

## POTENCIAL DEL AGUA DEL SUELO

*Heliodoro Bustamante\**

### INTRODUCCION

La física clásica reconoce dos formas principales de energía, que son la cinética y potencial.

La energía cinética o de movimiento es proporcional a la velocidad al cuadrado de un cuerpo y la energía potencial tiene relación a la posición o a las condiciones internas de un cuerpo.

Como en condiciones normales o promedias la velocidad interna del agua del suelo es muy lenta, generalmente la energía cinética se desprecia.

La energía potencial del agua presenta diferencias de un punto del suelo a otro; esas diferencias son las que originan el movimiento del agua de acuerdo a la tendencia universal de la materia en el sentido de moverse de donde la energía potencial es mayor a donde dicha energía es menor. En el suelo el agua en consecuencia se mueve hacia donde su energía decrece hasta lograr su estado de equilibrio. Se desprende entonces que la cantidad de energía potencial absoluta contenida en el agua, no es importante por sí misma, sino por su relación con la energía en diferentes lugares dentro del suelo. El concepto *Potencial de agua del suelo* es un criterio para esta energía.

### DEFINICIONES

*Potencial del agua del suelo.*

Indica la energía potencial específica por unidad de masa del agua del suelo con relación al agua en un estado de referencia estándar.

---

\* Profesor Asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional - Medellín.

## Estado estándar

Es en forma hipotética un recipiente de agua pura, a la presión atmosférica, a la misma temperatura del agua del suelo y a una elevación constante dada.

## Potencial cero.

Por convención se da el valor de cero al agua libre y pura (2).

## Potencial total del agua del suelo.

Según el Comité Internacional de las Ciencias del Suelo es la cantidad de trabajo que debe ser hecho para transportar una cantidad infinitesimal (en unidades de masa, volumen o peso) de agua libre y pura desde un recipiente a una elevación específica a la presión atmosférica en el sistema suelo-planta-atmósfera (2).

## POTENCIAL TOTAL DEL AGUA DEL SUELO

Este concepto es de fundamental importancia porque reemplaza la clasificación arbitraria que imperó en las primeras etapas en el desarrollo de la física del suelo, como: agua gravitacional, agua capilar, agua higroscópica, etc.

El agua en el suelo está sujeta a una serie de fuerzas que hacen que su potencial difiera de aquel del agua libre.

Estas fuerzas son de una parte la atracción de la matriz sólida, también la presencia de sales disueltas, la acción de la presión local por gases y la acción de las fuerza gravitacionales. En consecuencia el Potencial Total ( $\Psi_t$ ) del agua del suelo es igual a la suma de sus varios componentes

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p$$

De donde:

$\Psi_t$  = Potencial total

$\Psi_m$  = Potencial mátrico

$\Psi_g$  = Potencial gravitacional

$\Psi_o$  = Potencial osmótico

$\Psi_p$  = Potencial de presión

La principal ventaja de este concepto ( $\Psi_t$ ) radica en que da una medida unificada por medio de la cual el estado del agua puede ser evaluado en cualquier tiempo y cualquier lugar dentro del sistema suelo-planta-atmósfera.

El potencial del agua del suelo se puede expresar:

- Como energía por unidad de masa de agua: erg.  $g^{-1}$
- Como energía por unidad de volumen: erg.  $cm^{-3}$  o dina/cm<sup>2</sup> (bar, atm.)
- Como energía por unidad de peso: erg. dina<sup>-1</sup> o cm.

Tabla de conversión de unidades de potencial de agua del suelo

Unidades específicas			Unidades de volumen			Unid. de peso
erg/g	Joul/Kg	bar	milibar centibar atmósfera			(cm)
-1	-0.0001	-0.000001	-0.001	-0.0001	-0.000000987	-0.001017
-983.3	-0.098	-0.0009833	-0.9833	-0.0983	-0.0009703	-1
-1.000	-0.1	-0.001	-1	-0.1	-0.000987	-1.017
-10.000	-1	-0.01	-10	-1	-0.00987	-10.17
-1.000.000	-100	-0.1	-1000	-100	-0.987	-1017
-1.013.000	-101.3	-1	-1013	-101.3	-1	-1030

Tomada de: Hartman, R. 1983. Soil Water Potencial. ICTP.

