

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CS. AGRONÓMICAS
DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
LABORATORIO DE RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA

**MANUAL DE ESTUDIO Y
EJERCICIOS RELACIONADOS
CON EL CONTENIDO DE
AGUA EN EL SUELO Y SU USO
POR LOS CULTIVOS.**

Paola Silva C.
Herman Silva R.
Marco Garrido S.
Edmundo Acevedo H.

Editores:

Paola Silva C.

Herman Silva R.

Marco Garrido S.

Edmundo Acevedo H.

**MANUAL DE ESTUDIO Y EJERCICIOS RELACIONADOS CON EL CONTENIDO DE
AGUA EN EL SUELO Y SU USO POR LOS CULTIVOS**

© Derechos Reservados

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

Inscripción N° **252.843**

Del Registro de Propiedad Intelectual

ISBN: 978-956-19-0906-9

Departamento de Producción Agrícola

Facultad de Ciencias Agronómicas

Universidad de Chile

Avda. Santa Rosa 11315, La Pintana, Santiago –Chile

Santiago de Chile – 2015

Agradecimientos

A todos los alumnos que han pasado por la asignatura de Relación Suelo-Agua-Planta de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile que han sido los grandes motivadores de la creación de este Manual.

En la realización de esta guía han participado numerosos tesis de Pre y Postgrado del laboratorio Relación Suelo-Agua-Planta de la Facultad, colaborando en la redacción y desarrollo de algunos ejercicios, como en la realización de los dibujos y esquemas que permiten una mejor comprensión de las materias tratadas en este documento, no podemos dejar de nombrar al Dr. Mauricio Ortiz, Dr. (c) Rodrigo Savé, Ing. Agr. Olga León y Ing. Ejc. Agr. Rocío Muñoz a todos ellos les damos nuestros profundos agradecimientos.

Los autores.



INDICE

INTRODUCCIÓN.....	3
CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	5
Disponibilidad de agua en el suelo.....	7
Capacidad de Campo (CC).....	9
Punto de Marchitez Permanente (PMP)	9
Curva característica del suelo.....	10
Umbral de Riego (UR).....	11
Definiciones.....	13
Propiedades extensivas	13
Propiedades intensivas	13
Relaciones sin dimensión o porcentajes.....	13
Ejercicios de contenido de agua en el suelo	14
Preguntas sobre contenido de agua en el suelo	23
MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SUELO	24
Potencial hídrico en el suelo	24
Ley de Darcy	27
Ejercicios de movimiento de agua en el suelo	29
Preguntas sobre movimiento del agua en el suelo	36
MOVIMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA	39
Potencial hídrico en la planta.....	39
Transpiración.....	40
Resistencias	43
Ejercicios de movimiento de agua en la planta	46
Preguntas sobre movimiento de agua en la planta.....	52
USO CONSUMO DEL AGUA.....	60
Evapotranspiración	60
Métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivo	63
Métodos indirectos.....	63
Métodos directos.....	65
Ejercicios de consumo de agua por la planta.....	66
Preguntas sobre consumo de agua por la planta.....	71
EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA)	74
Eficiencia en el uso del agua instantánea.....	74
Eficiencia en el uso del agua a nivel de hoja	74
Eficiencia de transpiración instantánea a nivel de cultivo	75

Eficiencia de uso del agua agronómica	77
Mejora de la eficiencia en el uso del agua.....	79
Preguntas sobre eficiencia en el uso del agua.....	81
Referencias bibliográficas	82

INTRODUCCIÓN

En este libro **“MANUAL DE ESTUDIO Y EJERCICIOS RELACIONADOS CON EL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO Y SU USO POR LOS CULTIVOS”** hemos realizado un compendio de conceptos, argumentos e información mínima necesaria para enfrentar la resolución de problemas asociados a los requerimientos hídricos que demandan los cultivos. El estudiante tendrá a su disposición una serie de ejercicios, basados en análisis matemático que fortalecen el aprendizaje de los principios que rigen el contenido y el movimiento del agua en el suelo, y el consumo de agua por las plantas. Adicionalmente, cada capítulo tiene una sección de problemas que invitan a los estudiantes a sistematizar y seleccionar información válida que facilite la reflexión crítica en torno a estos principios. Todos los planteamientos de análisis de este libro están diseñados en el contexto de los resultados de aprendizaje propios del quehacer de un profesional del agro.

Este texto promueve el auto aprendizaje y la integración de conocimientos. En este sentido los estudiantes podrán ir ejercitando a medida que los contenidos se vayan desarrollando en las clases de las distintas asignaturas que imparten estos temas, tanto en Pre como Postgrado (Edafología, Relaciones Hídricas, Riego, Clima, Relación-Suelo-Agua-Planta, Fisiología de Cultivos, Fundamentos de Producción Vegetal, Sistemas Agrícolas, entre otras).

El capítulo “Contenido de Agua en el Suelo” le permite al estudiante conceptualizar y comprender los procedimientos asociados a la determinación de la capacidad de almacenaje de agua que tienen los suelos y familiarizarse así con los principales factores del suelo que determinan la magnitud de este almacenaje.

Los capítulos “Movimiento de Agua en el Suelo” y “Movimiento de Agua en la Planta” están enfocados a facilitar y generar estructuras de aprendizaje de los estudiantes en relación al continuo de agua, que va desde el suelo hacia la planta y desde la planta hasta la atmósfera. El movimiento de este continuo está regido por un gradiente de potencial hídrico, cuyos componentes se determinan dependiendo de la sección en que nos encontremos en el sistema suelo-planta-atmósfera.

El capítulo “Uso Consumo del Agua” identifica a la Evapotranspiración del Cultivo (ETc) como la pérdida de vapor de agua desde las cubiertas vegetales, siendo dependiente del clima (demanda de la atmósfera por vapor de agua) y del cultivo. La ETc se aplica como componente fundamental del balance hídrico permitiendo la programación de riegos a través de la determinación de momentos y cantidades de agua aplicar.

Finalmente el capítulo “Eficiencia en el Uso del Agua” entrega un aprendizaje integral sobre la relevancia en el uso sustentable de este recurso, mediante contenidos estructurados con el objetivo de identificar la relevancia e importancia del uso-consumo del agua por parte de los cultivos, aspecto clave en zonas donde el agua es un recurso escaso que limita la producción agrícola.

Esta propuesta facilita y promueve el aprendizaje y autonomía de nuestros estudiantes haciendo suyo los principios claves que rigen el contenido y el movimiento del agua en el suelo, y el consumo de agua por las plantas. Principios que tienen un alto valor profesional, especialmente en un escenario futuro donde el recurso hídrico será la principal limitante de los sistemas agropecuarios.

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

El suelo es una matriz sólida, no rígida, compuesta de aproximadamente 50% de partículas minerales y orgánicas y 50% de espacio poroso ocupado por aire y agua (Figura 1).

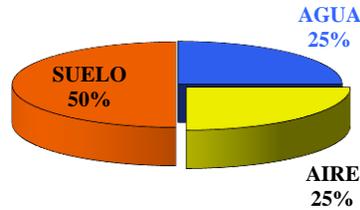


Figura 1. Composición del volumen del suelo.

De la figura anterior se puede concluir que:

$$V_t = V_s + V_a + V_w$$

$$V_t = V_s + V_p$$

$$V_p = V_a + V_w$$

En donde V_t es volumen total, V_s es volumen de suelo (partículas), V_a es volumen de aire, V_w volumen de agua y V_p Volumen de poros.

La condición hídrica del sistema suelo se describe a través del contenido y energía libre del agua, siendo estos factores los que afectan directamente el comportamiento vegetal. Las propiedades físicas del suelo como densidad aparente, textura y porosidad, entre otras, están relacionadas con la productividad de los cultivos porque modifican el almacenamiento de agua en suelo y su movimiento.

El contenido de agua del suelo puede ser expresado en términos gravimétricos (w) y/o volumétricos (θ). El **contenido gravimétrico** es la masa de agua por una

unidad de masa de suelo seco. Es el método más simple de medición del agua en el suelo. Su valor se determina secando la muestra de suelo a 105 °C hasta peso constante (alrededor de 24 horas). La determinación gravimétrica del contenido de agua está compuesta por dos mediciones independientes: la masa de suelo húmedo o total (Mt) y la masa de suelo seco (Ms), combinadas de la siguiente forma:

$$w = \frac{Mw}{Ms}$$

Donde Mw es la masa de agua del suelo, que se calcula con la siguiente expresión:

$$Mw = Mt - Ms$$

El **contenido volumétrico** de agua del suelo (θ) se expresa en términos de volumen de agua (Vw) por volumen de suelo (Vt). Puede ser calculado a partir del contenido gravimétrico de agua y la densidad aparente (Da) del suelo.

$$\theta = \frac{Vw}{Vt} = W Da$$

En un balance hídrico, las entradas y salidas de agua del suelo se expresan en términos de altura de agua por lo que el contenido de agua en el suelo es conveniente expresarlo en **términos de altura de agua (h) o columna de agua**. Esto se logra multiplicando el contenido volumétrico de humedad y la profundidad del suelo:

$$h = \theta \times \text{profundidad}$$

Por ejemplo, si un suelo tiene 100 cm de profundidad y un contenido volumétrico de agua de $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, la altura o columna de agua que contiene es de 30 cm.

Disponibilidad de agua en el suelo

El agua del suelo puede ser clasificada en tres categorías: agua gravitacional, agua disponible para las plantas y agua no disponible.

El **agua gravitacional** es la que drena libremente por la acción de la fuerza de gravedad mientras ésta sea mayor que la fuerza de retención del suelo, lo que está determinado por el diámetro ponderado de poros. Esta agua puede ser absorbida por la planta (ej. saturación durante un riego), no obstante está poco tiempo en el sistema.

El **agua no disponible** es aquella que está fuertemente adsorbida a las partículas del suelo y no puede ser absorbida por las plantas. Dentro de esta categoría actúan dos fuerzas: fuerzas capilares y fuerzas debidas a cargas electrostáticas. La primera fuerza, que es menor, actúa mientras el suelo tenga el agua suficiente para ocupar capilares.

Los capilares son tubos de pequeño diámetro en los que el agua tiende a subir por succión. La altura que es capaz de subir depende del diámetro del capilar; a menor diámetro mayor succión y mayor altura (Figura 2). La capilaridad actúa en cualquier dirección, por lo tanto es la clave para entender la retención de agua por los poros del suelo.

Capacidad de Campo (CC)

Es el contenido de agua de un suelo, después que ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar libremente, evitando las pérdidas por evapotranspiración. Corresponde aproximadamente al contenido de agua del suelo a una tensión o potencial mátrico del agua de -0,33 bares.

Normalmente este contenido de agua se toma alrededor de 24 a 48 horas después de un riego o lluvia abundante, teniendo la precaución de cubrir el suelo con un plástico para evitar la evaporación.

Punto de Marchitez Permanente (PMP)

Es el contenido de agua de un suelo al cual la planta se marchita y ya no recobra su turgencia al colocarla en una atmósfera saturada durante 12 horas. Por convención corresponde al contenido de agua a una tensión o potencial mátrico de -15 bares.

El PMP puede ser estimado a partir de la CC:

$$PMP = \frac{CC}{1,85}$$

Como se observa en el Cuadro 1 el contenido de agua a CC y a PMP cambia dependiendo la textura del suelo, siendo mayor en suelos con textura arcillosa y menor en suelos con textura arenosa.

Cuadro 1. Contenido de agua a CC y PMP en distintas clases texturales (Martin de Santa Olalla y de Juan Valero, 1992).

Clase textural	CC (%)	PMP (%)
Arcilla	23-46	13-29
Franco arcillosa	18-23	9-10
Franca	12-18	4-11
Franco arenosa	8-13	4-6
Arena	5-7	1-3

Los suelos arenosos, que poseen un mayor porcentaje de poros de mayor diámetro, drenan más rápido que los suelos arcillosos, que tienen un mayor porcentaje de poros de menor diámetro equivalente.

Curva característica del suelo

La curva característica de un suelo es aquella que se obtiene al graficar el contenido de agua del suelo (eje de las Y) versus la tensión o potencial mátrico (eje de las X). Esta curva es propia de cada suelo y varía con la textura y estructura. Esta curva se obtiene en laboratorio, sometiendo el suelo a presiones de 0,33 y 15 bares mediante una olla y plato de presión, respectivamente.

La Figura 4 muestra curvas características para un suelo arcilloso y uno arenoso. Ambos suelos a CC tienen distinto contenido de agua, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso, sin embargo, la tensión o potencial mátrico a que esta retenida esta agua es el mismo, -0,33 bares. De igual forma ambos suelos a PMP tienen distinto contenido de agua, siendo mayor en el suelo arcilloso que en el arenoso, esto implica que las plantas que se encuentran en suelos arcillosos se marchitan con un contenido de agua mayor del suelo que las plantas que se encuentran en un suelo arenoso, sin embargo la tensión o potencial mátrico a que esta retenida esta agua es el mismo, -15 bares.

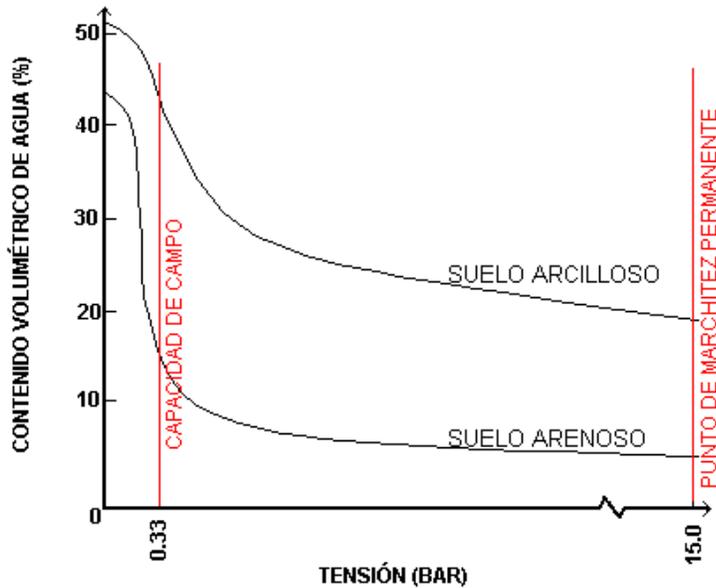


Figura 4. Curva característica de suelo arcilloso y suelo arenoso.

Umbral de Riego (UR)

Cerca de un tercio de la humedad aprovechable es fácilmente disponible. A medida que se va secando el suelo es más difícil para las plantas extraer agua, por lo que comúnmente se riega antes que el contenido de agua llegue a PMP, de esta forma, se fija un “Umbral de Riego” que es un porcentaje de la Humedad Aprovechable que tiene que consumirse antes de que se riegue de nuevo. Este umbral de riego se fija dependiendo de la especie y del estado de desarrollo del cultivo. La humedad disponible para las plantas es la altura de agua de la humedad aprovechable que se permite perder antes de regar (Figura 5).

