

Relación Suelo Agua Planta I

**Puntos y ámbitos de los estados de humedad
en el suelo, deducción y aplicación de
fórmulas, lluvias en el nivel freático, líneas de
secado o humedecimiento y sistema poroso en
el suelo**

Escuela Ingeniería Agrícola

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Autor:

Dr. Adrián Enrique Chavarría Vidal

Esta obra está bajo licencia [CC BY-NC-ND 4.0](#)

2025

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Contenido

Definiciones importantes	6
Poros del suelo y el agua y el aire en ellos	6
Porcentaje de humedad gravimétrica:	7
Porcentaje de humedad volumétrica:	7
Densidad aparente o peso específico aparente:.....	9
Densidad real de partículas o peso específico real:	9
Estados de humedad en el suelo	11
Capacidad de Campo	12
Punto de Marchitez Permanente	13
Manejo y deducción de ecuaciones en la física de suelos y del agua en el suelo	20
Ecuaciones básicas y comunes	20
Porcentaje de porosidad total, de sólidos, de aire, de agua o humedad volumétrica y otros (porcentaje volumétrica):	20
Deducción de ecuaciones	21
Otras maneras para calcular la densidad real de partículas o peso específico real, densidad aparente, porcentaje de humedad volumétrica y el porcentaje de aire:.....	21
Otras maneras para calcular la densidad aparente o peso específico aparente, porcentaje de humedad gravimétrica, porcentaje de humedad volumétrica y densidad real de partículas:	23
Otras maneras para estimar la densidad aparente, densidad real de partículas, volumen total de poros, volumen total del suelo, el	

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

volumen de agua, peso de suelo húmedo y peso de suelo seco por medio de las siguientes deducciones:.....	24
Deducción de la fórmula para encontrar la altura de agua (mm) teniendo el porcentaje de humedad volumétrica y la altura del suelo en donde se encuentra dicha humedad	29
Deducción de la fórmula para encontrar la altura de agua (mm) disponible para las plantas y de la fórmula de la lámina de riego	30
Volumen de macro, meso y micro poros	43
Efecto de la lluvia sobre la altura de agua en el nivel freático	43
Presiones del agua que se encuentra en la porosidad del suelo mineral	52
Presión de succión del agua en el suelo completa	56
Práctica de contenido de humedad en el suelo	77
Bibliografía.....	120
Anexos.....	122

Índice de Figuras

Figura 1: Agua en el suelo y sus puntos y rangos de humedad.....	16
Figura 2: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con mayor cantidad de macro poros que de meso y micro poros	17
Figura 3: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con mayor cantidad de micro poros que de meso y macro poros	18
Figura 4: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con muy poca cantidad de meso poros que de micro y macro poros	19
Figura 5: Variación de los contenidos de humedad en el suelo dependiendo de la cantidad de macro, meso y micro poros 3	29
Figura 6: Línea de secado o línea de humedecimiento de un horizonte de suelo	39
Figura 7: imagen de representación del suelo del ejemplo	46
Figura 8: imagen de representación del suelo del ejemplo donde se muestra el perfil saturado y el perfil no saturado	51
Figura 9: Estado de la presión de agua en el suelo según su contenido	53
Figura 10: Estado de la presión negativa o de la succión de agua en el suelo según en los meso poros	55
Figura 11: Línea de secado o línea de saturación para el ejemplo desarrollado	67
Figura 12: Puntos y rangos del estado del agua en el suelo	68
Figura 13: Línea de secado con los datos gravimétricos convertidos a volumétricos de este ejemplo en desarrollo	69
Figura 14: Figura del ejemplo a resolver	73
Figura 15: Figura del ejemplo a resolver	113

CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

Definiciones importantes

Para todo este libro se recomienda siempre ver las imágenes del anexo donde se tiene información importante.

Poros del suelo y el agua y el aire en ellos

Por la generación de estructura en el suelo por medio de procesos edáficos a través del tiempo se producen los agregados o terrones o peds que van dejando espacios que pueden ser llenos de agua o llenos de aire o ambos. Además de poder ser llenos con aire y agua, también son atravesados por aire y agua donde se presentan movimientos rápidos, moderados y lentos.

De lo anterior podemos deducir que en el suelo se presenta tanto la retención como el movimiento del agua y del aire en el sistema poros o la matriz del suelo donde el movimiento del agua en el suelo puede ser de manera saturado o de manera no saturado.

El espacio poroso (**%P = porcentaje de la porosidad total del suelo**) o porosidad del suelo cuando se va llenando de agua, el aire sale del suelo y cuando se va perdiendo el agua o se va secando el suelo, éste se va llenando de aire; donde el contenido máximo de agua o de aire que puede contener un suelo en un momento dado es el total del espacio poroso y por ello el contenido de humedad en el suelo nunca podrá ser mayor al total del espacio poroso.

Para medir el contenido de humedad en el suelo se utilizan usualmente valores de porcentaje y estos pueden ser porcentajes gravimétricos (**%HG = porcentaje de humedad gravimétrica**) o porcentajes volumétricos (**%HV = porcentaje de humedad volumétrica**) y para medir la porosidad o el espacio poroso del suelo usualmente también se utiliza el porcentaje. Un ejemplo de cada uno de ellos con una unidad específica y su interpretación son las siguientes:

1- 25 %HG lo que indica es que hay en el suelo 25 gramos (g) de agua por

cada 100 g de suelo seco $\left(\frac{X \text{ g agua}}{100 \text{ g suelo}}\right)$

2- 25 %HV lo que indica es que hay en el suelo 25 centímetros cúbicos (cm³) de agua por cada 100 (cm³) de suelo total (sólidos más el espacio poroso)

$\left(\frac{X \text{ (cm}^3\text{) agua}}{100 \text{ (cm}^3\text{) suelo}}\right)$

CC BY-NC-ND 4.0

3- 25 %P lo que indica es que hay en el suelo 25 centímetros cúbicos (cm³) de espacio ocupado por poros por cada 100 (cm³) de suelo total (sólidos más el espacio poroso) $\left(\frac{X \text{ (cm}^3\text{) poros}}{100 \text{ (cm}^3\text{) suelo(sólidos+espacio poroso)}}\right)$

Porcentaje de humedad gravimétrica:

El porcentaje de humedad gravimétrica se puede estimar de manera simple por medio de los pesos húmedo y seco

$$\%HG = \left(\frac{P_{sh} - P_{SS_{105^{\circ}C-24h}}}{P_{SS_{105^{\circ}C-24h}}} \right) * 100$$

Esta ecuación escrita de manera simplificada:

$$\%HG = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) * 100$$

$$\%HG = \frac{P_{ag}}{P_{ss}} * 100$$

Psh = peso de suelo húmedo (g)

$P_{SS_{105^{\circ}C-24h}}$ = peso de suelo seco (g) a 105 °C durante 24 horas

Pss = peso de suelo seco (g)

%HG = porcentaje de humedad volumétrica

Pag = peso del agua (g)

Porcentaje de humedad volumétrica:

$$\% \theta_{vol} = \frac{\%HG * D_a}{D_{agua}}$$

Da = densidad aparente (g/cm³)

D_{agua} = densidad del agua (considerada usualmente igual a 1,0 g/cm³)

%HG = porcentaje de humedad volumétrica

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Pero como se considera que la densidad del agua es igual a 1,0 g/cm³, queda de la siguiente manera:

$$\% \theta_{\text{vol}} = \% \text{HG} * \text{Da}$$

$$\% \text{HV} = \% \text{HG} * \text{Da}$$

$$\text{Da} = \frac{\% \text{HV}}{\% \text{HG}}$$

$$\% \text{HG} = \frac{\% \text{HV}}{\text{Da}}$$

y también está definido por la ecuación:

$$\% \text{HV} = \frac{\text{Vag}(m^3)}{\text{Vts}(m^3)} * 100$$

$$\text{Vts}(m^3) = \frac{\text{Vag}(m^3)}{\% \text{HV}} * 100$$

$$\text{Vag}(m^3) = \frac{\text{Vts}(m^3) * \% \text{HV}}{100}$$

$$\text{LaminaAgua}(\text{mm}) = \text{Vag}(\text{mm}) = \frac{\text{Vag}(m^3) * 1000}{\text{área}(m^2)}$$

$$\text{Vag}(m^3) = \frac{\text{LaminaAgua}(\text{mm}) * \text{área}(m^2)}{1000}$$

$$\text{área}(m^2) = \frac{\text{Vag}(m^3) * 1000}{\text{LaminaAgua}(\text{mm})}$$

Vag = volumen de agua en el suelo (cm³)

%HV = porcentaje de humedad volumétrica

Vts = volumen total del suelo (cm³) (incluye espacio ocupado con agua y/o aire y el espacio ocupado por los sólidos)

CC BY-NC-ND 4.0

No se debe de confundir los porcentajes cuando se realizan estimaciones por medio de las ecuaciones como se muestra a continuación

1- Ecuaciones correcta:

$$\%P = \%HV + \%Aire$$

$$\%Aire = \%P - \%HV$$

$$\%HV = \%P - \%Aire$$

2- Ecuaciones incorrecta:

$$\%P = \cancel{\%HG} + \%Aire$$

$$\%Aire = \%P - \cancel{\%HG}$$

$$\cancel{\%HG} = \%P - \%Aire$$

Densidad aparente o peso específico aparente:

$$Da = \frac{PSS_{105^{\circ}C-24h}}{Vts}$$

Da = densidad aparente (g/cm³)

$PSS_{105^{\circ}C-24h}$ = peso de suelo seco (g) a 105 °C durante 24 horas

Vts = volumen total del suelo (cm³) (incluyendo espacio ocupado con agua y aire y el espacio ocupado por los sólidos)

Densidad real de partículas o peso específico real:

$$Dr = \frac{PSS_{105^{\circ}C-24h}}{Vs}$$

Dr = densidad real de las partículas (g/cm³)

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$P_{SS_{105^{\circ}C-24h}}$ = peso de suelo seco (g) a 105 °C durante 24 horas

V_s = volumen total del suelo (cm^3) (incluyendo solamente el espacio ocupado por los sólidos)

Usualmente cuando no se tiene el valor de densidad aparente se toma un valor de 2,65 g/cm^3 en promedio ya que se considera que este valor es poco variable

Usualmente se toma un valor de densidad del agua se toma un valor de 1,00 g/cm^3 para hacer las estimaciones o cálculos.

En el sistema de USDA la porosidad del suelo se clasifica de la siguiente manera:

- **Macro poros:** Son los poros donde se presenta el movimiento rápido de agua y aire donde el agua se drena libremente y sale del suelo y no está disponible para las plantas y por ello, a dicha agua que se pierde libremente se le llama agua gravitacional. En términos de laboratorio se determina o corresponde a la cantidad de agua que se pierde o se drena después de aplicar una presión o succión de $-\frac{1}{10} atm$ (-0,10 atm o 1,0 mca para el sistema de la UE) o una presión o succión de $-\frac{1}{3} atm$ (-0,3333 atm o 3,33 mca) área el sistema del USDA.
- **Meso poros:** Son los poros donde se encuentra el agua aprovechable para las plantas y por ello se le llama agua biológicamente activa. También al agua contenida en estos poros se le llama agua biológicamente disponible para las plantas. Dentro de estos poros se encuentra tanto en retención y como en movimiento lento del agua en el suelo. Por ello se define como aquellos poros que tienen una humedad retenida en el suelo que se encuentra entre una presión o succión de $-\frac{1}{10} atm$ (-0,10 atm o 1,0 mca para el sistema UE) o una presión o succión de $-\frac{1}{3} atm$ (-0,3333 atm o 3,33 mca)(para el sistema USDA) llamado punto de capacidad de campo y una presión o succión de -15 atm o -150 mca para ambos sistemas llamado punto de marchitez permanente.
- **Micro poros:** Son los poros donde se presenta una gran capacidad para retener agua en contra de la fuerza de la gravedad, pero por ser espacios muy pequeños logran almacenar muy poca agua. El agua que retienen no se encuentra disponible para las plantas porque por definición, las plantas

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

ya no tienen la suficiente presión de succión para poder extraer la muy poca cantidad de humedad que existe en el suelo; no obstante, por ello le llaman a menudo agua no biológicamente activa. En un laboratorio de suelos el agua que retienen estos micro poros en el suelo corresponde a la cantidad de agua que queda en el suelo después de aplicar una presión de succión de -15 atm o -150 mca.

El sistema de la UE se trabaja muy a menudo solamente con macro poros y micro poros.

Estados de humedad en el suelo

- **Sub-saturación:** Son todos los estados de humedad que se presentan en el espacio poroso del suelo por debajo del punto de saturación.
- **Semi-saturación:** Estado intermedio entre el punto de saturación total y el punto de capacidad de campo (CC). Se presenta cuando la humedad del suelo tiene lleno de agua los micro poros y los meso poros, pero los macroporos no se encuentran completamente llenos o saturados, sino; que se encuentra en parte lleno de agua (saturado) y en parte lleno de aire (no saturado).
- **Saturación:** por definición todo el suelo se encuentra lleno de agua y no tiene aire y si se considera que todos los poros del suelo se encuentran llenos de agua entonces los macro, meso y micro poros son los que contienen toda esa humedad. Se considera en este estado de manera teórica que no queda aire en el suelo pero en la realidad o de manera práctica, si puede ser que exista algo de aire aunque en muy baja proporción y por ello, se considera usualmente despreciable.
- **Insaturado o no saturado:** Son todos los estados de humedad que se encuentran en el suelo que son iguales o menores al punto de capacidad de campo
- **Sobre saturado: NO EXISTE.** A veces de manera coloquial se le llama así cuando el suelo se encuentra con agua en su superficie como el encharcamiento o cuando se presenta un flujo de agua sea laminar o turbulento en la superficie del suelo pero esta agua no se encuentra dentro del suelo (agua externa al suelo) y por ello no se encuentra en el espacio poroso del suelo y como tal; esta agua no pertenece al suelo y usualmente,

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

se pierde de manera muy rápida. Además, es normal encontrar suelos en su superficie con flujos laminares o turbulentos de agua o encharcamientos y el suelo no se encuentra saturado internamente en uno o varios de sus horizontes y esto nos define que existen cantidades de aire en todo el sistema poroso del perfil del suelo nada despreciables lo cual indica que no existe en este caso la sobre saturación.

Capacidad de Campo

La capacidad de campo "CC" depende del tipo del suelo (no de la planta) y se encuentra debajo de los macroporos. Los tres tipos son:

- **CC_{real}**: Es el punto en donde se presenta la cantidad de agua máxima que retiene un suelo en contra de la fuerza de la gravedad que presenta un buen drenaje profundo (> 2,0 m). Es cuando un suelo saturado ha drenado en su perfil completamente el agua gravitacional lo cual corresponde o pertenece al movimiento rápido del agua en el suelo saturado o semisaturado. Se considera que en este punto se encuentran los meso poros y los micro poros llenos con agua y los macroporos se encuentran llenos de aire con muy poca agua porque ha drenado el agua gravitacional.
- **CC_{equivalente (USDA)}**: Es el punto donde se presenta la cantidad de agua máxima en el suelo después de aplicar una presión o una succión de $-\frac{1}{3} atm$ ($-0,3333 atm$ o $3,33 mca$). Este punto de humedad es el que se encuentra en un laboratorio al aplicar dicha presión a las muestras indisturbadas de suelos y este valor es el que normalmente es utilizado en las fórmulas para calcular las láminas y /o volúmenes de agua o de riego.
- **CC_{equivalente (UE)}**: Es el punto donde se presenta la cantidad de agua máxima en el suelo después de aplicar una presión o succión de $-\frac{1}{10} atm$ ($-0,10 atm$ o $1,0 mca$). Usualmente, esta CC_{equivalente} de (UE) se acerca más a la CC_{real}.

Por lo anterior, es normal encontrar en la literatura que la capacidad de campo equivalente teórica de los suelos se encuentra a $-0,10 atm$ o a $-0,33 atm$ dependiendo de la metodología utilizada.

La cantidad de agua que se presenta en el punto de CC_{real} muy frecuentemente es mayor que la cantidad de agua que se presenta en el punto CC_{equivalente} del

CC BY-NC-ND 4.0

USDA y se acerca más al punto $CC_{\text{equivalente de UE}}$ ($CC_{\text{equivalente de UE}} > CC_{\text{equivalente de USDA}}$).

La capacidad de campo se puede estimar por ecuaciones empíricas generales como son las siguientes:

$$ccg(0,33 \text{ atm}) = 0,6382 * \% \text{ arcilla} + 0,2845 * \% \text{ limo} + 0,0507 * \% \text{ arena}$$

$$ccg(0,33 \text{ atm}) = 0,555 * \% \text{ arcilla} + 0,187 * \% \text{ limo} + 0,027 * \% \text{ arena}$$

$$ccg(0,33 \text{ atm}) = 0,61 * \% \text{ arcilla} + 0,25 \% \text{ limo} + 0,023 * \% \text{ arena}$$

$$ccg(0,33 \text{ atm}) = 15,691 + 0,566 * \% \text{ arcilla} + 0,092 * \% \text{ limo} \\ + 1,787 * \% \text{ materia orgánica} \\ + 8,412 * \delta ap$$

$$ccv(0,33 \text{ atm}) = 0,2576 - 0,002 * \% \text{ arena} + 0,0036 * \% \text{ arcilla} \\ + 0,0299 * \% \text{ materia orgánica}$$

$$ccv(0,1 \text{ atm}) = 0,4118 - 0,003 * \% \text{ arena} + 0,0023 * \% \text{ arcilla} \\ + 0,0317 * \% \text{ materia orgánica}$$

Ecuación específica para suelos arenosos:

$$ccg = 8,658 + 2,571 * \% \text{ materia orgánica} + 0,296 * \% \text{ limo}$$

Donde:

- ccg = capacidad de campo gravimétrica (porcentaje de peso en agua).
- ccv = capacidad de campo gravimétrica (porcentaje en volumen de agua).

Punto de Marchitez Permanente

El punto de marchitez permanente depende del tipo de planta (no del suelo) y abarca la humedad que se encuentra en los microporos. Los tres tipos son:

- **PMP** **Por Definición:** Es el punto de secado del suelo donde se presenta una baja cantidad de agua en el sistema poroso del suelo o la matriz del suelo donde la planta llega a tal punto de marchitamiento que irreversiblemente muere aunque se le agregue agua. Usualmente se considera agua biológicamente NO aprovechable o NO activa biológicamente.

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

- **El PMP fisiológico o real:** Es el punto de secado de humedad en el suelo que se debería de utilizar para estimar la cantidad de agua que ya NO está disponible o NO es útil para algún género, especie y variedad específica de planta y corresponde al agua (**%H_{pmpf}**) que biológicamente ya NO es aprovechable para la planta o cultivo que se tiene porque la planta no tiene la capacidad de absorberla. Este punto es exclusivo de cada cultivo ya que depende de la capacidad de succión que tiene cada género, especie y variedad de planta.

De esta cantidad de agua en el suelo la planta comienza a morir o en un proceso de decadencia o disminución de sus capacidades que se refleja en un marchitamiento continuo y ascendente hasta la muerte debido a que no puede succionarla, porque la planta ante el estrés hídrico entra en un mecanismo de sobrevivencia, cierra los estomas y corta la transpiración para no perder agua; lo cual se produce de manera natural un calentamiento mayor en ella y este mecanismo o proceso de sobrevivencia se presenta a través del tiempo y puede durar días, semanas o meses que corresponde al tiempo en que tarda en morir (punto de marchitez donde irreversiblemente muere (**PMP_{Por Definición}**)). Aunque la planta ya no puede succionar el agua que está en el suelo en todo el tiempo (horas, días o meses) del marchitamiento continuo y ascendente (tiempo de mecanismos de supervivencia), el suelo se sigue secando y a menudo cuando la planta llega al punto de morir, el suelo está mucho más seco que cuando la planta ya no pudo absorber más agua. De todo lo anterior, podemos observar que existe un **PMP fisiológico (la planta ya no puede absorber agua)** y un **PMP por definición (cuando la planta muere)** y estos a su vez, presentan diferentes cantidades de humedad en el suelo siendo mucho menor el punto de marchitez permanente cuando la planta muere. En este punto se encuentra con agua los microporos

- **PMP equivalente:** Es el punto de humedad en el suelo donde la cantidad de agua que se presenta después de aplicar una presión o succión de -15 atm o de -150 mca. Este punto de humedad es el que se encuentra en un laboratorio al aplicar dicha presión a las muestras indisturbadas de suelos y este valor es el que normalmente es utilizado en las fórmulas para calcular las láminas de agua para riego, volúmenes de agua a aplicar a las plantas y otros.

El punto de marchitez permanente se puede estimar por ecuaciones empíricas generales siguientes:

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$ccg = 2,0421 * pmpg - 2,3823$$

$$pmpg = \frac{ccg + 2,3823}{2,0421}$$

$$ccg = 1,3514 * pmpg - 6,7567$$

$$pmpg = \frac{ccg + 6,7567}{1,3514}$$

$$pmpg = 0,74 * ccg - 5$$

Las siguientes ecuaciones sirven para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar:

$$\text{suelos arcillosos } pmp = \frac{cc}{2,0}$$

$$\text{suelos medios } pmp = \frac{cc}{2,1}$$

$$\text{suelos livianos } pmp = \frac{cc}{2,2}$$

Conociendo los % de arena, limo, arcilla, materia orgánica y densidad aparente:

$$pmpg = 0,57 * \% \text{ arcilla} + 0,12 * \% \text{ limo} + 0,001 * \% \text{ arena}$$

$$pmpg = 5,387 + 0,469 * \% \text{ arcilla} + 0,02 * \% \text{ limo} + 0,6909 * \% \text{ materia orgánica} + 4,949 * Da$$

$$pmpv = 0,026 + 0,005 * \% \text{ arcilla} + 0,0158 * \% \text{ materia orgánica}$$

Donde:

- ccg = capacidad de campo (porcentaje en peso de agua)
- ccv = capacidad de campo (porcentaje en volumen de agua)
- pmpg = punto de marchitez permanente (porcentaje en peso de agua)

CC BY-NC-ND 4.0

- pmpv = punto de marchitez permanente volumétrico (porcentaje en volumen de agua)
- D_a = densidad aparente (g/cm^3)

Conocimiento del punto de saturación (ps):

$$ccg = \left(\frac{ps}{1,84} \right) - 0,48$$

Se pueden observar las definiciones anteriores en las figuras 1, 2, 3 y 4 siguientes:

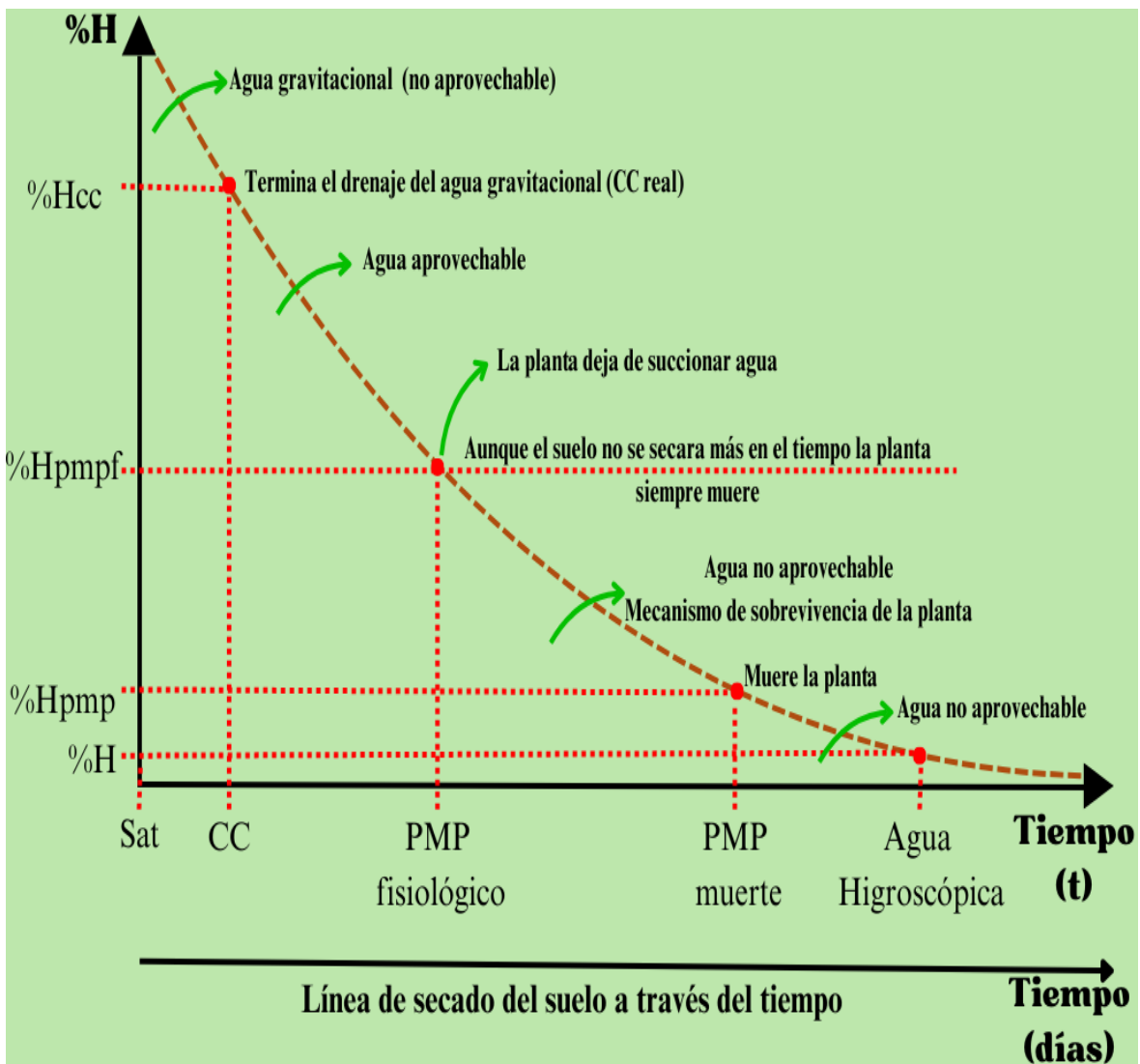


Figura 1: Agua en el suelo y sus puntos y rangos de humedad

CC BY-NC-ND 4.0

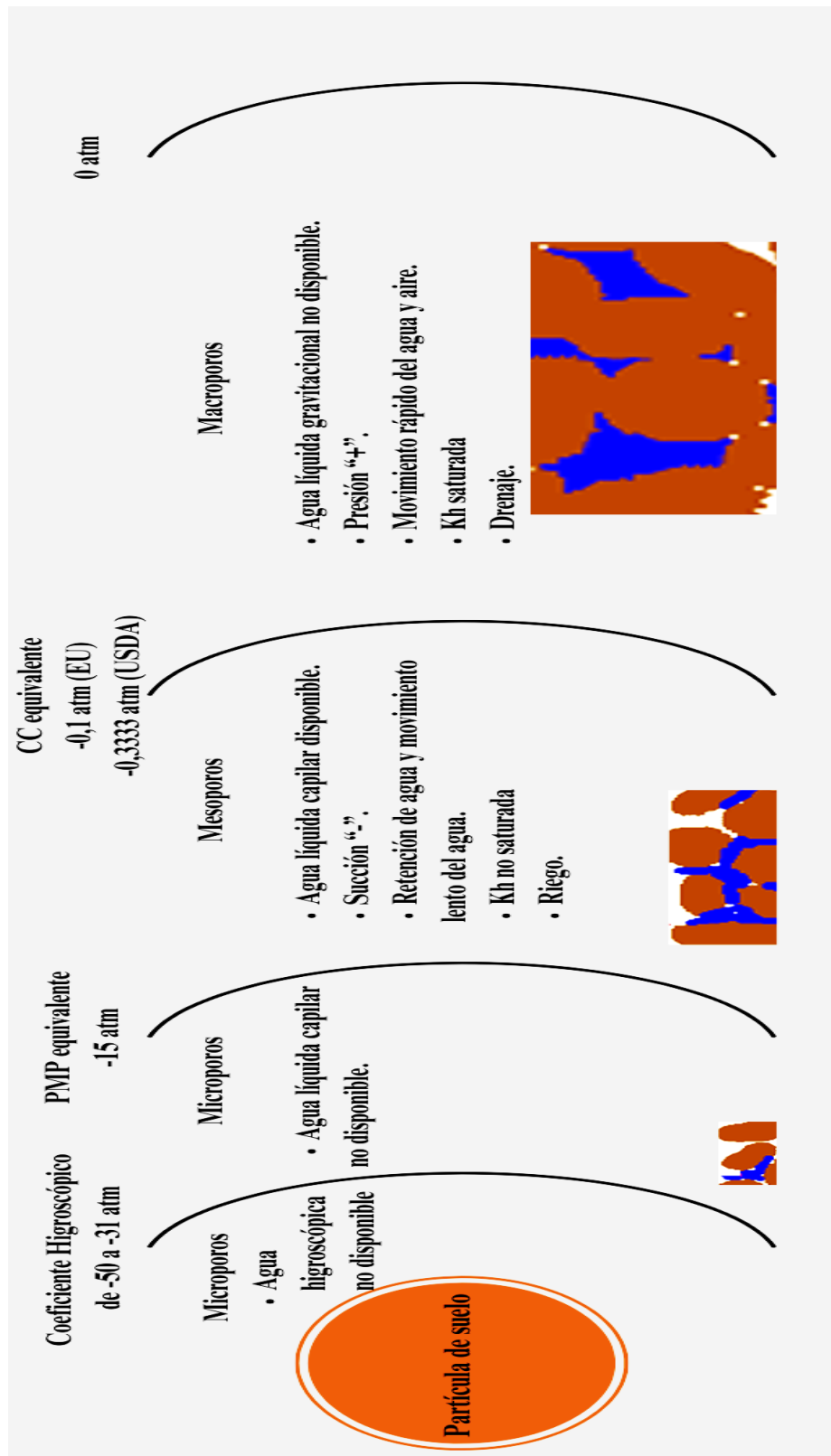


Figura 2: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con mayor cantidad de macro poros que de meso y micro poros

[CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

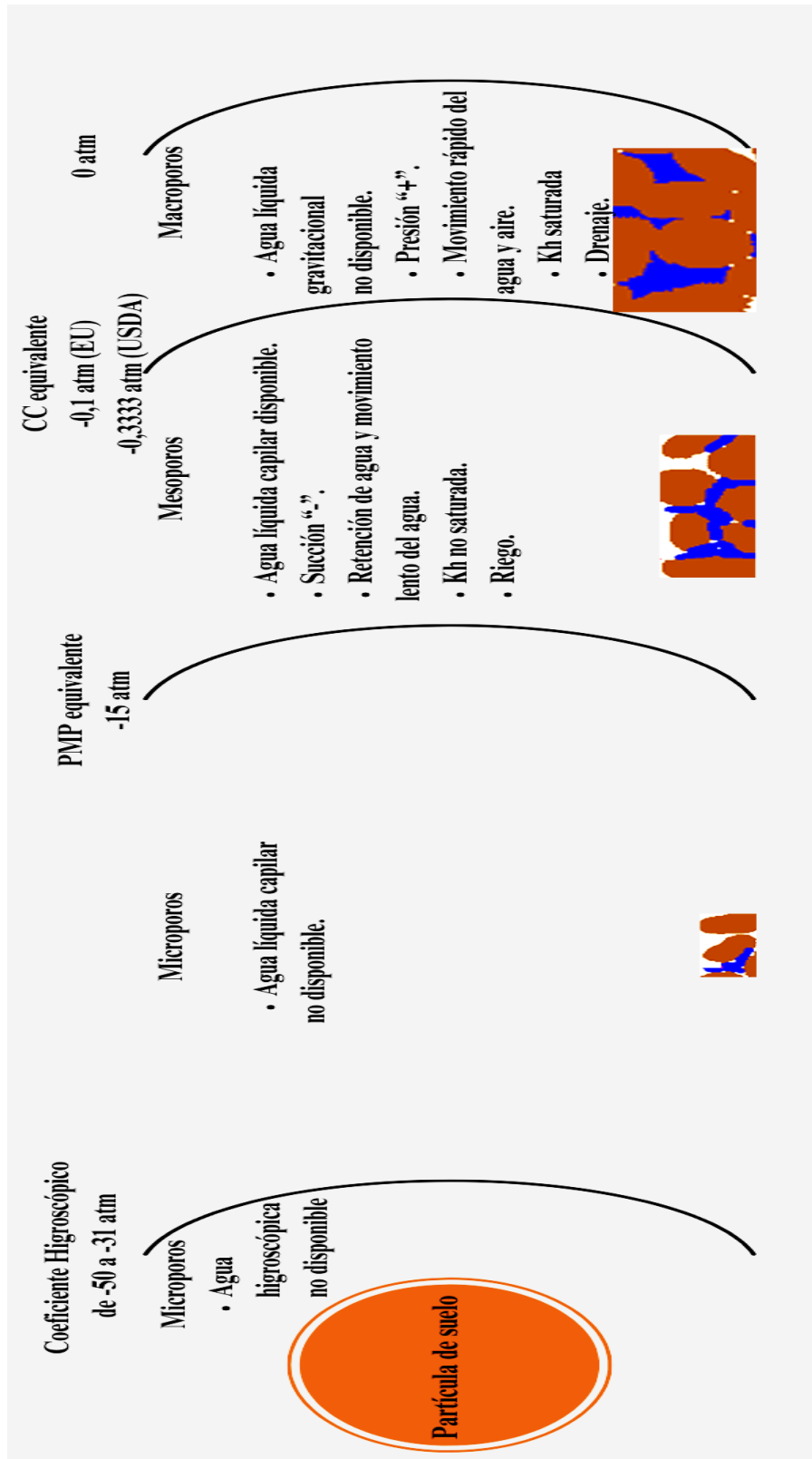


Figura 3: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con mayor cantidad de micro poros que de meso y macro poros

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

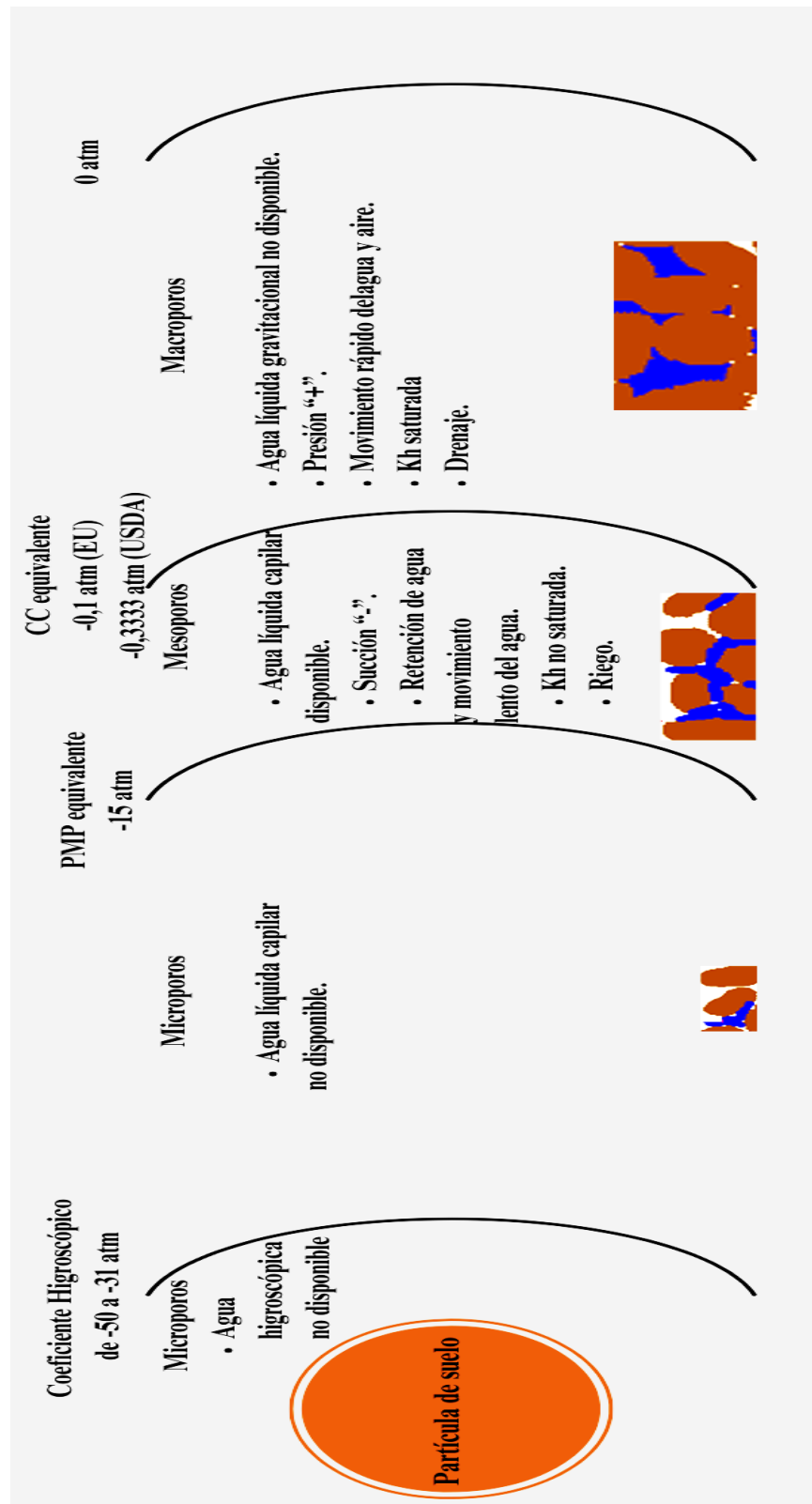


Figura 4: Variación de los contenidos de humedad en el suelo con muy poca cantidad de meso poros que de micro y macro poros

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Manejo y deducción de ecuaciones en la física de suelos y del agua en el suelo

Ecuaciones básicas y comunes

Porcentaje de porosidad total, de sólidos, de aire, de agua o humedad volumétrica y otros (porcentaje volumétrica):

$$\%P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) * 100$$

$$\%Sol + \%P = 100$$

$$\%Sol = 100 - \%P$$

$$\%P = 100 - \%Sol$$

$$\%P = \%Ai + \%Ag$$

$$\%P = \%Ai + \%HV$$

$$\%Sol + \%Ai + \%HV = 100$$

$$\%HV = 100\% - \%Sol - \%Ai$$

$$\%Sol = 100\% - \%HV - \%Ai$$

$$\%Ai = 100\% - \%HV - \%Sol$$

$$\%P = \frac{V_{tp}}{V_{ts}} * 100$$

$$V_{ts} = V_s + V_p$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%P = \frac{V_s + V_p}{V_{ts}} * 100$$

%P = porcentaje de poros (es un porcentaje volumétrico)

Da = densidad aparente (g/cm³)

Dr = densidad real de las partículas (g/cm³)

%Sol = porcentaje volumétrico ocupado por los sólidos

%Ai = porcentaje volumétrico ocupado por el aire

%Ag = porcentaje volumétrico ocupado por el agua

%HV = porcentaje de humedad volumétrica

Vtp = volumen total de los poros (cm³)

Vts = volumen total del suelo (cm³) (incluye espacio ocupado con agua y/o aire y el espacio ocupado por los sólidos)

Vs = volumen del suelo (cm³) (incluye espacio ocupado por los sólidos principalmente debido al suelo)

Deducción de ecuaciones

Otras maneras para calcular la densidad real de partículas o peso específico real, densidad aparente, porcentaje de humedad volumétrica y el porcentaje de aire:

Deduciendo otras ecuaciones de la siguiente ecuación por medio de despeje de variables:

$$\%P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) * 100$$

$$\frac{\%P}{100} = 1 - \frac{D_a}{D_r}$$

$$\frac{\%P}{100} - 1 = - \frac{D_a}{D_r}$$

$$1 - \frac{\%P}{100} = \frac{D_a}{D_r}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{\%P}{100}}$$

Uniendo las ecuaciones siguientes (Recordar que $\%HV = \%Ag$)

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{\%P}{100}}$$

$$\%P = \%Ai + \%Ag$$

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{\%Ai + \%Ag}{100}}$$

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{\%Ai + \%HV}{100}}$$

De donde podemos deducir por despeje de las siguientes ecuaciones:

$$1 - \frac{\%Ai + \%Ag}{100} = \frac{Da}{Dr}$$

$$-\frac{\%Ai + \%Ag}{100} = \frac{Da}{Dr} - 1$$

$$\%Ai + \%Ag = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)$$

$$\%Ai = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - \%Ag$$

$$\%Ai = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - \%HV$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%Ag = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - \%Ai$$

$$\%HV = 100 * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) - \%Ai$$

Otras maneras para calcular la densidad aparente o peso específico aparente, porcentaje de humedad gravimétrica, porcentaje de humedad volumétrica y densidad real de partículas:

Deduciendo de las siguiente ecuación:

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$Da = \frac{\%HV}{\%HG}$$

$$\frac{\%P}{100} = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

$$\frac{\%P}{100} - 1 = - \frac{Da}{Dr}$$

$$1 - \frac{\%P}{100} = \frac{Da}{Dr}$$

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

$$\frac{\%HV}{\%HG} = Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

$$\%HV = \%HG * Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%HG = \frac{\%HV}{Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)}$$

$$Dr = \frac{\%HV}{\%HG * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)}$$

Otras maneras para estimar la densidad aparente, densidad real de partículas, volumen total de poros, volumen total del suelo, el volumen de agua, peso de suelo húmedo y peso de suelo seco por medio de las siguientes deducciones:

Deduciendo de las siguiente ecuación:

$$\%P = \frac{V_{tp}}{V_{ts}} * 100$$

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\frac{V_{tp}}{V_{ts}} * 100 = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\frac{V_{tp}}{V_{ts}} = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

$$\frac{V_{tp}}{V_{ts}} + 1 = - \frac{Da}{Dr}$$

$$1 - \frac{V_{tp}}{V_{ts}} = \frac{Da}{Dr}$$

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{V_{tp}}{V_{ts}}\right)$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Dr = \frac{Da}{1 - \frac{Vtp}{Vts}}$$

$$Vtp = Vts * \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)$$

$$Vts = \frac{Vtp}{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

Deduciendo de las siguiente ecuación:

$$Vts = \frac{Vag}{\%HV} * 100$$

$$Vts = \frac{Vtp}{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

$$\frac{Vag}{\%HV} * 100 = \frac{Vtp}{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)}$$

$$Vag = \frac{Vtp * \%HV}{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100}$$

$$\%HV = \frac{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 * Vag}{Vtp}$$

$$1 - \frac{Da}{Dr} = \frac{Vtp * \%HV}{100 * Vag}$$

$$\frac{Da}{Dr} = \frac{Vtp * \%HV}{100 * Vag} - 1$$

$$Da = Dr * \left(\frac{Vtp * \%HV}{100 * Vag} - 1\right)$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Dr = \frac{Da}{\left(\frac{Vtp * \%HV}{100 * Vag} - 1\right)}$$

Deduciendo de la siguiente ecuación:

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%HV = \frac{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 * Vag}{Vtp}$$

$$\%HG * Da = \frac{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 * Vag}{Vtp}$$

$$\%HG = \frac{\left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100 * Vag}{Vtp * Da}$$

Deduciendo de la siguiente ecuación:

$$\%HG = \left(\frac{Psh - Pss}{Pss}\right) * 100$$

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%HV = \left(\frac{Psh - Pss}{Pss}\right) * 100 * Da$$

$$Da = \frac{\%HV}{\left(\frac{Psh - Pss}{Pss}\right) * 100}$$

$$Da = \frac{\%HV * Pss}{(Psh - Pss) * 100}$$

$$Da * 100 = \frac{\%HV * Pss}{Psh - Pss}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Da * 100 (Psh - Pss) = \%HV * Pss$$

$$Da * 100 * Psh = \%HV * Pss + Da * 100 * Pss$$

$$Da * 100 * Psh = Pss * (\%HV + Da * 100)$$

$$Psh = \frac{Pss * (\%HV + Da * 100)}{Da * 100}$$

$$Pss = \frac{\%HV + Da * 100}{Da * 100 * Psh}$$

Igualando las siguientes ecuaciones:

$$Da = \frac{\%HV * Pss}{(Psh - Pss) * 100}$$

$$\%HV = \frac{Vag}{Vts} * 100$$

$$Da = \frac{\frac{Vag}{Vts} * 100 * Pss}{(Psh - Pss) * 100}$$

$$Da = \frac{Vag * Pss}{Vts * (Psh - Pss)}$$

Igualando las siguientes ecuaciones:

$$1 - \frac{\%P}{100} = \frac{Da}{Dr}$$

$$\%P = 100 - \%Sol$$

$$1 - \frac{100 - \%Sol}{100} = \frac{Da}{Dr}$$

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{100 - \%Sol}{100}\right)$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{100}{100} + \frac{\%Sol}{100}\right)$$

$$Da = Dr * \left(1 - 1 + \frac{\%Sol}{100}\right)$$

$$\mathbf{Da = Dr * \frac{\%Sol}{100}}$$

$$Dr = \frac{Da}{\frac{\%Sol}{100}}$$

$$\mathbf{Dr = \frac{100 * Da}{\%Sol}}$$

$$\mathbf{\%Sol = \frac{100 * Da}{Dr}}$$

Deducción de la fórmula para encontrar la altura de agua (mm) teniendo el porcentaje de humedad volumétrica y la altura del suelo en donde se encuentra dicha humedad

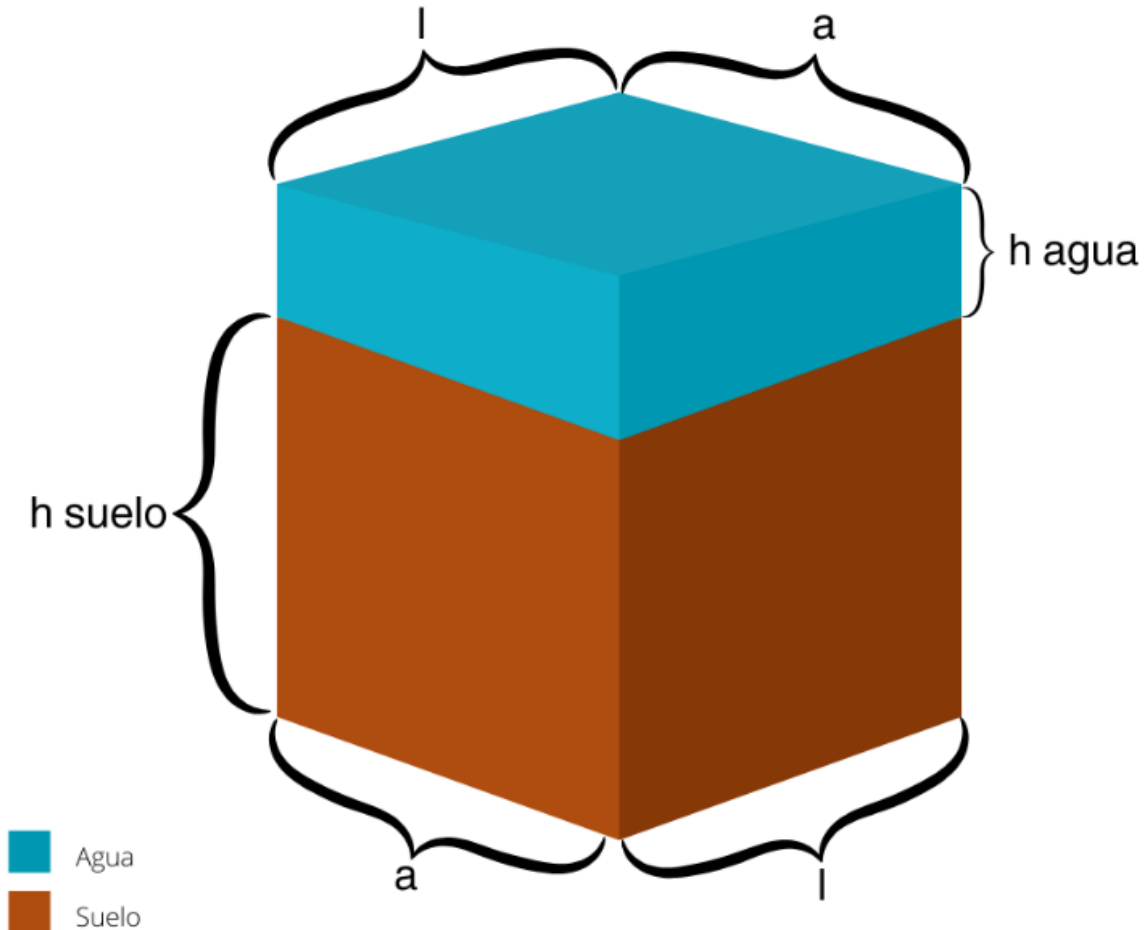


Figura 5: Variación de los contenidos de humedad en el suelo dependiendo de la cantidad de macro, meso y micro poros 3

Esta figura 5 supone que el agua se extrae de dentro del suelo del sistema poroso del y se le da la forma del suelo

De la figura podemos encontrar que los volúmenes de agua y del suelo se pueden calcular de la siguiente manera:

$$V_{agua}(m^3) = a(m) * l(m) * h_{agua}(m)$$

$$V_{suelo}(m^3) = a(m) * l(m) * h_{suelo}(m)$$

CC BY-NC-ND 4.0

Donde:

V= volumen de agua

a= ancho

l = largo

h= altura

Habíamos visto que una definición de la humedad volumétrica en porcentaje es la siguiente relación:

$$\%HV = \frac{V_{agua}(m^3)}{V_{suelo}(m^3)} * 100$$

Relacionando estas ecuaciones tenemos que:

$$\%HV = \frac{a * l * h_{agua}}{a * l * h_{suelo}} * 100$$

$$\%HV = \frac{h_{agua}}{h_{suelo}} * 100$$

$$h_{agua}(m) = \frac{\%HV * h_{suelo}(m)}{100}$$

$$h_{agua}(mm) = \frac{\%HV * h_{suelo}(mm)}{100}$$

De esta ecuación podemos obtener el volumen de agua en términos de una lámina de agua

Deducción de la fórmula para encontrar la altura de agua (mm) disponible para las plantas y de la fórmula de la lámina de riego

Como se definió, el agua útil es aquella que se encuentra entre el punto de capacidad de campo y el punto de marchitez permanente:

$$\text{Meso poros} = \text{Agua útil} = CC - PMP$$

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Usualmente se utilizan los valores de capacidad de campo y punto de marchitez permanente equivalentes y por ello los porcentajes de humedad gravimétrica y volumétrica útil se expresan de la siguiente forma:

$$\%HG_{util} = \%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)}$$

$$\%HV_{util} = (\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)}) * Dap$$

$$\frac{h_{agua}}{h_{suelo}} * 100 = (\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)}) * Dap$$

Donde la lámina de agua útil en el suelo queda expresada en el siguiente relación matemática:

$$h_{agua} = \frac{(\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Dap * h_{suelo}$$

$$h_{agua} = \frac{(\%HV_{cc(0,33atm)} - \%HV_{PMP(15atm)})}{100} * h_{suelo}$$

Las expresiones matemáticas para la lámina de agua útil para los otros puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente son:

$$h_{agua} = \frac{(\%HG_{cc(0,1atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Dap * h_{suelo}$$

$$h_{agua} = \frac{(\%HV_{cc(0,1atm)} - \%HV_{PMP(15atm)})}{100} * h_{suelo}$$

$$h_{agua} = \frac{(\%HG_{cc(real)} - \%HG_{PMP(real)})}{100} * Dap * h_{suelo}$$

$$h_{agua} = \frac{(\%HV_{cc(real)} - \%HV_{PMP(real)})}{100} * h_{suelo}$$

Para trasladar las expresiones matemáticas para la lámina de agua útil a lámina de riego máxima que se puede aplicar en un suelo se debe de cambiar la profundidad del suelo por la profundidad de las raíces (Pr) del cultivo que se tiene presente

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Da * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(0,33atm)} - \%HV_{PMP(15atm)})}{100} * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(0,1atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Da * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(0,1atm)} - \%HV_{PMP(15atm)})}{100} * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(real)} - \%HG_{PMP(real)})}{100} * Da * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(real)} - \%HV_{PMP(real)})}{100} * Pr$$

También se puede calcular la lámina de riego que se necesita para llevar de una humedad actual cualquiera, pero **menor** al punto de capacidad de campo hasta el punto de capacidad de campo y las expresiones matemáticas para eso serían:

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{Actual})}{100} * Da * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(0,33atm)} - \%HV_{Actual})}{100} * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(0,1atm)} - \%HG_{Actual})}{100} * Da * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(0,1atm)} - \%HV_{Actual})}{100} * Pr$$

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(real)} - \%HG_{Actual})}{100} * Da * Pr$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Lr = \frac{(\%HV_{cc(real)} - \%HV_{Actual})}{100} * Pr$$

Todas estas fórmula de lámina de agua y lámina de riego deben de ser utilizadas para cada horizonte hasta la profundidad a ser analizada y estimada del perfil del suelo, ya que los valores de humedad gravimétrica y volumétrica de los puntos de capacidad de campo y punto de marchitez permanente son diferentes en cada uno de los horizontes del suelo presentes en la profundidad de estudio.