*Potencial mátrico.*

Es el resultado de la acción integrada de las fuerzas de adsorción y capilaridad. Esas fuerzas atraen y retienen el agua en el suelo reduciendo su energía potencial por debajo de aquella del agua libre. La capilaridad es el resultado de la tensión superficial del agua y su ángulo de contacto con la fase sólida. En un suelo no saturado, la curva del menisco obedece a la ecuación de capilaridad (Ley de Laplace).

$$P_o - P_1 = \Delta P = - Y \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

$P_o$  = Presión atmosférica (por convención igual a cero)

$P_1$  = Presión del agua del suelo (debe ser menor a la atmosférica)

$\Delta P$  = Déficit de presión

$Y$  = Tensión superficial del agua.

$R_1$  y  $R_2$  = radios de curvatura.  $R_1 = R_2$  suponiendo poros de forma cilíndrica.

$$\Delta P = - \frac{2Y}{R}$$

Como  $R = \frac{r}{\cos \alpha}$  ( $\alpha$  = ángulo de contacto entre agua y suelo)

$$\Delta P = - \frac{2Y}{r}$$

Es bien conocido también que  $\Delta P = h \rho w g$

$h$  = altura de la columna capilar

$\rho w$  = densidad del agua

$g$  = aceleración de la gravedad

$$- \frac{2Y}{r} = h \rho w g$$

El potencial mátrico se expresa:

a. Por unidad de volumen

$$P = -\frac{2Y}{r} \text{ (dina/cm}^2\text{)}$$

b. Por unidad de masa

$$gh = \frac{-2Y}{r \rho_w} \text{ (erg/g)}$$

c. Por unidad de peso

$$h = \frac{-2Y}{\rho_w gr} \text{ (cm)}$$

El potencial mátrico ( $\Psi_m$ ) en un suelo saturado es igual a cero; en no saturado tiene valor negativo.

### *Potencial gravitacional*

Todo cuerpo es atraído al centro de la tierra por la fuerza gravitacional que es igual al producto de la masa de ese cuerpo por la aceleración de la gravedad. Entonces para levantar un cuerpo contra esa atracción es necesario efectuar un trabajo.

En consecuencia el potencial gravitacional del agua del suelo en cada punto, está determinado por la elevación de ese punto con respecto a un nivel de referencia dado. Si el nivel de referencia está por encima, el potencial gravitacional ( $\Psi_g$ ) es negativo, pero si el nivel de referencia está por debajo dicho potencial es positivo.

A una altura Z por encima del nivel de referencia, la energía del potencial gravitacional de una masa de agua (M) que ocupa un volumen (V) es:

$$Mgz = \rho_w Vgz$$

EL potencial gravitacional se expresa:

a. Por unidad de masa

$$\Psi_g = gz \text{ (erg/gm)}$$

b. Por unidad de volumen

$$Pg = \rho_w gz \text{ (dina/cm}^2\text{)}$$

c. Por unidad de peso

$$z = z \text{ (cm)}$$

### Potencial osmótico.

La presencia de sales en el agua del suelo baja su potencial. Si se parte de la base que el potencial osmótico ( $\Psi_o$ ) del agua pura es cero, en una solución, a la misma temperatura del agua libre, es negativo ese potencial.

La diferencia en potencial osmótico origina movimiento del agua entre dos puntos; sin embargo la concentración de sales en un perfil de suelo es aproximadamente similar por el proceso de difusión y la diferencia en la mayoría de los casos es despreciable. Pero es necesario tener en cuenta que desde el punto de vista del trabajo que debe efectuar la planta para extraer la humedad del suelo es importante.

El potencial osmótico puede ser calculado por medio de la ley de Van't Hoff.

$$\Psi_o = \frac{-n}{V} R T$$

$\Psi_o$  = Potencial osmótico en atmósferas

R = Constante universal de los gases (0.082 1.atm/mol.k)

$\frac{n}{V}$  = Molaridad de la solución (mol/l)

T = Temperatura absoluta (273 + t°C)

### Potencial de presión.

La presión a la que está sometida el agua del suelo depende de los cambios posibles en la presión del aire del ambiente; como la presión atmosférica permanece generalmente constante este efecto es despreciable en la variación del potencial de presión del agua del suelo.

En suelo saturado la fase líquida tiene una presión hidrostática mayor que la atmosférica y por lo tanto el potencial se considera positivo, en la superficie de la fase líquida el potencial es cero y el agua que se levanta por encima del nivel de la tabla de agua por capilaridad su potencial es negativo.

El potencial total del agua del suelo ( $\Psi_t$ ) es la suma del potencial mátrico, gravitacional, osmótico y de presión.

$$\Psi_t = \Psi_m + \Psi_g + \Psi_o + \Psi_p$$

Cuando existe una condición de equilibrio, es decir no hay transferencia de masas, el potencial total en diferentes puntos del sistema es constante.