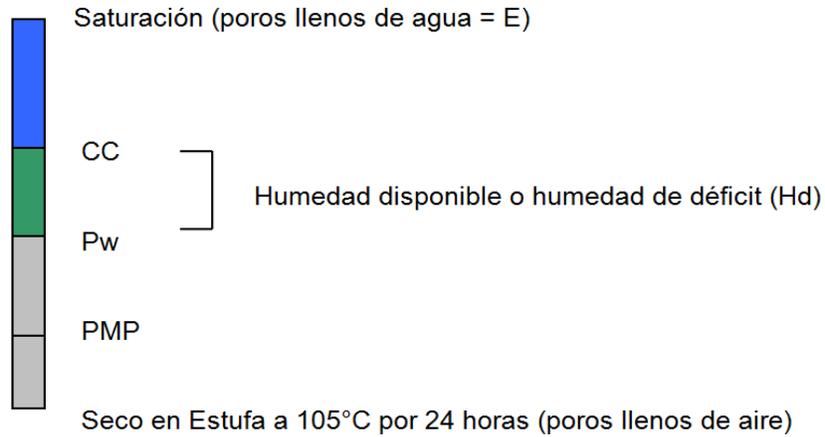


Figura 5. Humedad disponible en el suelo (H_d).

$$H_d = H_a \times UR$$

$$H_d = (CC - PMP) \times Da \times prof \times UR$$

Si P_w es el contenido de agua para un umbral de riego dado, se puede expresar de la siguiente manera:

$$H_d = (CC - P_w) \times Da \times prof$$

Por otra parte la altura de agua que tiene el suelo antes del momento del riego (P_w) se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$P_w = CC - H_d$$

El agua necesaria para llevar desde un contenido de agua cualquiera a saturación es H_{sat} :

$$H_{sat} = (E - P_w \times Da) \times prof$$

Definiciones

Propiedades extensivas

V_t = Volumen total

V_p = Volumen ocupado por poros

V_s = Volumen ocupado por sólidos

V_w = Volumen de agua

V_a = Volumen de aire

M_s = Masa de los sólidos

M_w = Masa de agua

Propiedades intensivas

$$\text{Densidad del agua} = D_w = \frac{M_w}{V_w} = 1 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\text{Densidad real del suelo} = D_r = \frac{M_s}{V_s} = 2,65 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\text{Densidad aparente del suelo} = D_a = \frac{M_s}{V_t}$$

Relaciones sin dimensión o porcentajes

$$\text{Porosidad del suelo} = E = \frac{V_p}{V_t} = 1 - \frac{D_a}{D_r}$$

$$\text{Contenido gravimétrico de agua} = W = \frac{M_w}{M_s}$$

$$\text{Contenido volumétrico de agua} = \theta = \frac{V_w}{V_t} = W * D_a$$

Ejercicios de contenido de agua en el suelo¹

1. Una muestra de suelo con 40% de porosidad tiene un volumen total de 120 cm^3 y un contenido de agua de $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Si la densidad de la fase sólida es de $2,5 \text{ g/cm}^3$. ¿Cuál es la densidad aparente?

Resultado: $1,5 \text{ g/cm}^3$

2. Un suelo húmedo tiene un contenido de agua de $0,15 \text{ g/g}$. Si se necesitan 200 g de suelo seco para un experimento ¿Cuántos gramos de suelo húmedo se necesitan?

Resultado: 230 g de suelo húmedo

3. Un suelo tiene una porosidad de $0,45 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Si el contenido de humedad del suelo es de $0,20 \text{ g/g}$ y la densidad de partículas promedio es de $2,6 \text{ g/cm}^3$. Calcule los cm de agua en una profundidad de 30 cm de suelo.

Resultado: $8,6 \text{ cm}$

4. Se desea llevar un suelo a CC Se sabe que el suelo alcanza CC con un valor de $0,4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ (contenido de humedad en base a volumen). Si el suelo está a PMP, ¿Qué altura de agua (cm) hay que aplicar para que el suelo quede a CC hasta una profundidad de 80 cm ? Porosidad = 50% y Densidad real = $2,6 \text{ g/cm}^3$

Resultado: $14,4 \text{ cm}$

¹ Se recomienda realizar los cálculos con magnitudes de hasta 2 decimales

5. Se tiene un suelo en el que un volumen de 1000 cm^3 tendría 340 cm^3 de agua a CC. La porosidad es de 54%. ¿Qué volumen de agua requiere la capa arable (15 cm de profundidad) por hectárea para quedar a CC si el suelo se encuentra a PMP?

Resultado: $240 \text{ m}^3/\text{ha}$

6. Un terrón natural de suelo húmedo tiene un volumen de 150 cm^3 , un peso húmedo de 240 g y un espacio ocupado por aire de $0,15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Si la densidad de partículas es de $2,65 \text{ g}/\text{cm}^3$. Calcular:

- Densidad aparente
- Contenido de agua en base a peso.
- Contenido de agua en base a volumen.
- Porosidad total (%).

Resultado: a) $1,35 \text{ g}/\text{cm}^3$
 b) $0,18 \text{ g}/\text{g}$
 c) $0,25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 d) 49%

7. Se sabe que regando un suelo que está a PMP con una altura de agua de 16 cm queda a CC hasta una profundidad de 80 cm. A CC el contenido de agua en base a volumen es de $0,4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Indique:

- Capacidad de campo del suelo (%).
- Punto de marchitez permanente (%).
- Humedad aprovechable (cm).
- ¿Qué profundidad del suelo queda a CC después de regar durante 20 h, si la velocidad promedio de infiltración es de $0,8 \text{ cm}/\text{h}$? En el momento en que se inicia el riego, el suelo tiene un contenido de agua de 10% (base a peso).
 Porosidad del suelo = 50%; $D_r = 2,6 \text{ g}/\text{cm}^3$

Resultado: a) 31%
b) 15%
c) 16 cm
d) 60 cm

8. El contenido de agua de un suelo a CC es de $0,4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Indique la altura de agua (cm) que hay que adicionar a este suelo para reponer totalmente la humedad aprovechable en una profundidad de 100 cm. Asuma que inicialmente el suelo está a PMP.

Resultado: 18 cm

9. Una muestra de suelo tiene un contenido de agua de 35% (base peso). ¿Qué volumen de agua se debe añadir a una muestra de 1 Kg de ese suelo para que su contenido de agua aumente a 50% (base peso)?

Resultado: 111 cm^3

10. Se tomó una muestra de suelo a los 15 cm de profundidad que pesó 350 g, luego fue secada en una estufa a 105°C por 24 horas y su peso fue de 280 g. Si la densidad aparente de dicho suelo es de $1,3 \text{ g}/\text{cm}^3$, calcule:

- El volumen de agua que tenía la muestra de suelo en el campo.
- El contenido gravimétrico de agua que tenía la muestra de suelo en el campo.
- El contenido volumétrico de agua que tenía la muestra de suelo en el campo.
- La altura de agua que tienen los primeros 30 cm de profundidad de dicho suelo.
- Si posteriormente a la toma de muestra del suelo, cae una lluvia de 14 mm ¿Qué profundidad de suelo queda a CC (40% en base a peso)?

Resultado: a) 70 cm^3
 b) $0,25 \text{ g/g}$
 c) $0,33 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$
 d) $9,8 \text{ cm}$
 e) $7,2 \text{ cm de profundidad}$

11. Con respecto al suelo del ejercicio N°10:

- a) ¿Qué volumen de agua se debe añadir para que el contenido de humedad de la muestra alcance CC?
 b) ¿Qué altura de agua se debe aplicar a 1 ha para que la humedad de los primeros 30 cm de dicho suelo alcancen CC?

Resultado: a) 42 cm^3 de agua
 b) $5,9 \text{ cm}$

12. ¿Cuál es la carga máxima que debe soportar un camión tolva de 5 m^3 de capacidad si la arena que transporta está completamente saturada? $D_a = 1,8 \text{ g/cm}^3$.

Resultado: $10,6 \text{ ton}$.

13. Con el objetivo de conocer la D_a de un suelo homogéneo, franco, de 80 cm de profundidad que se encontraba saturado, se sacó una muestra con forma de cubo de 10 cm por lado, que pesó 1900 g. La muestra se llevó inmediatamente a una estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta un peso constante de 1400g.

Para conocer el contenido de humedad a CC, dicho suelo se dejó drenar por 24 horas y se sacó una muestra que dio los siguientes resultados: 1570 g y 1250 g en peso húmedo y seco, respectivamente.

Para determinar el PMP se colocó una muestra en un plato de presión a 15 bares que pesó 1320 g en húmedo, al secarla en estufa a $105 \text{ }^\circ\text{C}$ pesó 1175 g. Conociendo el contenido de humedad de dicho suelo a CC y PMP conteste:

- a) Si el UR es de 30% , ¿cuántos gramos de agua habría que agregar a un macetero cilíndrico de 40 cm de alto y 30 cm de diámetro que se llena con este suelo?
- b) ¿Cuantos m^3 de agua por hectárea existen en el suelo en el momento en que ha cesado el drenaje del exceso de agua?

Resultado: a) 1556 g
b) 2880 m^3

14. Calcular el volumen de agua en media hectárea de un suelo que tiene un contenido de agua de un 23%, $D_a = 1,35$ g/cc y una profundidad de 75 cm.

Resultado: 1163 m^3

15. Un determinado suelo mineral tiene un 50% de porosidad y todo el perfil de suelo se satura con 12 cm de agua, aplicada cuando el suelo está a CC. También se sabe que con 3,5 cm se logra llevar desde un contenido de agua de 18% hasta CC. ¿Cuál es la profundidad del perfil?

Resultado: 59,6 cm

16. Un suelo tiene una CC de 18% y una porosidad de 55%. ¿Qué volumen de agua drenaría por cada centímetro cúbico de suelo si este estuviera saturado?

Resultado: 0,34 cm^3/cm^3

17. En un macetero ¿Cuál es la cantidad de agua necesaria para saturar el suelo si se sabe que su volumen es 950 cm^3 , CC 27%, PMP 10%, P_w 20% y su D_a 1,32 g/ cm^3 ?

Resultado: 228 cm^3

18. Determinar H_d y H_{sat} en un suelo de 60 cm de profundidad que presenta una CC de 27,7%, PMP 13%, P_w 23% y una porosidad de 50,1%.

Resultado: $H_d=4,2$ cm; $H_{sat}=12$ cm

19. Si CC 27,3%, PMP 14%, P_w 20%, D_a 1,4 g/cc y la profundidad del suelo es 83 cm.

- Determinar la porosidad
- ¿Qué porcentaje de poros está lleno de agua?
- Si cae una lluvia de 14 mm justo antes del riego ¿cuál será la altura de agua del suelo?

Resultado: a) 47%.

b) 59%

c) 24,6 cm

20. Una muestra de suelo húmedo tiene una masa de 1000 g y un volumen de 640 cm^3 . Al ser secada en una estufa a 105 °C por 24 horas su masa seca fue de 800 g. Calcule la densidad aparente, el volumen de agua y el volumen de suelo seco. Asuma una densidad real de 2,65 g/cm^3 .

Resultado: $D_a = 1,25$ g/cm^3 ; $V_w = 200$ cm^3 ; $V_s = 302$ cm^3

21. Un suelo presenta las siguientes características:

Profundidad	CC (%)	PMP (%)	D_a (g/cm^3)	E (%)	P_w (%)
0-25	30	15	1,35	48	22
25-50	28	12	1,40	47	21
50-88	26	11	1,41	47	20

- a) Determinar la humedad aprovechable.
- b) Determinar el déficit de humedad.
- c) ¿Hasta qué profundidad moja a CC una lluvia de 30 mm?
- d) Determinar humedad de saturación a partir de Pw.

Resultado: a) 18,7 cm
 b) 8,4 cm
 c) 28,1 cm
 d) 16,1 cm

22. Un suelo con las siguientes características:

Profundidad	CC (%)	PMP (%)	Da (g/cm ³)
0-30	30	15	1,35
30-80	28	13	1,4
80	Estrata impermeable		

- a) Calcular la lámina de agua que debería aplicarse para dejar un nivel freático a 40 cm desde la superficie. Considere que la lámina de agua se aplicará justo antes del riego (UR 25%).
- b) Si llueve 45 mm antes del riego ¿Se forma o no nivel freático? Si se forma ¿A qué profundidad desde la superficie? Considere un UR 25%.

Resultado: a) 7,3 cm
 b) 75 cm desde la superficie

23. Se tienen 5 ha de maravilla cuyas raíces llegan hasta 80 cm de profundidad, se riega con un UR de 30% en un suelo con las siguientes características:

Profundidad	CC (%)	PMP (%)	Da (g/cm ³)
0-25	30	12	1,41
25-45	30	12	1,42
45-80	28	11	1,35

a) Si antes del riego cae una lluvia de 25 mm ¿Hasta qué profundidad se humedece el suelo?

b) Si a los 80 cm existe un duripan impermeable ¿Qué monto de lluvia dejará un nivel freático a 25 cm de la superficie?

Resultado: a) Hasta los 32 cm

b) 104 mm

24. Un suelo de la serie Santa Bárbara presenta las siguientes características:

Profundidad	CC (%)	PMP (%)	Da (g/cm ³)	Pw (%)
0-17	59,5	26,4	0,94	30,0
17-28	67,1	35,7	0,79	35,0
28-43	61,6	38,6	0,71	40,0
43-67	55,0	37,2	0,98	55,0
67-98	55,5	38,5	0,94	55,5
98-120	57,5	40,7	0,89	57,5

- a) Calcular la porosidad (%)
- b) Determinar la humedad aprovechable.
- c) Determinar el déficit de humedad.
- d) ¿Hasta qué profundidad quedo el suelo CC después de una lluvia de 50 mm?

Resultado: a) 65; 70; 73; 63; 64; 66%.
b) 23,2 cm
c) 9,8 cm
d) Los primeros 18 cm de suelo

Preguntas sobre contenido de agua en el suelo

1. Discuta los conceptos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente:

- a) Desde un punto de vista de física de suelos.
- b) Desde un punto de vista de riego ("humedad aprovechable").
- c) Desde un punto de vista de relaciones hídricas de las plantas.

2. Basado en su conocimiento de curvas características típicas para una textura arenosa y una textura franco arcillosa, compare en un gráfico de contenido de agua en base a volumen v/s tiempo estos dos suelos. Asuma que ambos suelos están completamente cubiertos con el mismo cultivo y que la evapotranspiración es la misma y constante en el tiempo.

- a) Haga el gráfico para varios ciclos de riego indicando con flechas cuando se riega. Asuma que se riega cuando el potencial del agua del suelo llega a - 2,0 bares.
- b) ¿Cómo modificaría Ud. la práctica del riego para un cultivo en que la densidad radicular baja a la mitad en cada uno de estos suelos?

3. Discuta el concepto de agua aprovechable de un suelo. Defínalo, y señale los factores que determinan la mayor o menor monto aprovechable de agua para las plantas.

4. Señale en forma práctica los 4 principales pasos que se siguen para determinar la densidad aparente de un suelo.

MOVIMIENTO DE AGUA EN EL SUELO

Potencial hídrico en el suelo

El agua en el suelo siempre tiene una energía determinada, que depende de la cantidad de agua que haya en el suelo y de las fuerzas que actúan sobre ella. Se llama “**Potencial hídrico total (Ψ)**” a la energía libre por mol de agua, es decir a la capacidad de realizar trabajo del agua. Los campos de fuerza actúan disminuyendo la energía libre del agua o capacidad de desplazarse; de esta forma si al agua se le agregan solutos, estos interactúan con ella, disminuyendo su energía libre. El agua pura a una altura de referencia y presión de 1 Atm siempre tiene un potencial hídrico total de cero. A medida que se le resta energía libre su potencial se hace más negativo.

El potencial hídrico se puede expresar como la suma de sus componentes (campos de fuerza que quitan energía al agua).

$$\Psi = \psi_g + \psi_p + \psi_m + \psi_s$$

En que ψ_g es potencial gravitacional, ψ_p es potencial de presión, ψ_m es potencial mátrico y ψ_s es potencial de solutos o también conocido como potencial osmótico.

Las unidades de potencial hídrico pueden ser expresadas en base a:

- Masa (J/Kg)
- Volumen (cbar, MPa)
- Peso (cm, m)

Potencial gravitacional (ψ_g): Es el trabajo que se realiza al trasladar una cantidad infinitesimal de agua respecto a un nivel de referencia. Este potencial dependerá de un nivel de referencia, pudiendo ser positivo o negativo, si es que esta sobre o bajo el nivel de referencia.

Potencial de presión (ψ_p): Está referido a la presión atmosférica. Su valor es cero o positivo en la presencia de una columna de agua o en el caso de una célula corresponde a la presión que ejerce la vacuola en contra de la pared celular recibiendo en este caso el nombre de potencial de turgor.

