



PROGRAMA DE CONVERSIÓN DE DEUDA
DE HONDURAS FRENTE A ESPAÑA



Ingeniería en
Energías
Renovables

PRACTICAS RELACIÓN SUELO - AGUA - PLANTA



**PRACTICAS RELACIÓN SUELO - AGUA - PLANTA EN CULTIVOS
DENDROENERGICOS**

AUTOR:

ADRIÁN ENRIQUE CHAVARRÍA VIDAL

RECONOCIMIENTO TÉCNICO:

**CÉSAR AUGUSTO ALVARADO
MARNIE AMADA GIRÓN**

DICIEMBRE 2017

CONTENIDO

PRÁCTICA: DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE UNA PLANTA EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO POR MEDIO DE MEDIDAS DE CRECIMIENTO, FOTOSÍNTESIS E INTERCAMBIO GASEOSO	7
OBJETIVOS	10
INTRODUCCIÓN.....	10
LA FOTOSÍNTESIS.....	11
TRANSPIRACIÓN E INTERCAMBIO GASEOSO.....	13
MATERIALES.....	14
PROCEDIMIENTO.....	15
PREGUNTAS.....	15
PRÁCTICA: EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE LAS PLANTAS.	
OBJETIVOS.....	17
INTRODUCCIÓN.....	17
ORIGEN DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	17
SÍNTOMAS DE LA COMPACTACIÓN.....	20
EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO.....	21
MATERIALES.....	22
PROCEDIMIENTO.....	22
PREGUNTAS.....	23
PRÁCTICA: MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO EN FLUJO NO SATURADO	
OBJETIVOS.....	25
INTRODUCCIÓN.....	25
SORTIVIDAD (S).....	26
FLUJO ESTACIONARIO.....	27
MATERIALES.....	30
PROCEDIMIENTO.....	30
PREGUNTAS.....	31
PRÁCTICA: RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIDO CON TENSIÓMETRO, MESA DE SUCCIÓN Y BLOQUES DE YESO Y NYLON	
OBJETIVOS.....	33
INTRODUCCIÓN.....	34
RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO.....	34
1- TENSIÓMETRO.....	34
¿CÓMO INTERPRETAR LAS LECTURAS REALIZADAS CON UN TENSIÓMETRO?.....	38
¿DÓNDE SE INSTALA EL TENSIÓMETRO?.....	40
VENTAJAS:.....	40
DESVENTAJAS:.....	40
2- MESA DE SUCCIÓN (0 - 0,1 BAR):	40
FUERZAS DE RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO.....	41

TENSIÓN SUPERFICIAL.....	41
3- BLOQUES DE YESO O NYLON.....	41
MATERIALES.....	42
PROCEDIMIENTO.....	43
PREGUNTAS.....	43
PRÁCTICA: RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIDO CON OLLAS DE PRESIÓN	
OBJETIVOS.....	45
INTRODUCCIÓN.....	45
CAPACIDAD DE CAMPO.....	47
PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE.....	48
COEFICIENTE HIGROSCÓPICO.....	49
CLASIFICACIÓN BIOLÓGICA DEL AGUA EN EL SUELO.....	50
MATERIALES.....	53
PROCEDIMIENTO.....	54
PREGUNTAS.....	55
PRÁCTICA: INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO.....	
OBJETIVOS.....	57
INTRODUCCIÓN.....	57
ELECCIÓN DE UBICACIÓN DE LOS ANILLOS.....	60
MODELO MATEMÁTICO DE INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO.....	61
MÉTODO DIRECTO DE CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN BÁSICA.....	63
MATERIALES.....	64
PROCEDIMIENTO.....	64
PREGUNTAS.....	66
COMPONENTES DEL SISTEMA TRIFÁSICO (SÓLIDO, LÍQUIDO Y GASEOSO) DEL SUELO.....	69
RELACIONES MATEMÁTICAS Y EJERCICIOS DEL SISTEMA TRIFÁSICO DEL SUELO.....	71
CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO.....	71
DENSIDAD REAL O DENSIDAD DE PARTÍCULAS O PESO ESPECÍFICO REAL.....	71
DENSIDAD APARENTE O PESO ESPECÍFICO APARENTE.....	72
HUMEDAD GRAVIMÉTRICA.....	72
HUMEDAD VOLUMÉTRICA.....	73
COLUMNA O ALTURA DE AGUA EN EL SUELO.....	74
DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO.....	75
CAPACIDAD DE CAMPO.....	75
PUNTO DE MARCHITES PERMANENTE (PMP).....	76
HUMEDAD APROVECHABLE O AGUA ÚTIL O (AP O AU).....	77
ALTURA O LÁMINA DE AGUA APROVECHABLE = ALTURA O LÁMINA DE AGUA ÚTIL O (HAA O HAU).....	77
UMBRAL DE RIEGO (UR) O MÁXIMO AGOTAMIENTO DE AGUA (MAA) O AGUA FÁCILMENTE DISPONIBLE (AFD) EN EL SUELOS PARA LAS PLANTAS.....	78
UMBRAL DE RIEGO (UR) O MÁXIMO AGOTAMIENTO DE AGUA (MAA) O AGUA FÁCILMENTE DISPONIBLE (AFD) EN EL SUELOS PARA LAS PLANTAS EXPRESADO COMO UNA LÁMINA DE RIEGO.....	79
AGUA DIFÍCILMENTE DISPONIBLE O AGUA DE RESPALDO (ADD O AR) EN EL SUELO PARA LAS PLANTAS.....	80
CANTIDAD DE HUMEDAD PARA LLEVAR AL SUELO DESDE UN PUNTO DE HUMEDAD HASTA CAPACIDAD DE CAMPO.....	80

