moderada 175-425	1	0.5	0.6	0.65	1	0.65	0.75	0.8
	10	0.6	0.7	0.75	10	0.55	0.65	0.7
	100	0.65	0.75	0.8	100	0.5	0.6	0.65
	1000	0.7	0.8	0.8	1000	0.45	0.55	0.6
Fuerte 425-700	1	0.45	0.5	0.6	1	0.6	0.65	0.7
	10	0.55	0.6	0.65	10	0.5	0.55	0.65
	100	0.6	0.65	0.7	100	0.45	0.5	0.6
	1000	0.65	0.7	0.75	1000	0.4	0.45	0.55
Muy fuerte >700	1	0.4	0.45	0.5	1	0.5	0.6	0.65
	10	0.45	0.55	0.6	10	0.45	0.5	0.55
	100	0.5	0.6	0.65	100	0.4	0.45	0.5
	1000	0.55	0.6	0.65	1000	0.35	0.4	0.45

HR = humedad relativa del aire



**Figura 8. División del perfil de suelo para el cálculo de la humedad del suelo.**

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) es una función de la cobertura del cultivo (área cubierta por las hojas de la planta) y de la evaporación desde el suelo descubierto. Una vez que se obtienen los coeficientes de cultivo para un lugar y clon determinados, se pueden emplear éstos para calcular la  $E_a$ . En la Tabla 4 se presentan los valores  $K_c$  para un cultivo normal de papa en diferentes etapas de crecimiento y condiciones climatológicas.

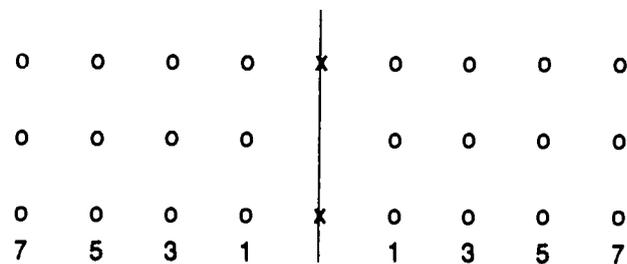
Los calendarios de riego se pueden elaborar a partir de los cálculos anteriores de las necesidades de riego, así como las posibilidades prácticas de aplicar un intervalo ideal de riego para una localidad dada.

**Tabla 4. Valores de Kc para un cultivo de papa de maduración precoz en diferentes etapas de crecimiento y condiciones climatológicas.**

Días	Etapa de crecimiento	HRmin		>70 %		<70 %	
		Viento m/s		0-5	5-8	0-5	5-8
1-14	inicial			0.40	0.45	0.50	0.50
15-30	desarrollo			0.80	0.85	0.90	0.95
36-75	crecimiento del tubérculo			1.05	1.10	1.15	1.20
76-90	madurez			0.70	0.70	0.75	0.75

**Irrigación por aspersión.** En estos sistemas se puede medir la cantidad de agua de riego que llega a la cobertura empleando recipientes de recolección de agua, colocados en un patrón de rejilla, perpendicularmente a la línea central de aspersión y entre cada dos cabezas de aspersión.

Inmediatamente después del riego se mide el agua recolectada, mediante un cilindro graduado, y se calcula la cantidad en milímetros. Cuando no se puede realizar la medición inmediatamente, se evitará la evaporación del agua recolectada, hasta el momento de la medición, añadiendo unas cuantas gotas de aceite al recipiente.



x : cabezas de aspersión de la línea central

o : recipientes de recolección

1, ..., 7 : número de hilera

**Figura 9. Colocación de los recipientes de recolección de agua de riego en un sistema de aspersión.**

**Irrigación por surco.** La distancia entre surcos de riego para papa puede ser de 0.7; 0.9 y 1.0 m. La distancia depende de las condiciones locales y se busca suministrar agua al borde y en la zona de raíz del cultivo. La distribución de agua en los surcos se optimiza con pendientes de aproximadamente 0.5 %. Para evitar la erosión no se debe emplear este tipo de riego si las pendientes son superiores a 2 % en suelos arenosos o mayores de 3 % en suelos arcillosos. En los surcos, se aplica el riego hasta que el agua llegue al extremo de los mismos y luego se disminuye la tasa de flujo. La reducción de la tasa de flujo depende de la textura del suelo y de la tasa de absorción. Esta tasa de riego con tiempo restringido es igual a la razón entre la cantidad de agua aplicada y la longitud del surco. A continuación se presenta una guía general.