Potencial mátrico (ψ_m): Es la reducción de energía libre del agua debido a las fuerzas de cohesión y adhesión entre moléculas de agua-agua y agua-sólido. Debido a que en la matriz del suelo existen poros con aire y agua se produce un fenómeno que se conoce como tensión superficial. La magnitud en que disminuye la energía libre es función del radio efectivo de los poros, a mayor radio efectivo mayor es el potencial mátrico. Se mide con tensiómetros (de Bourdon o de mercurio) o con bloques de yeso. Su valor es cero o negativo.

Potencial de solutos (ψ_s) o potencial osmótico(ψ_o): Es la reducción de energía libre del agua debido a la presencia de solutos. Adquiere importancia cuando el agua está separada por una membrana semipermeable. Siempre se presenta en las células. Su valor es negativo.

En el suelo no hay membranas semipermeables por lo que el agua se mide en respuesta a potencial hidráulico (suma de potencial de presión o mátrico y gravitacional) (Figura 6).

Potencial hídrico del suelo $\Psi = \psi_g + \psi_m (\psi_p)$

o Potencial hidráulico : $\phi = z + h$

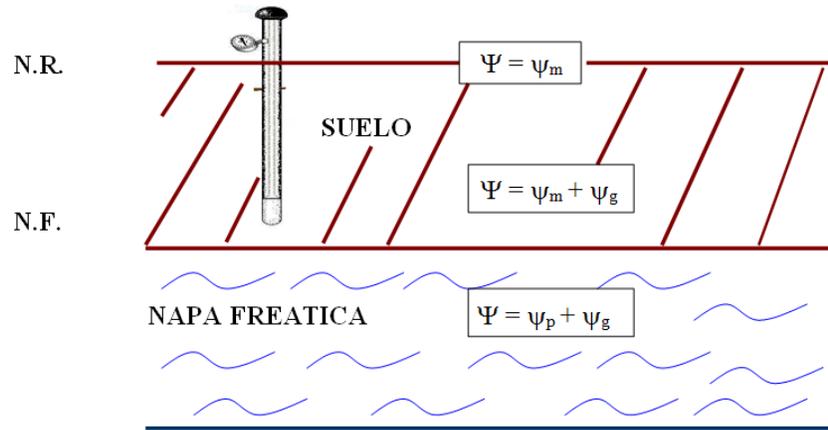


Figura 6. Potencial hídrico y sus diferentes componentes.

Dentro de un suelo los componentes del potencial varían según las condiciones de este. **Si el suelo está saturado**, no existe potencial mátrico, sino que actúa un potencial de presión como una columna de agua sobre un punto dado en el perfil del suelo. **Si el suelo no se encuentra saturado**, existirán poros con aire y meniscos que disminuirán la energía libre del agua.

El potencial hídrico del suelo puede ser descrito en términos de presión de vapor de agua. El agua líquida a una temperatura y presión atmosférica dada tiene asociado una presión de vapor en equilibrio. Se puede expresar a través de la siguiente ecuación:

$$\Psi = \frac{RT}{V} \left(\ln \frac{e_a}{e_s} \right)$$

donde Ψ es el potencial hídrico en MPa, R es la constante universal de los gases ($8,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ MPa mol}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$), T es la temperatura absoluta ($^\circ\text{K}$), V es el volumen molar del agua a la temperatura T ($\text{m}^3 \text{ mol}^{-1}$), e_a es la presión actual de vapor de agua y e_s es la presión de vapor a saturación.

Ley de Darcy

El movimiento del agua en el suelo se expresa por el **flujo de agua** (cantidad de agua que pasa por una unidad de área en un tiempo dado) que se describe por la **Ley de Darcy**, cuyas unidades de medición para flujo de agua son m/s, cm/s, mm/día, etc.

$$J = \frac{Q}{At} = -K \frac{\Delta \Psi}{\Delta x}$$

J: flujo (m/s)

Q: cantidad de agua (m³)

$\Delta \Psi$: diferencia de potencial hídrico (cm)

A: área (m²)

Δx : distancia (cm)

t: tiempo (s)

$\Delta \Psi / \Delta x$: gradiente de potencial hídrico

K: conductividad hidráulica (m/s)

El agua se mueve en respuesta a dos factores, primero a una fuerza que corresponde al **gradiente de potencial**, que es adimensional, pero como es un vector tiene sentido y dirección; y en segundo lugar a la **conductividad hidráulica**, es decir la capacidad del medio para conducir el agua, la cual varía con el contenido de agua y con el tipo de suelo. La conductividad hidráulica a saturación (K_0)² es mayor en suelos arenosos (con valores de 10⁻⁴ a 10⁻⁶ m/s), que en suelos arcillosos (con valores de 10⁻⁶ a 10⁻⁹ m/s). Como ya se mencionó, K también depende del contenido de humedad del suelo (Figura 7), si se está en suelos con bajo contenido de agua la conductividad hidráulica es muy baja pudiendo llegar cero, por lo tanto no habrá flujo, aunque el gradiente de potencial sea grande.

² El subíndice de K corresponde al potencial mátrico que tenga dicho suelo, en este caso, cero.

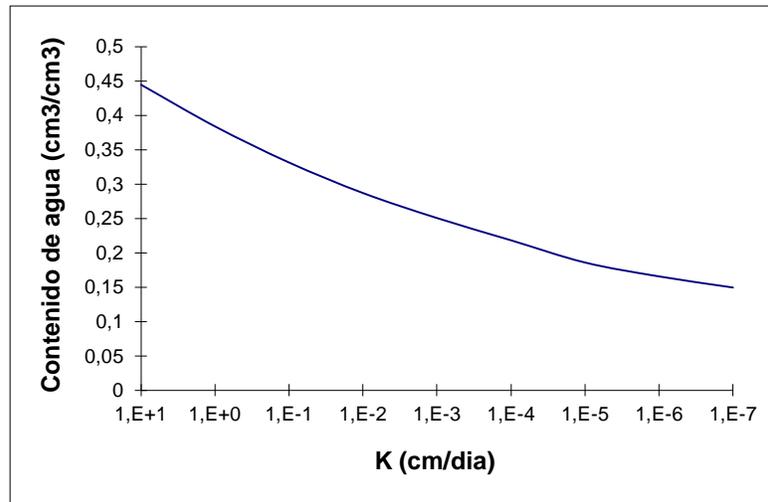


Figura 7. Conductividad hidráulica (K) en función del contenido volumétrico de agua (θ) en un suelo franco arcillo limoso.

El suelo puede estar bajo tres condiciones distintas, y que darán o no origen a un flujo de agua:

1. Suelo saturado con agua en equilibrio donde no existe movimiento de agua en la matriz suelo (el criterio de equilibrio es de igualdad de potencial hidráulico).
2. Suelo saturado en que el agua no está en equilibrio, existirá flujo de agua;
3. Suelo no saturado donde también existirá un flujo de agua.

Se debe tener cuidado de no confundir **caudal o gasto** con flujo, ya que el caudal es el agua que pasa en un tiempo determinado, dicho en otras palabras es el flujo que pasa por un área dada.

$$G = JA = \frac{Q}{At} A = \frac{Q}{t}$$

Ejercicios de movimiento de agua en el suelo³

1. Dos tensiómetros de Bourdon cuyas cápsulas instalados en un suelo a diferentes profundidades: A=40 cm, B=70cm. Ambos tensiómetros marcan 80 cb. (Asuma el nivel del suelo como el nivel de referencia).

a) ¿Cuál es el potencial del agua en los puntos A y B? ¿Hacia dónde se mueve el agua?

b) ¿Qué valor debieran indicar estos tensiómetros para asumir que el perfil está a CC?

Resultado: a) $\Psi_A = -840 \text{ cm}$ $\Psi_B = -870 \text{ cm}$; desde A a B
b) 30 cb

2. Dos tensiómetros están colocados en la ladera de un cerro cuya pendiente es de 30%³. El primer tensiómetro (el de más arriba) marca una succión de 45 cb, el segundo tensiómetro marca 35 cb. ¿A qué distancia se deberían encontrar las cápsulas de los tensiómetros para que no existiera movimiento de agua en la ladera?

Resultado: 3,48 m

3. Hay un suelo de 60 cm de profundidad en una ladera de un cerro con una pendiente de 20%. Se instalan 2 tensiómetros a 50 cm de profundidad y **a una distancia horizontal** de 1 metro uno de otro. El tensiómetro A (el más alto) marca 50cb y el tensiómetro B (el más bajo) marca 150cb. ¿Cuál es el potencial total del agua en cada punto? ¿Hacia dónde se mueve el agua? (N.R. punto B).

Resultado: $\Psi_A = -480 \text{ cm}$; $\Psi_B = -1500 \text{ cm}$
Desde A hacia B

³ Se recomienda realizar los cálculos con magnitudes de hasta 2 decimales

4. En un suelo de 70 cm de profundidad ubicado en ladera de un cerro con una pendiente de 30%, se instalan 2 tensiómetros a 60 cm profundidad y a una distancia de 1 metro uno de otro **en el sentido de la pendiente**. El tensiómetro A (el más alto) marca 65 cb y el tensiómetro B (el más bajo) marca 115 cb. ¿Cuál es el potencial total del agua en cada punto? ¿Hacia dónde se mueve el agua? ¿Cuál es el flujo si la conductividad hidráulica es de 0,024 cm/día? (Ocupe como N.R. el punto B)

Resultado: $\Psi_A = -621\text{cm}$; $\Psi_B = -1150\text{cm}$

Desde A hacia B; $J = 0,126\text{ cm/día}$

5. Si en un suelo hay una napa freática ubicada a 2,5 m de profundidad y existe un tensiómetro de Bourdon ubicado a 90 cm de profundidad que marca 15 cb.

a) Calcule el potencial hidráulico a 3m de profundidad (A), el potencial hidráulico en el límite de la napa freática (B) y el potencial hidráulico en el punto donde está ubicado el tensiómetro (C).

b) ¿Hacia dónde se mueve el agua?

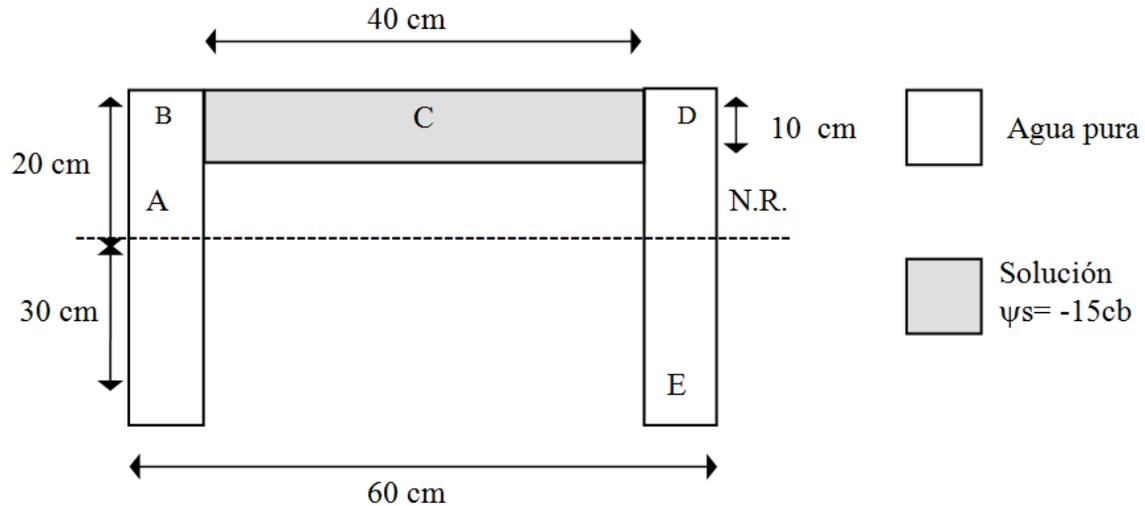
Resultado: a) $\Psi_A = -240\text{ cm}$; $\Psi_B = -250\text{ cm}$; $\Psi_C = -250\text{ cm}$

b) Desde A hacia B

6. En el siguiente sistema de cañería cerrada con soluciones y agua pura separadas por membranas semipermeables

a) Calcule los potenciales hidráulicos ubicados en los puntos A, B, C, D y E.

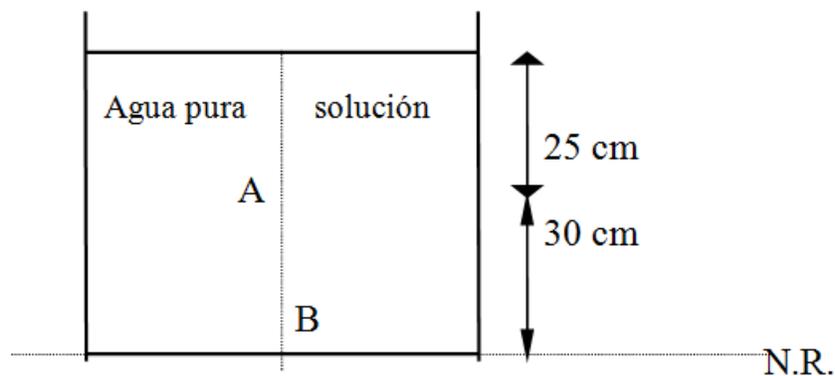
b) ¿Hacia dónde se mueve el agua? ¿Cuándo cesará el movimiento de agua?



- Resultado: a) $\Psi_A = 20 \text{ cm}$; $\Psi_B = 20 \text{ cm}$; $\Psi_C = -130 \text{ cm}$; $\Psi_D = 20 \text{ cm}$;
 $\Psi_E = 20 \text{ cm}$
 b) B y D hacia C; cesará cuando se igualen los potenciales totales.

7. Una cubeta está dividida por una membrana semipermeable. A un lado hay agua pura y al otro una solución con $\psi_s = -0,24 \text{ MPa}^4$.

- a) ¿Qué potencial total del agua tiene el punto A ubicado en el agua pura a 30 cm de altura de un punto B ubicado en la solución? ¿Hacia dónde se mueve el agua?
 b) ¿Qué potencial de presión extra debiera aplicarse a la solución para que no ocurra movimiento de agua?



- Resultado: a) $\Psi_A = 55 \text{ cm}$; $\Psi_B = -2345 \text{ cm}$; desde A a B
 b) $0,24 \text{ MPa}$

8. Hay 2 tensiómetros de mercurio separados horizontalmente por 100 cm, ambos están ubicados a 30 cm de profundidad. El tensiómetro A marca 32 cm Hg y el tensiómetro B marca 28 cm Hg. Si la conductividad hidráulica de ese suelo es de $4 \times 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$

a) Determine la dirección del movimiento del agua y calcule su flujo.

Resultado: a) desde B a A ; Flujo = $2,8 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

9. El potencial hidráulico de un punto A de un suelo es de -65 cm y el ψ_m es de -35cm. En un punto B del suelo localizado 30cm bajo A el $\psi_m = -40\text{cm}$. Considere que está circulando agua a razón de 600cm^3 en 10 horas por un área de 200 cm^2 entre los 2 puntos de dicho suelo ¿Calcule la $K_{37,5}$ del suelo?