ALTURA DE AGUA PARA LLEVAR AL SUELO DESDE UN PUNTO DE HUMEDAD HASTA CAPACIDAD DE CAMPO.....	81
POROSIDAD DEL SUELO TOTAL.....	82
ALTURA DE AGUA O LÁMINA DE AGUA NECESARIA PARA LLEVAR A SATURACIÓN UN SUELO.....	83
POROSIDAD OCUPADA POR EL AIRE.....	83
SATURACIÓN DE AGUA DEL ESPACIO POROSO.....	86
RELACIÓN DE POROS.....	89
PRACTICA DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO.....	91
PRÁCTICA DE INFILTRACIÓN.....	113
BIBLIOGRAFIA.....	121



*Obró mucho el que
nada dejó para
mañana.*

Baltasar Gracián (1601-1658)



PRÁCTICA: DESARROLLO Y CRECIMIENTO DE UNA PLANTA EN DIFERENTES TIPOS DE SUELO POR MEDIO DE MEDIDAS DE CRECIMIENTO, FOTOSÍNTESIS E INTERCAMBIO GASEOSO

OBJETIVOS

- Medir el desarrollo de un mismo tipo de planta en tres diferentes tipos de suelo (textura)
- Medir la fotosíntesis en las plantas
- Medir el intercambio gaseoso en las plantas
- Medir el área foliar en las plantas
- Medir el peso húmedo y seco de las plantas
- Definir estadísticamente diferencia en los crecimientos

INTRODUCCIÓN

Las plantas (Figura 1) son seres vivos que como los animales se alimentan, respiran y se reproducen. A diferencia de los animales las plantas no pueden desplazarse, ni tampoco sentir, pero sí pueden hacer algo que los animales no hacen, como fabricar su propio alimento mediante la fotosíntesis.

La fotosíntesis consiste básicamente en la elaboración de azúcar a partir del CO_2 (dióxido de carbono) minerales y agua con la ayuda de la luz solar. El oxígeno que se forma por la reacción entre el CO_2 y el agua, es expulsado de la planta a través de los estomas de las hojas. Para hacer la fotosíntesis se necesita la energía que toma la planta del sol.

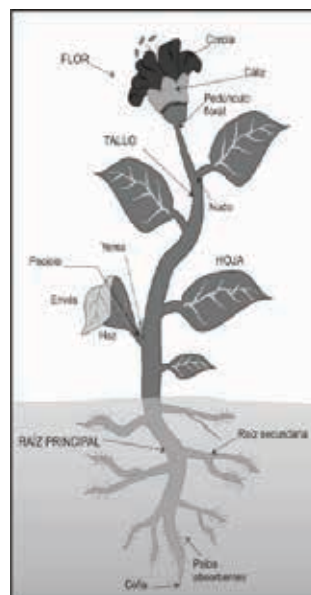


FIGURA 1: ÓRGANOS PRINCIPALES DE UNA PLANTA.