Como se ha estimado además que  $\Psi_o$  es constante en un perfil del suelo, entonces:

$$\Psi_m + \Psi_g + \Psi_p = \text{constante} = \Psi_H$$

$\Psi_H$  se denomina *Potencial Hidráulico*.

En áreas no saturadas es decir por encima del nivel del agua;

$$\Psi H = \Psi m + \Psi g.$$

Si se habla en términos de cabeza, la *cabeza hidráulica*  $H$  es la suma de la cabeza gravitacional ( $Z$ ) y la cabeza de presión del agua del suelo ( $h$ )

## DETERMINACIONES

El tensiómetro es un aparato que consiste de una copa de cerámica porosa, conectada a un tubo que se llena de agua y conectado en un extremo a un manómetro (Figura 1).

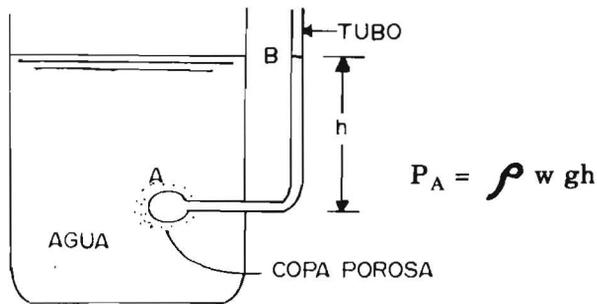


FIGURA 1. Copa porosa colocada dentro de un recipiente con agua

Si se coloca el tensiómetro en íntimo contacto con la fase líquida en un suelo no saturado, la presión es negativa y por lo tanto se ejerce una succión al agua del tensiómetro hasta alcanzar una condición de equilibrio, entonces la altura de la columna de agua descenderá (Figura 2).

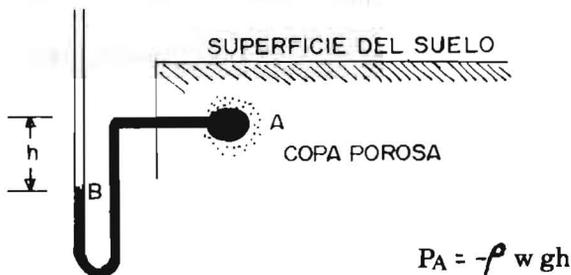


FIGURA 2. Tensiómetro en suelo no saturado

En la práctica los manómetros de agua serían de una longitud tan amplia que serían inoperantes, y por esa razón se utiliza el mercurio que tiene una densidad de  $13.6 \text{ gm/cm}^3$  (reduce 13.6 veces la columna de agua) (2)

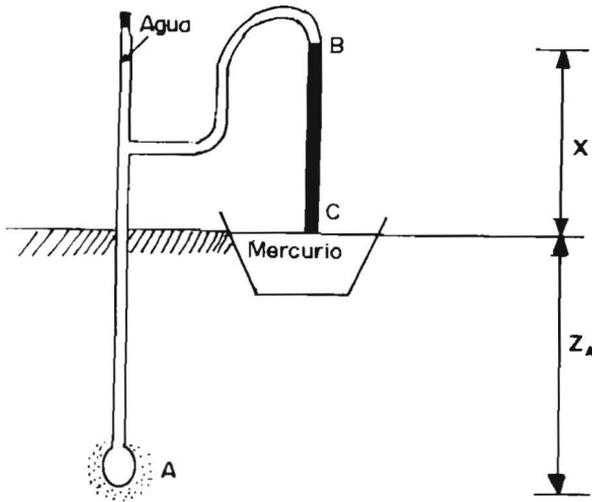


FIGURA 3. Tensiómetro con manómetro de mercurio

De la figura 3 y en estado de equilibrio se tiene lo siguiente:

En agua (A y B)

$$-Z_A + \frac{P_A}{\rho w g} = Z_B + \frac{P_B}{\rho w g}$$

$$P_A - Z_A \rho w g = P_B + Z_B \rho w g$$

$$P_A = P_B + Z_B \rho w g + Z_A \rho w g = P_B + \rho w g (Z_A + Z_B) \quad (1)$$

En mercurio (B y C)

$$Z_B + \frac{P_B}{\rho Hg g} = Z_C + \frac{P_C}{\rho Hg g}$$

Como:  $Z_C = 0$  (nivel de referencia)

$P_C$  = Presión atmosférica (por convención = 0)

La ecuación se convierte en:

$$Z_B + \frac{P_B}{\rho Hg g} = 0$$

$$P_B = -\rho Hg g Z_B \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1)

$$P_A = -\rho H g g Z_B + \rho w g (Z_A + Z_B) \quad \text{por unidad de masa}$$

$$\frac{P_A}{\rho w g} = \frac{-\rho H g g Z_B + Z_A + Z_B}{\rho w g} \quad \text{Por unidad de peso (3)}$$