Resultado: $K_{37,5} = 0,128 \text{ cm/hora}$

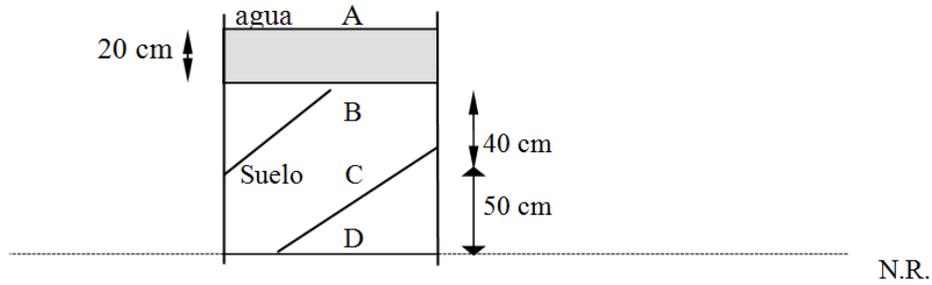
10. Un cultivo cuya profundidad de arraigamiento es de 150 cm crece en un suelo que tiene un nivel freático a los 250 cm de profundidad. En el límite de la zona radicular el potencial

mátrico es de -100 cm de agua. A los 200 cm de profundidad el potencial mátrico es de -50

cm de agua. Calcule el aporte de la napa a la evapotranspiración del cultivo ($K_o = 1,3 \text{ cm/día}$; $K_{75} = 0,25 \text{ cm/día}$; $K_{100} = 0,2 \text{ cm/día}$; $K_{250} = 0,01 \text{ cm/día}$)

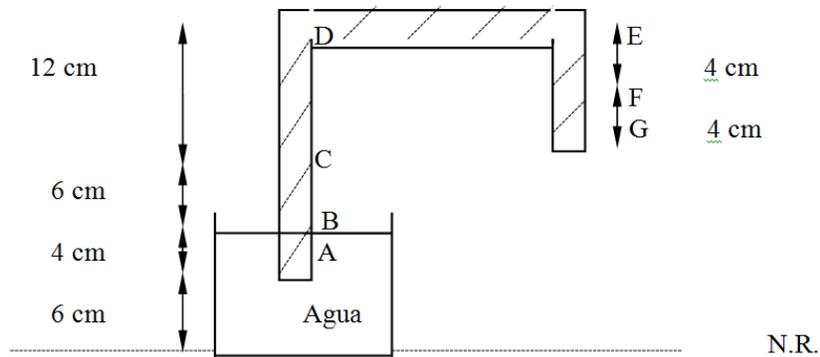
Resultado: La napa no aporta agua, porque no hay flujo.

11. En una columna de **suelo saturado en equilibrio**. Calcule el valor de potencial hidráulico en los puntos A, B, C y D ¿Cuál es el flujo?



Resultado: $\Psi_A = 110 \text{ cm}$; $\Psi_B = 110 \text{ cm}$; $\Psi_C = 110 \text{ cm}$; $\Psi_D = 110 \text{ cm}$
 No hay flujo

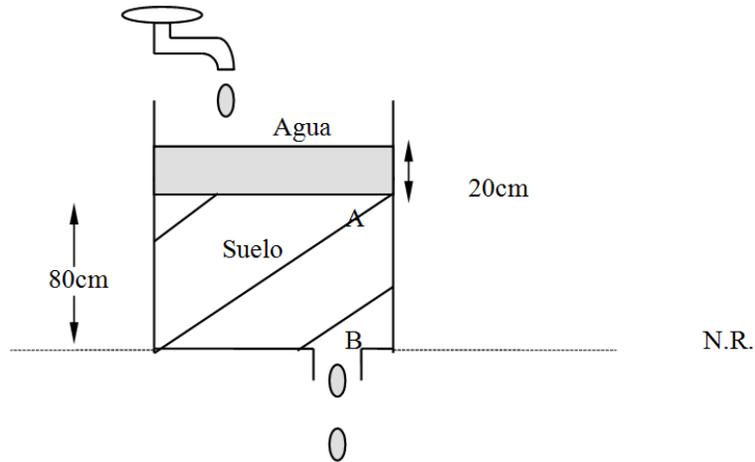
12. Una columna de **suelo en equilibrio** hídrico tiene inserto su único extremo poroso en un receptáculo de agua tal como se indica en la figura. Determine los potenciales hidráulicos y sus componentes en cada punto.



Resultado:

	ψ_m	ψ_g	Ψ
A	0	6	10
B	0	10	10
C	-6	16	10
D	-18	28	10
E	-18	28	10
F	-14	24	10
G	-10	20	10

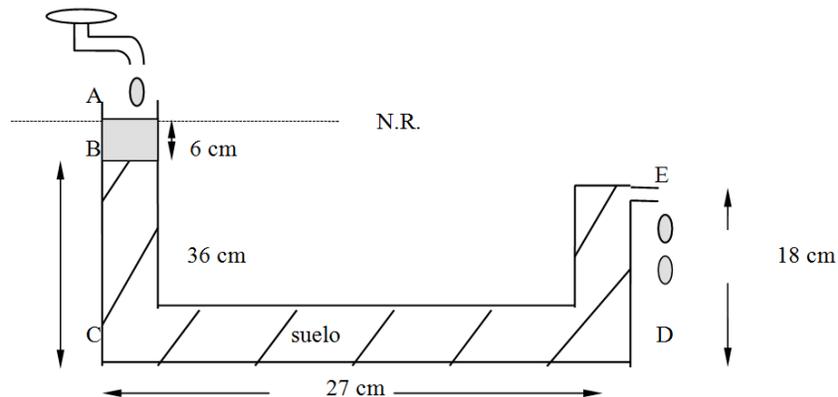
13. En una columna de **suelo saturado con agua que no está en equilibrio**, el agua se está moviendo con un flujo de 0,1 m/hr. Calcule el valor del potencial hidráulico en A y en B y el valor de la conductividad hidráulica



Resultado: $\Psi_A = 100 \text{ cm}$; $\Psi_B = 0 \text{ cm}$

$K_o = 0,08 \text{ m/hr}$

14. Calcular los potenciales hidráulicos y sus componentes en los puntos A, B, C, D y E. Considere que **el suelo está saturado y no está en equilibrio**. Si la conductividad del suelo es de 0,00023 m/s ¿Cuál será el flujo? Si el diámetro de la cañería es de 10 cm ¿Cuál será el caudal?



Resultado: $\Psi_A = 0 \text{ cm}$; $\Psi_B = 0 \text{ cm}$; $\Psi_C = -10,8 \text{ cm}$; $\Psi_D = -18,7 \text{ cm}$; $\Psi_E = -24 \text{ cm}$

15. Un agricultor descubre que su semillero de alfalfa una vez establecido le da excelentes rendimientos sin riego. La evapotranspiración media durante el período de floración y llenado de grano es de 5 mm/día, considere que durante el período no ocurren lluvias. Las raíces llegan hasta una profundidad de 1,5 m. Durante 50 días del período el contenido de humedad medio en base a volumen en la zona radicular baja de 0,25 a 0,20 cm^3/cm^3 y su ψ_m llega a - 50 cb. Si el gradiente de potencial hidráulico entre 1,5 m de profundidad a que se encuentra el nivel freático es de 10 cm/cm, calcule:

- a) ¿Existe aporte de agua desde la napa freática? Si existe ¿Cuánto es su aporte diario?
- b) ¿A qué profundidad se encuentra el nivel freático?
- c) ¿Cuál es el valor de K para el suelo entre 1,5 m de profundidad y el nivel freático?

Resultado: a) Si, su aporte es de 3,5 mm/día
 b) 2,05 m
 c) 0,35 mm/día

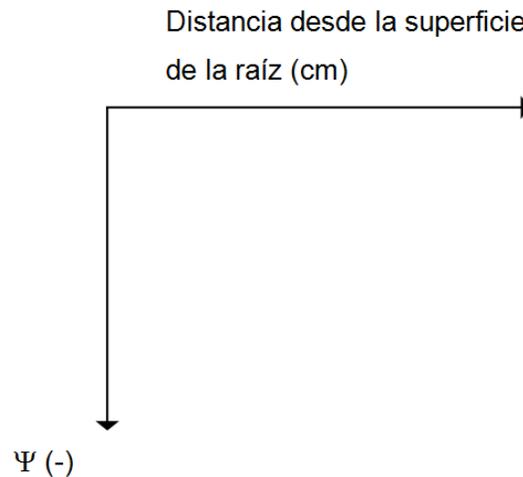
16. La humedad relativa en equilibrio con el agua de un suelo es de 100 %. Calcule el potencial del agua de este suelo (erg/g).

Resultado: 0 erg/g

Preguntas sobre movimiento del agua en el suelo

1. Describa un tensiómetro e indique la base teórica de su funcionamiento. ¿Qué instrumento utilizaría Ud. para complementar la acción del tensiómetro dentro del rango de humedad aprovechable? Describalo brevemente.
2. Al cubrir con agua la superficie de un suelo seco, la velocidad de infiltración en la etapa inicial es superior al valor de la conductividad hidráulica del suelo (saturación). Después de un tiempo, sin embargo, se aproxima a K_0 . Explique.
3. Grafique, en función del tiempo y para un período de un mes, el potencial del agua promedio del suelo y el potencial del agua de las hojas para las siguientes condiciones:
 - a) Tomate regado por goteo.
 - b) Tomate regado por surco.
4. Dibuje una curva tipo de velocidad de infiltración del agua en el suelo v/s tiempo. Explique la forma de esta curva en términos de la ley de Darcy. Marque cuidadosamente los ejes de la curva y señale el valor de K_0 . Justifique.

5. Imagine una planta idealizada con una sola raíz y transpirando activamente. La raíz tiene propiedades uniformes en relación a la absorción de agua y crece verticalmente en el suelo. Haga un gráfico que indique claramente la variación del potencial hidráulico del agua del suelo desde la superficie de la raíz hacia la masa de suelo. Justifique la forma de la curva.



7. En el modelo utilizado para predecir el movimiento del agua en el suelo se usa la ley general de transporte que toma una forma determinada. Indique cual es esa forma:

- Para condiciones de régimen estacionario.
- Para condiciones transientes.
- Para el caso de que exista un "sink" en el sistema (ej. raíces de plantas).

Señale en forma precisa el significado físico de cada término o grupo de términos en las ecuaciones anteriores, señalando las unidades respectivas.

8. Indique en qué consisten, que miden y cómo funcionan:

- Tensiómetros
- Bloques de yeso
- Aspersor de neutrones
- Bloques de yeso

9. Se deja saturado 1,5 m de profundidad de un suelo franco. Después de 2 años ¿cuál será el contenido de humedad aproximado a los 50 cm de profundidad, si durante dicho período no crecieron plantas? Considere que durante el período no hubo lluvias. Justifique.

MOVIMIENTO DE AGUA EN LA PLANTA

Potencial hídrico en la planta

Teniendo claro el concepto de potencial hídrico se puede entender que el agua se mueva desde el suelo a la superficie de la raíz, que entra vía apoplástica y simplástica al interior de la raíz, para luego ingresar simplásticamente a nivel de la endodermis y entrar a los vasos xilemáticos hasta llegar a las células del mesófilo y luego pasar a la atmósfera, gracias al gradiente de potencial que existe en el sistema suelo-planta-atmósfera (Figura 8).

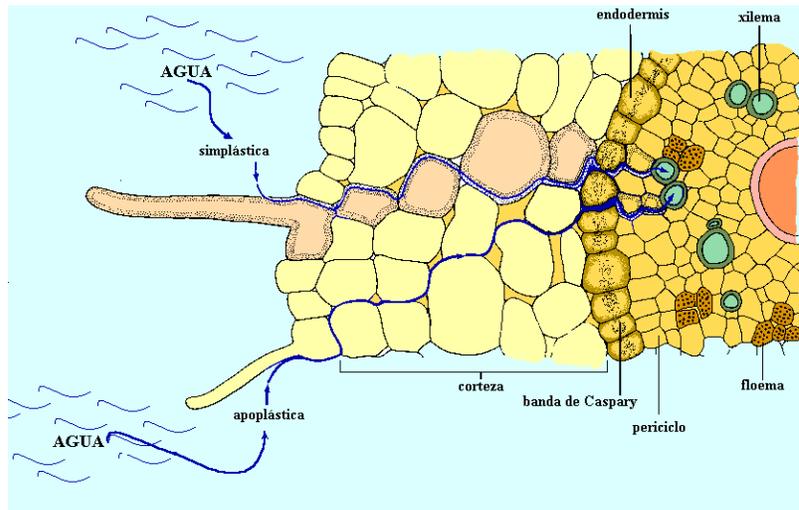


Figura 8. Movimiento de agua en la planta.

En una célula vegetal existen membranas que seleccionan el paso de iones y vacuolas que presionan la pared celular generando el turgor celular, por lo que los principales componentes del potencial hídrico en la célula son ψ_p y ψ_s .

$$\text{Potencial hídrico de la célula: } \Psi = \psi_p + \psi_s + \psi_g \quad \begin{matrix} 0 \\ \nearrow \end{matrix}$$

En una célula el potencial de gravedad es muy pequeño, su valor se desprecia porque en términos de magnitud es demasiado pequeño en relación a los otros

dos componentes, ψ_p y ψ_s , por lo tanto para fines prácticos el potencial hídrico total es la suma del potencial de solutos más el potencial de presión. Si la célula se encuentra en equilibrio con el medio externo los potenciales se igualan de modo que no hay movimiento de agua.

El movimiento de agua en la planta ocurre por un gradiente de potencial, ésta se mueve desde un mayor potencial (suelo húmedo) a un menor potencial (atmósfera). Como se puede observar en la Figura 9 los componentes del potencial varían dependiendo del tejido.

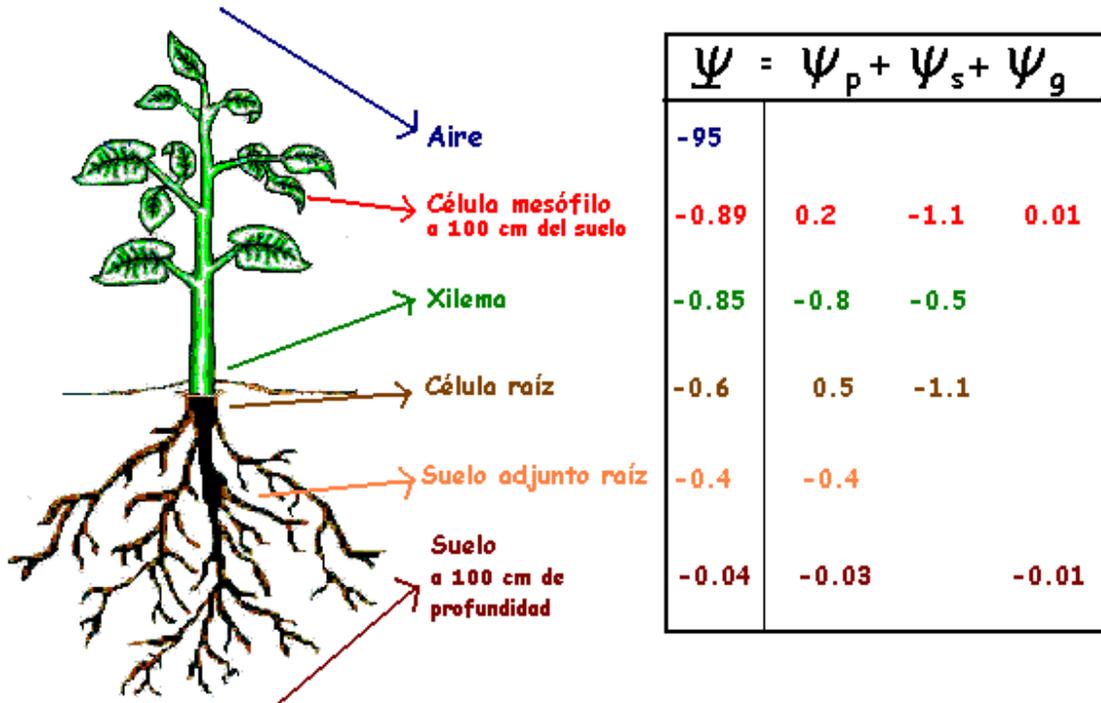


Figura 9. Valores en MPa de los componentes del potencial hídrico en el suelo y en la planta.

Transpiración

El agua se mueve desde el suelo a la superficie de la raíz, a los vasos xilemáticos hasta llegar a las células del mesófilo de las que se evapora agua desde sus paredes celulares. Debido a un gradiente de potencial hídrico entre las células del

mesófilo y la atmósfera, sale vapor de agua a través de los espacios intercelulares, atraviesa los estomas y la capa límite, todo este movimiento se hace por difusión. Ya en el aire turbulento el vapor de agua se mueve por convección cambiando rápidamente de posición en el perfil de aire (Figura 10).