En su circunscripción más amplia coincide en un grupo de organismos lejanamente emparentados, que pueden agruparse en cianobacterias, hongos, algas y plantas terrestres, organismos que casi no poseen ningún carácter en común salvo por el hecho de poseer cloroplastos (o de ser el ancestro de un cloroplasto, en el caso de las cianobacterias) o de no poseer movilidad (en el caso de los hongos).

LA FOTOSÍNTESIS

Las plantas son seres vivos llamados autótrofos, lo que significa que son capaces de obtener su propio alimento, a diferencia, por ejemplo, los animales que necesitan alimentarse de las plantas u otros animales, y es por ello por lo que reciben el nombre de heterótrofos. Para ello, las plantas aprovechan la energía del sol mediante un proceso denominado fotosíntesis, a partir del cual obtienen hidratos de carbono que son la base energética de su alimentación (Figura 2).

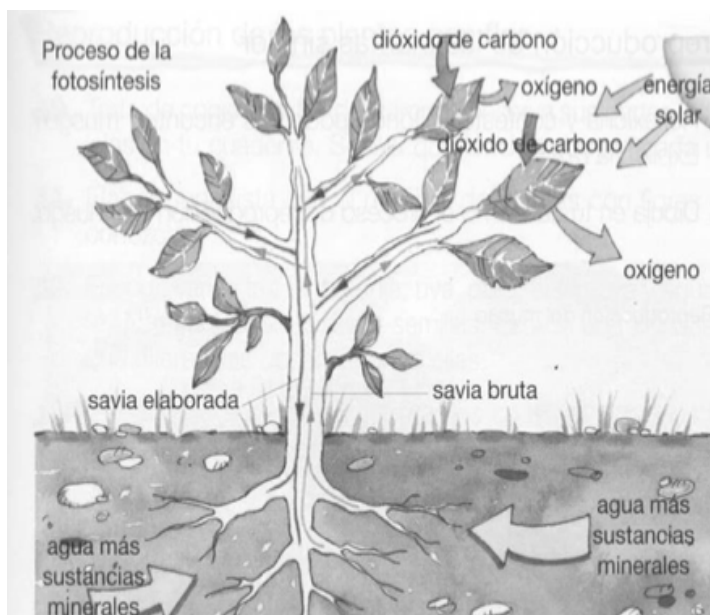


FIGURA 2: LA FOTOSÍNTESIS DE UNA PLANTA Y LOS ELEMENTOS QUE INTERVIENEN

El proceso de la fotosíntesis es una reacción bioquímica muy compleja, pero que se puede resumir en la figura 3:

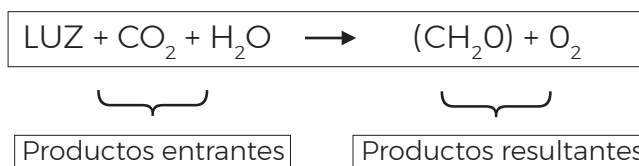


FIGURA 3: COMPONENTES PRINCIPALES Y RESULTADO DE LA FOTOSÍNTESIS

Las hojas a través de la clorofila que es una sustancia de color verde que contienen las plantas (y de ahí el color verde de las hojas), es capaz de absorber la radiación solar y convertir y aprovechar la energía que tienen.

También es necesario el dióxido de carbono (CO_2) que hay en el aire el cual, las plantas lo toman a través de los estomas de las hojas.

Un producto resultante de la fotosíntesis es el oxígeno (O_2). Las plantas, regeneran el aire de la atmósfera eliminando parte del CO_2 por medio de la absorción, liberando O_2 . Pero para la planta el resultado más importante de la fotosíntesis es la obtención de hidratos de carbono (CH_2O) que la planta va a utilizar como fuente energética en otros procesos posteriores (en la respiración) y que por medio del floema son transportados como savia, permitiéndole crecer (Figura 4).

Una vez obtenidos en las hojas, los hidratos de carbono se reparten a todas las partes de la planta a través del floema, que es un conjunto de tuberías de vuelta distintas del xilema. El proceso de la fotosíntesis, solamente tiene lugar durante el día, ya que es necesaria la luz del sol.