Ejemplo 1 de cálculo: se tienen los siguientes datos de humedad del suelo en un horizonte "A".

$$Dap = 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$CC_{g(0,1)} = 41 \%$$

$$PMP_{g(15)} = 23 \%$$

$$Pr = 230 \text{ mm (23 cm)}$$

$$\%HG_{ag \text{ sat}} = 52 \%$$

El cálculo del agua útil gravimétrico y volumétrico:

$$Agua \text{ útil} = CC - PMP$$

$$\%AU_g = 41\%HG - 23\%HG$$

$$\%AU_g = 18 \%HG$$

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%AU_v = 18 \%HG * 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$\%AU_v = 22,14 \% \text{ volumétrico}$$

1. Cálculo de la lámina de riego

$$h_{agua} = \frac{(\%HG_{cc(0,1atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Dap * h_{suelo}$$

$$h_{agua} = \frac{(41\%g - 23\%g)}{100} * 1,23\text{g/cm}^3 * 230\text{mm}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Lr = 50,92 \text{ mm}$$

2. ¿Cuánta agua falta (en m³ y en mm) para llegar hasta la saturación del suelo a esa profundidad en una finca de 6000 m² a una prof = 250 mm si el suelo tuviera un 8% de humedad gravimétrica actualmente?

Para resolver esta pregunta vamos a utilizar la siguiente ecuación:

$$V_{ag} = \frac{V_{ts} * \%HV}{100}$$

Calculando las humedades volumétricas saturada, a capacidad de campo y al punto de humedad en que se encuentra el suelo o actual (act):

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%HV_{sat} = 52 \%g * 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$\%H_{vsat} = 63,96 \% \text{ volumétrico}$$

$$\%HV_{cc} = 41 \%g * 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$\%HV_{cc} = 50,43 \% \text{ volumétrico}$$

$$\%HV_{act} = 8\%g * 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$\%HV = 9,84\%$$

Cálculo del porcentaje volumétrico desde la humedad actual hasta el punto de saturación:

$$\% \text{ Agua}_v = \%HV_{sat} - \%HV_{act}$$

$$\% \text{ Agua}_v = 63,96\% - 9,84\%$$

$$\% \text{ Ag}_v = 54,12 \%$$

Cálculo del volumen de suelo:

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{\text{suelo}} = \text{área} * \text{profundidad}$$

$$V_{\text{suelo}} = 6000 \text{ m}^2 * 0,25 \text{ m}$$

$$\mathbf{V_{\text{suelo}} = 1500 \text{ m}^3 \text{ totales}}$$

Calculando el volumen de agua (m^3 agua):

$$\mathbf{V_{\text{ag}} = \frac{V_{\text{ts}} * \%HV}{100}}$$

$$V_{\text{ag}} = \frac{1500 \text{ m}^3 * 54,12 \%}{100}$$

$$\mathbf{V_{\text{totalAg}} = 811,8 \text{ m}^3 \text{ agua}}$$

Calculando el volumen de agua expresado en lámina de agua (mm agua):

$$\mathbf{\text{LaminaAgua(mm)} = \text{Vag(mm)} = \frac{\text{Vag(m}^3) * 1000}{\text{área (m}^2)}}$$

$$\text{LaminaAgua(mm)} = \text{Vag(mm)} = \frac{811,8 (\text{m}^3) * 1000}{6000 (\text{m}^2)}$$

$$\mathbf{\text{LaminaAgua(mm)} = \text{Vag(mm)} = 135,3}$$

Se puede observar que con $811,8 \text{ m}^3$ de agua o $135,3 \text{ mm}$ de lámina de agua se satura ese perfil del suelo en los 6000 m^2 .

3. ¿Cuánta agua se necesita para llenar los microporos desde la humedad actual mencionada?

Los microporos son todos aquellos poros que se encuentran en el suelo que retienen el agua con una presión de succión de 15 atm llamado punto de marchitez permanente ($\text{PMP}_{g(15)}$). Ya el suelo tiene un $8 \% \text{ HG}$ y tendría que llegar a $\text{PMP}_{g(15)} = 23 \%$.

$$\text{Faltante de humedad} = (23\% \text{HG} - 8\% \text{HG})$$

CC BY-NC-ND 4.0

Faltante de humedad = 15%HG

$$\%HV = \%HG * Da$$

Faltante de humedad (%v) = 15%HG*1,23g/cm³

Faltante de humedad = 18,45%HV

$$h_{\text{agua}}(mm) = \frac{\%HV * h_{\text{suelo}}(mm)}{100}$$

$$\text{Faltante de humedad (mm)} = h_{\text{agua}}(mm) = \frac{18,45\%HV * 250 (mm)}{100}$$

Faltante de humedad (mm) = 46,1250 mm

$$V_{\text{ag}}(m^3) = \frac{\text{Lamina Agua}(mm) * \text{área} (m^2)}{1000}$$

$$V_{\text{ag}}(m^3) = \frac{46,1250 \text{ mm} * 6000 (m^2)}{1000}$$

Faltante de humedad (m³) = 276,78 m³

Se puede observar que con 276,78 m³ se termina de llenar todos los micro poros de los 6000 m²

4. ¿Cuánta agua se necesita para llenar los mesoporos desde la humedad actual mencionada?

El agua que se necesita para llenar los mesoporos es lo que falta de llenar los microporos que corresponde a 276,78 m³ o 46,1250 mm más todos los meso poros.

Los meso poros corresponde a la cantidad de agua que se encuentra entre capacidad de campo y el punto de marchitez permanente llamada agua útil

$$\text{Meso poros} = \text{Agua útil} = CC - PMP$$

$$\text{Meso poros} = \text{Agua útil} = (41\%HG - 23\%HG)$$

CC BY-NC-ND 4.0

Meso poros = Agua útil = 18 %HG

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%HV = 18 \%HG * 1,23 \text{ g/cm}^3$$

$$\%HV = 22,14$$

$$h_{\text{agua}}(\text{mm}) = \frac{\%HV * h_{\text{suelo}}(\text{mm})}{100}$$

$$h_{\text{agua}}(\text{mm}) = \frac{22,14\%HV * 250(\text{mm})}{100}$$

$$h_{\text{agua}}(\text{mm}) = 55,35$$

$$V_{\text{ag}}(\text{m}^3) = \frac{\text{Lamina Agua}(\text{mm}) * \text{área}(\text{m}^2)}{1000}$$

$$V_{\text{ag}}(\text{m}^3) = \frac{55,35(\text{mm}) * 6000(\text{m}^2)}{1000}$$

$$V_{\text{ag}}(\text{m}^3) = 332,1$$

Cálculo del volumen total de agua que se necesita para

$$V_{\text{ag}}(\text{m}^3)\text{Total} = 332,1 + 276,78$$

$$V_{\text{ag}}(\text{m}^3)\text{Total} = 608,88$$

5. ¿Cuánto volumen de aire tenía el suelo cuando estaba a un 8% de HG y cuanto volumen de agua?

El volumen de aire cuando estaba a 8%HG es igual al volumen de aire para llevar el suelo hasta saturación por lo que el volumen de aire es de 811,8 m³.

Cálculo del volumen de agua cuando el suelo se encuentra con un 8% de humedad:

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$\%HV = \%HG * Da$$

$$\%HV = 8\%HG * 1,23g/cm^3$$

$$\%HV = 9,84$$

$$h_{\text{agua}}(mm) = \frac{\%HV * h_{\text{suelo}}(mm)}{100}$$

$$h_{\text{agua}}(mm) = \frac{9,84\%HV * 250 (mm)}{100}$$

$$h_{\text{agua}}(mm) = 24,6$$

$$V_{\text{ag}}(m^3) = \frac{\text{Lamina Agua}(mm) * \text{área} (m^2)}{1000}$$

$$V_{\text{ag}}(m^3) = \frac{24,6(mm) * 6000 (m^2)}{1000}$$

$$V_{\text{ag}}(m^3) = 147,6 m^3 \text{ agua}$$

Todos los cálculos se pueden observar resumidos en la figura 6.

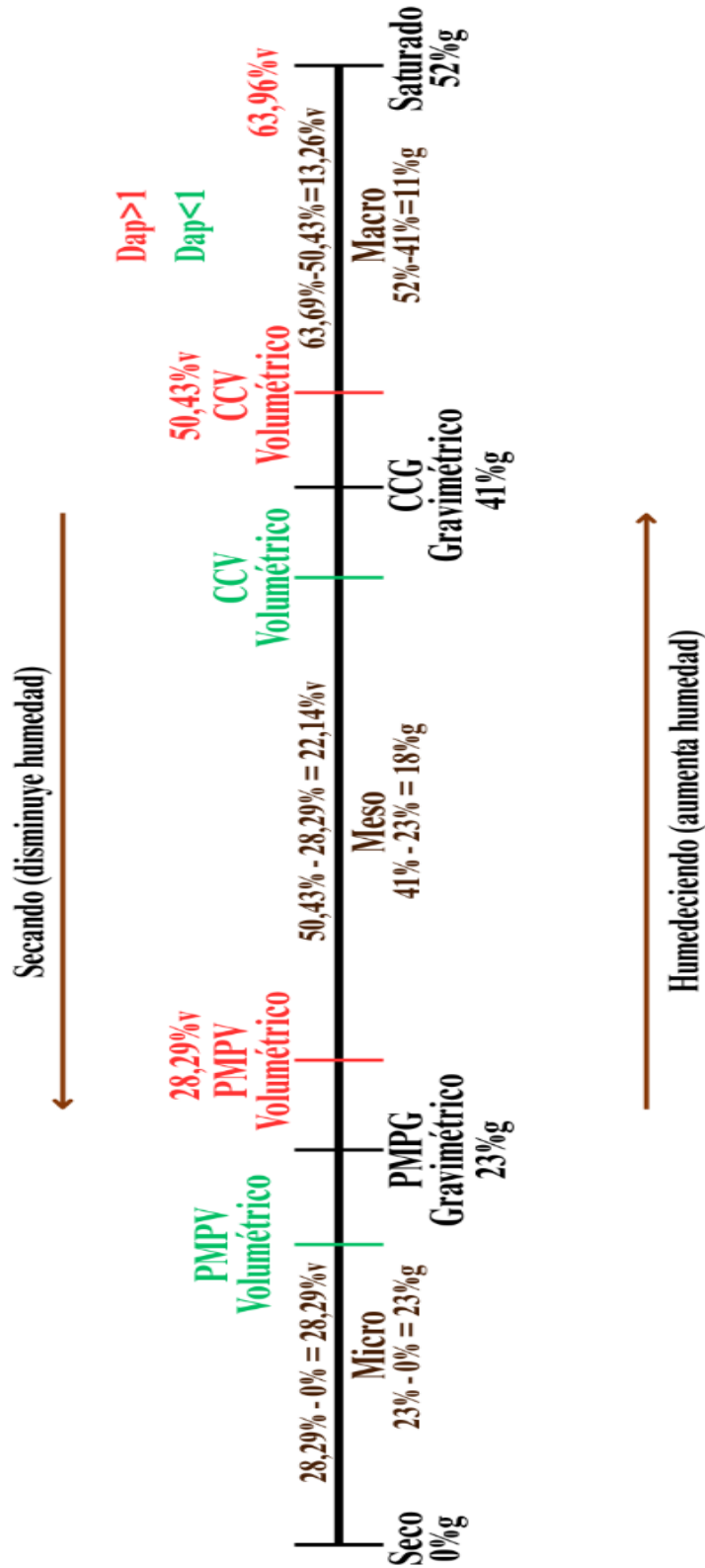


Figura 6: Línea de secado o línea de humedecimiento de un horizonte de suelo

CC BY-NC-ND 4.0

Ejemplo de cálculo de utilización de la fórmula de la lámina de riego y frecuencia de riego suponiendo un cultivo de aguacate

Calcular láminas de riego para diferentes profundidades en el cultivo de aguacate suponiendo que se agota toda el agua útil.

1) Datos

- CC – PMP = 18 %
- $Dap = 1,23 \text{ g/cm}^3$
- $ETp = 4 \text{ mm/día}$
- Profundidades de riego en el perfil del suelo: 10, 25, 45 y 60 cm

2) Fórmulas usadas

$$Lr = \frac{(\%HG_{cc(0,33atm)} - \%HG_{PMP(15atm)})}{100} * Da * Pr$$

$$Fr = \frac{Lr}{Etp}$$

Donde:

Fr = frecuencia de riego (días)(nos dice cada cuantos días se debe de regar)

Etp = evapotranspiración (mm/día)(nos indica cuánta agua se pierde por día del suelo)

3) Cálculos

CC – PMP = 18 %

$Dap = 1,23 \text{ g/cm}^3$

$ETp = 4 \text{ mm/día}$

Pr = 10 cm

$$Lr = \left(\frac{18 \% \text{grav}}{100} * \frac{1,23 \text{ g}}{\text{cm}^3} * 10 \text{ cm} \right) * \frac{10 \text{ mm}}{1,0 \text{ cm}}$$

$$Lr = 22,14 \text{ mm}$$

$$Fr = \frac{Lr}{Etp}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Fr = \frac{22,14 \text{ mm}}{4,0 \text{ mm/día}}$$

$$Fr = 5,5 \text{ días}$$

CC – PMP = 18 %

Dap = 1,23 g/cm³

ETp = 4 mm/día

Pr = 25 cm

$$Lr = \left(\frac{18 \% \text{grav}}{100} * \frac{1,23 \text{ g}}{\text{cm}^3} * 25 \text{ cm} \right) * \frac{10 \text{ mm}}{1,0 \text{ cm}}$$

$$Lr = 55,35 \text{ mm}$$

$$Fr = \frac{Lr}{Etp}$$

$$Fr = \frac{55,35 \text{ mm}}{4,0 \text{ mm/día}}$$

$$Fr = 13,83 \text{ días}$$

CC – PMP = 18 %

Dap = 1,23 g/cm³

ETp = 4 mm/día

Pr = 45 cm

$$Lr = \left(\frac{18 \% \text{grav}}{100} * \frac{1,23 \text{ g}}{\text{cm}^3} * 45 \text{ cm} \right) * \frac{10 \text{ mm}}{1,0 \text{ cm}}$$

$$Lr = 99,63 \text{ mm}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Fr = \frac{Lr}{Etp}$$

$$Fr = \frac{99,63 \text{ mm}}{4,0 \text{ mm/día}}$$

$$Fr = 24,9 \text{ días}$$

CC – PMP = 18 %

Dap = 1,23 g/cm³

ETp = 4 mm/día

Pr = 60 cm

$$Lr = \left(\frac{18 \% \text{grav}}{100} * \frac{1,23 \text{ g}}{\text{cm}^3} * 60 \text{ cm} \right) * \frac{10 \text{ mm}}{1,0 \text{ cm}}$$

$$Lr = 132,84 \text{ mm}$$

$$Fr = \frac{Lr}{Etp}$$

$$Fr = \frac{132,84 \text{ mm}}{4,0 \text{ mm/día}}$$

$$Fr = 33,21 \text{ días}$$

4) Resumen de resultados

Pr (cm)	Lr (mm)	fr (días)
0-10	2,21	5,5
10-25	5,53	13,8
25-45	9,96	24,9
45-60	13,28	33,2

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Volumen de macro, meso y micro poros

$$Volumen\ micro = U * Vs$$

$$Volumen\ meso = Q * Vs$$

$$Volumen\ macro = \mu * Vs$$

Efecto de la lluvia sobre la altura de agua en el nivel freático

La lluvia en su exceso o en su faltante es un factor fundamental en el incremento o decrecimiento del nivel freático. Usualmente si partimos de un suelo seco y comienzan las lluvias a caer, el suelo comienza a llenar los microporos que son los poros que presentan mayor presión de succión de todos los poros, luego los meso poros que tienen capacidad de retención de agua y por último los macro poros que su capacidad de retención tiende a ser menor a la fuerza de la gravedad y debido a esto el movimiento de agua en estos se considera rápido.

Por lo anterior, se considera que un suelo con drenaje libre ya humedecido en su máxima capacidad de retención de humedad llamado capacidad de campo (micro y meso poros llenos de agua) en sus horizontes, las precipitaciones que entren al suelo se acumularán en los macro poros y comenzará a presentarse la saturación del suelo de las partes más profundas y comenzará a incrementar el nivel freático hacia arriba en el perfil del suelo. Para estimar el incremento del nivel freático debido a las precipitaciones se utiliza la siguiente relación matemática:

$$h = \frac{R}{\mu}$$

$$\mu = \frac{R}{h}$$

$$R = h * \mu$$

Donde:

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

H = altura que a la que se eleva el nivel freático debido a una precipitación

R = lluvia o precipitación expresada en una lámina de agua (mm)

μ = macroporosidad (expresada en una proporción, $0 < \mu < 1$)

Ejemplo: De manera hipotética se tiene un suelo profundo y uniforme en su perfil a capacidad de campo hasta una profundidad de 150 cm donde se encuentra el nivel freático. Cae una lluvia fuerte de una lámina de 60 mm. Calcule:

- a. El incremento (mm y cm) en el nivel freático si el suelo tiene una macroporosidad de 35% y cuál es la nueva profundidad del nivel freático

$$h = \frac{R}{\mu}$$

$$h = \frac{60 \text{ mm}}{\left(\frac{35}{100}\right)}$$

$$h = 200 \text{ mm}$$

$$h = 20 \text{ cm}$$

La nueva profundidad del nivel freático es:

$$h = 150 \text{ cm} - 20 \text{ cm}$$

$$h = 130 \text{ cm}$$

- b. El incremento del nivel freático si el suelo tiene una macroporosidad del 8% y cuál es la nueva profundidad del nivel freático

$$h = \frac{R}{\mu}$$

$$h = \frac{60 \text{ mm}}{\left(\frac{8}{100}\right)}$$

$$h = 750 \text{ mm}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$h = 75 \text{ cm}$$

La nueva profundidad del nivel freático es:

$$h = 150 \text{ cm} - 75 \text{ cm}$$

$$h = 75 \text{ cm}$$

Ejemplo: Un suelo no tan profundo que presenta 3 horizontes que están a capacidad de campo presentó una lluvia de 50 mm en una finca de una hectárea (100 m × 100 m) en un suelo con profundidad de 45 cm a capacidad de campo, el cual tiene 3 horizontes que son:

- Horizonte A con Macro Poros = 17% y grosor de 17 cm
- Horizonte B1 con Macro Poros = 12% y grosor de 9 cm
- Horizonte B2 con Macro Poros = 9% y grosor de 24 cm

Se quiere conocer:

1. ¿Cuántos metros cúbicos se infiltraron?
2. ¿Cuáles horizontes se saturaron?
3. En el caso de que un horizonte no se haya saturado, ¿cuántos metros cúbicos de aire le quedaron?
4. ¿Cuánto porcentaje de la macroporosidad está llena de agua y cuánto de aire?

Procedimiento: para resolver el ejemplo confeccionaremos una imagen que muestre los datos de manera tridimensional

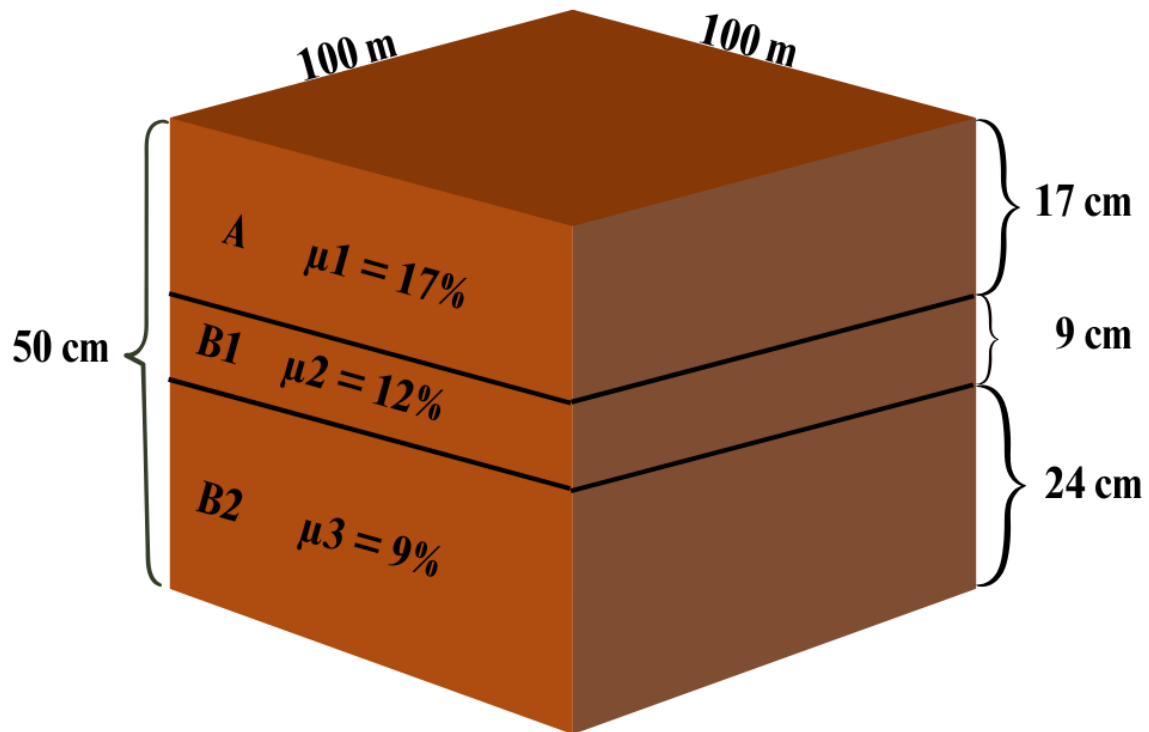


Figura 7: imagen de representación del suelo del ejemplo

1. Metros cúbicos infiltrados:

$$\text{Volumen total de lluvia} = 100 \text{ m} * 100 \text{ m} * 0,05 \text{ m}$$

$$\text{Volumen total de lluvia} = 500 \text{ m}^3$$

Horizonte A:

$$V_A = 10000 \text{ m}^2 * 0,17 \text{ m} * \frac{17}{100}$$

$$V_A = 289 \text{ m}^3$$

Horizonte B1:

$$V_{B1} = 10000 \text{ m}^2 * 0,09 \text{ m} * \frac{12}{100}$$

$$VB1 = 108 \text{ m}^3$$

Horizonte B2:

$$VB2 = 10000 \text{ m}^2 * 0,24 \text{ m} * \frac{9}{100}$$

$$VB2 = 216 \text{ m}^3$$

Máxima retención que puede tener el suelo:

$$V_{total} = Hz A + Hz B1 + Hz B2$$

$$V_{total} = 289 \text{ m}^3 + 108 \text{ m}^3 + 216 \text{ m}^3$$

$$V_{total} = 613 \text{ m}^3$$

Puede retener hasta 613 m³ de agua, por lo tanto muy probablemente todos los 500 m³ de lluvia se infiltraron.