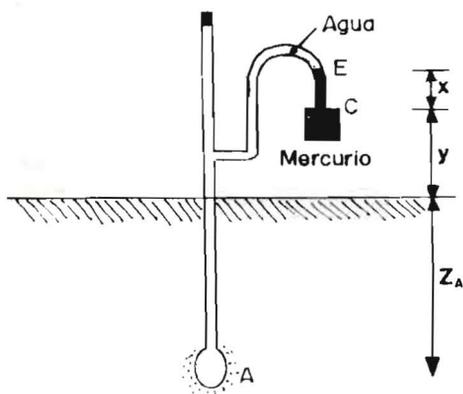
Como:  $\rho H g = 13.6 \text{ g/cm}^3$   
 $\rho w = 1 \text{ g/cm}^3$

La ecuación (3) se convierte en:

$$h_A = -13.6 Z_B + Z_A + Z_B \quad \text{o de la figura 3}$$

$$\underline{h_A = -12.6X + Z_A} \quad (4)$$

Como normalmente en los tensiómetros el depósito de mercurio se localiza por encima de la superficie del terreno, tal como se observa en la Figura 4, la ecuación (4) se convierte en:



$$h_A = -12.6X + Y + Z_A$$

FIGURA 4. Posición tradicional del Tensiómetro

Como en términos de cabeza hidráulica, se había deducido que (5):

$$H = h + Z$$

Entonces:

$$H = -12.6X + Y + Z_A + (-Z_A)$$

$$\underline{H = -12.6X + Y}$$

A manera de ejemplo se presenta la Tabla 1 que relaciona la máxima producción de varios cultivos con referencia al potencial mátrico.

TABLA No. 1

Potencial mátrico, a cuyo nivel debe aplicarse agua para obtener la máxima producción de suelos bien drenados, fertilizados y bajo buen manejo.

Cultivo	Potencial mátrico (cm)
Alfalfa	-1500
Lechuga	-400 a -600
Papa	-300 a -500
Coliflor	-600 a -700
Limón	-400
Naranja	-200 a -1000
Aguacate	-500
Tomate	-800 a -1500
Banano	-300 a -1500

Tomada de: Taylor y Ashcroft, 1972.

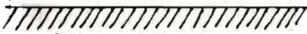
BIBLIOGRAFIA

1. HANKS, R. and G. L. ASHCROFT. 1980. Applied Soil Physics. Advanced Series in Agricultural Science 8.
2. HARTMANN, R. 1983. Soil Water Potential. International Centre for Teoretical Physics. College on Soil Physics. Trieste. Italy.
3. HILLEL, D. 1980. Fundamentals of Soil Physics. Academic Press. New York.
4. \_\_\_\_\_ . 1980. Aplication of Soil Physics. Academic Press. New York.
5. REICHARDT, K. 1983. Soil Moisture Studies. International Centre for Teoretical Physics. College on Soil Physics. Trieste. Italy.

## EJEMPLOS

(Tomados de: Hanks and Ashcroft, 1980) (1)

1. Hay dos puntos en un suelo localizados a una distancia vertical del nivel de referencia tal como se observa en la Figura. Encontrar la diferencia en el potencial gravitacional entre esos puntos.

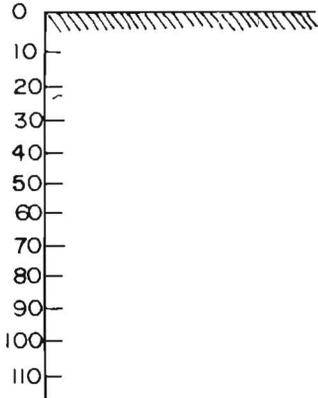


$$\psi_{Z_A} = 15 \text{ cm}$$

$$\psi_{Z_B} = -10 \text{ cm}$$

$$\Delta \psi_Z = \psi_{Z_A} - \psi_{Z_B} = 15 - (-10) = 25 \text{ cm}$$

2. Un suelo tiene la Tabla de agua a -70 cm. Encontrar los valores de  $\psi_m$ ,  $\psi_p$ ,  $\psi_z$  y  $\psi_h$  a través del perfil que se muestra a continuación. El nivel de referencia es la superficie.