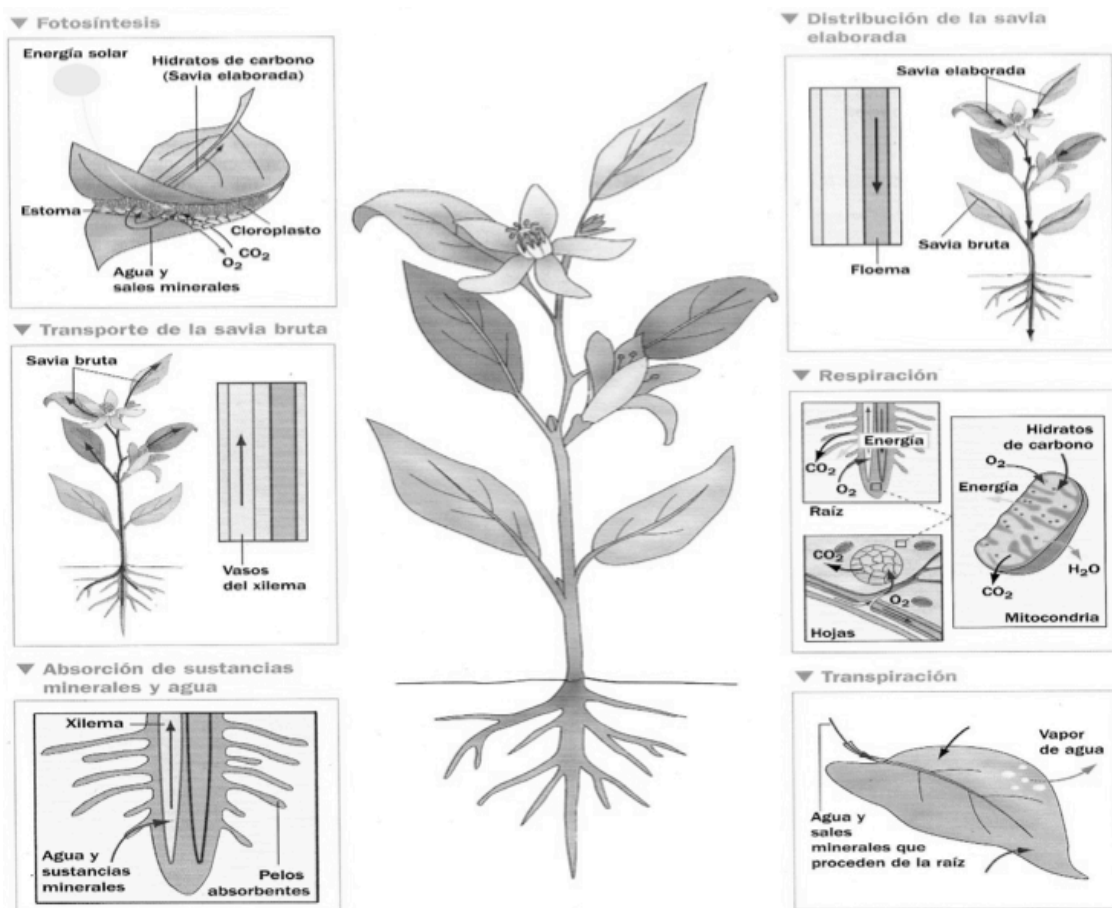


FIGURA 4: FOTOSÍNTESIS Y DISTRIBUCIÓN DE LA SAVIA ELABORADA EN LA PLANTA

TRANSPIRACIÓN E INTERCAMBIO GASEOSO

La transpiración (Figura 5) es un determinante primario del balance energético de la hoja y del estado hídrico de la planta. Este proceso comprende la evaporación del agua desde las células superficiales en el interior de los espacios intercelulares y su difusión fuera del tejido vegetal principalmente a través de los estomas. Junto al intercambio de dióxido de carbono (CO_2), determina la eficiencia de uso del agua de una planta.

La adquisición de dióxido de carbono y el intercambio de oxígeno son fundamentales para que se desarrollen los procesos de fotosíntesis y respiración de las plantas junto con una pérdida de agua de la planta en forma de vapor a través del proceso denominado transpiración.

La transpiración es la difusión de vapor de agua desde el interior de la hoja hacia la atmósfera. La transpiración depende de la conductancia foliar al vapor de agua y el diferencial de presión de vapor (DPV).

Las hojas pierden agua a través de sus estomas como una consecuencia de la actividad fotosintética de las células del mesófilo (Figura 6). Los estomas ejercen el mayor control de corto plazo en las relaciones hídricas de una planta debido a que controlan la salida de agua que ocurre en respuesta a un fuerte gradiente de diferencia de presión de vapor (DPV) entre el aire y la hoja.