2. Horizontes que se saturaron:

Horizonte B2

$$216 \text{ m}^3 < 500 \text{ m}^3 \text{ (el horizonte B2 se satura)}$$

El agua que queda para el llenado de los otros horizontes

$$500 - 216 = 284 \text{ m}^3$$

Horizonte B1

$$108 \text{ m}^3 < 284 \text{ m}^3 \text{ (el horizonte B1 se satura)}$$

El agua que queda para el llenado de los otro horizonte

$$284 - 108 = 176 \text{ m}^3 \text{ quedan libres de agua}$$

Horizonte A

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

289 m³ > 176 m³ (el horizonte "A" NO se satura pero queda semisaturado)

Como se puede observar solo se saturaron B1 y B2 y el A queda semi saturado

3. Volumen de aire en el horizonte no saturado:

Capacidad de A = 289 m³

Aire = Espacio restante = 289 – 176 = 113 m³

El volumen de aire es de 113 m³

4. Porcentaje de macroporosidad ocupada por el agua:

Volumen total de macroporos = 613 m³

$$\% \text{ Agua} = \left(\frac{\text{agua infiltrada}}{\text{espacio macro poros total}} \right) * 100$$

$$\% \text{ Agua} = \left(\frac{500}{613} \right) * 100$$

% Agua = 81,57 %

Porcentaje de macroporosidad ocupada por el aire:

% Aire = 100 % - 81,57 %

% Aire = 18,43 %

Ejemplo 2: Se tiene un suelo cuyos horizontes se encuentran a capacidad de campo que presenta un nivel freático a 95 cm de profundidad desde la superficie del suelo y tiene un horizonte A de 20 cm con macro poros = 20%, horizonte B1 de 45 cm con macro poros = 15% y horizonte B2 de 30 cm con macro poros = 13%. Se presenta una lluvia extraordinaria de 80 mm ¿En qué nivel desde superficie del suelo se encuentra el nivel freático?

CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

Estado de humedad	Horizonte	Espesor (cm)	Profundidad (cm)	Macroporos
CC	A	20	0-20	0,2
CC	B1	45	20-65	0,15
CC	B2	30	65-95	0,13

Caso del horizonte B2:

$$h_{B2} = \frac{R}{\mu}$$

$$h_{B2} = \frac{80 \text{ mm}}{0,13}$$

$$h_{B2} = 615,3846 \text{ mm}$$

$$h_{B2} = \frac{615,3846 \text{ mm} * 1 \text{ cm}}{10 \text{ mm}}$$

$$h_2 = 61,5384 \text{ cm}$$

Como el horizonte B2 tiene un espesor de 30 cm y el crecimiento del agua es de 61,835 cm entonces el horizonte B2 queda saturado. Para esto, se debe de calcular cuanto queda de lámina en mm pero se debe de tener cuidado porque se debe de calcular la lámina que sobra para el caso del horizonte B2 y luego trasladarlo a la lámina real que es la precipitación que sobra:

$$\text{Lam. B2. Sobra(mm)} = (61,5384 \text{ cm} - 30 \text{ cm})$$

$$\text{Lam. B2. Sobra(mm)} = 31,5384 \text{ cm}$$

$$\text{Lam. B2. Sobra(mm)} = \frac{31,5384 \text{ cm} * 10 \text{ mm}}{1 \text{ cm}}$$

$$\text{Lam. B2. Sobra(mm)} = 315,384 \text{ mm}$$

La precipitación que sobra se calcula utilizando la siguiente relación:

$$R = h * \mu$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$R = 315,384 \text{ mm} * 0,13$$

La precipitación que sobra = R = 41 mm

Caso del horizonte B1:

Calculando el incremento en el nivel freático para lo cual se utiliza la precipitación que quedó

$$h_{B1} = \frac{R}{\mu}$$

$$h_{B1} = \frac{41 \text{ mm}}{0,15}$$

$$h_{B1} = 273,3333 \text{ mm}$$

$$h_{B1} = \frac{273,3333 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} * 1 \text{ cm}$$

$$h_{B1} = 27,3333 \text{ cm}$$

El incremento en el nivel freático es de 27,333 cm pero se observa que el espesor del horizonte B1 es de 45 cm. De aquí podemos ver que el horizonte B1 queda en un estado semi saturado (en parte saturado y en parte no saturado)

$$\text{Parte que No se satura del horizonte B1} = (45 \text{ cm} - 27,3333 \text{ cm})$$

$$\text{Parte que No se satura del horizonte B1} = (17,67 \text{ cm})$$

De aquí se puede estimar cuanto fue el incremento total del nivel freático cuanto queda no saturado en este perfil del ejemplo

$$\text{Levantamiento total del nivel freático (perfil saturado)} = 30 \text{ cm} + 27,3333 \text{ cm}$$

$$\text{Levantamiento total del nivel freático (perfil saturado)} = 57,333 \text{ cm}$$

$$\text{Perfil del suelo no saturado} = (20 \text{ cm} + 45 \text{ cm} + 30 \text{ cm}) - 57,333 \text{ cm}$$

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Perfil del suelo no saturado = 95 cm - 57,333 cm

Perfil del suelo no saturado = 37,6667 cm

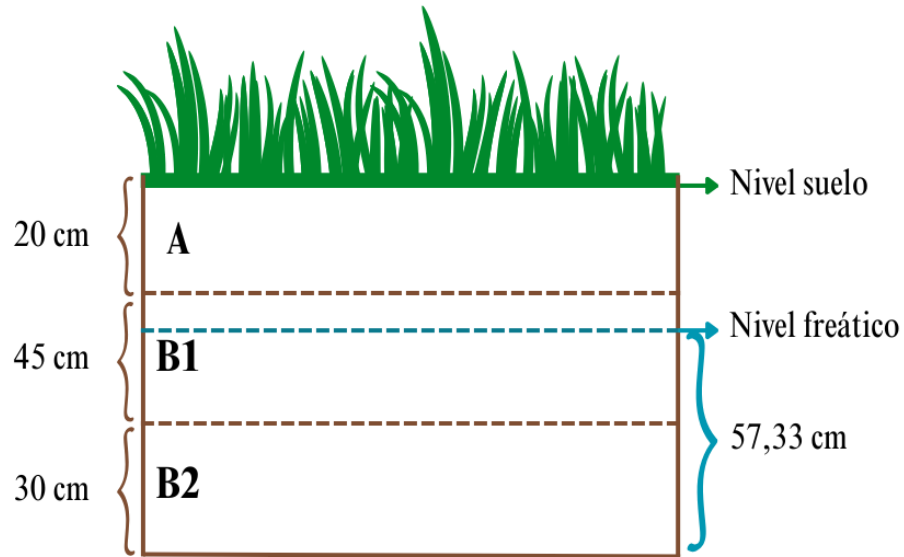


Figura 8: imagen de representación del suelo del ejemplo donde se muestra el perfil saturado y el perfil no saturado

Presiones del agua que se encuentra en la porosidad del suelo mineral

El agua en el suelo está definida por su estado energético y es llamado como el potencial total del agua en el suelo y se determina por potenciales de presión que corresponde a la suma del potencial de presión, el potencial de la matriz del suelo el potencial gravitacional y el potencial osmótico.

$$Y_{\text{total}} = Y_{\text{presión}} + Y_{\text{matricial}} + Y_{\text{gravitacional}} + Y_{\text{osmótico}}$$

El potencial de presión se presenta cuando el agua en el suelo está en saturación y tiene o presenta una presión positiva hidrostática. También, se puede decir que se presenta en suelos inundados.

El potencial matricial o de la matriz del suelo se presenta en el sistema poroso del suelo en succiones o presiones negativas llamado usualmente como “retención”. Aquí entran en juego las propiedades del agua y las propiedades del suelo.

El potencial gravitacional es el que se presenta o utiliza para el drenaje de los suelos y se manifiesta principalmente en estados saturados o semi saturados y los valores que toma pueden ser positivos o negativos porque depende de un punto de referencia.

El potencial osmótico se presenta debido a las sales presentes en el suelo y por ello tiene alta importancia en la succión de agua por las plantas y del riego de las plantas donde los valores son negativos o de succión.

Se puede observar en la figura 9, que cuando el suelo no está saturado se tiene una presión negativa y cuando el suelo se encuentra saturado la presión del agua en el suelo es positiva y donde se encuentra el nivel freático la presión es igual a cero.

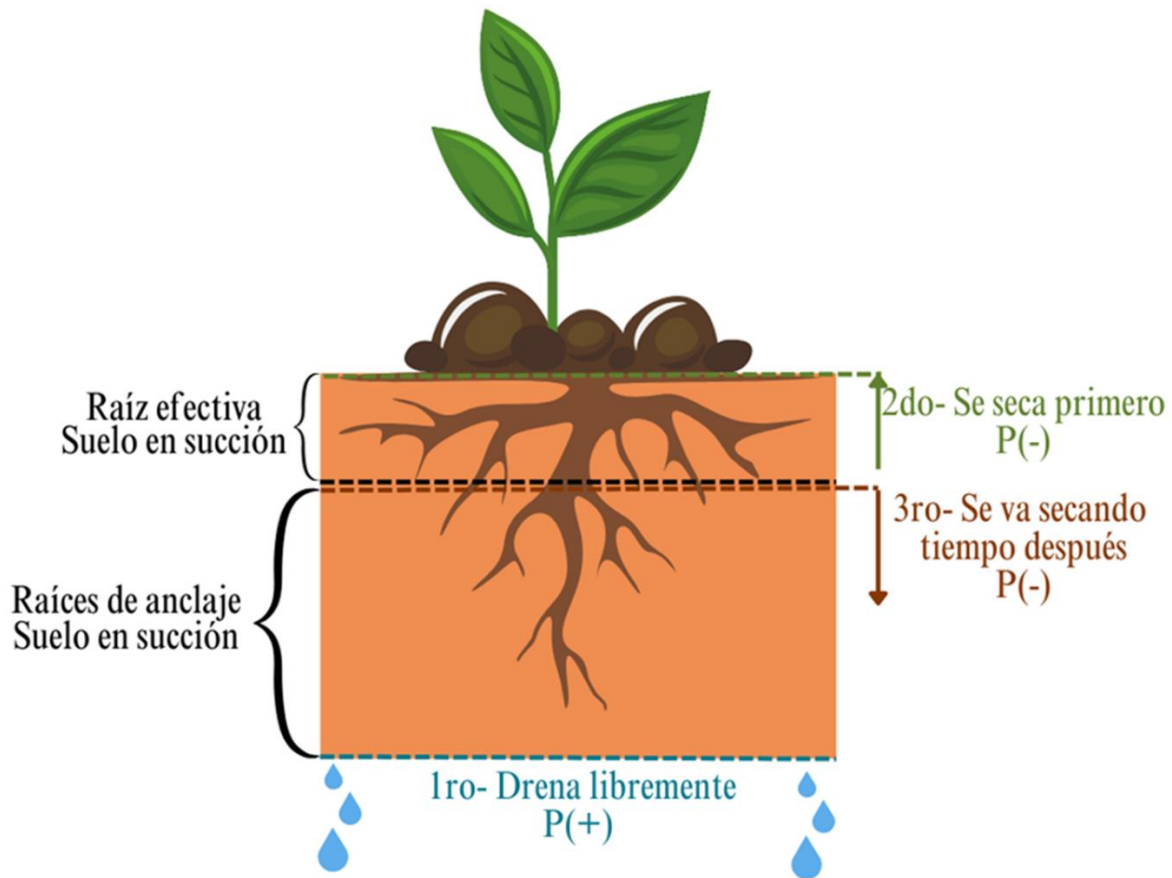


Figura 9: Estado de la presión de agua en el suelo según su contenido

El flujo saturado en un suelo con drenaje libre normalmente se mueve hacia abajo y como es un flujo rápido de agua usualmente se presenta de primero el cual consiste en un movimiento de un punto con mayor energía potencial hacia un punto de menor energía potencial. Cuando el flujo saturado se presenta en sentido contrario o sentido ascendente es cuando la capacidad del drenaje natural del suelo es menor o mucho menor al ingreso de agua a dicho suelo.

El suelo al estar saturado se presenta un flujo de agua llamado libre o gravitacional debido a que la fuerza de la gravedad es la que actúa sobre la masa de agua y es el flujo que se presenta principalmente en los macro poros en el suelo.

Cuando el suelo no está saturado se presenta un flujo de agua no saturado, el cual es dominado principalmente por las presiones de succión o presión negativa que no son vencidas por la fuerza de la gravedad donde el agua se mueve de un lugar de menor succión o presión negativa o mayor energía hacia lugares de mayor succión o mayor presión negativa o menor energía. Este flujo se presenta

fundamentalmente en los micro y meso poros y se puede presentar muy poco en los macro poros respecto a los anteriores.

Por efecto de la evaporación que la produce el sol y la transpiración por las plantas lo segundo que sucede es la evapotranspiración de las partes superficiales del suelo que es lo que se va secando primero respecto a las partes más profundas del suelo y estas capas, en tercer lugar es lo que se va secando al final.

El flujo saturado del agua en el suelo es mayor al flujo no saturado del agua en el suelo. Al flujo saturado de agua en el suelo se le llama conductividad hidráulica y al flujo no saturado de agua en el suelo se le llama movimiento no saturado de agua en el suelo, y un movimiento muy conocido de este flujo es la infiltración de agua en el suelo el cual es un movimiento vertical descendente parecido al flujo saturado cuando está drenando el agua o inclusive, percolando (salida o pérdida del agua del suelo a capas profundas que normalmente tienden a formar los caudales bases de los nacientes de quebradas y ríos) pero no son iguales.

Como se observa en la figura 10, a medida que el suelo se va secando los poros más grandes son los que primero pierden el agua y se comienzan a llenar de aire y los poros más pequeños son los que van quedando con agua. Este proceso se presenta en toda la línea de secado del suelo, que consiste en la pérdida de agua desde estar saturado hasta estar seco.

CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

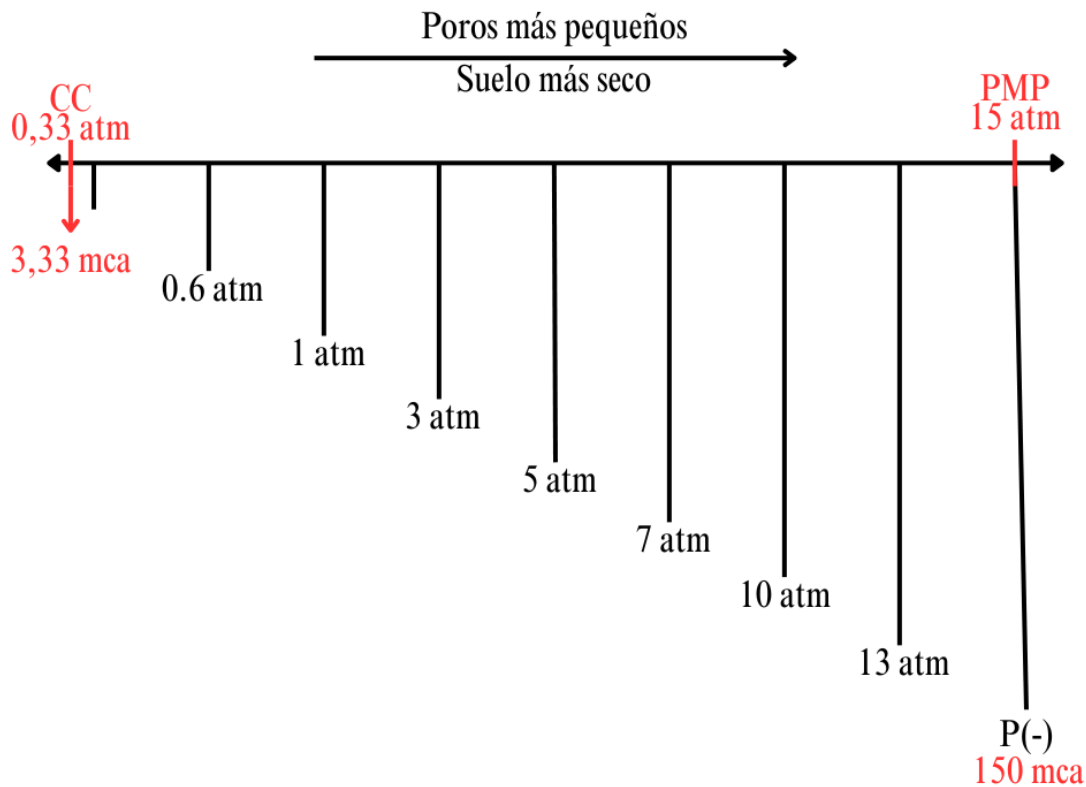


Figura 10: Estado de la presión negativa o de la succión de agua en el suelo según en los meso poros

Esto se debe a que la succión de agua en el suelo que se podría definir como la presión que se presenta en el espacio poroso del suelo para retener el agua o también podría llamarse como la retención de agua en el suelo podría medirse por medio de la Altura de Ascenso Capilar (centímetros de columna de agua “cmca”) según el diámetro de los poros (cm).

El ascenso capilar es un movimiento de agua que se presenta en contra de la fuerza de la gravedad a como su nombre lo indica, de manera ascendente y además; este flujo de agua se presenta exclusivamente cuando el suelo está en succión o presión negativa fundamentalmente en los micro y meso poros. Para su estimación se toma en cuenta el nivel freático como punto de altura cero y de aquí hacia arriba es que se cuenta la altura del ascenso capilar.

Esta altura del ascenso capilar (centímetros de columna de agua “cmca”) está definida por la siguiente relación matemática:

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$h (cmca) = \frac{0,3}{d(cm)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{h (cmca)}$$

$$h (cmca) = \frac{0,15}{r(cm)}$$

$$r(cm) = \frac{0,15}{h (cmca)}$$

Donde:

h = altura contada desde el nivel freático a la que una partícula de agua sube o asciende en contra de la fuerza de la gravedad según el diámetro o el radio de los poros

d= diámetro del poro

r= radio del poro

De estas ecuaciones podemos también estimar al diámetro o el radio del poro por medio de la medición de la altura del ascenso capilar

Presión de succión del agua en el suelo completa

Esta se debe a dos componentes que son las que se muestran en la siguiente relación matemática (hay otras variable que ya se han despreciado por estar en succión):

- 1- La presión negativa o succión en el suelo (vista hasta el momento en este documento) que se debe fundamentalmente al efecto físico de la matriz del suelo y el comportamiento del agua en los espacios porosos.
- 2- La presión negativa o succión que se debe a las sales que se encuentran en el suelo. Esta tiene un efecto fuerte en suelo con problemas de salinidad y estas sales pueden ser de cualquier tipo y no solamente debida al sodio. A menudo tienden a presentarse en suelos salinos y salino-sódicos que tienen regímenes de humedad ústicos o también áridos y desérticos. En

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

zonas lluviosas usualmente tienden los suelos a no presentar problemas de salinidad y por ello se desprecia la presión osmótica quedando la succión de agua en el suelo solamente la debida al sistema poroso del suelo.

$$\mathbf{Psuelo = Poros_{Succión\ matriz\ del\ suelo} + Presión\ osmótica\ de\ sales}$$

Si el suelo no tiene problemas de salinidad entonces la relación matemática queda de la siguiente forma:

$$\mathbf{Psuelo = Poros_{Succión\ matriz\ del\ suelo}}$$

Ejemplo:

Se tiene un suelo con una succión matricial de -0,33 atm y una salinidad que produce una presión osmótica de -0,38 atm. ¿Cuál? es la presión de succión total en el suelo que debe de vencer la planta para poder absorber el agua.

$$\mathbf{Psuelo = Poros_{Succión\ matriz\ del\ suelo} + Presión\ osmótica\ de\ sales}$$

$$\mathbf{Psuelo = -0,33\ atm + -0,38\ atm}$$

$$\mathbf{Psuelo = -0,71\ atm}$$

Se puede observar del ejemplo que la succión matricial muestra que el suelo está a capacidad de campo teórica del USDA y si solo se mide esta presión se estaría cometiendo un error y se podría meter a un cultivo en estrés hídrico ya que en realidad la succión del agua en el suelo es mayor. Por ello, los análisis químico de los suelos para correcciones y ajustes químicos es justificado o al menos, medir salinidad del suelo.

Ejemplo de cálculo de ascenso capilar y retención del agua en el suelo

1) Fórmulas que se pueden utilizar:

$$h\ (cmca) = \frac{0,3}{d(cm)}$$

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

2) Cálculos

¿Cuál? diámetro de los poros (cm y micras) que tiene una partícula de agua que presenta una presión de succión o un ascenso capilar de $h_c = 50$ cm.

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{50 cmca}$$

$$d(cm) = 0,006$$

$$d(micras) = 0,006cm * \frac{1 m}{100 cm} * \frac{1000000 micras}{1 m}$$

$$d(micras) = 60 micras$$

¿Cuánta? presión de succión tiene una partícula de agua que tiene un ascenso capilar de $h_c = 80$ cm.

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cm)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{80}$$

$$d(cm) = 0,00375$$

$$d(micras) = 0,00375cm * \frac{1 m}{100 cm} * \frac{1000000 micras}{1 m}$$

$$d(micras) = 37,5 micras$$

CC BY-NC-ND 4.0

¿Cuánta? presión de succión tiene una partícula de agua que tiene un ascenso capilar de $h_c = 100$ cm.

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{h(\text{cm})}$$

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{100}$$

$$d(\text{cm}) = 0,003$$

$$d(\text{micras}) = 0,00375 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1000000 \text{ micras}}{1 \text{ m}}$$

$$d(\text{micras}) = 30 \text{ micras}$$

- 3) Resumen de la succión de agua en el suelo y diámetro de los poros del ejemplo propuesto

Succión o Ascenso capilar(cm)	Diámetro del poro (cm)	Diámetro del poro (micras)
50 cm	0,006	60
80 cm	0,00375	37,5
100 cm	0,003	30

Ejercicio de succión de agua en el suelo y el tamaño de los poros

Ejemplo de cálculo de ascenso capilar y retención del agua en el suelo parte 1: Un suelo bajo condiciones de equilibrio se encuentra saturado con un nivel freático a 10 cm de profundidad en el perfil del suelo.

- ¿Cuál es la presión de succión que tendrían unas moléculas de agua que se encuentran a 2 cm de profundidad en el perfil del suelo?
Presión de succión a 2 cm:

La presión de succión a 2 cm sería la diferencia de presión hasta los 10 cm. Succión = 10 - 2 = 8

CC BY-NC-ND 4.0

2. ¿Cuál es el diámetro de poros (μ) promedio que contendría las moléculas de agua a 4 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Diámetro de poros (μ) a 4 cm:

Para la profundidad de 4 cm, la succión será $10 - 4 = 6$

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cm)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{6\text{ cm}}$$

$$d(cm) = 0,05$$

$$d(\text{micras}) = 0,05\text{cm} * \frac{1\text{ m}}{100\text{ cm}} * \frac{1000000\text{ micras}}{1\text{ m}}$$

$$d(\text{micras}) = 500\text{ micras}$$

3. ¿Cuáles poros se encuentran llenos de agua a 10 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Poros llenos de agua a 10 cm: todos los poros hasta esta profundidad están saturados de agua.

4. ¿Qué presión tienen los poros a 10 cm de profundidad en el perfil del suelo?
Presión en los poros a 10 cm:

Succión= $10\text{ cm} - 10\text{ cm} = 0\text{ cm}$

Ejemplo de cálculo de ascenso capilar y retención del agua en el suelo parte 2: Luego se construyen drenajes a 15 m de espaciamiento entre los drenajes y a 1,20 m de profundidad logrando bajar el nivel freático a 110 cm de profundidad.

5. ¿Cuáles tamaños de poros se encuentran llenos de agua a 2 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Tamaños de poros a 2 cm:

CC BY-NC-ND 4.0

Succión = 110 cmca – 2 cmca = 108 cmca

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{108 cmca}$$

$$d(cm) = 0,002777$$

$$d(micras) = 0,002777\cancel{cm} * \frac{1\cancel{m}}{100\cancel{cm}} * \frac{1000000\cancel{micras}}{1\cancel{m}}$$

$$d(micras) = 27,78 micras$$

Rango de diámetro de poros drenados a 2 cm = 27,78 μ - 375 μ

6. ¿A qué presión de succión se encontrarán después de drenar el suelo a 12 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Presión de succión a 12 cm = 110 cmca – 12 cmca = 98 cmca

7. ¿Cuál es el rango de diámetro de poros que ha sido drenado a 2 cm de profundidad en el perfil del suelo?

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{8 cmca}$$

$$d(cm) = 0,0375$$

$$d(micras) = 0,0375\cancel{cm} * \frac{1\cancel{m}}{100\cancel{cm}} * \frac{1000000\cancel{micras}}{1\cancel{m}}$$

$$d(micras) = 375 micras$$

CC BY-NC-ND 4.0

Rango de diámetro de poros drenados a 2 cm = 27,78 μ - 375 μ

8. ¿A partir de qué tamaño de poros se encuentran llenos de agua a los 75 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Presión de succión = 110 cmca – 75 cmca = 35 cmca

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{35 cmca}$$

$$d(cm) = 0,008571$$

$$d(micras) = 0,008571 \cancel{cm} * \frac{1 \cancel{m}}{100 \cancel{cm}} * \frac{1000000 \cancel{micras}}{1 \cancel{m}}$$

Tamaño de poros a 75 cm de profundidad:

$$d(micras) = 85,71 micras$$

9. ¿Cuál es el tipo de presión ('+', '0' o '-') a 75 cm profundidad cuando la tabla de agua ha sido deprimida por los drenajes como se explica anteriormente?