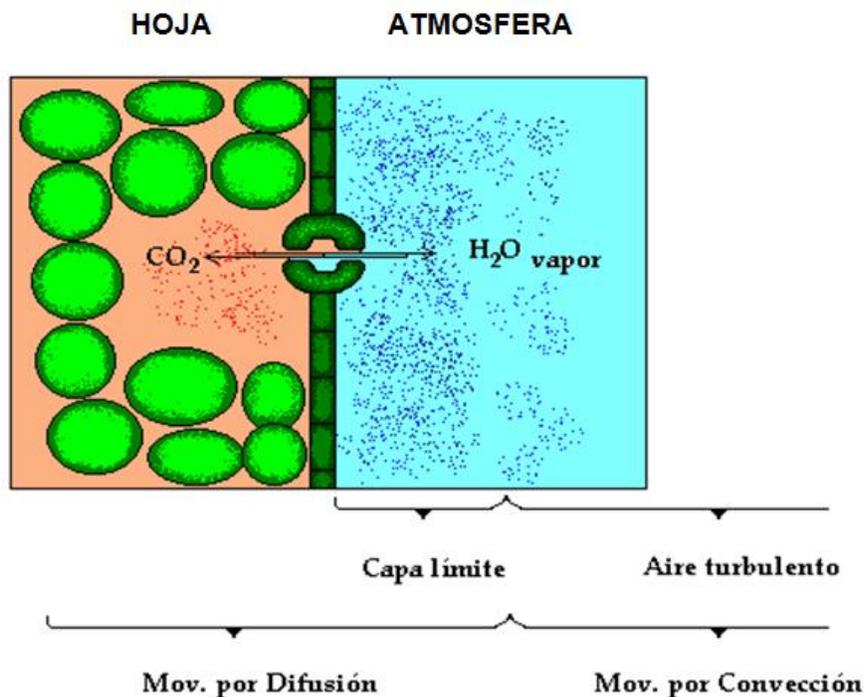


Figura 10. Movimiento del CO_2 y vapor de agua a través de los estomas de las hojas

El movimiento de gases en la hoja y en la capa límite ocurre por difusión (cantidad de un gas j que pasa por una unidad de área en un tiempo dado) y se puede describir por la **Primera Ley de Fick**. Las unidades de medición para flujo de un gas son $\text{Kg/m}^2\text{s}$, $\text{mg/cm}^2\text{s}$, etc.

$$J = \frac{Q}{At} = -D_j \frac{\Delta C}{\Delta x}$$

J: flujo (Kg/m²s)

Q: cantidad de un gas j (Kg)

A: área (m²)

t: tiempo (s)

D_j: coeficiente de difusión (m²/s)

ΔC: diferencia de concentración (Kg/m³)

Δx: distancia (m)

ΔC / Δx: gradiente de concentración (Kg/m⁴)

El gas se mueve en respuesta a dos factores, primero a una fuerza asociada al **gradiente de concentración** entre dos puntos, que por ser un vector tiene sentido y dirección; y en segundo lugar a la capacidad del medio para realizar la transferencia del gas, es decir el **coeficiente de difusión**, el cual variará con el tipo de medio en que se desplace (aire, agua), la temperatura y el tipo de gas j que este en movimiento (CO₂, vapor de H₂O, etc.).

En el flujo de gases a través de la capa límite, la distancia (Δx) está representada por el grosor de la capa límite.

$$\text{Grosor de la capa límite (mm)} = \sqrt{\frac{4l}{v}}$$

l: largo de hoja (m)

v: velocidad del viento (m/s)

Resistencias

Dada la dificultad de medir la distancia entre los puntos en que ocurre el flujo de gases, se utiliza el término de resistencia (r) que corresponde $\Delta x/Dj$.

$$J = \frac{Q}{At} = -\frac{Dj}{\Delta x} \quad y \quad \Delta C = g \Delta C = \frac{\Delta C}{r}$$

La resistencia pasa a ser el recíproco de la conductancia (g). A mayor grosor de la capa límite menor es la conductancia, por lo tanto mayor la resistencia al paso de un gas.

Los elementos que conducen el flujo pueden estar en secuencia y se habla que forma resistencias en serie, donde la resistencia total al paso (R) correspondería a la sumatoria de las resistencias individuales de cada elemento (r); pero si los elementos están conectados en paralelo, se cumple que el recíproco de la resistencia total ($1/R$) es igual a la sumatoria de los recíprocos de las resistencias individuales de cada elemento ($1/r$)

R serie: $R = r_1 + r_2 + r_3 + \dots r_n$

R paralelo: $1/R = 1/r_1 + 1/r_2 + 1/r_3 + \dots 1/r_n$

El flujo de vapor de agua desde las paredes de las células del mesófilo y el aire turbulento, tiene que pasar por distintas resistencias, en serie y en paralelo (Figura 11).

Donde la resistencia total que se opone a la salida de vapor de agua se calcula:

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{(r_{ei} + r_e)} + \frac{1}{r_e}$$

r_{ei} = resistencia de los espacios intercelulares

r_e = resistencia de los estomas

r_c = resistencia de la cutícula

r_{cl} = resistencia de la capa límite

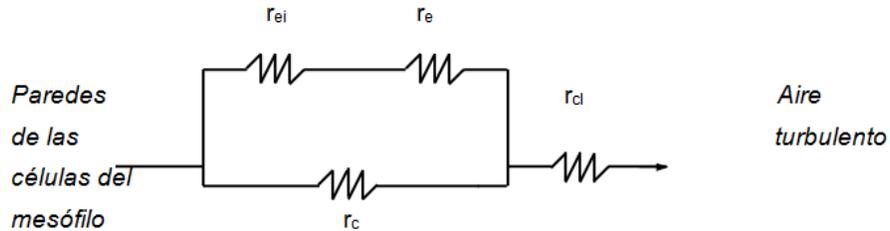


Figura 11. Diagrama de resistencia (Nobel, 1982).

Como se aprecia en la Figura 12, existe una diferencia de humedad relativa (HR) entre la hoja y la atmósfera, que provoca la salida de vapor de agua desde la hoja hacia la atmósfera, este movimiento se debe a la diferencia de concentración (ΔC) de vapor de agua entre la hoja (e^*_H) y la atmósfera (e).

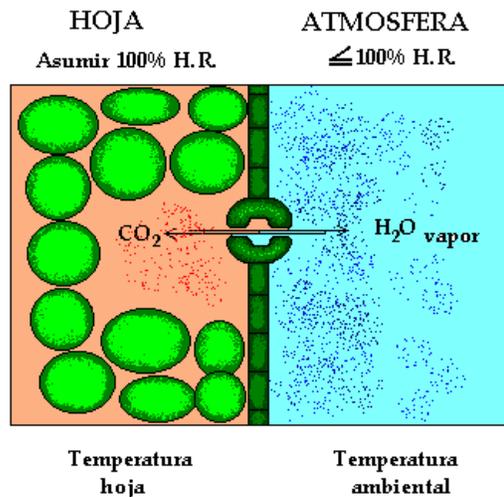


Figura 12. Movimiento del vapor de agua.

Para calcular el flujo de vapor de agua desde la hoja a la atmósfera se debe considerar que en el interior de la cavidad subestomática existe un 100% de la

humedad relativa, por lo que solo se requiere conocer la temperatura foliar para determinar la presión de vapor (e^*_H) en su interior (Figura 13). En la atmósfera la humedad relativa es normalmente inferior al 100%, sin embargo, conociendo la humedad relativa se puede calcular la presión de vapor actual (e):

$$HR = \frac{e}{e^*} 100$$

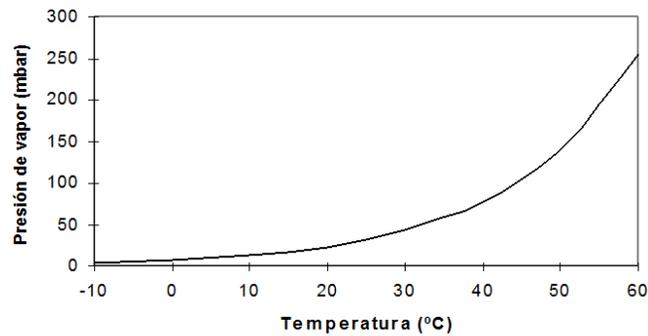


Figura 13. Relación entre la presión de vapor a saturación (e^*) y la temperatura. Corresponde a la ecuación exponencial $e^* = 7,07 e^{0,05979 \times T}$.

Ejercicios de movimiento de agua en la planta⁴

1. Una planta de trigo tiene raíces hasta una profundidad de 60 cm, en un suelo donde un tensiómetro marca 30 cb (A), tiene en su quinta hoja, ubicada a 30 cm de altura, células del mesófilo cuyas vacuolas ejercen una presión de 0,2 MPa sobre la pared celular.

a) ¿Qué potencial osmótico tienen las células para que su potencial hídrico sea de -0,8 MPa (B)? ¿Hacia dónde se mueve el agua?

¿Según el resultado obtenido por qué cree Ud. que no se considera el ψ_g como un componente importante en el potencial hídrico del tejido vegetal?

Resultado: a) $\Psi_s = -1,003$ MPa; desde A hacia B

2. El potencial hídrico de un tejido en un matraz con agua pura es de -0,6 MPa sus componentes son: $\psi_p = 0,5$ MPa y $\psi_s = -1,1$ MPa. Si el mismo tejido se coloca en un matraz con solución salina de -1 MPa.

a) ¿Cuál será el nuevo potencial hídrico del tejido y sus componentes?

b) ¿Qué potencial debiera tener la solución para provocar plasmólisis de las células del tejido?

Resultado: a) $\Psi = -1$ Mpa ; $\psi_s = -1,1$ MPa ; $\psi_p = 0,1$ MPa
b) -1,1 MPa

3. La humedad relativa del aire en equilibrio con una muestra de tejido vegetal y a temperatura constante es de 100%. Calcule el potencial total del agua del tejido.

Resultado: $\Psi = 0$

⁴ Se recomienda realizar los cálculos con magnitudes de hasta 2 decimales

4. Si el ΔC_{H_2O} entre la superficie de una hoja de 5 cm de largo y el aire turbulento es de $22,9 \text{ g/m}^3$ y la velocidad del viento es de $0,1 \text{ m/s}$. Asuma una temperatura de la hoja y del aire igual a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($D_{20^\circ\text{C } H_2O} = 2,4 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$)

- ¿Cuál será el grosor de la capa límite?
- ¿Cuál será el flujo de vapor de agua?
- Si la velocidad del viento aumentara a 10 m/s ¿cuál sería el nuevo grosor de la capa límite? ¿Cuál será el flujo de transpiración? ¿Aumenta o disminuye? ¿Por qué? ¿Cómo cambiaría el flujo de CO_2 fotosíntesis se altera? ¿Si se altera aumenta o disminuye? ¿Por qué? Explique en detalle.

Resultado: a) $2,82 \text{ mm}$
 b) $0,194 \text{ g/m}^2\text{s}$
 c) $0,282 \text{ mm}; 1,94 \text{ g/m}^2\text{s}$

5. En un invernadero de 5 m de largo, 5 m de ancho y 3 m de alto hay plantas de poroto en macetas, que no tienen problemas de riego. Un termómetro infrarrojo indica una temperatura foliar de $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Si la temperatura ambiental y la HR del invernadero son de $30 \text{ }^\circ\text{C}$ y 99% , respectivamente,

- ¿Cuál será el flujo de vapor de agua entre la superficie de la hoja y el aire turbulento? Considere un coeficiente de difusión de vapor de agua en el aire de $2,57 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ ($30 \text{ }^\circ\text{C}$), hojas de 7 cm de largo y una baja velocidad del viento de $0,001 \text{ m/s}$.
- Si las mismas macetas se llevaran a campo ¿Cuál sería el flujo de vapor de agua entre la superficie de la hoja y el aire turbulento? Considere los siguientes cambios: 50% de HR y una velocidad del viento de 10 m/s .

Resultado : a) $0,23 \text{ mg/m}^2\text{s}$
 b) $2240 \text{ mg/m}^2\text{s}$

6. Si en un día de verano la HR es 40%, la velocidad del viento es de 10 m/s, la temperatura ambiental es de 32 °C y se tiene un cultivo de maíz con una temperatura foliar de 28 °C con hojas de 15 cm de largo ($D_{\text{vapor de agua en el aire a } 32^{\circ}\text{C}} = 2,6 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$).

Conteste:

- ¿Cuál será el grosor de la capa límite?
- ¿Cuál es la concentración de vapor de agua en el interior de las hojas de maíz?
- ¿Cuál es la concentración de vapor en el aire turbulento?
- ¿Cuál será la transpiración de una hoja de maíz cuando haya una temperatura 32 °C (entre la superficie de la hoja y el aire turbulento)?

Resultado : a) 0,49 mm.
 b) 0,0271 Kg/m³.
 c) 0,0136 Kg/m³.
 d) $7,16 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}^2\text{s}$.

7. Calcule la resistencia total desde el mesófilo al aire turbulento del vapor de agua. Para ello considere las siguientes resistencias:

	r (s/m)
Capa límite	25
Estoma	300
Cutícula	4000
Espacio intercelular	15

8. Se tienen 2 hojas (A y B). La hoja A presenta mayor área ocupada por estomas su r_e es de 53 s/m. La hoja B presenta menor área ocupada por estomas su r_e es de 600 s/m. Ambas hojas presentan los mismos valores de r_{cl} , r_c y r_{ei} de 20 s/m, 5000 s/m y 30 s/m, respectivamente.

a) Calcule la resistencia de la hoja y la resistencia total en ambas hojas, compare.

b) Si la concentración de vapor de agua en la atmósfera es de 18 g/m^3 y el flujo de vapor en ambas hojas es de $100 \text{ mg/m}^2\text{s}$ ¿Cuál debiera ser la concentración del vapor de agua en las paredes del mesófilo en la hoja A y en la hoja B?.

Resultado: a Hoja A $R_H = 81,64 \text{ s/m}$; Hoja B $R_H = 559,55 \text{ s/m}$
 $R_T = 101,64 \text{ s/m}$; $R_T = 579,55 \text{ s/m}$
 b) Hoja A $C_i = 28,16 \text{ g/m}^3$; Hoja B $C_i = 75,92 \text{ g/m}^3$

9. Dadas las siguientes resistencias al vapor de agua, de una hoja que esta transpirando en forma continua $3,4 \times 10^{-5} \text{ Kg/m}^2\text{s}$, calcule:

- La conductancia de la capa límite, estoma y del espacio intercelular.
- La concentración del vapor de agua sobre el estoma (A), en la cavidad sub-estomática (B) y sobre la pared celular de una célula del mesófilo (C). Considere una concentración de vapor de agua en el aire turbulento de $8,65 \times 10^{-3} \text{ Kg/m}^3$.

	r (s/m)	g (mm/s)
Capa límite	100	
Estoma	500	
Espacio intercelular	40	

10. Se tiene una hoja en la oscuridad, los estomas están cerrados. En estas condiciones la hoja transpira a una tasa de $4 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^2\text{s}$ y la diferencia de vapor de agua entre las paredes de las células del mesófilo y el aire turbulento es de $1,01 \text{ mg/cm}^3$. La r_c es de 2500 s/cm .

- Calcule la r_{cl}
- La misma hoja se pone a la luz y los estomas se abren. La tasa de transpiración sube a $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2\text{s}$. La diferencia de vapor de agua, r_c y la r_{cl} son los mismos que en a), asuma $r_{ei} = 15 \text{ s/cm}$. Calcule la r_e
- ¿Cuál sería la tasa de transpiración si la r_e calculada en b) se reduce a la mitad.

11. Se tiene una hoja en la oscuridad, los estomas están cerrados. En estas condiciones la hoja transpira a una tasa de $4 \times 10^{-4} \text{ mg/cm}^2\text{s}$ y la diferencia de concentración de vapor de agua entre los espacios intercelulares de la hoja y el aire externo es de $4 \times 10^{-3} \text{ mg H}_2\text{O/cm}^3 \text{ aire}$. La r_{cl} es de $2,5 \text{ s/cm}$.