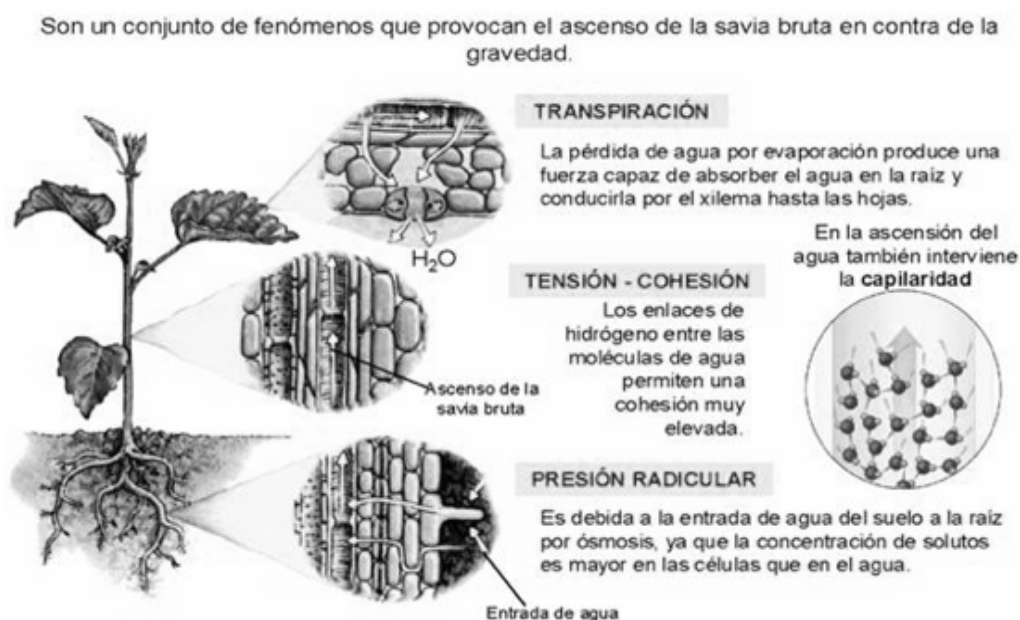


FIGURA 5: ELEMENTOS PRINCIPALES QUE GENERA LA TRANSPIRACIÓN

Tanto la absorción desde el suelo por las raíces como la transpiración por las hojas, ejercen un control primario en la regulación de la conductancia estomática. El flujo de agua a través de la planta responde entonces a dos ambientes distintos. Por un lado, el ambiente aéreo a que está expuesta la hoja y que puede ser definido en términos de radiación, temperatura, diferencial de presión de vapor, contenido de CO_2 y condición de la capa límite. Por otro lado, las raíces comúnmente generan señales de estrés hídrico, las que sumadas a las señales en la conductividad hidráulica del xilema también controlan la pérdida de agua por la hoja.

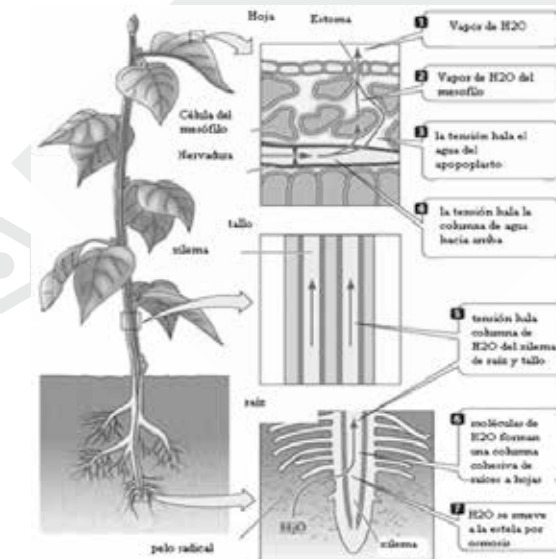


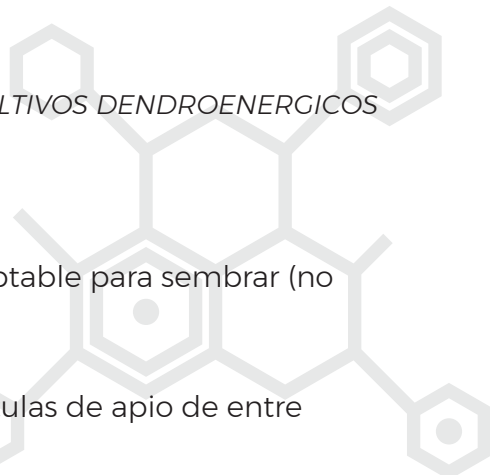
FIGURA 6: PROCESO DE TRANSPIRACIÓN EN LA PLANTA