Tipo de presión a 75 cmca: Succión negativa

10. ¿Cuál es el tipo de presión ('+', '0' o '-') a 59 cm de profundidad cuando la tabla de agua ha sido deprimida por los drenajes como se explica anteriormente?

Tipo de presión a 59 cmca: Succión negativa.

**Ejemplo de cálculo ascenso capilar y retención del agua en el suelo
parte 1: Un suelo bajo condiciones de equilibrio se encuentra con un nivel freático a 80 cm de profundidad en su perfil**

CC BY-NC-ND 4.0

- a. ¿Cuál? es la presión de succión que tendrían unas moléculas de agua que se encuentra a 7,0 cm de profundidad en el perfil del suelo?

$$h = 80 \text{ cmca} - 7 \text{ cmca} = 73 \text{ cmca}$$

$$h = 73 \text{ cmca}$$

La presión de succión es de 73 cmca

- b. ¿Cuál? es el diámetro de poros promedio que contendría las moléculas de agua a 4 cm de profundidad en el perfil del suelo?

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{h(\text{cmca})}$$

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{(80 - 4) \text{ cmca}}$$

$$d(\text{cm}) = 0,003947$$

$$d(\text{micras}) = 0,003947 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1000000 \text{ micras}}{1 \text{ m}}$$

$$d(\text{micras}) = 39,47$$

El diámetro de poros es de 39,47 μ

- c. ¿Cuáles? poros se encuentran llenos de agua a 20 cm de profundidad en el perfil del suelo?

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{h(\text{cmca})}$$

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{(80 - 20) \text{ cmca}}$$

$$d(\text{cm}) = 0,003947$$

$$d(\text{micras}) = 0,003947 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1000000 \text{ micras}}{1 \text{ m}}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$d (\text{micras}) = 39,47$$

Respuesta: Todos los poros $\leq 50 \mu$

- d. ¿Cuáles? poros se encuentran llenos de agua a 80 cm de profundidad en el perfil del suelo?

Todos los poros se encuentran llenos de agua

Ejemplo de cálculo de ascenso capilar y retención del agua en el suelo parte 2: Luego se producen altas precipitaciones y el nivel freático se eleva a 10 cm de profundidad.

- e. ¿Cuáles? tamaños de poros se encuentran llenos de agua a 7 cm de profundidad en el perfil del suelo?

$$d(\text{cm}) = \frac{0,3}{h (\text{cmca})}$$

$$d (\text{cm}) = \frac{0,3}{(10 - 7) \text{ cmca}}$$

$$d (\text{cm}) = 0,1$$

$$d (\text{micras}) = 0,1 \text{ cm} * \frac{1 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{1000000 \text{ micras}}{1 \text{ m}}$$

$$d (\text{micras}) = 1000$$

Respuesta: Todos los poros $\leq 1000 \mu$

- f. A ¿Qué? presión de succión se encontrarían los poros en el suelo a 4 cm de profundidad en el suelo?

$$h = 10 \text{ cmca} - 4 \text{ cmca}$$

$$h = 6 \text{ cmca}$$

CC BY-NC-ND 4.0

Respuesta: 6 cmca

- g. ¿Cuál es el rango de diámetros de poros en el suelo a 7 cm de profundidad en el suelo?

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{(80 - 7) cmca}$$

$$d(cm) = 0,004109$$

$$d(micras) = 0,004109 \cancel{cm} * \frac{1 \cancel{m}}{100 \cancel{cm}} * \frac{1000000 micras}{1 \cancel{m}}$$

$$d(micras) = 41,1$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{h(cmca)}$$

$$d(cm) = \frac{0,3}{(10 - 7) cmca}$$

$$d(cm) = 0,1$$

$$d(micras) = 0,1 \cancel{cm} * \frac{1 \cancel{m}}{100 \cancel{cm}} * \frac{1000000 micras}{1 \cancel{m}}$$

$$d(micras) = 1000$$

Respuesta: el rango es 41,1 μ a 1000 μ

- h. ¿Cuál? es el tipo de presión (“+”, “0” o “-”) a 20 cm de profundidad en el suelo?

CC BY-NC-ND 4.0

Respuesta: presión positiva (+)

- i. ¿Cuál? es el tipo de presión (“+”, “0” o “-”) a 50 cm de profundidad en el suelo?

Respuesta: presión positiva (+)

- j. ¿Cuál? es el tipo de presión (“+”, “0” o “-”) a 10 cm de profundidad en el suelo?

Respuesta: presión igual a cero (=0)

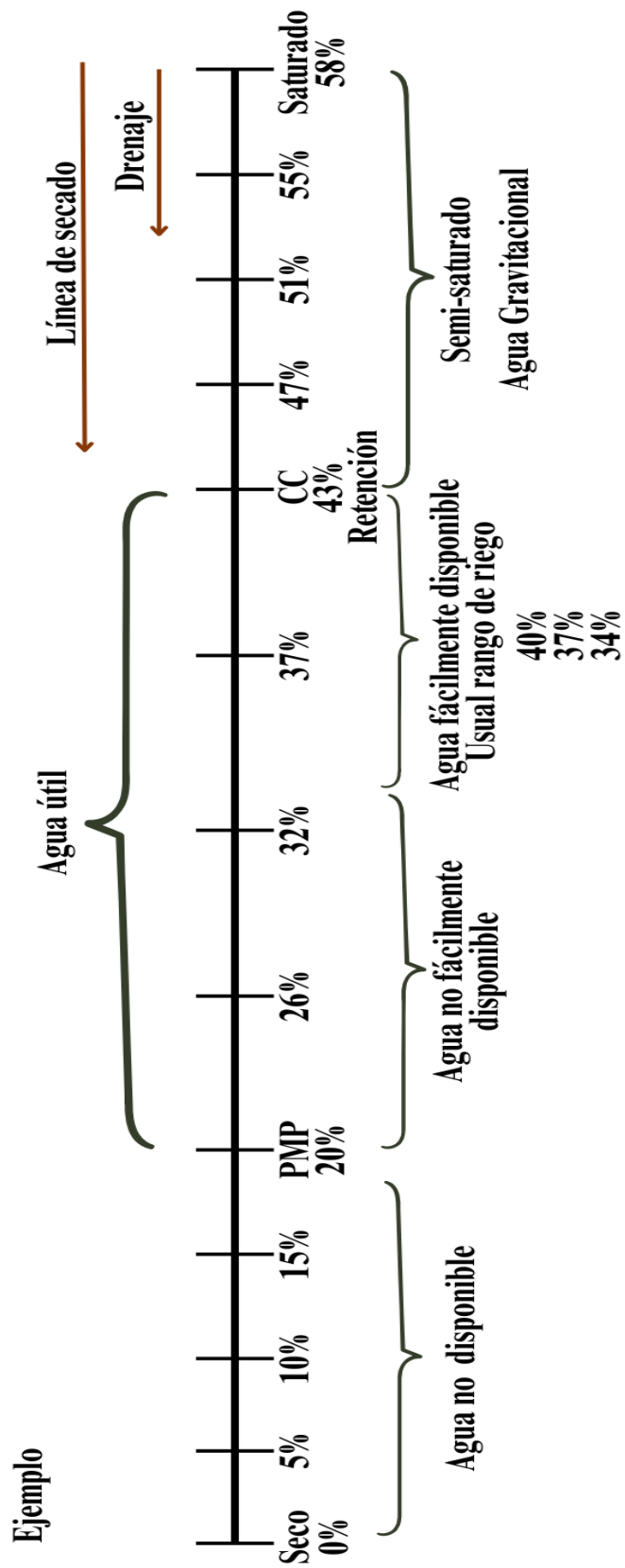


Figura 11: Línea de secado o línea de saturación para el ejemplo desarrollado

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

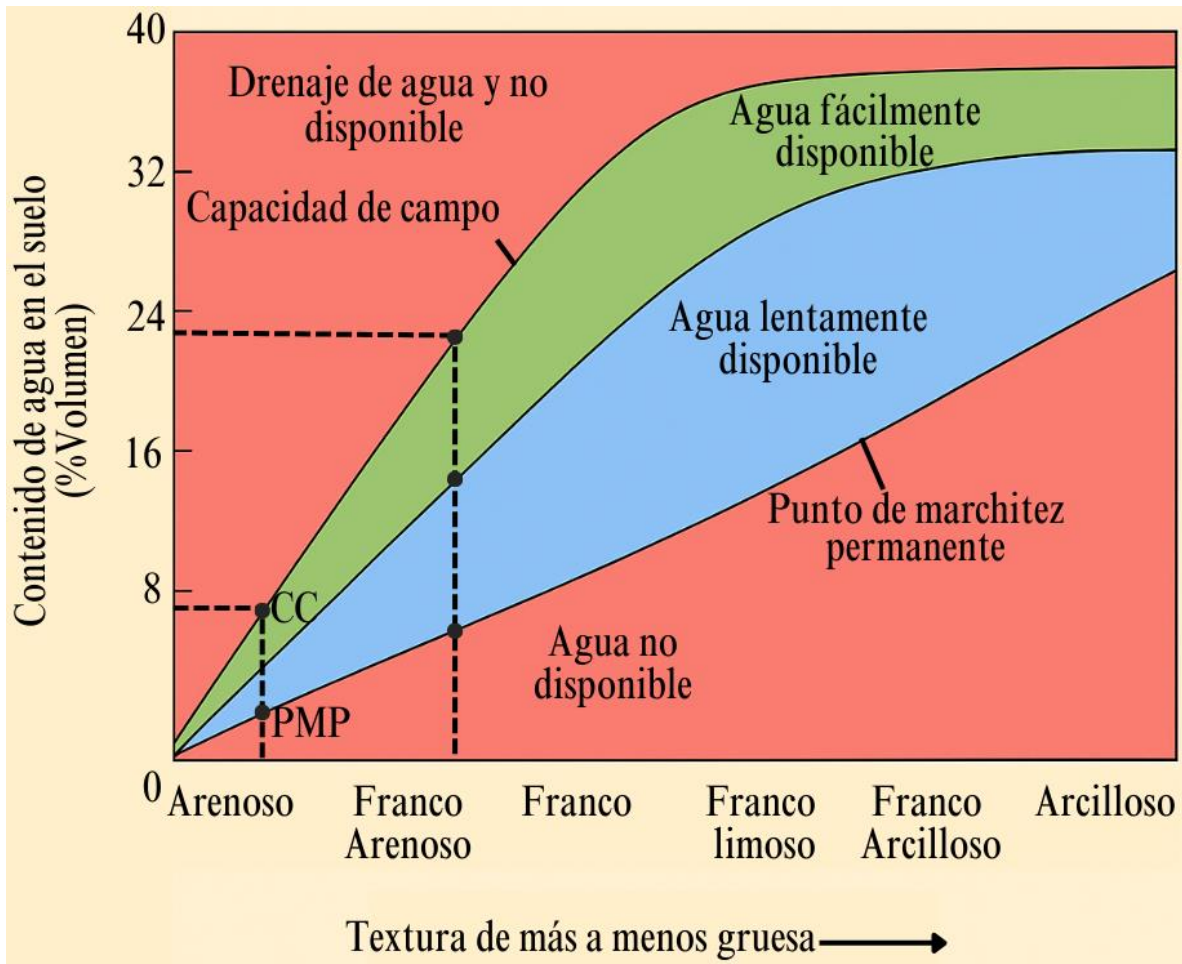


Figura 12: Puntos y rangos del estado del agua en el suelo

Ejemplo de cálculo: Se tiene un suelo con una profundidad de 28 cm, densidad aparente de 1,10 g/cm³ y un área de 1250 m². También se tiene el suelo con las siguientes humedades:

Seco=	0%
%PHg=	11%
%HG1=	19%
PMPg=	25%
%HG2=	24%
CCg=	45%
%HG3=	55%
%Satg=	59%

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

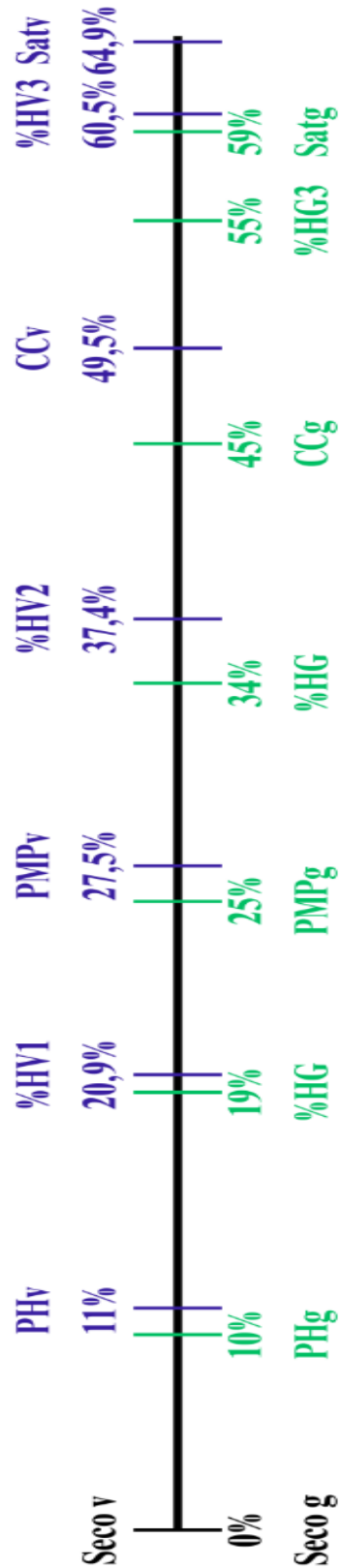


Figura 13: Línea de secado con los datos gravimétricos convertidos a volumétricos de este ejemplo en desarrollo

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

a. ¿Cuál es el volumen total de poros en %?

El volumen total se muestra cuando el suelo está totalmente saturado que representa la máxima cantidad de espacios todos llenos de agua por lo que el porcentaje de poros %P = 64,9%

b. ¿Cuál es el volumen total de poros en m³?

Para este cálculo se utiliza el porcentaje de humedad volumétrica al punto de capacidad de campo

$$P(m^3) = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{64,9\%}{100}$$

$$P(m^3) = 227,15 m^3$$

c. ¿Cuál es el volumen total en m³ que puede retener el suelo?

$$Ret(m^3) = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{49,5\%}{100}$$

$$Ret(m^3) = 173,25$$

d. ¿Cuál es el volumen total en m³ de microporos?

$$micro\ poros\ (m^3) = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{27,5\%}{100}$$

$$micro\ poros\ (m^3) = 96,25 m^3$$

e. ¿Cuál es el volumen total en m³ de macroporos?

$$macro\ poros\ (m^3) = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{(64,9\% - 49,5\%)}{100}$$

$$macro\ poros\ m^3 = 53,9$$

f. ¿Cuál es el volumen total en m³ de mesoporos?

CC BY-NC-ND 4.0

$$m^3 \text{ meso} = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{(49,5 \% - 27,5 \%)}{100}$$

$$\text{meso poros (m}^3\text{)} = 77 \text{ m}^3$$

g. ¿Cómo se llama el estado de humedad del %HG3?

Estado Semisaturado

h. ¿Cuál es el volumen total en m³ que se pierde si el suelo pasa del %HG3 al %HG1? La respuesta debe darse de la siguiente manera:

h.1. ¿Cuánta agua se drena en m³?

$$\text{Agua que drena} = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{(60,5 \% - 49,5 \%)}{100}$$

$$\text{Agua que drena} = 38,5 \text{ m}^3$$

h.2. ¿Cuánta agua se evapotranspira en m³?

$$\text{Agua que evapotranspira} = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{(49,5 \% - 27,5 \%)}{100}$$

$$\text{Agua que evapotranspira} = 77 \text{ m}^3$$

h.3. ¿Cuánta agua se evapora en m³?

$$\text{Agua que se evapora} = 1250m^2 * \frac{28cm}{100cm/m} * \frac{(27,5 \% - 20,9 \%)}{100}$$

$$\text{Agua que evapora} = 23,1 \text{ m}^3$$

h.4. ¿Cuánta agua se pierde en total en m³?

$$38,5 \text{ m}^3 + 77 \text{ m}^3 + 23,1 \text{ m}^3 = 138,6 \text{ m}^3$$

i. ¿Cuál es el volumen total en mm que se pierde si el suelo pasa del %HG3 al %HG1? La respuesta debe darse de la siguiente manera.

i.1. ¿Cuánta agua se drena en mm?

$$\text{Agua que drena} = \frac{38,5\text{m}^3}{1250\text{m}^2} * \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}}$$

$$\text{Agua que drena} = 30,8 \text{ mm}$$

i.2. ¿Cuánta agua se evapotranspira en mm?

$$\text{Agua que evapotranspira} = \frac{77\text{m}^3}{1250\text{m}^2} * \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}}$$

$$\text{Agua que evapotranspira} = 61,6 \text{ mm}$$

i.3. ¿Cuánta agua se evapora en mm?

$$\text{Agua que evapora} = \frac{23,1\text{m}^3}{1250\text{m}^2} * \frac{1000\text{mm}}{1\text{m}}$$

$$\text{Agua que evapora} = 18,48 \text{ mm}$$

i.4. ¿Cuánta agua se pierde en total en mm?

$$30,8 \text{ mm} + 61,6 \text{ mm} + 18,48 \text{ mm} = 110,88 \text{ mm}$$

Ejemplo de cálculo: Se tiene un suelo en un terreno de 58 cm de profundidad y 850 m² de área, con un horizonte A1 de 11 cm de grosor, con macroporos de 20%, mesoporos de 28% y microporos de 10%; un horizonte A2 de 31 cm con Macroporos de 28%, mesoporos de 16% y microporos de 9% y B1 de 16 cm con Macroporos de 12%, mesoporos de 23% y microporos de 23%.

Para solucionar el ejemplo se hace una figura con la información que se nos da como planteamiento inicial para entender mejor que es lo que se nos dice y cual sería el mejor camino a seguir para lograr dar respuestas correctas

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

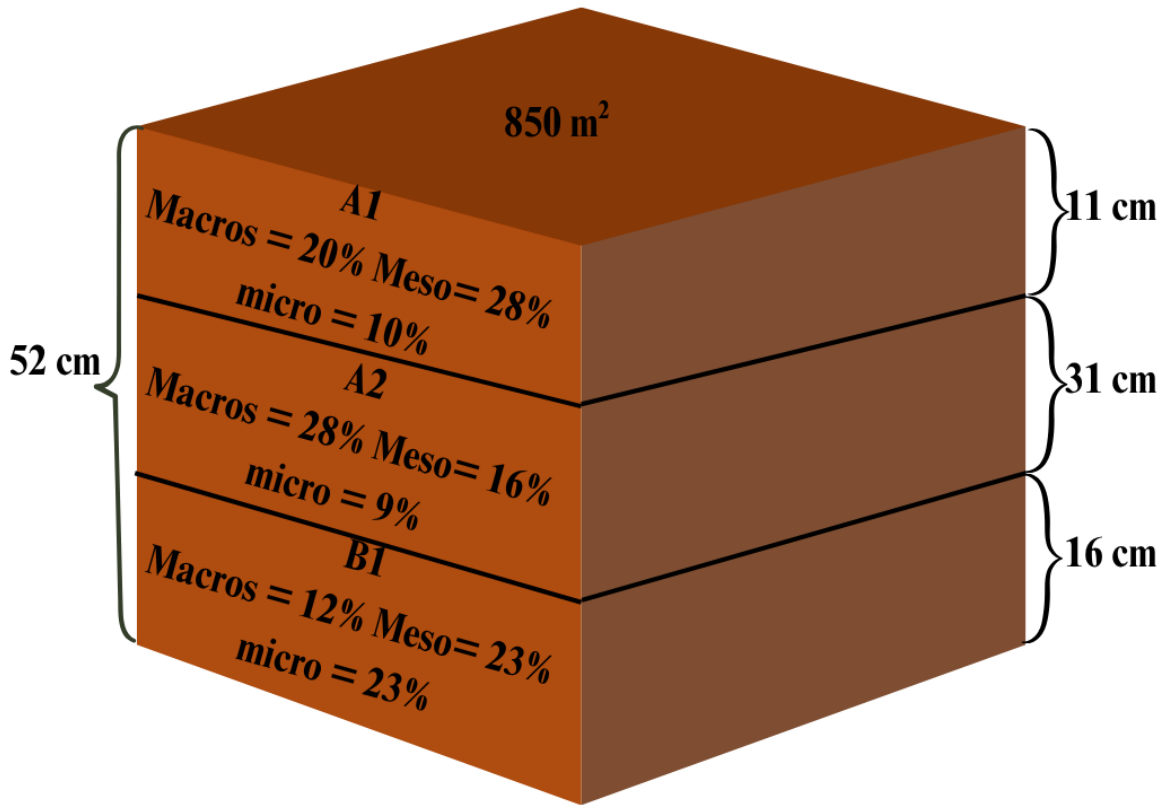


Figura 14: Figura del ejemplo a resolver

1.1. ¿Cuánta macroporosidad total, mesoporosidad total y microporosidad total tiene el suelo en ese terreno m³?

Para hacer la sumatoria para sacar estos totales, se deben de pasar los porcentajes de poros a m³ de la siguiente manera:

$$\text{macro poros A1}(m^3) = 850m^2 * \frac{11 \text{ cm}}{100 \frac{\text{cm}}{m}} * \frac{20}{100}$$

$$m^3\text{macroA1} = 18,7 \text{ m}^3$$

Una forma de resolver este problema es por medio de un cuadro que muestre para cada horizonte según su espesor cada uno de los cálculos y resultados de los macro meso y micro poros

Hori- zonte	Prof	Área	Volumen	Macroporos		Mesoporos		Microporos		Total
	m	m ²	m ³	%	m ³	%	m ³	%	m ³	m ³
A1	0,11	850	0,11*850 =93,5	20	93,5*20/100 =18,7	28	93,5*28/100 =26,18	10	93,5*10/100 =9,35	54,23
A2	0,31	850	0,31*850 =263,5	28	263,5*28/100 =73,78	16	263,5*16/100 =42,16	9	263,5*9/100 =23,715	139,66
B1	0,16	850	0,16*850 =136	12	136*12/100 =16,32	23	136*23/100 =31,28	23	136*23/100 =31,28	78,88
Total:	0,58		493		108,8		99,62		64,345	272,77

1.2. ¿Cuánta porosidad total tienen los horizontes A1, A2 y B1 en m³ en ese suelo de ese terreno en m³?

Del cuadro anterior la porosidad total corresponde a 272,77 m³

1.3. ¿Cuánta porosidad total tiene ese suelo de ese terreno en m³?

Del cuadro de la 2.1 se contesta esta pregunta:

$$(54,23 \text{ m}^3 + 139,66 \text{ m}^3 + 78,88 \text{ m}^3) = 272,77 \text{ m}^3$$

Tiene una porosidad total de 272,77 m³

Ejemplo de cálculo y deducción de fórmulas para su deducción: Se tiene un suelo en un terreno del cual se toman unas muestras y se obtienen los valores de peso de suelo húmedo 100 g, porcentaje de humedad volumétrica de 50,571%, porosidad total de 55,47 % y una densidad real de 2,65 g/cm³. Calcule el peso del suelo seco.

$$\%HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\%HG = \frac{\%HV}{Da}$$

Igualando ecuaciones:

$$\frac{\%HV}{Da} = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

$$\frac{\%HV}{100 * Da} = \frac{Psh}{Pss} - \frac{Pss}{Pss}$$

$$\frac{\%HV}{100 * Da} = \frac{Psh}{Pss} - 1$$

$$\frac{\%HV}{100 * Da} + 1 = \frac{Psh}{Pss}$$

$$Psh = Pss * \left(\frac{\%HV}{100 * Da} + 1\right)$$

$$Pss = \frac{Psh}{\frac{\%HV}{100 * Da} + 1}$$

$$\frac{P}{100} = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

$$\frac{P}{100} - 1 = -\frac{Da}{Dr}$$

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{P}{100}\right)$$

Sustituyendo en las ecuaciones

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$Pss = \frac{Psh}{\frac{\%HV}{100 * Dr * \left(1 - \frac{P}{100}\right)} + 1}$$

$$Pss = \frac{100}{\frac{50,571}{100 * 2,65 * \left(1 - \frac{55,47}{100}\right)} + 1}$$

$$Pss = 70,0009 \text{ cm}^3$$

Práctica de contenido de humedad en el suelo

Esta práctica presenta los ejercicios planteados en el libro “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., y Edmundo Acevedo)” CUYA DIRECCIÓN ELECTRÓNICA ES

<https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf>

Confeccionado por la “UNIVERSIDAD DE CHILE FACULTAD DE CS. AGRONÓMICAS DEPARTAMENTO DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA LABORATORIO DE RELACIÓN SUELO-AGUA-PLANTA”

Las soluciones desarrolladas a los ejercicios propuestos son completamente del autor de este libro o propios.