**Tabla 5. Tasas promedio de absorción (A) para diferentes tipos de suelo.**

Textura	Tasa de absorción (mm/hora)	
	Rango	Promedio
Arcilla fina-densa	1 – 15	5
arcilla limosa - arcilla	0.03 – 5	2.5
marga arcillosa - arcilla limosa	2.5 – 15	8
Textura media - marga limosa	8 – 20	12.5
Textura medianamente gruesa		
marga arenosa fina		
marga arenosa	15 – 75	25
Textura gruesa		
arena margosa fina		
arena margosa	25 – 250	50

---

La longitud óptima del surco es una función de la longitud del surco más largo que recibe una distribución uniforme de agua con una erosión mínima. El aprovisionamiento de agua entre surcos se puede regular empleando a) sifones que parten del canal principal de abastecimiento a los surcos, o, b) usando canales secundarios de abastecimiento desde los que se distribuye el agua a los surcos. Cuando el agua llega al fondo del surco, se puede reducir el número de sifones o se pueden conectar los surcos con el canal auxiliar secundario.

La cantidad de agua disponible en un sistema de surcos con sifones se puede estimar registrando la cantidad de agua recolectada en un recipiente durante tres minutos. Con canales auxiliares, la cantidad de agua aplicada (en m<sup>3</sup>) es:

$$Q = st \times v \times t \quad (24)$$

donde:  $st$  = área de la sección transversal (m<sup>2</sup>);  $v$  = velocidad de flujo (m/min);  $t$  = tiempo de riego (min).

**Frecuencia de riego.** Además de las consideraciones relativas a la disponibilidad de agua para tomar una decisión sobre los intervalos de riego, si existe disponibilidad diaria de agua de riego la frecuencia de aplicación ( $F$ ) se puede calcular de la siguiente manera:

$$F = 100\% E_a / E_{dp} \quad (25)$$

donde:  $100\% E_a$  = cantidad de agua necesaria para sustituir el  $100\%$  de la evapotranspiración (mm/d) corregida por el factor  $K_c$ ; y,  $E_{dp}$  = evaporación diaria promedio (mm; panevaporación corregida). La evaporación diaria promedio se obtiene de los datos de panevaporación para 4 a 7 días.

Para lograr una elevada eficiencia en el empleo de agua y altos rendimientos de tubérculos, el calendario de riego debe ajustarse a las necesidades del cultivo durante la estación, siendo necesario revisarlo constantemente.

---

## 7 BIBLIOGRAFIA

---

- BULK, A. L. 1981. New equations for computing vapor pressure and enhancement factor. *Journal of Applied Meteorology*. 20: 1527-1532.
- BURMAN, R. D.; CUENCA, R. H.; WEISS, A. 1982. Techniques for estimating irrigation water requirements. *Advances in Irrigation*. 2: 336-393.
- CAMPBELL, G. S.; CAMPBELL, M. D. 1982. Irrigation scheduling using soil moisture measurements: Theory and practice. *Advances in Irrigation*. 1: 25-42.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. 1977. Guidelines for predicting crop water requirements. FAO, Rome. 144 p. (FAO Irrigation Drainage and Paper N° 24).
- HAVERKORT, A. J. 1982. Water management in potato production. CIP, Lima, Peru. 22 p. (Technical Bulletin 15).
- LEVITT, J. 1972. Responses of plants to environmental stresses. First edition. Academic Press. New York. 679 p.
- LOON, C. D. VAN. 1981. The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *American Potato Journal* 58: 51-69.
- MIDMORE, D. J. 1982. Evaluation of agronomic technology for potatoes in the hot tropics. CIP, Lima. 11 p. (Technology Evaluation Series).
- MIDMORE, D. J. 1986. A simple method for interpreting potato crop growth and yield. *CIP Circular* 14(1): 7-9.
- MURRAY, F. W. 1967. On the computation of saturation vapor pressure. *Journal of Applied Meteorology*. 6: 203-204.
- PENMAN, H. L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proceedings Royal Society London. Series A*. 193: 120-146.
- SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H.T.; BRADSTREET, E. D.; HEMMINGSEN, E. H. 1965. Sap pressure in vascular plants. *Science*. 148: 339-346.
- VAN DEN HONERT, T. H. 1948. Water transport as a catenary process. *Discussions of Faraday Society*. 3: 146-153.