El agua transpirada proviene principalmente del componente líquido de los suelos, denominado por los científicos solución del suelo y es sobre todo agua con varias sustancias minerales en disolución, cantidades grandes de oxígeno y dióxido de carbono disueltos. La solución del suelo es muy compleja y tiene importancia primordial al ser el medio por el que los nutrientes son absorbidos por las raíces de las plantas. Cuando la solución del suelo carece de los elementos requeridos para el crecimiento de las plantas, el suelo es poco fértil hasta llegar a ser prácticamente estéril.

Los principales gases contenidos en el suelo son el oxígeno, el nitrógeno y el dióxido de carbono. El primero de estos gases es importante para el metabolismo de las plantas porque su presencia es necesaria para el crecimiento de varias bacterias y de otros organismos responsables de la descomposición de la materia orgánica. La presencia de oxígeno también es vital para el crecimiento de las plantas ya que su absorción por las raíces es necesaria para sus procesos metabólicos.

MATERIALES:

- Suelo arcilloso, franco y arenoso
- Recipientes plásticos para sembrar
- Semillas de culantro, plántulas de apio o alguna otra de rápido crecimiento
- Medidor de transpiración
- Medidor de fotosíntesis
- Medidor de área foliar
- Balanzas
- Recipientes para pesar



PROCEDIMIENTO

- Se agrega suelo a los recipientes plásticos con una humedad aceptable para sembrar (no saturado ni seco)
- Se siembran las semillas de culantro en surco continuo o las plántulas de apio de entre cuatro a seis por grupo dependiendo del recipiente que se tiene.
- Se debe de tener los cuidados en el tiempo para un buen desarrollo de las plantas como por ejemplo estar regándolas
- Se evalúa en el tiempo el punto indicado para comenzar a medir transpiración, temperatura y fotosíntesis.
- Se realizan en dos diferentes fechas una curva de transpiración, una de fotosíntesis y una de temperatura midiendo cada media hora en el transcurso del día desde las 7:30 am. hasta las 11:00 am. con los instrumentos mencionados.
- Cuando se tiene un crecimiento aceptable se procede a arrancar las plantas las cuales se separan en sus partes (raíces, tallos, y hojas) de manera individual para el caso del apio y tres muestras en el caso del culantro.
- Se mide el área foliar.
- Se pesa el peso húmedo de cada una de sus partes.
- Se secan cada una de sus partes en el horno a 75 °C por tres o cuatro días.
- Se trasladan los valores de producción a toneladas por hectáreas y se comparan producciones
- Se define cual es el tipo de suelo con producciones mayores.
- Definir si se presentaron diferencias en las temperaturas, transpiraciones y fotosíntesis con respecto a las producciones.

PREGUNTAS:

- ¿Qué significa el peso seco de una planta? Explique
- ¿Cómo es recomendable realizar las comparaciones de los valores encontrados de las plantas, en base a peso seco o en base a peso húmedo? ¿Por qué?, Explique.

La ciencia, a pesar de sus progresos increíbles, no puede ni podrá nunca explicarlo todo. Cada vez ganará nuevas zonas a lo que hoy parece inexplicable. Pero las rayas fronterizas del saber, por muy lejos que se eleven, tendrán siempre delante un infinito mundo de misterio.

Gregorio Marañón (1887-1960)

PRÁCTICA: EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN LA GERMINACIÓN Y DESARROLLO DE LAS PLANTAS

OBJETIVOS

Medir el desarrollo de un mismo tipo de planta en tres diferentes tipos de suelo compactados, expresado en valores peso seco y peso húmedo de las plantas de raíz tallos y hojas.

INTRODUCCIÓN

ORIGEN DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

La compactación del suelo corresponde a la pérdida de volumen que experimenta una determinada masa de suelo, debido a fuerzas externas que actúan sobre él. Estas fuerzas externas, en la actividad agrícola, tienen su origen principalmente en:

- Cargas producidas por implementos de labranza del suelo
- Cargas producidas por los neumáticos de tractores
- Pisoteo de animales

En condiciones naturales (sin intervención antrópica) se pueden encontrar en el suelo, horizontes con diferentes grados de compactación llamada compactación o adensamiento natural, lo que se explica por las condiciones que dominaron durante la formación y la evolución del suelo. Sin embargo, es bajo condiciones de intensivo uso agrícola que este fenómeno se acelera llamada compactación o adensamiento provocado y llega a producir serios problemas en el desarrollo de las plantas cultivadas.