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

Procedimiento 1:

$$\%P = \frac{Vp}{Vts} * 100$$

$$Vp = \frac{\%P * Vts}{100}$$

$$Vp = \frac{40\% * 120\text{cm}^3}{100}$$

$$\mathbf{Vp = 48 \text{ cm}^3}$$

$$Vts = Vs + Vp$$

$$Vs = Vts - Vp$$

$$Vs = (120 - 48)\text{cm}^3$$

$$\mathbf{Vs = 72 \text{ cm}^3}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Dr = \frac{P_{ss}}{V_s}$$

$$P_{ss} = Dr * V_s$$

$$P_{ss} = 2,5 \frac{g}{cm^3} * 72 cm^3$$

$$P_{ss} = 180 g$$

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_{ts}}$$

$$Da = \frac{180 g}{120 cm^3}$$

$$Da = 1,5 g/cm^3$$

Procedimiento 2:

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

$$Da = \frac{2,5g}{cm^3} * \left(1 - \frac{40\%}{100}\right)$$

$$Da = 1,5 g/cm^3$$

2. Un suelo húmedo tiene un contenido de humedad de 0,15 g/g. Si se necesitan 200 g de suelo seco para un experimento ¿Cuántos gramos de suelo húmedo se necesitan?

Procedimiento 1:

$$HG = \frac{P_{agua}}{P_{suelo}}$$

$$HG = 0,15 g.agua /g.suelo$$

$$\frac{P_{ag}}{P_s} = 0,15 \frac{g.ag}{g.s}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Pag = 0,15 \frac{g \cdot ag}{g \cdot s} * Ps$$

$$Pag = 0,15 \frac{g}{g} * 200g$$

$$\mathbf{Pag = 30 g}$$

$$Psh = 30g + 200g$$

$$\mathbf{Psh = 230 g}$$

Procedimiento 2:

$$HG = \frac{Psh - Pss}{Pss}$$

$$\mathbf{HG = 0,15 g/g}$$

$$\frac{Psh - Pss}{Pss} = 0,15 \frac{g}{g}$$

$$Psh - Pss = 0,15 \frac{g}{g} * Pss$$

$$Psh = Pss + 0,15 \frac{g}{g} * Pss$$

$$Psh = 1,15 * Pss$$

$$Psh = 0,15 * 200$$

$$\mathbf{Psh = 230 g}$$

Procedimiento 3:

Mediante regla de 3

$$\mathbf{0,15 g.ag : 1 g.s :: X g.a : 200 g.s}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$0,15 \text{ g. a} * 200 \text{ g. s} = 1 \text{ g. s} * \mathbf{X} \text{ g. a}$$

$$\mathbf{X} \text{ g.s} = 30 \text{ g.a}$$

$$Psh = 200 \text{ g s} + 30 \text{ g a}$$

$$\mathbf{Psh = 230 g}$$

Procedimiento 4:

Mediante razonamiento

$$\text{Si existe } 0,15 \frac{\text{g agua}}{\text{g suelo}}$$

entonces

$$0,15 \frac{\text{g agua}}{\text{g suelo}} * \frac{100}{100}$$

$$= \frac{15 \text{ g agua}}{100 \text{ g suelo}}$$

$$\frac{15 \text{ g agua}}{100 \text{ g suelo}} * \frac{2}{2}$$

$$= \frac{30 \text{ g agua}}{200 \text{ g suelo}}$$

Lo que nos dice que existen 30 g de agua en 200 g de suelo por lo que al sumar ambos nos da un peso total de 230 g.

Procedimiento 5 = procedimiento incorrecto

A menudo cuando se tiene un dato como 0,15 g/g de humedad gravimétrica se multiplica para conocer cuánta agua existe en una muestra de suelo lo cual es un error como se muestra a continuación:

$$Pag = 230 \text{ g} * 0,15 \frac{\text{g de agua}}{\text{g de suelo}}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$P_{ag} = 34,5 \text{ g.ag}$$

al realizar la resta nos da:

$$P_{ss} = 230g - 34,5g$$

Pss = 195,5 g de suelo lo cual es incorrecto.

La manera de cálculo correcto utilizando este procedimiento se deduce de la ecuación encontrada en el procedimiento 2 de este ejercicio 2:

$$P_{sh} = 1,15 * P_{ss}$$

$$P_{ss} = \frac{P_{sh}}{1,15}$$

$$P_{ss} = \frac{230 \text{ g}}{1,15}$$

Pss = 200 g de suelo, lo cual es correcto

- 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.**

$$P = 0,45 \frac{\text{cm}^3 \text{espacios}}{\text{cm}^3 \text{suelo}}$$

$$\%P = 0,45 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} * \frac{100}{100}$$

$$\%P = \frac{45 \text{ cm}^3}{100 \text{ cm}^3}$$

$$\%P = 45 \%$$

$$\%P = \left(1 - \frac{D_a}{D_r}\right) * 100$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$45 = \left(1 - \frac{Da}{2,6}\right) * 100$$

$$\frac{45}{100} = \left(1 - \frac{Da}{2,6}\right)$$

$$0,45 - 1 = \frac{-Da}{2,6}$$

$$-0,55 = \frac{-Da}{2,6}$$

$$0,55 * 2,6 = Da$$

$$Da = 1,43 \text{ g.suelo/cm}^3.\text{suelo}$$

$$**HV = Da * HG**$$

$$HV = 0,20 * 1,43 \text{ g.suelo / cm}^3.\text{suelo}$$

$$HV = 0,286$$

$$hagua = HV * Pr$$

$$hagua = 0,286 * 30\text{cm}$$

$$**hagua = 8,58 \text{ cmca}**$$

- 4. Se desea llevar un suelo a capacidad de campo (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%; Densidad real = $2,6 \text{ g/cm}^3$.**

Procedimiento 1:

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$50 = \left(1 - \frac{Da}{2,6}\right) * 100$$

$$\frac{50}{100} = 1 - \frac{Da}{2,6}$$

$$0,50 - 1 = - \frac{Da}{2,6}$$

$$-0,50 * 2,6 = -Da$$

$$0,50 * 2,6 = Da$$

$$Da = 1,30 \text{ g/cm}^3$$

$$**HV = Da * HG**$$

$$**HG_{cc} = \frac{HV_{cc}}{Da}**$$

$$HG_{cc} = \frac{0,40}{1,30}$$

$$HV_{cc} = 0,3077 \text{ g/g}$$

pmpg (15 atm) = ccg / 1,85 esta ecuación sirve para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar.

$$\text{pmpg} = 0,3077 \text{ (g/g)} / 1,85$$

$$\text{pmp} = 0,1663 \text{ (g/g)}$$

hagua = (ccg - pmpg) * Da * hsuelo esta ecuación no se divide entre 100 debido a que los valores del porcentaje de humedad gravimétrica están en proporción

$$\text{hagua} = (0,3077 \text{ g/g} - 0,1663 \text{ g/g}) * 1,30 \text{ g/cm}^3 * 80 \text{ cm}$$

$$\text{hagua} = 14,7056 \text{ cm}$$

CC BY-NC-ND 4.0

Procedimiento 2:

$$pmpg = 0,4897 * cc + 1,1666$$

Con cc en %

$$pmpg = 0,4897 * (0,3077 * 100) + 1,1666$$

$$pmpg = 16,23\%$$

$$pmpg = \frac{16,23}{100}$$

$$pmpg = 0,1623$$

$$hagua = (ccg - pmpg) * Da * hs$$

$$hagua = (0,3077 - 0,1623) * 1,30 * 80$$

$$hagua = 15,12 \text{ cm}$$

Procedimiento 3:

$$pmp (15 \text{ atm}) = cc/1,85$$

Esta ecuación sirve para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalor

$$pmp = \frac{0,4 \frac{cm^3}{cm^3}}{1,85}$$

$$pmp = 0,2162$$

$$hagua = (ccv - pmpv) * hs$$

$$hagua = (0,40 - 0,2162) * 80$$

$$hagua = 14,70 \text{ cm}$$

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Las diferencias son debidas principalmente a que es una estimación por medio de las ecuaciones utilizadas.

5. Se tiene un suelo en el que el volumen de 1000 cm^3 con 340 cm^3 de agua a cc y una porosidad 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?

Suponemos una $D_r = 2,65 \text{ g/cm}^3$

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$54 = \left(1 - \frac{Da}{2,65}\right) * 100$$

$$\frac{54}{100} = 1 - \frac{Da}{2,65}$$

$$0,54 - 1 = -\frac{Da}{2,65}$$

$$-0,46 * 2,65 = -Da$$

$$0,46 * 2,65 = Da$$

$$\mathbf{Da = 1,219 \text{ g/cm}^3}$$

Estimando la humedad ccv:

$$ccv = 340 \text{ cm}^3 \text{ de agua a } \frac{cc}{100 \text{ cm}^3}$$

$$ccv = 0,34 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$$

$$ccg = \frac{0,34}{1,219}$$

$$ccg = 0,2789$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$pmpg = 0,4897 * cc + 1,1667$$

$$pmpg = 0,4897 * (0,2789 * 100) + 1,1666$$

$$pmpg = 14,8244\%$$

$$pmpg = \frac{14,8244\%}{100}$$

$$pmpg = 0,148244 \text{ en proporción}$$

$$hagua = (ccg - pmpg) * Da * hs$$

$$hagua = (0,2789 - 0,148244) * 1,219 * 15$$

$$hagua = 2,389 \text{ cm}$$

Para pasarlo a volumen por hectárea:

$$\frac{V}{ha} = 2,39 \text{ cm} * \frac{1,0m}{100cm} * \frac{100 \text{ m} * 100 \text{ m}}{1,0ha}$$

$$\frac{V}{ha} = 239 \text{ m}^3/ha$$

6. Un terrón natural de suelo húmedo tiene un volumen de 150 cm^3 , con 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 humedad en base a peso (o gravimétrico)
- Contenido de humedad en base a volumen (o volumétrico)
- Porosidad total

Calculando el espacio ocupado por aire:

$$V_{ai} = V_t * \%A_i$$

$$V_{ai} = 150 \text{ cm}^3 * 0,15 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{ai} = 22,5 \text{ cm}^3$$

Calculando el espacio ocupado por agua y por el suelo:

$$V_t = V_s + V_{ai} + V_{ag}$$

$$150 = V_s + 22,5 + V_{ag}$$

$$150 - 22,5 = V_s + V_{ag}$$

$$V_s + V_{ag} = 127,5$$

$$P_{sh} = P_{ss} + P_{ag}$$

$$240 = P_{ss} + P_{ag}$$

$$P_{ss} = 240 - P_{ag}$$

$$D_r = \frac{P_{ss}}{V_s}$$

$$V_s = \frac{P_{ss}}{D_r}$$

$$V_s = \frac{P_{ss}}{2,65}$$

$$V_s = 0,3774 * P_{ss}$$

Además

$$D_a = \frac{P_{ag}}{V_{ag}}$$

$$V_{ag} = \frac{P_{ag}}{D_a}$$

$$V_{ag} = \frac{P_{ag}}{1,0 \text{ g/cm}^3}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{ag} = P_{ag}$$

$$Volumen\ agua = Peso\ agua$$

Combinando las siguientes ecuaciones

$$V_s + V_{ag} = 127,5$$

$$P_s = 240 - P_{ag}$$

$$V_s = 0,3774 * P_{ss}$$

$$V_{ag} = P_{ag}$$

$$V_s + V_{ag} = 127,5$$

$$0,3774 * P_{ss} + P_{ag} = 127,5$$

Sustituyendo tenemos

$$0,3774 * (240 - P_{ag}) + P_{ag} = 127,5$$

$$90,576 - 0,3774 * P_{ag} + P_{ag} = 127,5$$

$$0,6226 * P_{ag} = 127,5 - 90,576$$

$$0,6226 * P_{ag} = 36,924$$

$$P_{ag} = \frac{36,924}{0,6226}$$

$$P_{ag} = 59,3061\ g \rightarrow V_{ag} = 59,3061\ cm^3$$

Sustituyendo tenemos

$$P_{ss} = 240 - 59,3061$$

$$P_{ss} = 180,6939\ g$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_t = V_s + V_{ai} + V_{ag}$$

$$V_s = 150 - 22,5 - 59,3061$$

$$V_s = \mathbf{68,1939}$$

Calculando la densidad aparente con base a peso seco

$$Da = \frac{P_{ss}}{V_t}$$

$$Da = \frac{180,6939}{150}$$

$$Da = \mathbf{1,2046 \text{ g/cm}^3}$$

Calculando en contenido de humedad en base a peso (o gravimétrico) en proporción

$$HG = \frac{Pag \text{ (g de agua)}}{P_{ss} \text{ (g de suelo)}}$$

$$HG = \frac{59,3061 \text{ (g de agua)}}{180,6939 \text{ (g de suelo)}}$$

$$HG = \mathbf{0,3282 \text{ g.ag/g.s}}$$

En porcentaje

$$\%HG = \frac{Pag}{P_{ss}} * 100$$

$$\%HG = \frac{59,3061 \text{ (g de agua)}}{180,6939 \text{ (g de suelo)}} * 100$$

$$\%HG = \mathbf{32,82\%}$$

Calculando el contenido de humedad en base a volumen (o volumétrico)
En proporción

CC BY-NC-ND 4.0

$$HV = \frac{V_{ag}(cm^3 \text{ de agua})}{V_t(cm^3 \text{ agua} + cm^3 \text{ aire} + cm^3 \text{ suelo})}$$

$$HV = \frac{59,3061 \text{ cm}^3 \text{ agua}}{150 \text{ cm}^3 \text{ agua}}$$

$$HV = 0,3954 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

En porcentaje

$$\%HV = \frac{V_{ag}}{V_s} * 100$$

$$\%HV = \frac{59,3061 \text{ cm}^3}{150 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\%HV = 39,54 \% (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$$

Utilizando otra metodología:

$$\%HV = D_a * \%HG$$

En proporción

$$HV = 1,2113 \text{ g/cm}^3 * 0,3282 (\text{g. ag/g. s})$$

$$HV = 0,3976 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

En porcentaje

$$\%HV = 1,2113 \text{ g/cm}^3 * 32,82 \%$$

$$\%HV = 39,76\%$$

Calculando la porosidad total

Procedimiento 1:

En proporción

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

$$\%P = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

$$\%P = 1 - \frac{1,2113g/cm^3}{2,65g/cm^3}$$

$$\%P = 1 - 0,4570$$

$$\%P = 0,5429$$

En porcentaje

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\%P = \left(1 - \frac{1,2113g/cm^3}{2,65g/cm^3}\right) * 100$$

$$\%P = (1 - 0,4570) * 100$$

$$\%P = 0,5429 * 100$$

$$\%P = 54,29\% \text{ (recordar que es volumétrico)}$$

Procedimiento 2:

$$Vp = Vai + Vag$$

$$\%P = \frac{Vp}{Vt}$$

En proporción

$$\%P = \frac{Vai + Vag}{Vt}$$

$$\%P = \frac{22,5 cm^3 + 59,3061cm^3}{150cm^3}$$

$$\%P = 0,5453$$

En porcentaje

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%P = \frac{V_{ai} + V_{ag}}{V_t} * 100$$

$$\%P = \frac{22,5 \text{ cm}^3 + 59,3061 \text{ cm}^3}{150 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\%P = 0,5453 * 100$$

$$\%P = 54,53\%$$

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 humedad en base a volumen es de $0,4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Indique:

- Capacidad de campo en el suelo
- Punto de marchitez permanente
- Humedad aprovechable (%)

¿Qué profundidad del suelo queda a cc después de regar durante 20 h, si la velocidad promedio de infiltración es de $0,8 \text{ cm/h}$. En el momento en que se inicia el riego, el suelo tiene un contenido de humedad de 10% (base a peso)? Porosidad del suelo $\%P = 50\%$; $D_r = 2,60 \text{ g/cm}^3$

Calculando el pmpv

$$h_{agua} = (ccv - pmpv) * h_s$$

$$\frac{h_{agua}}{h_s} = (ccv - pmpv)$$

$$\frac{h_{agua}}{h_s} - ccv = -pmpv$$

$$\frac{16}{80} - 0,4 = -pmpv$$

$$0,2 - 0,4 = -pmpv$$

$$-0,2 = -pmpv$$

$$pmpv = 0,2$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Pmpv = 0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$$

Calculando el agua útil

Procedimiento 1: volumétrica

$$Au = HG_{Au} = CC - PMP$$

$$Au = HG_{Au} = 0,4 - 0,2$$

$$Au = HG_{Au} = 0,2 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$$

Procedimiento 2: Gravimétrica

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\%P = 50\%$$

$$50 = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\frac{50}{100} = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)$$

$$-\frac{Da}{Dr} = 0,50 - 1$$

$$-\frac{Da}{Dr} = -0,50$$

$$-Da = -0,50 * Dr$$

$$Da = 0,50 * Dr$$

$$Da = 0,50 * 2,6$$

$$Da = 1,3 \text{ g/cm}^3$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%HV = Da * \%HG$$

$$\%HG = \% \frac{HV}{Da}$$

de donde se deduce para capacidad de campo

$$ccg = \frac{ccv}{Da}$$

$$ccg = \frac{0,4}{1,3}$$

$$\mathbf{ccg = 0,3 \text{ g/g}}$$

o en términos porcentuales

$$ccg = 0,3 * 100$$

$$\mathbf{ccg = 30\%}$$

para el punto de marchitez permanente

$$pmpg = \frac{pmpv}{Da}$$

$$pmpg = \frac{0,2}{1,3}$$

$$\mathbf{pmpg = 0,15}$$

o en términos porcentuales

$$pmpg = 0,15 * 100$$

$$\mathbf{pmpg = 15\%}$$

$$Au = ccg - pmpg$$

$$Au = 30 - 15$$

$$Au = 15\%$$

CC BY-NC-ND 4.0

de donde se observa que el $Au = 15\% = 0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para una densidad aparente de $1,3 \text{ g/cm}^3$

Procedimiento 3: gravimétrica

$$Auv = HV_{Au} = ccv - pmpv$$

$$Auv = HV_{Au} = 0,2 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3}$$

$$HG = \frac{HV}{Da}$$

se deduce que

$$Aug = \frac{Auv}{Da}$$

$$Aug = \frac{0,2}{1,3}$$

$$\mathbf{Aug = 0,15}$$

en términos porcentuales

$$Aug = 0,15 * 100$$

$$\mathbf{Aug = 15\%}$$

Luego, continuando con el ejercicio tenemos:

Cálculo de la lámina infiltrada utilizando la ecuación física que define la velocidad.

$$velocidad = \frac{distancia}{tiempo}$$

$$Distancia = velocidad * tiempo$$

$$hainf = 0,8 \text{ (cm/h)} * 20 \text{ h}$$

$$\mathbf{hainf = 16 \text{ cms}}$$

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

donde hainf (altura de agua infiltrada) tiene a ser had (altura de agua disponible)

$$h_{agua} = \frac{(ccg - pmpg)}{100} * Da * h_s$$

Sustituyendo el pmpg por el contenido de humedad

$$h_{agua} = \frac{(30 - 10)}{100} * 1,3 * 80$$

$$h_a = 20,8 \text{ cm}$$

es la altura de agua que se necesita para llevar todo el perfil del suelo de los 80 cm de profundidad desde un 10% de humedad hasta capacidad de campo. Como se infiltraron solamente 16 cm se procede a calcular que profundidad de suelo quedó a capacidad de campo.

$$h_{ad} = \frac{(ccg - pmpg)}{100} * Da * h_s$$

$$h_s = \frac{h_{ad} * 100}{(ccg - pmpg) * Da}$$

$$h_s = \frac{16 * 100}{(30 - 10) * 1,3}$$

$$h_s = 61,54 \text{ cm}$$

por lo que solamente 61,54 cm de la profundidad del total de los 80 cm del perfil del suelo llega a capacidad de campo.

8. 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 g/cm³ calcule:

- **El volumen de agua que tenía la muestra de suelo en el campo.**
- **El contenido gravimétrico de humedad que tenía la muestra de suelo en el campo.**

CC BY-NC-ND 4.0

- El contenido volumétrico de humedad 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 capacidad de campo
- ¿Qué volumen de agua se debe añadir para que el contenido de humedad de la muestra alcance ccg (40% en base a peso)
- ¿Qué altura de agua se debe aplicar a 1 ha para que la humedad de los primeros 30 cm de dicho suelo alcancen ccg (40% en base a peso)?

Cálculo del volumen de agua

$$V_{ag} = 350 \text{ g} - 280 \text{ g}$$

Debido a que el agua tiene $1 \text{ g} / 1 \text{ cm}^3$

$$V_{ag} = 350 \text{ cm}^3 - 280 \text{ cm}^3$$

$$\mathbf{V_{ag} = 70 \text{ cm}^3}$$

Cálculo de la humedad gravimétrica

$$\%HG = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

$$\%HG = \frac{350 - 280}{280} * 100$$

$$\mathbf{\%HG = 25\%}$$

Calculando la humedad volumétrica

$$\%HV = D_a * \%HG$$

$$\%HV = 1,3 * 25$$

$$\mathbf{HV = 32,5 \text{ cm}^3 \text{ de agua} / \text{cm}^3 \text{ de suelo}}$$

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Calculando la altura de agua

$$h_{agua} = \frac{\%HV}{100} * h_s$$

$$h_{agua} = \frac{32,5}{100} * 30$$

$$\mathbf{h_a = 9,75 \text{ cm}}$$

calculando la altura de agua que queda a capacidad de campo

$$agua \text{ total} = (9,75 + 1,4) \text{ cm}$$

$$\mathbf{agua \text{ total} = 11,15 \text{ cm}}$$

$$h_{agua} = \frac{\%HV}{100} * h_s$$

$$h_s = \frac{h_a}{\frac{\%HV}{100}}$$

$$h_s = \frac{h_a}{\frac{\%HG * Da}{100}}$$

$$h_s = \frac{11,15}{\frac{40 * 1,3}{100}}$$

$$\mathbf{h_s = 21,44 \text{ cm}}$$

cálculo del volumen de agua a agregar en porcentaje

$$\%HG = \frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} * 100$$

$$P_{sh} = \frac{\%HG * P_{ss}}{100} + P_{ss}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$Psh = \frac{40 * 280}{100} + 280$$

$$\mathbf{Psh = 392 \text{ g}}$$

$$\text{Volumen de agua a agregar} = (392 - 350) \text{ g}$$

$$\text{Volumen de agua a agregar} = (392 - 350) \text{ cm}^3$$

$$\mathbf{\text{Volumen de agua a agregar} = 42 \text{ cm}^3}$$

Calculando la altura de agua

Como se le añaden 42 cm³ o 42 g de agua

$$hagua = \frac{\%HV}{100} * hs$$

$$\%HV = Da * \%HG$$

$$hagua = \frac{Da * \%HG}{100} * hs$$

$$hagua = \frac{1,3 * (40 - 25)}{100} * 30$$

$$\mathbf{ha = 5,85 \text{ cm}}$$

9. Con el objetivo de conocer la Da 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°C hasta un peso constante de 1400g. Para conocer el contenido de humedad a ccg, dicho suelo se dejó drenar por 24 horas y se sacó una muestra que dio los siguientes resultados: 1570 y 1250 g en peso húmedo y seco, respectivamente. Para determinar el pmpg se colocó una muestra en un plato de presión a 15 bares que pesó 1320 g en húmedo, al secarla en estufa a 105°C pesó 1175 g. Conociendo el contenido de humedad de dicho suelo a ccg y pmpg conteste:

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

- Si el agotamiento 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?
- ¿Cuántos m³ de agua por hectárea existen en el suelo en el momento en que ha cesado el drenaje del exceso de agua?

Calculando el volumen total de la muestra

$$Vt = 10 * 10 * 10 \text{ cm} * \text{cm} * \text{cm}$$

$$\mathbf{Vt = 1000 \text{ cm}^3}$$

Calculando la densidad aparente

$$Da = \frac{Ps}{Vt}$$

$$Da = \frac{1400g}{1000\text{cm}^3}$$

$$\mathbf{Da = 1,4 \text{ g/cm}^3}$$

Calculando la humedad gravimétrica saturada

$$\%HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

$$\%HG = \frac{1900 - 1400}{1400} * 100$$

$$\mathbf{\%HG = 35,71 \%}$$

Calculando la humedad gravimétrica a capacidad de campo en porcentaje

$$\%HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

$$\%HG = \frac{1570 - 1250}{1250} * 100$$

$$\mathbf{\%HG = 25,60 \%}$$

CC BY-NC-ND 4.0

Calculando la humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente en porcentaje

$$\%HG = \frac{Psh - Pss}{Pss} * 100$$

$$\%HG = \frac{1320 - 1175}{1175} * 100$$

$$\%HG = 12,34 \%$$

Calculando la altura de agua

$$had = \frac{(ccg - pmpg)}{100} * Da * hs * \%Agotamiento$$

$$had = \frac{(25,60 - 12,34)}{100} * 1,4 * 40 * \frac{30}{100}$$

$$had = 2,2277 \text{ cm}$$

pero el Vag se divide en tres volúmenes como sigue

$$Vag1 = Vag_{0-18\%}$$

$$Vag2 = Vag_{18\%-cc}$$

$$Vag3 = Vag_{cc-SE}$$

$$Vag = Vag_{0-18\%} + Vag_{18\%-cc} + Vag_{cc-SE}$$

$$hagua = \% \frac{HV}{100} * hs$$

llamando "x" la profundidad del perfil

$$hagua = \% \frac{HV}{100} * x$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%HV = \frac{hagua * 100}{x}$$

$$\%HV_{0-18\%} = Vag_{0-18\%} = 18\%$$

$$\%HV_{18\%-cc} = Vag_{0-18\%} = \frac{3,5 * 100}{x} = \frac{350}{x}$$

$$\%HV_{cc-SE} = Vag_{cc-SE} = \frac{12 * 100}{x} = \frac{1200}{x}$$

Sustituyendo 2, 3 y 4 en 1

$$Vag = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$\%P = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$50 = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$32 = \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$32 = \frac{350 + 1200}{x}$$

$$32 * x = 1550$$

$$x = \frac{1550}{32}$$

$$x = 48,43$$

b) Calculando la densidad aparente del suelo

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%P = 50\%$$

$$50 = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\frac{50}{100} = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right)$$

$$-\frac{Da}{Dr} = 0,50 - 1$$

$$-\frac{Da}{Dr} = -0,50$$

$$-Da = -0,50 * Dr$$

$$Da = 0,50 * 2,65$$

$$Da = 1,325 \text{ g/cm}^3$$

$$ha = \% \frac{HV}{100} * hs$$

$$\%HV = Da * \%HG$$

$$ha * 100 = \%HV * hs$$

calculando el volumen de agua para conocer el peso

$$Vag = ha * \pi * r^2$$

$$Vag = 2,2277 * 3,141593 * (15)^2$$

$$\mathbf{Vag = 1574,67 \text{ cm}^3}$$

$$\mathbf{\text{Peso de agua} = 1574,67 \text{ g}}$$

Calculando la humedad a capacidad de campo volumétrica

$$\%HV = Da * \%HG$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\%HV_{cc} = Da * \%HG_{cc}$$

$$\%HV_{cc} = 1,4 * 25,6$$

$$\%HV_{cc} = 35,84\%$$

Calculando el volumen de una hectárea

$$Vol/ha = 100m * 100m * 0,80m$$

$$Vol/ha = 8000 m^3$$

$$V_{ag} = 8000m^3 * \frac{(35,84\%)}{100}$$

$$V_{ag} = 2867,20 m^3$$

10. Calcular el volumen de agua en media hectárea de un suelo que tiene un contenido de humedad gravimétrica de un 23%, $Da (g/cm^3) = 1,35$ y una profundidad de 75 cm.