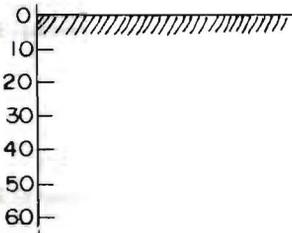


	$\psi_m$	$\psi_p$	$\psi_z$	$\psi_h$
0	-70	0	0	-70
10	-60	0	-10	-70
20	-50	0	-20	-70
30	-40	0	-30	-70
40	-30	0	-40	-70
50	-20	0	-50	-70
60	-10	0	-60	-70
70	0	0	-70	-70
80	0	10	-80	-70
90	0	20	-90	-70
100	0	30	-100	-70
110	0	40	-110	-70

3. El agua se está evaporando de la superficie de un suelo cuya tabla de agua se encuentra a una profundidad de 40 cms. El nivel de referencia es la superficie. Los valores de  $\psi_m$  medidos se indican en el gráfico.

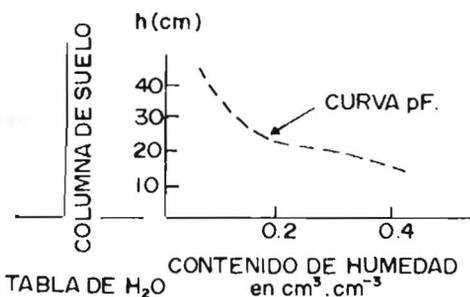
Encontrar  $\psi_p$ ,  $\psi_z$ ,  $\psi_h$

Prof. (cms).



	$\psi_m$	$\psi_p$	$\psi_z$	$\psi_h$
0	-100	0	0	-100
10	-45	0	-10	-55
20	-26	0	-20	-46
30	-12	0	-30	-42
40	0	0	-40	-40
50	0	10	-50	-40
60	0	20	-60	-40

4. En la ilustración siguiente se observa una columna de suelo sobre el nivel del agua subterránea. Si existe la condición de equilibrio, calcular  $\Psi_g$ ,  $\Psi_m$ ,  $\Psi_p$  y  $\Psi_h$



altura (h)	$\Psi_g(Z)$	$\Psi_m(h)$	$\Psi_p(h)$	$\Psi_H$
30	30	-30	0	0
20	20	-20	0	0
10	10	-10	0	0
0	0	0	0	0
-10	-10	0	10	0

5. Una solución que contine cloruro de sodio 0.01N a 25°C se encuentra en el suelo.

Calcular el potencial osmótico'

$$\text{Presión osmótica de Na} = 0.082 \times 298 \times 0.01 = -0.25 \text{ atm.}$$

$$\text{Presión osmótica de CL} = 0.082 \times 298 \times 0.01 = -0.25 \text{ atm.}$$

1

Potencial osmótico total = -0.50 atm.

6. La altura de la columna de mercurio en los manómetros de dos tensiómetros localizados a profundidades diferentes en un suelo son las siguientes:

Profundidad (Z) (cm)	Lectura del tensiómetro (X) (cm)
10	37.8
30	23.3

El nivel de mercurio se encuentra a 18 cm de la superficie del suelo que es el nivel de referencia.

Calcular: la cabeza de presión del agua en el suelo (h) y la cabeza hidráulica (H) para la profundidad del suelo de 10 cms.

$$h_{10} = -12.6X + Y + Z = -12.6(37.8) + 18 + 10 = -448.2 \text{ cm.}$$

$$h_{10} = h - Z = -448.2 - 10 = -458.2 \text{ cm}$$

$$h_{30} = -12.6(23.3) + 18 + 30 = -245.5 \text{ cm.}$$

$$H_{30} = -245.5 - 30 = -275.5 \text{ cm}$$

7. Dos tensiómetros se colocaron en el suelo; uno a 50 cms. de profundidad ( $Z_1$ ) y el otro a 75 cm ( $Z_2$ ). La lectura en el manómetro del primero fue de 10.7 cm ( $X_1$ ) y de 13.8 cm ( $X_2$ ) el segundo. El recipiente de mercurio en ambos estaba a 20 cms (Y) sobre el nivel del terreno (referencia).

Calcular:

a) La cabeza hidráulica, b) decir hacia donde fluye el agua, c) dar los resultados en atmósferas.

$$H_1 = -12.6X_1 + Y = -12.6(10.7) + 20 = -114.8 \text{ cm.}$$

$$H_2 = -12.6 X_2 + Y = -12.6(13.8) + 20 = -153.88 \text{ cm.}$$

El agua fluye hacia abajo de  $Z_1$  a  $Z_2$  porque el potencial decrece en esa dirección.

$$H_1 = -114.8 \text{ cm de H}_2\text{O} = -0.114 \text{ atmósferas}$$

$$H_2 = -153.88 \text{ cm de H}_2\text{O} = -0.154 \text{ atmósferas.}$$