Su principal consecuencia es la modificación de la porosidad. A medida que se incrementa la compactación disminuye el espacio poroso, especialmente la porosidad de mayor diámetro que es la ocupada por el aire y el agua útil como se muestra en la (figura 7).

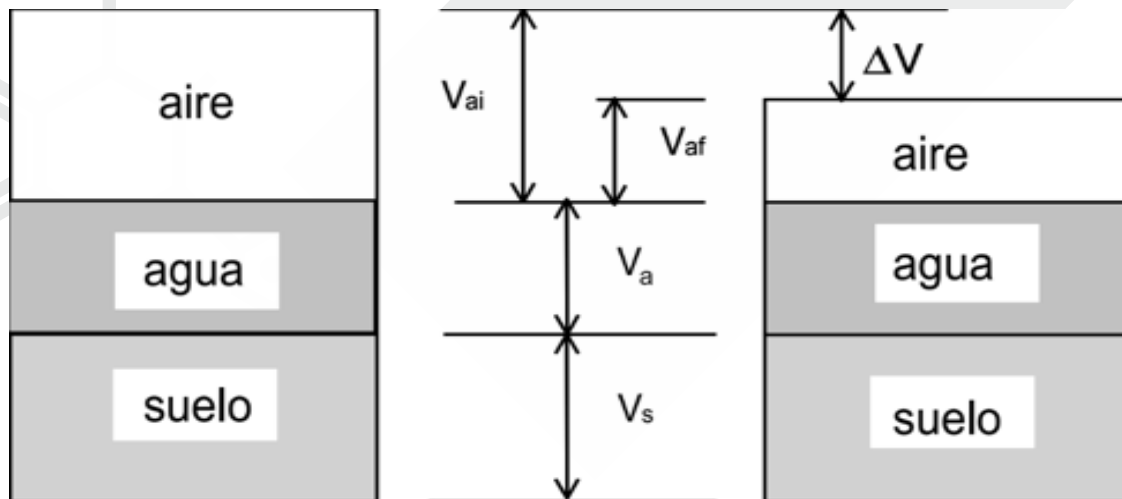


FIGURA 7: EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN EL SUELO

Donde:

- vai** = volumen de aire inicial (cm^3)
- vaf** = volumen de aire final (cm^3)
- va** = volumen de agua (cm^3)
- vs** = volumen del suelo sólido (cm^3)
- ΔV** = diferencia de volumen o volumen perdido (cm^3)

La infiltración también se ve afectada ya que se disminuye la permeabilidad de la capa compactada. Si esta compactación se produce en la capa superficial se producirá un incremento de la escorrentía y de la erosión, y si la capa compactada está a una cierta profundidad aparecerán problemas de encharcamiento al disminuir la velocidad de infiltración. La mayor escorrentía y la menor tasa de infiltración hacen que una parte del agua caída no pase a las capas inferiores del suelo, por lo que cuando el suelo se encuentra compactado la reserva de agua es mucho menor.

La compactación del suelo provoca la pérdida de rendimiento en la producción de cultivos mediante la restricción de crecimiento de las raíces y la reducción de la circulación del aire y el agua en el suelo.

Las raíces necesitan agua y oxígeno para poder desarrollarse, y además debe existir un espacio poroso adecuado entre las partículas del suelo por el que puedan ir creciendo. El principal obstáculo con el que se puede encontrar la raíz en su crecimiento es el impedimento mecánico que puede deberse tanto a la presencia de rocas u horizontes muy pedregosos a poca profundidad, como a la presencia de capas de suelo endurecidas o compactadas, en las cuales la densidad es alta y existen pocos espacios entre las partículas (Figura 8). Debemos tener en cuenta que, aunque las raíces son capaces de penetrar por grietas y poros muy pequeños, las paredes de éstos deben ser capaces de ceder ante la presión ejercida por éstas. Conforme va aumentando la densidad del suelo el crecimiento de las raíces va requiriendo un mayor gasto de energía y su desarrollo va siendo afectado, pudiendo verse totalmente impedido si la compactación es excesiva.