Calculando el volumen total de suelo

$$V_t = 100m * 100m * 0,75m * 0,5$$

$$V_t = 3750 m^3$$

Calculando la humedad volumétrica

$$\%HV = Da * \%HG$$

$$\%HV = 1,35 * 23$$

$$\%HV = 31,05\%$$

Calculando volumen de agua

$$V_{ag} = \% \frac{HV}{100} * V_t$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{ag} = \frac{31,05}{100} * 3750m^3$$

$$V_{ag} = 1164,37 m^3$$

11. Se determina que la porosidad de suelo mineral es de un 50%, se sabe que son necesarios 12 cm de agua para saturar todo el perfil desde cc se requieren 3,5 cm para llevarlo desde un contenido de humedad de un 18% volumétrico hasta ccv.

- ¿Cuál es la profundidad (hs) del perfil?
- Suponiendo una densidad real de partículas = 2,65 g/cm³ ¿Cuál sería la profundidad (hs) del perfil?

$$V_p = V_{ai} + V_{ag}$$

$$\%HV = \frac{h_{agua} * 100}{hs}$$

$$\%HV = \frac{h_{agua} * 100}{x}$$

$$\%HV = D_a * \%HG$$

Sustituyendo tenemos

$$D_a * \%HG = \frac{h_{agua} * 100}{x}$$

$$\%HG = \frac{h_{agua} * 100}{D_a * x}$$

$$V_{ag} = V_{ag0-18\%} + V_{ag18\%-cc} + V_{agcc-SE}$$

$$V_{ag} = \%HG_{0-18\%} * D_a + \%HG_{18\%-cc} * D_a + \%HG_{cc-SE} * D_a$$

$$V_{ag} = 18 * D_a + \frac{3,5 * 100}{D_a * x} * D_a + \frac{12 * 100}{D_a * x} * D_a$$

V_{ag} = %P porque está saturado

CC BY-NC-ND 4.0

$$50 = 18 * Da + \frac{3,5 * 100}{Da * x} * Da + \frac{12 * 100}{Da * x} * Da$$

$$50 = 18 * 1,325 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$50 = 23,85 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$50 - 23,85 = \frac{350 - 1200}{x}$$

$$26,15 = \frac{1550}{x}$$

$$x = \frac{1550}{26,15}$$

$$x = 59,27 \text{ cm}$$

12. Una muestra de suelo húmedo tiene una masa de 1000 g y un volumen de 640 cm³. Al ser secada en una estufa a 105°C por 24 horas su masa seca fue de 800g. Calcule la densidad aparente, el volumen de agua y el volumen de suelo seco. Asuma una densidad real de 2,65 g/cm³.

Cálculo de la densidad aparente

$$Da = \frac{Ps}{Vt}$$

$$Da = \frac{800}{640}$$

$$Da = 1,25 \text{ g/cm}^3$$

Calculando el volumen de agua

$$Pa = 10000 \text{ g} - 800 \text{ g}$$

$$Pa = 200 \text{ g}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{ag} = 200 \text{ cm}^3$$

Calculando la humedad gravimétrica

$$\%HG = \frac{Pa}{Ps} * 100$$

$$\%HG = \frac{1000 - 800}{800} * 100$$

$$\%HG = 25\%$$

Calculando la humedad volumétrica

$$\%HV = Da * \%HG$$

$$\%HV = 1,25 * 25\%$$

$$\%HV = 31,25\%$$

Calculando la porosidad total

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\%P = \left(1 - \frac{1,25}{2,65}\right) * 100$$

$$\%P = 52,83\%$$

Calculando el volumen de poros

$$Vp = Vt * \%P$$

$$Vp = 640 \text{ cm}^3 * \left(\frac{52,83}{100}\right)$$

$$Vp = 338,11 \text{ cm}^3.$$

Calculando el volumen del suelo

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_s = V_t - V_p$$

$$V_s = (640 - 338,11) \text{ cm}^3$$

$$V_s = 301,89 \text{ cm}^3$$

13. Se tienen 5 ha en la finca maravilla con una profundidad radicular de 80 cm se está regando con un umbral de riego/agotamiento de 30% en un suelo con las siguientes características:

Horizonte	Profundidad (hs)	Macroporos	CCg (%)	PMPg (%)	Da (g/cm ³)
A1	0-25	12	30	12	1,41
A2	25-45	10	30	12	1,42
B1	45-80	8	28	11	1,35

- a. Si a los 80 cm existe una capa dura de suelo (hardpan) ¿Qué monto de lluvia dejará un nivel freático a 25 cm de la superficie suponiendo que se tiene una humedad de partida en el porcentaje de agotamiento?

Estaría en ese caso saturado los horizontes B1 y A2

Calculamos para el horizonte más profundo B1

Calculando las alturas de agua que pueden ser absorbidas en cada estrato hasta capacidad de campo desde el porcentaje de agotamiento.

$$haguaB1 = \frac{ccg - pmpg}{100} * Da * hs$$

$$haguaB1 = \frac{28 - 11}{100} * 1,41 * (80 \text{ cm} - 45 \text{ cm})$$

$$haguaB1 = 8,3895 \text{ cm}$$

$$haguaB1 = 83,895 \text{ mm}$$

lo que nos dice es que en los 25 cm del estrato 1 pueden almacenar 6,345 cm que son 63,45 mm de agua desde el punto de marchitez permanente hasta capacidad de campo. Desde el umbral de riego sería:

CC BY-NC-ND 4.0

$$\text{El 30\% de la lámina} = 8,3895 \text{ cm} * \left(\frac{30\%}{100}\right)$$

$$\text{El 30\% de la lámina} = \mathbf{2,51685 \text{ cm}}$$

$$\text{El 30\% de la lámina} = \mathbf{25,1685 \text{ mm}}$$

$$h_{\text{aguaB1ur}} = 8,3896 \text{ cm} - 2,51685 \text{ cm}$$

$$\mathbf{h_{\text{aguaB1ur}} = 5,87265 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{h_{\text{aguaB1ur}} = 58,7265 \text{ mm}}$$

Cálculo la lámina de los macroporos del **horizonte B1**

$$\%HV = \frac{h_{\text{agua}}}{h_{\text{suelo}}} * 100$$

$$h_{\text{agua}} = \frac{\%HV * h_{\text{suelo}}}{100}$$

$$h_{\text{agua}} = \frac{8 \%macro * (80 \text{ cm} - 45 \text{ cm})}{100}$$

$$\mathbf{h_{\text{agua}} = 2,8 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{h_{\text{agua}} = 28 \text{ mm}}$$

Lámina de agua para saturar desde el % Agotamiento hasta saturado del horizonte B1:

$$\text{Sat. Hz.B1} = 2,8 \text{ cm} + 2,51685 \text{ cm}$$

$$\mathbf{\text{Sat. Hz.B1} = 5,31 \text{ cm}}$$

$$\mathbf{\text{Sat. Hz.B1} = 53,1 \text{ cm}}$$

Calculamos para el horizonte intermedio A2

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

Calculando las alturas de agua que pueden ser absorbidas en cada estrato hasta capacidad de campo desde el porcentaje de agotamiento.

$$h_{aguaA2} = \frac{ccg - pmpg}{100} * Da * hs$$

$$h_{aguaA2} = \frac{30 - 12}{100} * 1,42 * (45 \text{ cm} - 25 \text{ cm})$$

$$h_{aguaA2} = 5,112 \text{ cm}$$

$$h_{aguaA2} = 51,12 \text{ mm}$$

lo que nos dice es que en los 25 cm del estrato 1 pueden almacenar 6,345 cm que son 63,45 mm de agua desde el punto de marchitez permanente hasta capacidad de campo. Desde el umbral de riego sería:

$$\text{El 30\% de la lámina} = 5,112 \text{ cm} * \left(\frac{30\%}{100}\right)$$

$$\text{El 30\% de la lámina} = 1,5336 \text{ cm}$$

$$\text{El 30\% de la lámina} = 15,336 \text{ mm}$$

$$h_{aguaA2ur} = 5,112 \text{ cm} - 1,5336 \text{ cm}$$

$$h_{aguaA2ur} = 3,5784 \text{ cm}$$

$$h_{aguaA2ur} = 35,784 \text{ mm}$$

Cálculo de los **macroporos del horizonte A2**

$$\%HV = \frac{h_{agua}}{h_{suelo}} * 100$$

$$h_{agua} = \frac{\%HV * h_{suelo}}{100}$$

$$h_{A2_{agua}} = \frac{10\%macro * (45 \text{ cm} - 25 \text{ cm})}{100}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$h_{agua} = 2,0 \text{ cm}$$

Lámina de agua para saturar desde el % Agotamiento hasta saturado del horizonte A2:

$$\text{Sat. Hz.A2} = 2,0 \text{ cm} + 1,5336 \text{ cm}$$

$$\text{Sat. Hz.A2} = 3,5336 \text{ cm}$$

$$\text{Sat. Hz.A2} = 35,336 \text{ mm}$$

Cálculo del monto de lluvia o precipitación para que quede saturado de 80 cm hasta los 25 cm de profundidad:

$$\text{Sat. Hz.B1-A2} = 5,31 \text{ cm} + 3,5336 \text{ cm}$$

$$\text{Sat. Hz.B1-A2} = 8,8436 \text{ cm}$$

$$\text{Sat. Hz.B1-A2} = 88,436 \text{ cm}$$

- b. Si antes del riego cae una lluvia de 65 mm ¿queda saturado o semisaturado algunos horizontes del suelo? y en el caso de saturarse hasta que profundidad se satura el suelo.

Para el horizonte B1:

- b.1. Para llevar el horizonte B1 hasta CC se necesitan 2,8 cm de lluvia
b.2. Para saturar el horizonte B1 en los macro poros se necesitan: 2,5168 cm de lluvia
b.3. Para saturar el horizonte B1 en total se necesitan 5,31 cm de lluvia.
Total de agua que queda después de saturar el horizonte B1

Sobrante después saturación B1 = 6,5 cm lluvia – 5,31 cm capacidad

Sobrante después saturación B1 = 1,19 cm

Queda saturado el horizonte B1 y 1,19 cm se pasan al horizonte A2

- b.4. Para llevar el horizonte B1 hasta CC se necesitan 1,5336 cm de lluvia

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Faltante de agua para llevar el horizonte A2 hasta capacidad de campo:

$$Faltante\ de\ agua\ para\ CC.A2 = 1,19\ cm - 1,5336\ cm$$

$$Faltante\ de\ agua\ para\ CC.A2 = -0,3436\ cm$$

$$Faltante\ de\ agua\ para\ CC.A2 = -3,436\ mm$$

El horizonte A2 no queda saturado ni semisaturado

Ejercicio para realizar

Se tomaron muestras de dos estratos de suelo con un cilindro de 10 cm de largo y 5 cm de radio, luego se les determinó lo siguiente:

Profundidad (hs)	ccg (%)	pmpg (%)	Da (g/cm ³)
0-30	30	15	1,35
30-80	28	13	1,40

- Si el porcentaje de agotamiento o umbral de riego (UR) es de 30 %, ¿Cuántos metros cúbicos de agua se deben aplicar por ha?
- Si antes del riego cae una lluvia de 45 mm, ¿Se forma o no nivel freático? Si se forma, ¿hasta que profundidad?
- Si se saca una muestra de 100 cm³ desde el primer estrato antes del riego ¿Cuánto pesaría dicha muestra?

Ejemplo: Se presentó una lluvia fuerte de 150 mm en un periodo de 24 horas en una finca de 250 m * 100 m en un suelo con una profundidad de 45 cm a capacidad de campo el cual tiene 3 horizontes que son:

- Horizonte A con una humedad de 17% HG y un grosor de 18 cm y porosidad total de 56%,
- Horizonte B1 con una humedad de 14%HG y grosor de 9 cm y porosidad total de 53% y
- Horizonte B2 con una humedad de 18%HG y grosor de 18 cm y porosidad total del 47%.
- Los horizontes del suelo tienen una densidad real de 2,60 g/cm³ por igual.

Se quiere conocer:

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

$$\%P = \left(1 - \frac{Da}{Dr}\right) * 100$$

$$\frac{\%P}{100} = 1 - \frac{Da}{Dr}$$

$$\frac{\%P}{100} - 1 = -\frac{Da}{Dr}$$

$$1 - \frac{\%P}{100} = \frac{Da}{Dr}$$

$$Da = Dr * \left(1 - \frac{\%P}{100}\right)$$

1- Cálculo de la densidad aparente de cada horizonte

$$Da_A = 2,6 * \left(1 - \frac{56}{100}\right)$$

$$Da_A = 1,1440 \text{ g/m}^3$$

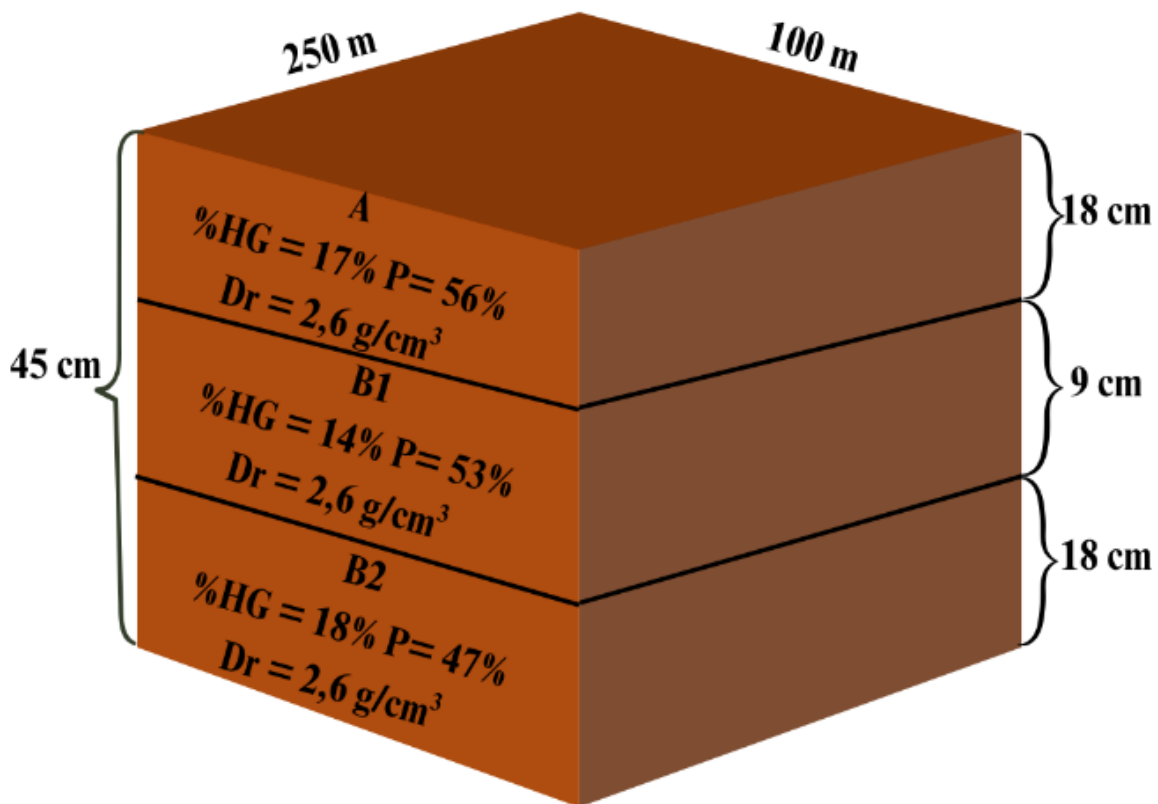


Figura 15: Figura del ejemplo a resolver

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

$$Da_{B1} = 2,6 * \left(1 - \frac{53}{100}\right)$$

$$Da_{B1} = 1,2220 \text{ g/m}^3$$

$$Da_{B2} = 2,6 * \left(1 - \frac{47}{100}\right)$$

$$Da_{B2} = 1,378 \text{ g/m}^3$$

$$\%HV = \%HG * Da$$

2- Cálculo del porcentaje de humedad volumétrica de cada horizonte

$$\%HV_A = 1,1440 * 17\%$$

$$\%HV_A = 19,4480 \%$$

$$\%HV_{B1} = 1,2220 * 14\%$$

$$\%HV_{B1} = 17,1080 \%$$

$$\%HV_{B2} = 1,378 * 18\%$$

$$\%HV_{B2} = 24,8040 \%$$

3- Cálculo del volumen total del suelo

$$V_{TS} = 100m * 250m * \frac{45 \frac{cm}{m}}{100 \frac{cm}{m}}$$

$$V_{TS} = 11250 \text{ m}^3$$

4- Cálculo de los volúmenes total de suelo de cada horizonte

$$V_{SA} = 100m * 250m * \frac{18 \frac{cm}{m}}{100 \frac{cm}{m}}$$

$$V_{SA} = 4500 \text{ m}^3$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{SB1} = 100m * 250m * \frac{9 \text{ cm}}{100 \frac{\text{cm}}{m}}$$

$$\mathbf{V_{SB1} = 2250 \text{ m}^3}$$

$$V_{SB2} = 100m * 250m * \frac{18 \text{ cm}}{100 \frac{\text{cm}}{m}}$$

$$\mathbf{V_{SB2} = 4500 \text{ m}^3}$$

5- Volumen de poros de cada horizonte

$$V_{PA} = 4500 * \frac{56}{100}$$

$$\mathbf{V_{PA} = 2520 \text{ m}^3}$$

$$V_{PB1} = 2250 * \frac{53}{100}$$

$$\mathbf{V_{PB1} = 1192,5 \text{ m}^3}$$

$$V_{PB2} = 4500 * \frac{47}{100}$$

$$\mathbf{V_{PB2} = 2115 \text{ m}^3}$$

$$\mathbf{\Sigma V_P = 5827,5 \text{ m}^3}$$

6- Volumen de humedad inicial por horizonte

$$V_{AgA} = 4500 * \frac{19,448}{100}$$

$$\mathbf{V_{AgA} = 875,16 \text{ m}^3}$$

$$V_{AgB1} = 2250 * \frac{17,108}{100}$$

$$\mathbf{V_{AgB1} = 384,93 \text{ m}^3}$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$V_{AgB2} = 4500 * \frac{24,804}{100}$$

$$\mathbf{V_{AgB2} = 1116,18 \text{ m}^3}$$

$$\mathbf{\sum V_{Ag} = 2376,27 \text{ m}^3}$$

7- Volúmenes de aire o espacios vacíos de agua por cada horizonte

$$V_{AgA} = (2520 - 875,16) \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{AgA} = 1644,84 \text{ m}^3}$$

$$V_{AgB1} = (1192,5 - 384,93) \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{AgB1} = 807,57 \text{ m}^3}$$

$$V_{AgB2} = (2115 - 1116,18) \text{ m}^3$$

$$\mathbf{V_{AgB2} = 998,82 \text{ m}^3}$$

$$\mathbf{\sum V_{Ag} = 3451,23 \text{ m}^3}$$

8- Total de lluvia precipitada en m³

$$m^3_{lluvia} = (100 * 250) * \frac{150}{1000}$$

$$\mathbf{m^3_{lluvia} = 3750 \text{ m}^3}$$

*El agua precipitada es mayor al volumen de aire, por lo tanto, todos los horizontes se saturan.

9- ¿Cuántos metros cúbicos se infiltraron?

Se infiltraron 3451,23 m³

10-¿Cuáles horizontes se saturan?

CC BY-NC-ND 4.0

Se saturan todos los horizontes

11-En el caso de que un horizonte no se haya saturado ¿cuántos metros cúbicos de aire le quedaron?

No quedaron m^3 de aire

12-¿Cuánto porcentaje de la macroporosidad en total del suelo está llena de agua y cuánto de aire?

Toda la macroporosidad está llena de agua

13-¿Cuántos cm quedan libres de agua en el posible horizonte que no se haya saturado?

No quedan cm libres de agua

14-¿Hubo escurrimiento o no hubo? Y en el caso de que haya habido entonces ¿cuántos metros cúbicos de agua se perdieron por escurrimiento?

$$3750 \text{ m}^3 - 3451,23 \text{ m}^3 = 298,77 \text{ m}^3$$

Se escurrieron $298,77 \text{ m}^3$

15-Pasó el tiempo y se evapotranspiraron 70 mm en la misma finca. Por el nuevo evento se necesita conocer:

Agua evapotranspirada:

$$E_{tp} = \frac{70 \text{ mm}}{1000 \frac{\text{mm}}{\text{m}}} * 250\text{m} * 100\text{m}$$

$$E_{tp} = 1750 \text{ m}^3$$

Agua en el suelo completamente saturado = $3451,23 \text{ m}^3$

Cuando se pierde el agua, esta se va perdiendo de los Macroporos que son iguales al volumen de aire porque el suelo estaba a capacidad de campo.

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

$$V_{AiA} = 1644,84 \text{ m}^3 \text{ (pero inicialmente está saturado)}$$

$$1750 - 1644,84 = 105,16 \text{ m}^3 \text{ de agua quedan por evapotranspirar}$$

16-¿Cuáles horizontes quedan saturados?

El horizonte B2 queda saturado

17-¿Cuáles horizontes quedan semi saturados?

$$V_{aiA} = 807,57 \text{ m}^3 \text{ (Inicialmente está saturado)}$$

$$\text{Agua que queda en el horizonte B1} = 807,57 \text{ m}^3 - 105,16 \text{ m}^3$$

$$\text{Agua que queda en el horizonte B1} = 702,41 \text{ m}^3$$

R/ el horizonte B1 queda semisaturado

18-¿Cuáles horizontes no quedan saturados ni semi saturados?

El horizonte A

19-¿A qué profundidad desde la superficie del suelo queda el nivel freático?

$$L_{agua} = \frac{702,41 \text{ m}^3}{250\text{m} * 100\text{m}} * \frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}}$$

Lagua = 2,8096 cm de lámina de agua

$$h = \frac{R}{\mu}$$

$$h = \frac{2,8096 \text{ cm}}{\mu}$$

Cálculo de la macroporosidad

$$\mu = \frac{\text{VolAi(suelo a CC)}}{\text{VolHzB1}} * 100$$

CC BY-NC-ND 4.0

$$\mu = \frac{807,57}{2250} * 100$$

$$\mu = 35,89\%$$

$$h = \frac{2,8096}{\frac{35,89}{100}}$$

La altura de agua saturada en el suelo h = 7,8284 cm

Altura de agua en el B1

$$9 \text{ cm} - 7,8284 \text{ cm} = 1,17 \text{ cm}$$

$$\text{Prof NF} = 18 \text{ cm} + 1,17 \text{ cm}$$

$$\text{Prof NF} = 19,17 \text{ cm}$$

R/ está a 19,17 cm de profundidad

CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

Bibliografía

Cisneros, R. 2005. Apuntes de la materia de riego y drenaje. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://cadenacacaoca.info/CDOC-Deployment/documentos/Apuntes_de_Riego_y_Drenaje_v.2.pdf

Fertilab. (S.f.). Interpretación de resultados de textura y humedad del suelo. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.fertilab.com.mx/AdminFertilab/Notas_Tecnicas/pdf_notas/Interpretacion_de_Resultados_de_Textura_y_Humedad_del_Suelo.pdf

Instituto de investigación y formación agraria y pesquera. 2010. Manual de riego para agricultores, módulo 4: Riego localizado. Santa lucía – España. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.juntadeandalucia.es/export/drupal/jda/1337160941RIEGO_BAJA.pdf

López, Y. Relaciones hídricas en el contenido agua-suelo-planta-atmósfera. 2000. Palmira – Columbia. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/08f083e2-5ca2-459d-8274-1660c29955fa/content

Matadamas, E. (S.f.). El agua en el suelo y las plantas. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/file:///C:/Users/adchavarria/Downloads/EL%20AGUA%20PRES%20PDF.pdf

Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. 2000. Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, experiencias en américa latina, Serie: zonas áridas y semiáridas. Santiago de Chile.