- Calcule la resistencia cuticular (r_c).
- La misma hoja se pone a la luz y los estomas se abren. La tasa de transpiración sube a $1 \times 10^{-3} \text{ mg/cm}^2\text{s}$ hojas. La diferencia de concentración de vapor de agua, r_{cl} y r_c tienen los mismos valores que en (a). Calcule la resistencia de los estomas r_e .
- ¿Cuál sería la tasa de transpiración si la r_e calculada en (b) se reduce a la mitad?

12. Se tiene una hoja transpirando bajo condiciones ambientales constantes. Al disminuir la intensidad de luz parcialmente, el gradiente de concentración de vapor de agua (aire-hoja) disminuye a la mitad, y la transpiración disminuye a $1/4$ de su valor original.

Indique en cuanto aumenta o disminuye la R total, la r_s y r_c , si el valor original de R total, que una provoca la disminución de luz, era de 1 s cm^{-1} . Completamente a oscuras, la R total medida fue de 30 s cm^{-1} .

13. Una hoja está transpirando a velocidad constante; $r_{cl} = 1 \text{ s/cm}$, $r_c = 15 \text{ s/cm}$, $r_e = 1,5 \text{ s/cm}$. Las otras resistencias son despreciables.

- a) ¿Qué porcentaje del agua transpirada pasa a través de la cutícula?
- b) ¿Qué valor tiene la resistencia total en la fase de vapor?
- c) Si la r_e se duplica ¿Cuál es la tasa de transpiración expresada como porcentaje de la tasa original?

Preguntas sobre movimiento de agua en la planta

1. Haga un diagrama para el corte transversal de una raíz con crecimiento primario. Señale los tejidos existentes y especifique claramente las vías de movimiento del agua.

2. En el paso del agua desde el pelo radical hacia xilema se encuentra una serie de tejidos con distintas características.
 - a) Explique cómo se realiza el movimiento a través de esa zona indicando las fuerzas que generan este movimiento y las resistencias que se encuentran en el camino.
 - b) ¿Qué efecto tiene, sobre la absorción, el crecimiento en grosor de la raíz del primer al segundo año?

3. Las plantas poseen Bandas de Caspari en la endodermis, ubicada en la parte interna de la raíz primaria. Suponga que debido a una mutación aparece una planta con las Bandas de Caspari ubicadas en la epidermis, en la superficie de la raíz, es decir, la epidermis tiene la estructura de la endodermis de la especie normal. Señale las ventajas o desventajas que esta planta tendría para competir por elementos nutritivos con una planta normal.

4. Dibuje y describa los tejidos de una hoja tipo para una planta mesófito. Señale las funciones correspondientes.

5. Señale los componentes del potencial total del agua de importancia en el:
 - a) Movimiento de agua en el suelo;
 - b) Absorción de agua por las plantas;
 - c) Potencial total del agua en las células de un tejido parenquimático.
 - d) Potencial total del agua en el xilema. Indique los signos.

6. El potencial total del agua de la hoja superior de una planta de maíz (1,8 m de altura) que transpira activamente es de -25 bares. De valores aproximados para el potencial total del agua y sus componentes a nivel de la hoja, tallo, raíces y suelo.

	Ψ	Ψ_o	Ψ_p	Ψ_m	Ψ_g
Hoja	- 25				
Tallo					
Raíces					
Suelo					

7. Demuestre que el potencial de presión del agua en el citoplasma debe ser igual al de la vacuola en una célula.

8. Describa el o los mecanismos de transporte de agua en las plantas. Señale cómo se origina el movimiento del agua a partir de una superficie (planta) evaporante y cómo el proceso se transmite hasta el suelo.

9. Explique en términos del potencial total del agua y de sus componentes cómo un aumento de transpiración desde las hojas produce un aumento en la absorción de agua por las raíces. Considere el paso completo a través de la planta, comience con la hoja, a continuación describa el cambio en los haces vasculares, venas, etc.

10. En clase se ha enfatizado la importancia de la curva característica de los tejidos vegetales, en especial hojas.

- a) Describa el método para determinar esta curva (CRA vs Ψ) que usted considere más adecuado. Discuta porqué dicho método debe ser mejor (más valioso) que otros posibles y cuáles son sus desventajas.
- b) Señale qué información puede obtener de la curva característica en relación a las relaciones hídricas de un tejido. De especial énfasis al potencial del agua y sus componentes. Sea explícito y cuantitativo.
- c) Analice cómo podría utilizar la información de la curva característica de tejido desde un punto de vista agronómico.

11. a) Señale en orden de importancia los procesos fisiológicos que se ven afectados con el desarrollo de un déficit hídrico en un tejido vegetal (0 a -25 MPa).

b) Discuta la importancia relativa de estos efectos a nivel de los déficits hídricos que experimentan comúnmente las plantas mesófitas (Ψ probablemente no inferior a -20, -25 MPa).

12. El estado hídrico de un vegetal se puede medir por:

- a) Contenido relativo de agua
- b) Psicometría de termocuplas
- c) Método de Shardaikov
- d) Bomba de presión.

Explique qué mide y cómo se ocupa cada método. Establezca un orden de preferencia de acuerdo a la precisión y a la cantidad de información que se puede obtener de las muestras en cada método. Suponga que no tiene problemas en cuanto a equipo disponible.

13. Describa brevemente, señalando ventajas y desventajas, la determinación del potencial total del agua y sus componentes por la técnica isopiástica y mediante la bomba a presión.

14. Se desea determinar frecuencia de riego en un huerto frutal a través de un parámetro medido en la planta.

a) ¿Qué parámetro mediría usted?

b) ¿Qué precauciones tomaría para realizar las mediciones?

c) ¿Qué método utilizaría:

- En caso que tenga acceso a equipo

- En caso de que no disponga de ningún equipo especializado?

d) Describa brevemente los métodos indicados en (c).

15. Analice la potencialidad productiva de una zona tropical, en comparación con una zona de desierto con abundante agua. Discuta posibles problemas relacionados con el estado hídrico de las plantas en ambas situaciones.

16. Algunos autores han postulado (y demostrado experimentalmente) que algunas plantas en determinadas condiciones podrían absorber agua desde la atmósfera. Discuta las condiciones (ambientales y de la planta) que deben cumplirse para observar el fenómeno mencionado. ¿Considera usted que el fenómeno es de común ocurrencia en la naturaleza?

17. Existe interés en conocer la cantidad de agua que absorben las raíces de un cultivo en función de la profundidad del suelo inmediatamente después de un riego.

a) Plantee una ecuación diferencial que identifique el problema.

b) Sugiera los parámetros que se deben medir para cuantificar el proceso.

c) Señale una metodología experimental para medir los parámetros sugeridos en b).

18. ¿Cuáles son los principales factores que influyen en la apertura estomática? Pondere.

19. a) ¿Bajo qué condiciones de luz y viento considera Ud. que la transpiración estaría controlada fundamentalmente por la abertura de los estomas (la transpiración cambia considerablemente con cambios moderados en la abertura de los estomas)?

b) ¿Bajo qué condiciones de luz y viento la transpiración parecería ser independiente de la abertura estomática (la transpiración se ve poco afectada con cambios moderados en la abertura de los estomas)?

20. Se ha tratado de reducir la transpiración de las hojas aplicando una película de plástico sobre ellas.

a) Dibuje un diagrama de resistencias que incluya la resistencia del plástico ($r_{\text{plástico}}$) en el lugar apropiado.

b) Escriba una ecuación para la tasa de transpiración que incluya las resistencias para el caso con plástico. Las tasas relativas de transpiración con y sin la película plástica fueron:

	Transpiración relativa	
	Día	Noche
Sin plástico	100 %	100 %
Con plástico	60 %	95 %

c) Considerando la ecuación y las resistencias, explique porque la reducción en la transpiración es tan baja en la noche comparada con la reducción que ocurre durante el día.

21. a) Escriba una ecuación que le permita cuantificar la transpiración desde una hoja. b) Defina cada uno de los términos de la ecuación anterior e indique cómo puede medirlos.

c) Relacione la ecuación de transpiración con la primera Ley de Fick.

d) ¿Cómo interviene el coeficiente de difusión de vapor de agua en aire en la definición de resistencias?

22. Se tiene una planta con suministro ilimitado de agua transpirando en forma constante en la obscuridad, la velocidad del viento es constante (10 cm/s) al igual que la temperatura y humedad. En un momento determinado se enciende una luz de 3.500 fc. (1/3 del máximo solar) cuyo espectro es idéntico al espectro solar.

a) Grafique R hoja, r_{cl} y r_e en cm en función del tiempo, comience con los valores de equilibrio en la obscuridad y termine cuando se alcanza el nuevo equilibrio. Indique con una flecha el momento en que se enciende la luz. Asuma valores razonables para las resistencias. Señale explícitamente las suposiciones que Ud. hace. Los estomas pueden demorar entre 2 y 3 horas para alcanzar el equilibrio.

b) En un diagrama similar y utilizando la misma escala para la variable tiempo grafique la tasa de transpiración relativa y la temperatura de la hoja. Explique cómo obtiene los valores. Recuerde que las hojas tienen una masa baja y una superficie alta.

23. Especifique claramente las condiciones que deben cumplirse para que se produzca transpiración negativa en las plantas (absorción de agua por órganos aéreos).

24. Responda sí o no frente a cada pregunta:

a) La r_{cl} es variable ()

b) La resistencia del suelo es variable ()

c) La r_{cl} aumenta si la velocidad del viento aumenta ()

d) Un anti-transpirante de cubierta de látex aumenta ψ_s pero causa una mayor apertura de los estomas ()

- e) R_{hoja} se puede medir directamente asumiendo condiciones de saturación ()
- f) Una hoja angosta puede presentar una menor resistencia a la difusión de vapor que una ancha debido a que el K_h (Eddy para calor) es mejor ()
- g) El término concentración de vapor de agua puede expresarse como presión de vapor ()

25. Haga diagramas que señalen las principales resistencias al paso de CO_2 hacia el interior de una hoja y al paso de vapor de agua desde el interior de una hoja.

26. Considerando una planta mesófito, en buen estado hídrico, señale las alteraciones que esperaría que ocurrieran en la transpiración y fotosíntesis frente a los siguientes cambios:

- a) Aumento de la velocidad del viento
- b) Aumento de la resistencia estomática
- c) Disminución de la humedad relativa del aire

27. Según la literatura, el enriquecimiento de la atmósfera con CO_2 en los invernaderos generalmente aumenta los rendimientos (aumenta la asimilación de CO_2). ¿Cómo es posible que esto ocurra a pesar del hecho de que una alta concentración de CO_2 induce cierre de los estomas? Explique en términos de gradientes y resistencias y curvas de respuesta de los estomas al CO_2 . ¿Qué efecto tendría el enriquecimiento de la atmósfera con CO_2 sobre la eficiencia del uso del agua (rendimiento por unidad de agua utilizada)?

28. Analice gráficamente el efecto de los siguientes factores ambientales en la abertura de los estomas de plantas C_3 y CAM: intensidad de la luz, concentración interna de CO_2 , déficit hídrico en la planta, deficiencia de potasio.

29. Un especialista en mejoramiento vegetal solicita su opinión sobre el comportamiento estomático que él debería buscar para desarrollar variedades (de plantas que no sean CAM) adaptadas a condiciones áridas (el agua es limitante).

¿Qué aconsejaría Ud.? Sea específico y cuantitativo en su análisis y puntualice en forma explícita cualquier aspecto conflictivo.

30. La concentración de oxígeno en la superficie de un suelo es $2,8 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^3$. A los 100 cm de profundidad la concentración de oxígeno es cero.

- a) Calcule el flujo de O_2 en régimen estacionario a través de los 100 cm de suelo, si el coeficiente de difusión D , para oxígeno en este suelo es de $0,06 \text{ cm}^2/\text{s}$.
- b) ¿Qué valor tendría el flujo de O_2 en este mismo suelo, si su contenido de humedad disminuyera a $0,10 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$? Asuma $D = 0,20 \text{ cm}^2/\text{s}$.

31. Se tiene una columna de un suelo seco a 105°C , la parte inferior de la columna se pone en contacto con una atmósfera que contiene amoníaco en forma de gas. El amoníaco difunde a través de la columna y es a la vez adsorbido por el suelo, la densidad aparente del suelo es $1,3 \text{ g/cm}^3$. Calcule el coeficiente efectivo de difusión para el amoníaco a través del suelo, sabiendo que el coeficiente de difusión de amoníaco en aire es $0,25 \text{ cm}^2/\text{s}$ y que la adsorción de amoníaco por el suelo está relacionada en forma lineal a la concentración de este gas en la fase gaseosa, con una constante de partición de 100.

USO CONSUMO DEL AGUA

Evapotranspiración

La evapotranspiración está compuesta de la transpiración del cultivo más la evaporación directa del agua de la superficie del suelo (Figura 14); por lo que depende del estado de desarrollo del cultivo. En los primeros estados fenológicos del cultivo el cubrimiento es menor por tanto la evapotranspiración es también menor.

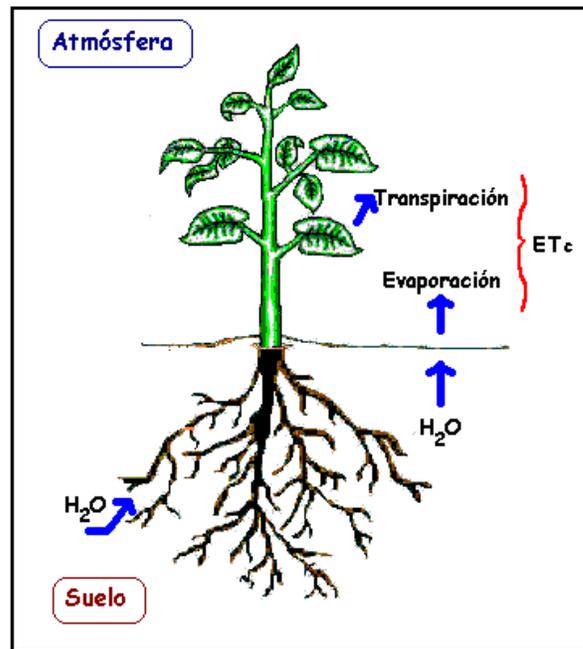


Figura 14. Esquema de consumo de agua del suelo

En un suelo bien regado el consumo del contenido de agua del suelo la realizan las plantas. Este consumo está determinado por la evapotranspiración de un cultivo determinado en una localidad y tiempo dado (ET_c , mm/día), es decir es la demanda de agua de la atmósfera. Esta evapotranspiración depende de dos grupos de factores, por un lado los factores climáticos agrupados en la Evapotranspiración de referencia (ET_0), donde se incluye radiación, temperatura,

viento y humedad relativa; y los factores propios del cultivo que se agrupan en un coeficiente de cultivo (K_c) y que dependen de la especie y de su estado de desarrollo.

$$ET_c = K_c \times ET_o$$

La ET_o , evapotranspiración de referencia, se define como “la evapotranspiración de una pradera de gramíneas en cobertura total con una altura de 10 cm de largo con un buen suministro de agua y nutrientes y sin problemas de plagas ni enfermedades”. Los únicos factores que afectan ET_o , son los parámetros climáticos. Por lo tanto, ET_o es también un parámetro climático que puede ser calculado a partir de datos meteorológicos. ET_o expresa el poder evaporante de la atmósfera en una localidad y época del año, y no considera ni las características del cultivo, ni los factores de suelo. Existen diversos métodos para estimar ET_o , entre los que se destacan:

- Evaporímetro de Bandeja clase A
- Blaney y Criddle
- Radiación
- Penman-Monteith.

Estos métodos están ordenados de menor a mayor requerimiento de datos meteorológicos para la estimación de ET_o , siendo el método de Penman-Monteith el más preciso, pero a su vez el más demandante de información, la cual no siempre está disponible.

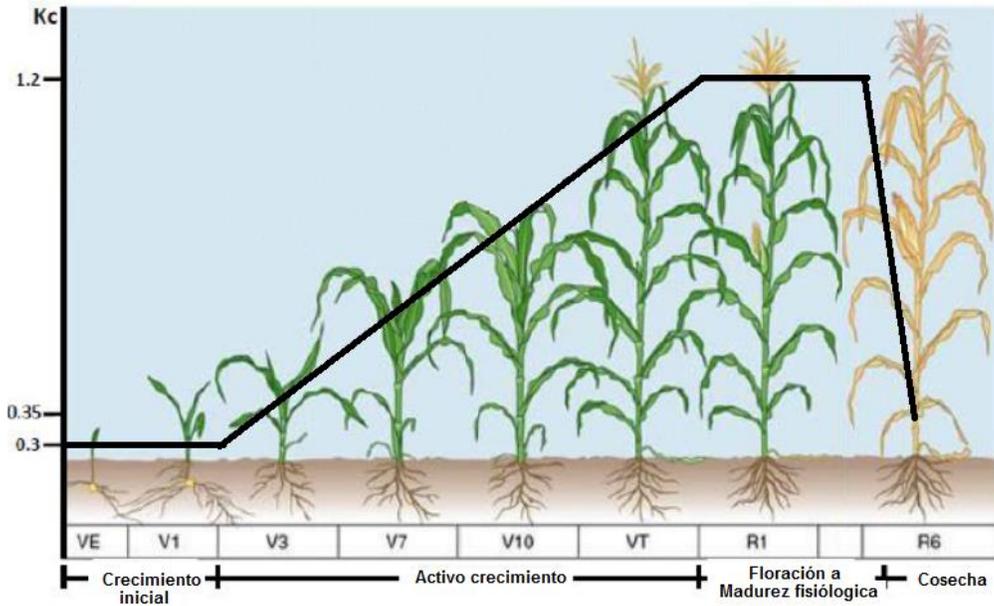


Figura 15. Evolución del Kc durante el ciclo de desarrollo de un cultivo de maíz.

El Coeficiente de cultivo (Kc) es un factor que incluye los efectos propios del cultivo sobre la ET_c , como el área foliar, la altura, el porcentaje de suelo cubierto (Figura 15). Su valor puede ser determinado experimentalmente, para ello ET_c se mide directamente a través de lisímetros.

$$Kc = \frac{ET_c}{ET_o}$$

Durante el periodo inicial de crecimiento de los cultivos el área foliar es pequeña y la evapotranspiración ocurre principalmente como evaporación en el suelo. Por lo tanto, el valor de Kc durante el periodo inicial es alto cuando el suelo se encuentra húmedo debido al riego o lluvia, y es bajo cuando la superficie del suelo se encuentra seca.

Métodos de estimación de la evapotranspiración de cultivo

Métodos indirectos

La mayoría de los métodos indirectos de estimación de evapotranspiración de cultivo se basan en el balance energético de superficie. La radiación neta (Rn) calculada por el balance de radiación, es la energía que se utiliza en el balance de energía, es decir es la energía que queda en la Tierra disponible para ser utilizada en calentar el aire (H), evaporar agua (LE) y calentar el suelo (G).

$$RN = R_s(1 - \alpha) - R_L = H + LE + G$$

R_s = radiación solar ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

α = albedo

R_L = radiación emitida por la Tierra ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

RN = flujo radiación neta ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

H = flujo de calor sensible ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

LE = flujo calor latente ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

G = flujo calor que ingresa a la Tierra ($\text{cal m}^{-2} \text{d}^{-1}$)

Entre los métodos micrometeorológicos de balance de energía y masa, la relación de balance de energía de Bowen, ha sido utilizada con éxito para estimar la evapotranspiración de los cultivos en tiempo real, sin mencionar que el equipo requerido es más accesible en comparación con otros métodos. El método de estimación de evapotranspiración a través de la relación de Bowen es el siguiente:

$$RN = LE + H + G \quad / \frac{1}{LE}$$

$$\frac{RN}{LE} = \frac{LE}{LE} + \frac{H}{LE} + \frac{G}{LE}$$

Si consideramos un balance de varios días, la variable G tiende a cero. Por lo tanto la expresión $\frac{G}{LE}$ es cero:

$$\frac{RN}{LE} = 1 + \frac{H}{LE}$$

$$LE = \frac{RN}{1 + \frac{H}{LE}}$$

$$\beta = \frac{Kh LE}{Kw LE} \approx \frac{Kh \Delta T^{\circ}}{Kw \Delta e}$$

Donde β es la Relación de Bowen, que es el cociente entre el flujo de calor sensible y el flujo de vapor de agua, que pueden ser medidos como la diferencia de temperatura del aire (ΔT°) y presión parcial de vapor agua (Δe) entre dos puntos. Es importante señalar que para que la estimación sea efectiva se requiere de condiciones atmosféricas estables o de amplias áreas abiertas, de manera que los factores de transferencia vertical de vapor de agua (Kw) y de calor sensible (Kh) sean iguales (principio de similaridad). Por tanto:

$$LE = \frac{RN}{1 + \beta}$$

Otros métodos de estimación de evapotranspiración a través de técnicas micrometeorológicas es el de covarianza de torbellinos (Eddy Covariance), en el que se mide directamente la componente vertical instantánea de la velocidad del viento mediante un anemómetro tridimensional, a la vez que se obtienen concentraciones instantáneas de vapor de agua.

Métodos directos

Uno de los métodos más precisos en la determinación de la evapotranspiración de cultivo es a través del uso de lisímetros de drenaje, que son grandes recipientes que almacenan un volumen conocido de suelo sobre el cual pueden o no desarrollarse plantas. El uso de lisímetros implica un conocimiento detallado del balance hídrico del suelo descrito en la siguiente expresión:

$$ETc = PP + R - PC - ES \pm \Delta w$$

ETc: Evapotranspiración de cultivo

PP: precipitación

R: riego

PC: percolación profunda

ES: escorrentía superficial

Δw : diferencia del contenido de agua al inicio y al final del periodo de medición.

En este caso con el uso de un lisímetro es posible conocer la magnitud de cada una de los ingresos de agua a través de pluviómetros y caudales de riego, y las salidas de agua recolectando el agua que escurre superficialmente y el agua que drena a través de colectores. El componente Δw puede ser determinado mediante técnicas gravimétricas. Realizando el balance es posible conocer la evapotranspiración del cultivo, o en el caso de suelo desnudo, la evaporación directa desde el suelo.

Además de los lisímetros de drenaje, es posible implementar lisímetros de pesada, los cuales poseen las mismas características con la diferencia que estos se disponen sobre balanzas que miden los cambios de peso del lisímetro de forma continua.

Ejercicios de consumo de agua por la planta⁵

1. Determine las necesidades de agua para cada una de las fases del período vegetativo de una variedad de maíz, sembrada el 10 de octubre en Santiago y cuya información fenológica es:

Fase fenológica	Duración (Días)	Kc (Promedio de la fase)
Fase inicial	20	0,6
Fase de crecimiento activo	40	0,8
Fase de pleno desarrollo	50	1,5
Fase de maduración	30	0,7
TOTAL	140	

Los datos evaporimétricos y los coeficientes k_p determinados de acuerdo a las condiciones climáticas son:

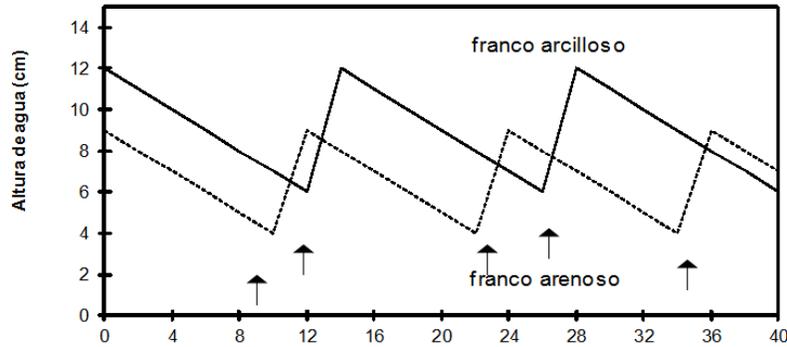
	S	O	N	D	E	F	M
Ev	2,3	4,0	4,5	6,7	7,0	6,0	4,0 (mm)
Kp	0,8	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7

Expresar los resultados en m^3/ha (recuerde que $1\text{ mm} = 10\text{ m}^3/ha$)

2. En el gráfico siguiente, se muestran las variaciones en el contenido de humedad de 2 suelos de 30 cm de profundidad: A) franco arenoso y B) franco arcilloso. Cada suelo se riega cuando llega a PMP con una altura de agua que los deja a CC Las flechas señalan el momento del riego. Señale:

- ¿Cuáles son los contenidos de humedad a CC y PMP del suelo arenoso y arcilloso?
- ¿Qué humedad aprovechable tiene cada suelo?
- ¿Con qué frecuencia se riega cada suelo?

⁵ Se recomienda realizar los cálculos con magnitudes de hasta 2 decimales



3. Se tiene un macetero de 30 cm de altura y 30 cm de diámetro lleno de suelo que tiene un contenido de humedad de 35% cuando está sometido a una tensión de $-0,3$ bares. Si el PMP es de 23% el UR de 30% y la $D_a = 1,9$ g/cm³:

- ¿Qué contenido de humedad tiene el suelo de ese macetero antes de regar?
- ¿Qué volumen de agua tiene la maceta en ese momento?
- ¿Qué altura de agua hay que aplicar para que ese suelo quede a CC?

Resultado: a) 0,31 g/g.

b) 12,6 litros.

c) 2,04 cm.

4. De acuerdo a los datos presentados, calcule el número de riegos y las fechas de riego (grafique). Considere que la temporada de riego comienza en septiembre y el cultivo se cosecha el 15 de enero.

CDC = 30% ETc Septiembre 4 mm/día

PMP = 18% ETc Octubre = 5 mm/día

$D_a = 1,4$ g/cm³ ETc Noviembre = 6 mm/día

UR = 50% ETc Diciembre = 3 mm/día

Profundidad de raíces 50 cm ETc Enero = 0

Resultado: 13 riegos.

10 Sept ; 20 Sept ; 30 Sept ; 8 Oct ; 16 Oct ; 24 Oct ; 1 Nov ; 8 Nov ;
15 Nov ; 22 Nov ; 29 Nov ; 12 Dic y 26 Dic.

5. Se tienen plantas de poroto cuya ET_c es de 1 mm/día en una maceta de 30 cm de diámetro y 50 cm de profundidad, llena de suelo homogéneo con un contenido de humedad de 0,4 g/g.

- ¿En cuántos días el contenido de humedad del suelo llegará a 0,25g/g?
- A partir de este último contenido de humedad ¿Qué volumen de agua se deberá agregar para que el suelo quede a CC (0,5 g/g) ?. $D_a = 0,9 \text{ g/cm}^3$.

Resultado: a) En 67,5 días.
b) 7,9 litros.

6. Un cultivo de trigo en floración crece en un suelo franco con una profundidad de arraigamiento de 95 cm. El contenido de humedad del suelo a CC y PMP es de 0,3 g/g y 0,15 g/g, respectivamente. La D_a del suelo es $1,2 \text{ g/cm}^3$. La evapotranspiración promedio diaria para un cultivo de trigo en floración es de 5 mm/día.

- Si el contenido actual de humedad es de $0,3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ desde la superficie hasta una profundidad de 120 cm ¿En cuántos días se regará el cultivo?.
- Si el UR es de 40% ¿En cuántos días se volverá a regar el cultivo?
- Haga un gráfico altura de agua v/s tiempo en que aparezcan los riegos de a y b.

Resultado: a) En 2,3 días.
b) En 13,7 días.

7. Un cultivo de maíz en estado de llenado de grano (enero y febrero) tiene una ETc promedio de 8 y 10 mm/día, respectivamente. En la mañana del día 20 de enero el cultivo de maíz, que tiene 1 m de profundidad de arraigamiento inicia su llenado de grano, el que se prolongará por 30 días. En dicha fecha el suelo (franco y homogéneo) está a CC con 0,38 g/g ($D_a = 1,5 \text{ g/cm}^3$).

- a) ¿Qué contenido de humedad tiene dicho suelo cuando el UR es de 30%? ¿Qué día se regará? ¿Qué altura de agua se debe aplicar en el riego?
- b) Si no se regara, ¿Qué día la humedad del suelo llegará a PMP (0,15 g/g)?

Resultado: a) 47,65 cm; 2 de Febrero; 103,5 mm.

b) 26 de Febrero.

8. Durante la temporada 2014/2015 se realizó un ensayo de quínoa en la Estación Experimental Antumapu. La profundidad de enraizamiento de este cultivo fue de 60 cm. Las características del suelo fueron:

Profundidad	C C (%)	PMP (%)	$D_a \text{ (g/cm}^3\text{)}$
0 – 15	23,43	15,00	1,31
15 – 45	19,23	13,31	1,23
45 – 75	13,30	10,89	1,36

La ETc mensual de la quínoa fue:

Septiembre: 13,4 mm/mes
 Octubre: 23,5 mm/mes
 Noviembre: 42,4 mm/mes
 Diciembre: 58,3 mm/mes
 Enero: 65,5 mm/mes

El suelo estaba a CC el 1 de septiembre, no hubo lluvia entre el 1 de septiembre y el 31 de enero y el UR es de 50%, conteste:

- a) ¿Qué contenido de humedad tiene el suelo cuando el umbral de riego alcanza al 50%?
- b) ¿Cuántos riegos se dieron a la quínoa entre el 1 de septiembre y el día 31 de enero?
- c) ¿Cada cuantos días se realizaron los riegos para dicho período?
- d) ¿Qué altura de agua se debió aplicar en cada riego?
- e) ¿Qué volumen de agua se aplicó durante todo el período en 1 hectárea de quínoa?
- f) Grafique la variación del contenido de agua versus tiempo e indique con una flecha los riegos hechos durante el período

Resultado: a) 12,23 cm.
 b) 9,3 riegos
 c) A los 41 - 25 - 15 - 14 - 12 - 12 - 11 - 10 - 10 días
 d) 2,17 cm
 e) 1953 m³

9. a) Derive una expresión que permita utilizar relación de Bowen y el balance de energía en la determinación de la evapotranspiración.
- b) Derive una ecuación tipo relación de Bowen a partir de ecuaciones de flujo de masa (LE y CO₂), para el cálculo del flujo de CO₂ sobre un cultivo.
- c) Combine las expresiones de los puntos a) y b) para calcular el flujo de CO₂.
- d) Utilizando la metodología dada en la relación de Bowen, calcule el flujo de calor latente y el flujo de calor sensible a partir de los siguientes datos:
 Radiación neta = 0,792 cal/cm²/min.
 Conducción de calor en el suelo = 0,08 cal/cm²/min.
 Temperatura a 100 cm = 16,87 °C y presión de vapor de agua a 100 cm = 0,014 g/g
 Temperatura a 200 cm = 16,42 °C y presión de vapor de agua a 200 cm = 0,012 g/g

Preguntas sobre consumo de agua por la planta

1. Defina brevemente:
 - a) Potencial del agua.
 - b) Radiación neta.
 - c) Evapotranspiración de referencia.

2. ¿Cómo se determina la fracción diaria de las horas de luz anuales en porcentaje?

3. a) Derive la ecuación de continuidad o conservación.
b) Reemplace la ecuación para difusión en estado de régimen estacionario en la ecuación de conservación y obtenga una ecuación para difusión en condiciones transientes.
c) ¿Qué entiende usted por solución de una ecuación diferencial?

4. Grafique aproximadamente a escala las curvas anuales que Ud. esperaría para R_n , H y LE sobre (Justifique sus gráficas):
 - a) Un campo seco
 - b) Un campo húmedo.

5. En el espacio provisto, discuta cada una de las afirmaciones que se dan. Durante las noches y con cielos despejados:
 - a) La radiación desde la tierra es fundamentalmente de onda larga.
Ocurre lo contrario si existe alta nubosidad.
 - b) Se puede generar una "inversión", evitando el peligro de heladas.
 - c) La temperatura de la superficie de la tierra baja y se aumenta el peligro de heladas.
 - d) Si el cielo se cubre con nubes, estas actuarán absorbiendo radiación y los cultivos se enfriarán más rápidamente.
 - e) La pérdida de radiación de las hojas podría enfriarlas bajo el punto de rocío.