Paulet, M. Relación suelo agua planta: requerimientos de agua de las plantas en relación con el clima y el suelo para una producción óptima. 1983. República Dominicana. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://repositorio.iica.int/server/api/core/bitstreams/5a7242a7-d4be-4bcd-ba5d-6501bf7409ca/content

Salinas, I. 2025. Tecnologías para mejorar la producción y productividad agropecuaria. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgglefindmkaj/https://www.una.edu.ni/wp-content/uploads/2025/02/tema2.pdf

CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarria@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

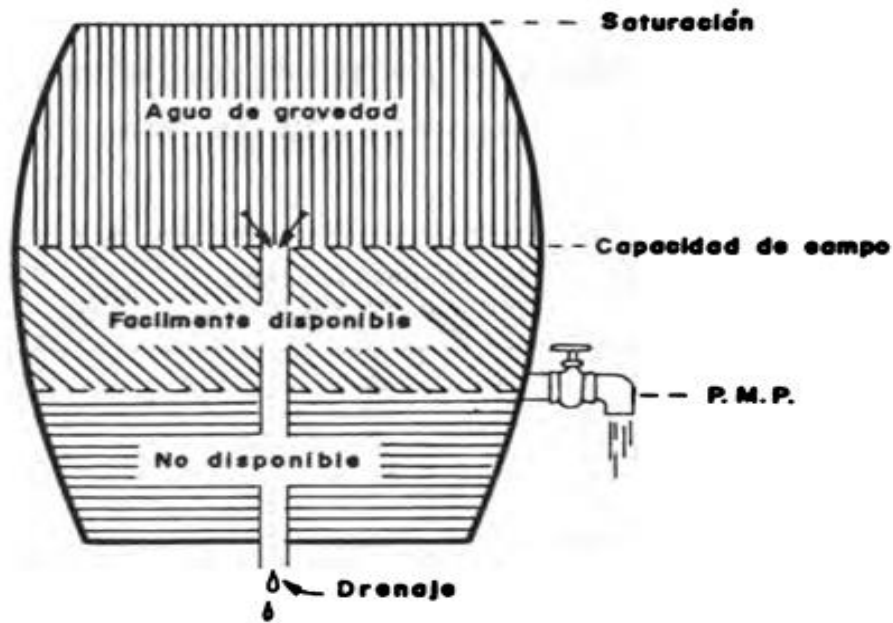
Silva, P. Silva, H. Garrido, M. Acevedo, E. 2015. Manual de estudio y ejercicios relacionados con el contenido de agua en el suelo y su uso por los cultivos. Santiago-Chile. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/130642/Manual-de-estudio-y-ejercicios-relacionados-con-el-contenido-de-agua.pdf

Unidad de Hidrología Depto. de Suelos y Aguas Facultad de Agronomía. (S.f.). Agua en el suelo. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://cdn.portalfruticola.com/2017/11/6d33e6a4-agua-en-el-suelo.pdf

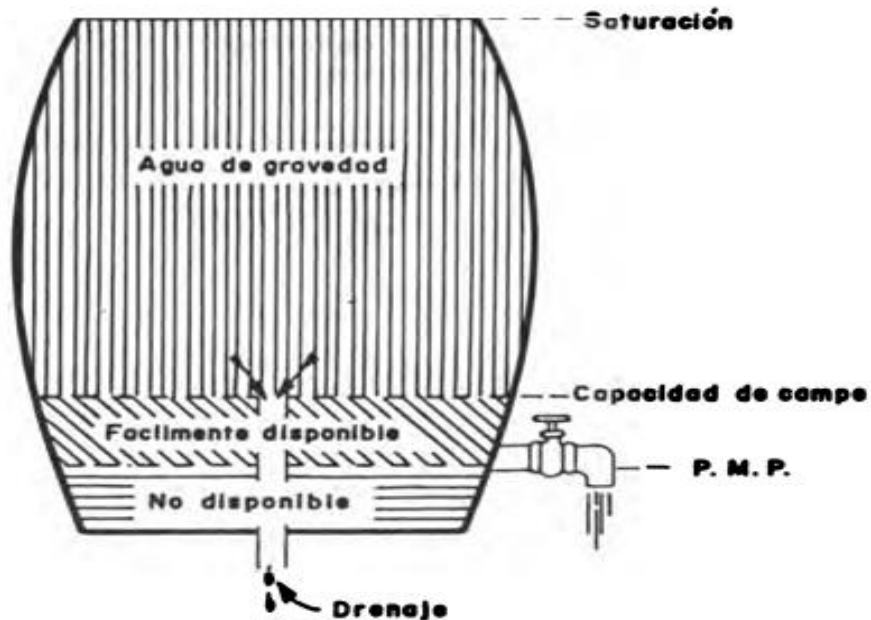
CC BY-NC-ND 4.0

**Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com**

Anexos



El barril representa las características de humedad de un suelo arcilloso.

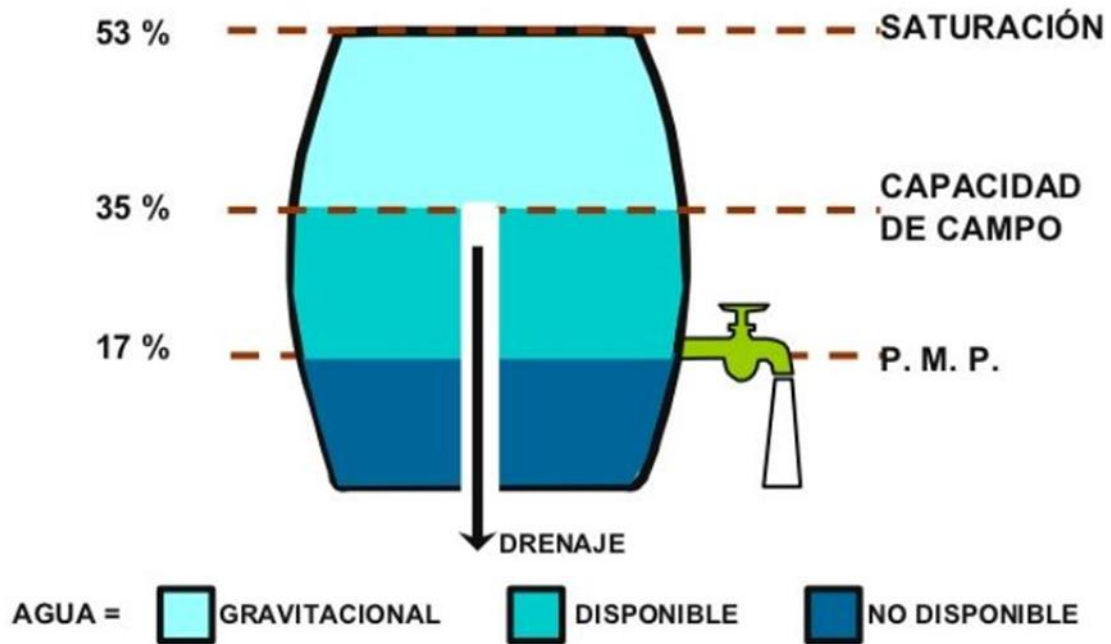


El barril representa las características de humedad de un suelo arenoso.

Tomado de: Paulet, M. Relación suelo agua planta: requerimientos de agua de las plantas en relación con el clima y el suelo para una producción óptima. 1983.

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

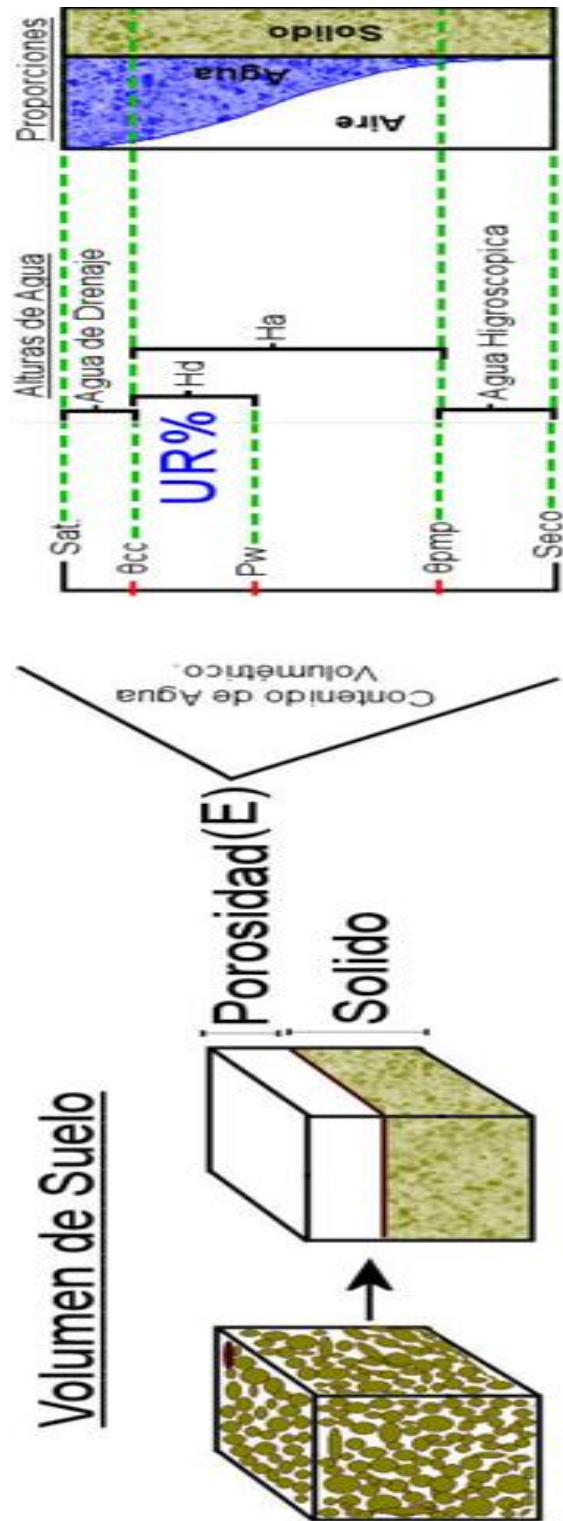


AGUA DEL SUELO

Tomado de: <https://www.portalfruticola.com/noticias/2018/01/25/la-capacidad-de-campo-de-un-suelo-tecnicas-para-su-medicion/>

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

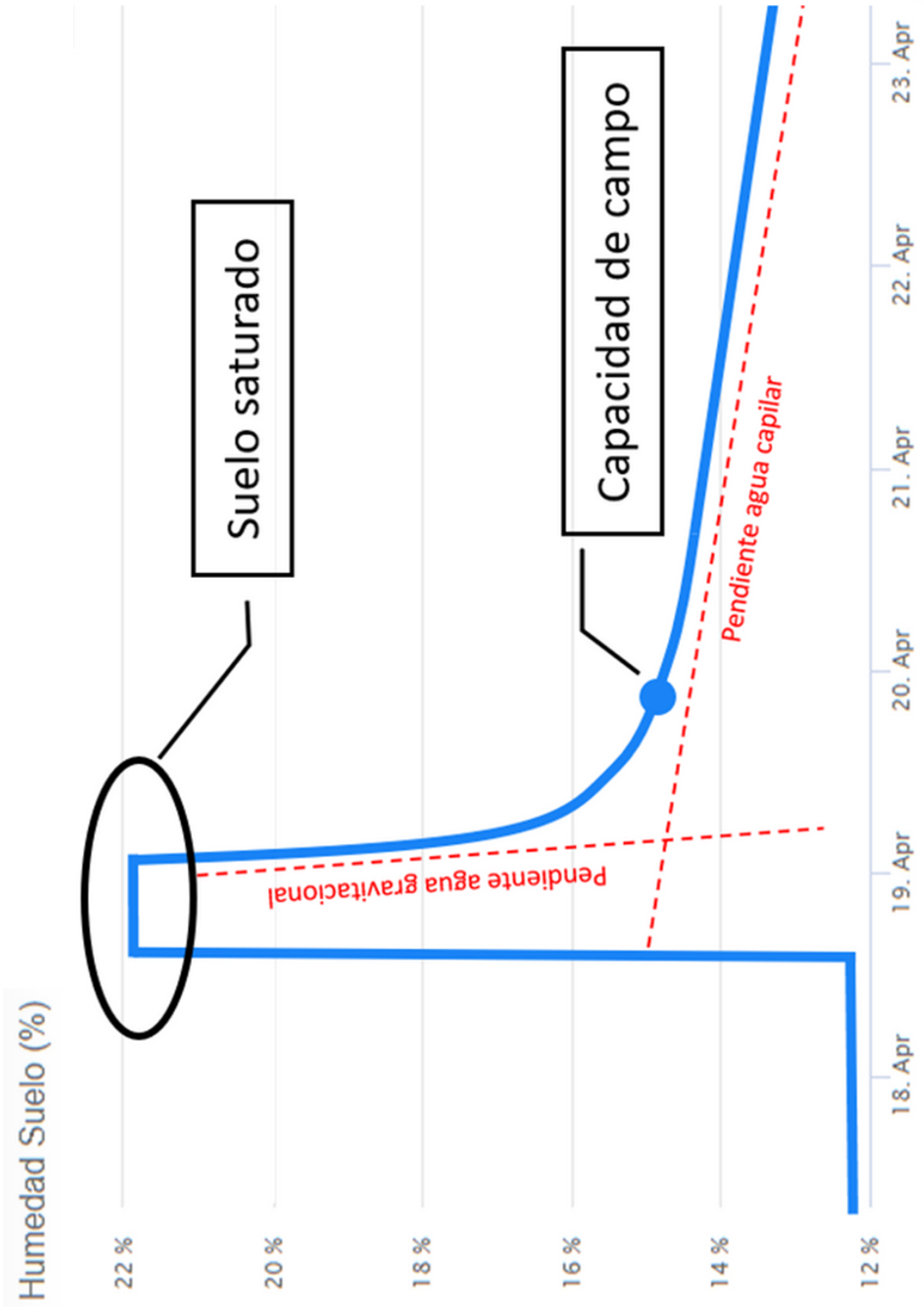


Tomado de:

https://es.wikipedia.org/wiki/Capacidad_de_campo#/media/Archivo:Humedad_en_el_suelo.jpg

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
 Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com



Tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=FBjS3rNEREO>

CC BY-NC-ND 4.0

¿Qué es el agua disponible del suelo?

El agua en el suelo puede encontrarse en diversas formas y lugares, y sólo una fracción de toda el agua es accesible a los microorganismos y plantas, a esta fracción se le conoce como agua disponible

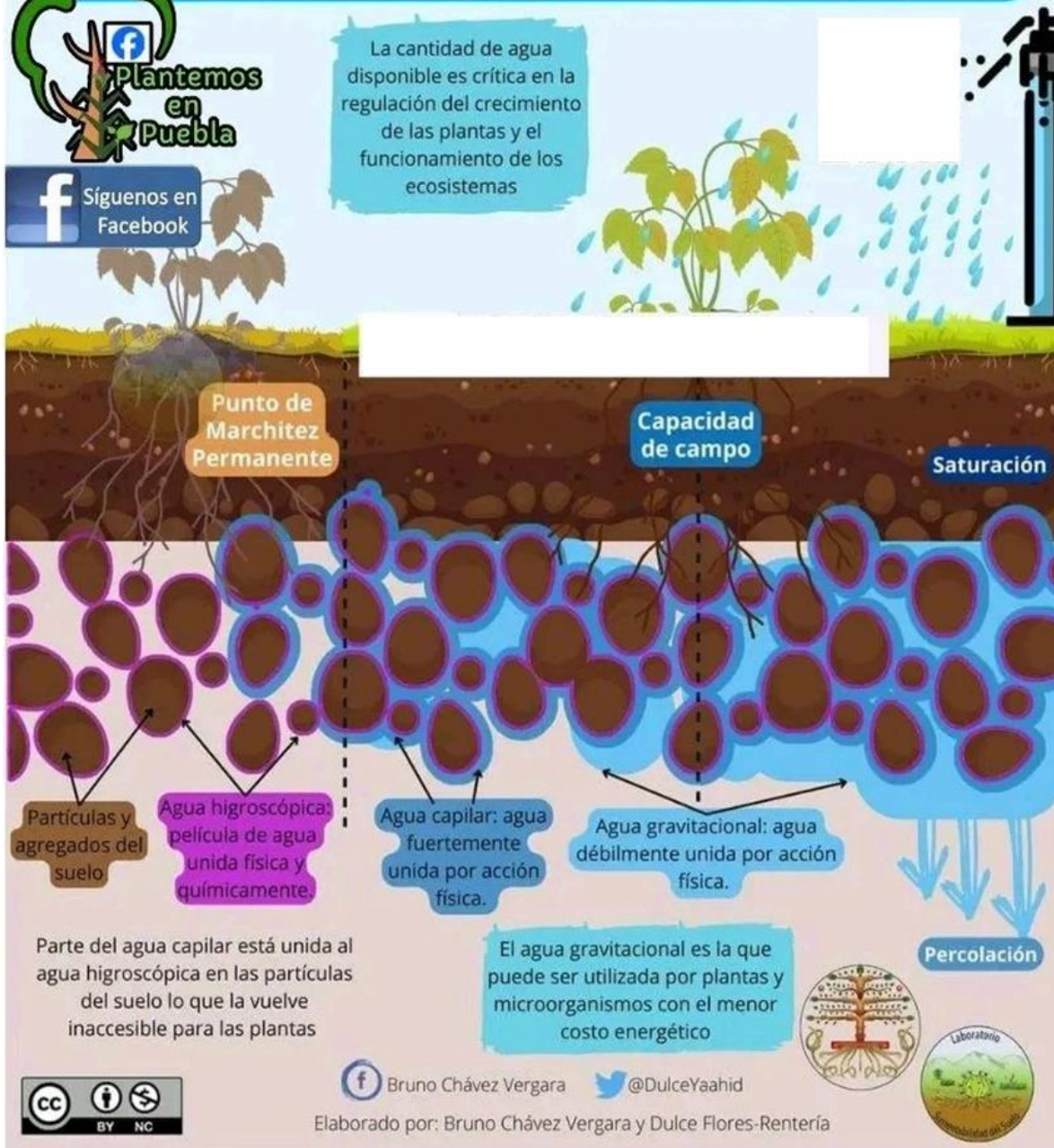


Plantemos en Puebla



Síguenos en Facebook

La cantidad de agua disponible es crítica en la regulación del crecimiento de las plantas y el funcionamiento de los ecosistemas



Tomado de: https://es.linkedin.com/posts/sixto-s%C3%A1nchez-5584b122_explorando-el-equilibrio-del-suelo-hablamos-activity-7313921846251311104-TUUT

CC BY-NC-ND 4.0

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

RELACION ENTRE EL TIPO DE SUELO Y CARACTERISTICAS DE HUMEDAD EXPRESADO EN
BASE A PESO DE SUELO SECO

(Doneen 1971. FAO. IDP. 1)

Tipo de Suelo	Lugar	Capacidad de Campo	P.M.P	Relación $\frac{C.C.}{P.M.P.}$	cm. de agua disponible por 30 cm. de profundi- dad. *
		§	§	§	
1 Arena fina	California	3.29	1.33	2.47	0.86
2 Arena	Arizona	4.79	3.17	1.51	0.66
3 Franco arenoso	California	9.69	4.17	2.17	2.03
4 Franco arenoso	California	11.09	3.08	3.60	3.31
5 Franco arenoso fino	California	16.80	8.93	1.88	3.20
6 Franco limoso	New Mexico	17.28	8.23	2.10	3.76
7 Franco arenoso	Oregon	18.79	6.61	2.85	5.06
8 Franco limo arcilloso	New York	21.70	5.02	4.35	6.93
9 Franco limoso	Ohio	23.36	6.12	3.82	7.35
10 Franco arcilloso	Ohio	24.51	11.55	2.12	5.02
11 Arcilloso	California	27.33	12.53	2.18	6.00
12 Franco fino arcilloso	California	28.33	12.49	2.26	6.43
13 Arcilloso	New Mexico	30.42	16.00	1.91	6.00
14 Franco arcilloso	California	31.12	25.70	1.21	1.81
15 Franco	Oregon	37.90	19.03	1.99	7.82

Tomado de: Paulet, M. Relación suelo agua planta: requerimientos de agua de las plantas en relación con el clima y el suelo para una producción óptima. 1983.

[CC BY-NC-ND 4.0](#)

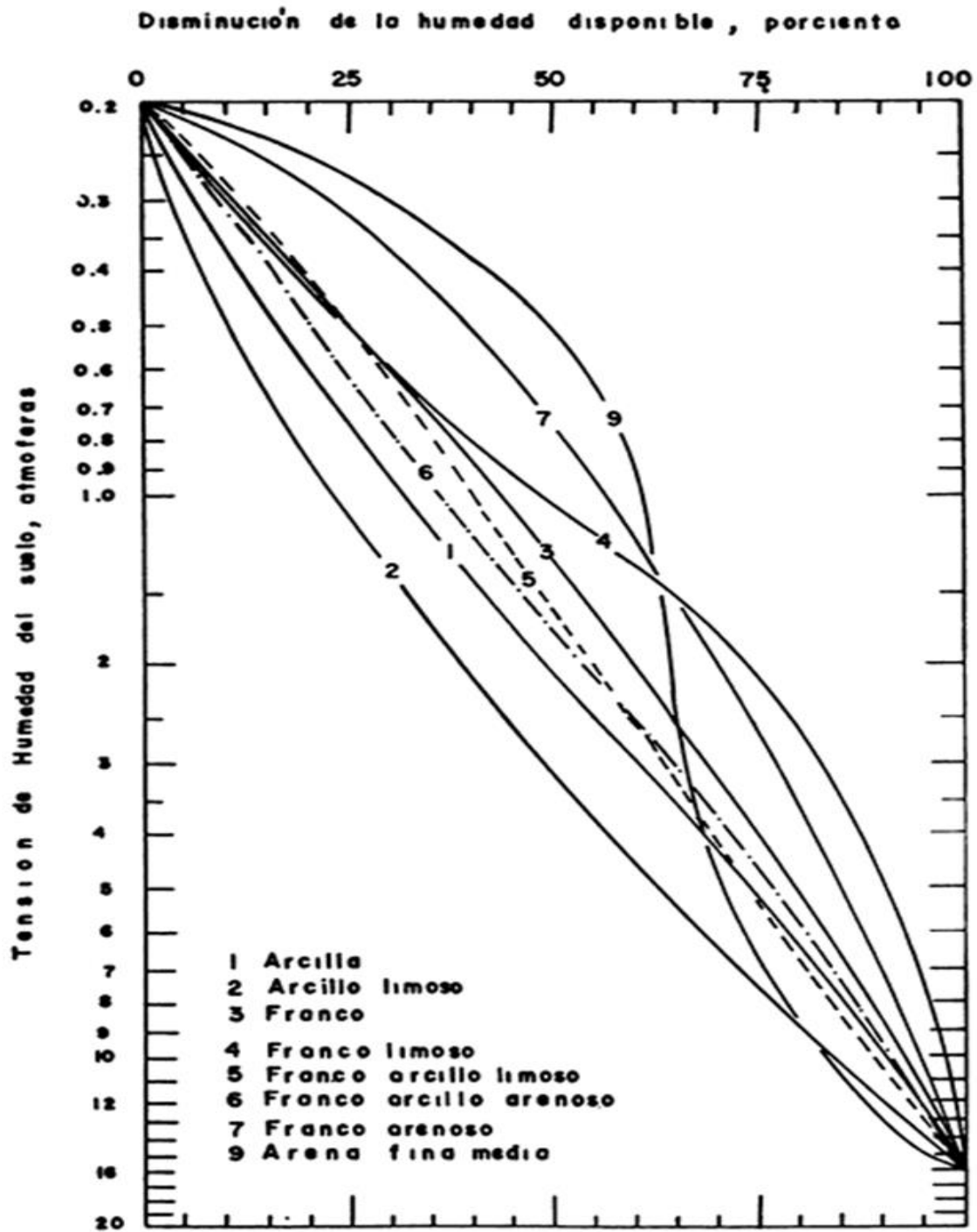
Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

AGUA DISPONIBLE PARA DIFERENTES TEXTURAS DE SUELO

Textura	cm de agua por 30 cm de suelo
Arena gruesa	1.0 a 2.0
Arena franca a arena gruesa	2.0 a 2.5
Franco arenoso fino a franco arenoso	2.5 a 4.0
Franco limoso a franco arenoso fino	4.0 a 5.5
Arcilla a franco arcilloso	4.5 a 6.0

Doneen 1971. FAO. IDP. 1

Tomado de: Paulet, M. Relación suelo agua planta: requerimientos de agua de las plantas en relación con el clima y el suelo para una producción óptima. 1983.



Curvas de Retención de Humedad en función de la disminución de la humedad disponible

Tomado de: Paulet, M. Relación suelo agua planta: requerimientos de agua de las plantas en relación con el clima y el suelo para una producción óptima. 1983.

[CC BY-NC-ND 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Instituto Tecnológico de Costa Rica - Escuela Ingeniería Agrícola -
Dr. Adrián Enriq. Chavarría Vidal adchavarría@itcr.ac.cr chavarrivae@gmail.com