6. Señale la razón para que aparezca la constante de Von Karman en ecuaciones que representan la transferencia turbulenta de alguna propiedad atmosférica.

7. Escriba ecuaciones para el balance de energía y el balance de radiación a nivel de la superficie de la tierra. Defina cada uno de sus términos y señale sus unidades.

8. El balance de energía puede ser utilizado para estimar evapotranspiración. ¿Cuál es la aproximación que se usa para separar el flujo de calor latente del flujo de calor sensible?. Explique.

- a) Contraste los conceptos de flujo transiente y flujo en estado de régimen estacionario.
- b) Señale ecuaciones tipo que se usan en ambos casos;
- c) Señale el tipo de flujo que esperaría encontrar usted en los siguientes casos:
 - Calor en el suelo
 - Calor en la atmósfera
 - Agua en una tubería
 - Agua a través de una planta
 - Agua que infiltra en un suelo seco.

9. Se puede estimar la evapotranspiración de un cultivo utilizando el balance de energía y la relación de Bowen.

- a) Señale los supuestos (condiciones) que deben cumplirse para que el método sea válido.
- b) ¿Qué parámetros necesita medir y como lo realizaría prácticamente?

10. ¿Cómo se disipa la energía radiante que llega a la superficie terrestre?, ¿Cuál es la utilidad de la relación de Bowen para determinación de ETo?

11. Discuta la ecuación de Penman -Monteith para determinar ETo.

12. Ponga en orden correlativo, de más a menos preciso, los siguientes métodos para estimar ETo: Evaporímetro clase A, ecuación de Blaney & Criddle; ecuación de Penman-Monteith; lisímetro de drenaje. Establezca el orden con fines a determinar la frecuencia de riego para frutilla en el Norte Chico. Justifique.

13. Discuta la importancia que tiene el perfil del viento en la estimación de ETo bajo condiciones de neutralidad atmosférica.

14. En base a los antecedentes discutidos en clase elabore un método de terreno para calcular la evaporación del agua desde la superficie de un suelo. Considere los flujos internos de agua en el perfil (Flujos verticales solamente).

15. Los datos meteorológicos que se utilizan en el cálculo de tasas de riego generalmente provienen de estaciones ubicadas en zona no cultivadas. ¿Qué efectos podría tener esto en el desarrollo de un proyecto de riego en zonas áridas? ¿Cómo corregiría por este efecto?

16. Se desea implantar un cultivo nuevo en Chile. Discuta estudios que Ud. haría para determinar los aspectos hídricos necesarios para lograr una máxima producción.

17. Usted debe elaborar un programa para evaluar la evapotranspiración potencial de Chile. ¿Cómo abordaría el problema pensando en medidas a corto y largo plazo? ¿Qué metas inmediatas y futuras se fijaría?

EFICIENCIA EN EL USO DEL AGUA (EUA)

La eficiencia en el uso del agua es la relación entre la producción de materia seca y el agua utilizada en un periodo determinado. La producción de materia seca puede ser expresada en términos de carbono asimilado, biomasa aérea o total producida y rendimiento económico. Por otro lado, el agua utilizada puede ser expresada en términos de agua transpirada, agua evapotranspirada o aplicada (vía riego o precipitación).

Respecto del intervalo de tiempo considerado, la eficiencia en el uso del agua puede ser medida de forma instantánea (en términos de asimilación de carbono y agua transpirada, que normalmente se mide a nivel de hoja y es extrapolable a la canopia), por intervalos de tiempo determinados, o en el ciclo completo del cultivo.

Por lo tanto, la eficiencia en el uso del agua puede ser expresada en diversas formas, y la interpretación de su magnitud dependerá de los componentes utilizados para su cálculo.

Eficiencia en el uso del agua instantánea

Eficiencia en el uso del agua a nivel de hoja

A nivel de la hoja, las mediciones de eficiencia en el uso del agua son a escala instantánea y relacionan la tasa de asimilación CO_2 (A_i) y su tasa de transpiración (T_i), ambos por unidad de superficie de hoja. Esta eficiencia en el uso de agua es conocida como eficiencia de transpiración (TE), y está representada por la siguiente expresión:

$$TE(A, T, i)_h = \frac{A_i}{T_i}$$

$$TE(A, T, i)_h = \frac{(r_b + r_s)(C_a - C_i)}{(r_b + r_s)'(e^* - e)}$$

$$TE(A, T, i)_h = 0,625 \frac{(C_a - C_i)}{(e^* - e)}$$

A_i : asimilación neta por unidad de superficie de hoja.

T_i : transpiración por unidad de superficie de hoja.

(r_b+r_s) : suma de las resistencias de la capa límite y estomática al CO_2 .

$(r_b+r_s)'$: suma de las resistencias de la capa límite y estomática al vapor de agua.

C_a : presión parcial de CO_2 aire

C_i : presión parcial de CO_2 espacios intercelulares

e^* : presión de vapor a saturación en la hoja

e : presión de vapor actual del aire circundante a la hoja

(e^*-e) : déficit de presión hoja-aire

Eficiencia de transpiración instantánea a nivel de cultivo

La extrapolación de la TE de una hoja a cultivo resulta bastante difícil, debido a la necesaria conversión de CO_2 fijado a materia seca. Por otro lado, la transpiración estará regulada por la arquitectura de la canopia, siendo fundamental tener conocimiento área foliar que efectivamente es capaz de fijar CO_2 .

Si se pretende conocer la eficiencia de transpiración instantánea de una canopia, esta puede ser estimada a través de la siguiente expresión:

$$TE(B, T, i)_c = \frac{Kd}{(e^* - e)}$$

$$TE(B, T, i)_c = \frac{Kd}{(e^* - e)} = \frac{a b c C_a \frac{LD}{LT}}{(e^* - e)}$$

e^* : presión de vapor a saturación a temperatura del aire

$(e^* - e)$: déficit de presión de vapor del aire

a: $\frac{PM_{CH_2O}}{PM_{CO_2}} = 0,68$ (cantidad de CO_2 necesaria para producir azúcar)

b: valor dependiente de la fracción de carbohidratos, proteínas y lípidos en la biomasa producida

c: tasa de carboxilación definida como $1 - \frac{ci}{ca}$

LD: índice de área foliar expuesto a radiación directa (~ 1,4)

LT: índice de área foliar equivalente al área transpirada

Las principales diferencias de eficiencia de transpiración observadas entre especies están dadas por los componentes b y c de la ecuación. En el caso de b, este coeficiente pretende normalizar las diferencias entre plantas cuya biomasa tenga una composición bioquímica costosa respecto del almidón, tal como la síntesis de proteínas y lípidos. En estos términos una oleaginosa como la maravilla, tendería a tener una eficiencia de transpiración menor que una planta que sintetice moléculas energéticamente menos costosas como el caso del trigo. Por otro lado, la tasa de carboxilación (c) discriminará fuertemente entre metabolismos fotosintéticos, siendo plantas de metabolismo C_4 significativamente más eficientes que plantas de metabolismo C_3 dada la prácticamente nula fotorespiración.

Kd soya ~ 4×10^3 Pa

Kd trigo ~ 5×10^3 Pa

Kd maíz ~ 12×10^3 Pa

Eficiencia de uso del agua agronómica

La eficiencia en el uso del agua agronómica es medida a nivel de cultivo a escala estacional. Esta es expresada en términos de la materia seca producida y el agua utilizada por el cultivo durante su ciclo de desarrollo.

$$B_i = EUA \Sigma Tr_i$$

EUA: eficiencia en el uso del agua

B_i : biomasa producida por el cultivo al tiempo i

ΣTr_i : transpiración de cultivo acumulada al tiempo i

Si consideramos la relación entre la biomasa producida y la sumatoria del agua transpirada por el cultivo, la pendiente de la función resultante será la eficiencia de transpiración.

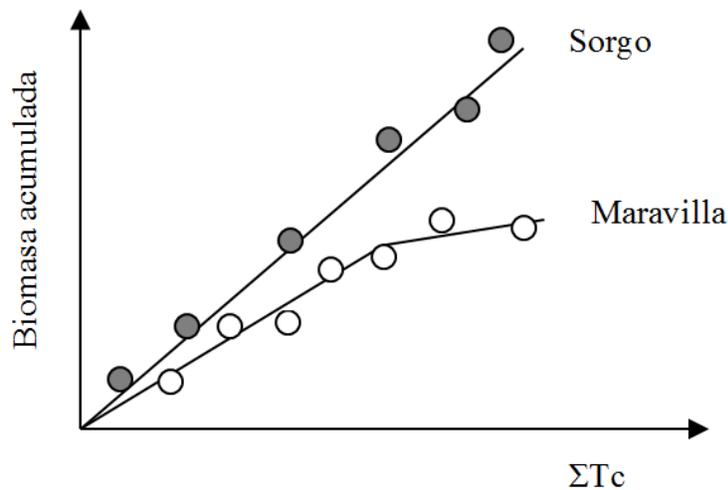


Figura 16: Relación entre la biomasa producida y la transpiración acumulada de un cultivo durante su ciclo de desarrollo.

Como se observa en la Figura 16 la pendiente de la relación entendida como la eficiencia de transpiración, es prácticamente constante a lo largo del ciclo del

cultivo. En el caso de Maravilla, la pendiente disminuye su valor desde llenado de grano, cuando la composición bioquímica de la materia seca producida aumenta su proporción en términos de lípidos (compuesto energéticamente costoso). La diferencia observada entre sorgo y maravilla está dada por la tasa de carboxilación, mayor en plantas de metabolismo C_4 . En otras palabras, a un mismo monto de agua transpirada, una planta de metabolismo fotosintético C_4 es capaz de generar una cantidad mayor de materia seca que una planta de metabolismo C_3 .

La eficiencia de transpiración de un cultivo también puede ser estimada en función de la biomasa producida ante diferentes montos de evapotranspiración estacional. En este caso la estimación se obtiene relacionando la biomasa producida por un cultivo sometido a una variedad de ambientes con diferentes demandas atmosféricas, que determinen diferentes montos de agua evapotranspirada a lo largo de la temporada

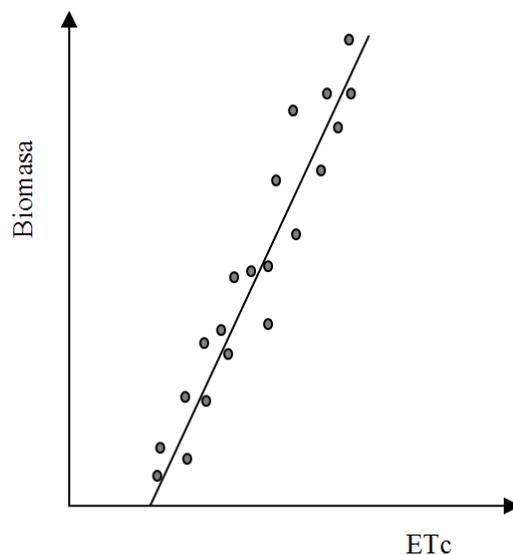


Figura 17: Relación entre la biomasa y la evapotranspiración de cultivo acumulada limitada por agua.

En el caso de la Figura 17, cada punto representa la biomasa producida y la evapotranspiración de un cultivo al final de su ciclo de desarrollo, a diferencia de la Figura 16, donde los puntos representan la biomasa producida y la evapotranspiración acumulada por un cultivo en un momento determinado de su ciclo. La pendiente de la recta representa la eficiencia de transpiración del cultivo, y el punto donde la función intercepta el eje X representa la evaporación estacional media de ese cultivo. En este caso la pendiente representa la eficiencia de transpiración donde el único factor limitante es la disponibilidad de agua, y en teoría es aplicable a cualquier especie.

Cabe señalar que la eficiencia en el uso del agua de los cultivos ha sido un sujeto de estudio por décadas, dada su relevancia en la productividad y uso de agua, tema particularmente importante en el contexto actual, de limitación de superficies aptas para la producción de alimentos y la creciente escasez de agua producto del cambio climático. Por otro lado, la constancia de la eficiencia de transpiración ha permitido el desarrollo de diversos modelos de simulación utilizados para predecir el rendimiento de los cultivos en diversos ambientes.

Mejora de la eficiencia en el uso del agua

El objetivo de aumentar la eficiencia en el uso del agua de los cultivos puede ser abordado a través de diversas vías. Aquí se discuten algunas de ellas.

Vía aumento de la tasa de carboxilación: esto potenciaría la producción de materia seca por unidad de agua transpirada. A través de ingeniería genética se podría modificar la eficiencia de las enzimas asociadas a la carboxilación, como son la rubisco y la PEP carboxilasa. Por otro lado por medio de selección y fitomejoramiento podrían identificarse genotipos que tengan una potencial de carboxilación superior. Finalmente se podría modificar la presión parcial de CO₂ del ambiente en el que se desarrolla el cultivo, no obstante esta alternativa queda restringida a especies que se desarrollen en ambientes controlados, como

cámaras de crecimiento o invernadero, haciendo poco factible su implementación a nivel comercial.

Vía disminución de la pérdida de agua por transpiración: en este caso humificar el ambiente disminuiría el déficit de presión de vapor hoja aire (DPV_{h-a}), por lo que la tasa de transpiración sería menor a una misma conductancia estomática, no perjudicando la asimilación de CO_2 . Otra alternativa es seleccionar individuos que se desarrollen bien en condiciones donde el DPV_{h-a} sea bajo, lo que en un ambiente mediterráneo ocurre durante el invierno.

Preguntas sobre eficiencia en el uso del agua

1. a) Escriba una expresión que permita estimar la EUA (B, T, e), es decir, en base a la biomasa, transpiración, estacional.
b) Basado en la expresión derivada en (a) señale tres formas en que agrónomicamente puede elevar EUA y dos formas en que pueda alterar EUA genéticamente.

2. a) Señale por qué la discriminación de ^{13}C (Δ) es un indicador de la eficiencia de transpiración.
b) Hay dos genotipos de trigo A y B que tienen la misma fecha de floración. La ΔA es mayor que la ΔB , señale:
-¿Qué genotipo tiene mayor TE?
-¿Qué genotipo rinde más bajo condiciones de déficit de agua?

3. Defina el concepto de eficiencia del uso del agua por las plantas. Señale en que forma la anatomía y morfología de la hoja puede alterar su valor.

4. Diseñe una planta que cumpla con tener una alta productividad en grano por unidad de superficie y alta eficiencia al uso del agua. Especifique cada una de las características a buscar.

5. De razones por las cuales es difícil extrapolar mediciones puntuales de intercambio gaseoso en hoja a nivel de canopia. Justifique a través del concepto de eficiencia en el uso del agua.

6. Explique por qué una planta de alto potencial productivo tendrá en la mayoría de los casos una baja eficiencia en el uso del agua.

Referencias bibliográficas

ALLEN, R., PEREIRA, L., RAES D., SMITH, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de agua de los cultivos. Estudio FAO Serie Riego y Drenaje N°56, Roma. 322 p.

DOORENBOS, J. and PRUITT, W. 1977. Crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage, paper N°24 FAO, Roma. 154 p.

DOORENBOS, J., KASSAM, A. 1986. Efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos. Estudio FAO Serie Riego y Drenaje N°33. Roma. p

DE SANTA OLALLA, M., y VALERO, J.A. 1992. Agronomía del riego. España. 732 p.

LOOMIS, R.S. y CONNOR, D.J. 2002. Ecología de Cultivos. Productividad y Manejo en Sistemas Agrarios. Mundi-Prensa. Madrid. 591 p.

NOBEL, P. 1983. Biophysical Plant Physiology and Ecology, WH Freeman, San Francisco 603 p.

NOBEL, P. 2009. Physicochemical and environmental. Plant Physiology. Elsevier Academic press, Canada. 604 p.

VILLALOBOS, F.J., MATEOS, L., ORGAZ, F. y FERERES, E. 2002. Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, España. 496 p.