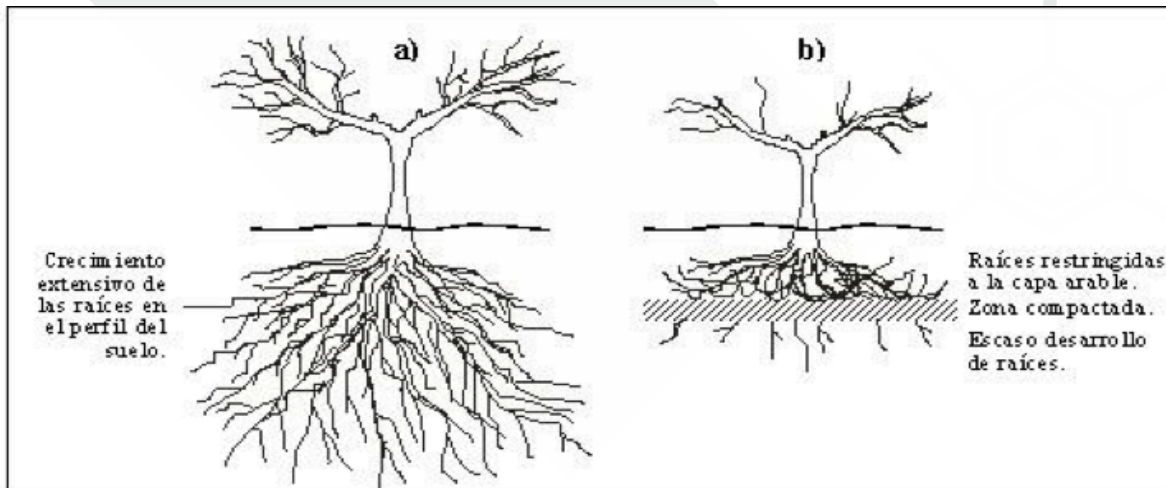


FIGURA 8: DESARROLLO DE UN CULTIVO EN UN SUELO SIN RESTRICCIONES FÍSICAS DE SUELOS (A) Y EL MISMO CULTIVO DESARROLLÁNDOSE EN UN SUELO QUE TIENE UNA ESTRATO DE SUELOS COMPACTADA (B)

LOS FACTORES QUE VAN A TENER UN EFECTO DIRECTO SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS RAÍCES SON:

- Aumento de la resistencia mecánica del suelo
- Disminución de la macro porosidad del suelo

El aumento de la resistencia mecánica del suelo va a restringir el crecimiento de las raíces a espacios de menor resistencia, tales como los que se ubican entre los agregados de la las estructuras del suelo (terrones naturales de los horizontes del suelo), en cavidades formadas por la fauna del suelo (lombrices y otros) y en espacios que se producen por la descomposición de restos orgánicos gruesos como el caso de las raíces muertas. Esta situación va a producir un patrón de crecimiento característico de raíces aplanadas y deformes, ubicadas en fisuras del suelo, con una escasa exploración del volumen total.

La disminución de la macro porosidad del suelo va a producir una baja capacidad de aireación y oxigenación del mismo, dando como resultado una disminución de la actividad de las raíces y, consecuentemente, un menor crecimiento de éstas, un menor volumen de suelo explorado, una menor absorción de agua y nutrientes. Este efecto se puede agravar si se riega en forma excesiva, llegando a provocar la muerte de las raíces por asfixia. Esto es debido a que los escasos macroporos que pueden airear el suelo van a permanecer llenos de agua gran parte del tiempo.

El resultado final de la compactación del suelo es un menor potencial de rendimiento en la producción de cultivos. La pérdida de rendimiento puede variar ampliamente dependiendo de la extensión de la compactación del suelo y las condiciones ambientales que afectan al cultivo durante su desarrollo.

Los suelos que tienen una humedad por encima de la capacidad de campo, presentan un mayor potencial para la compactación. El agua actúa como lubricante entre las partículas del suelo, lo que permite que éstas sean colocadas unas al lado de otras. A medida que más espacio de aire se sustituye por agua, el potencial de compactación va en aumento. Hay un punto, sin embargo, cuando la mayor parte del espacio aéreo se llena de agua cerca de la saturación, que el potencial de compactación de un suelo disminuye. Por lo tanto, un suelo muy mojado casi a saturación, tiene menos potencial de compactación que un suelo moderadamente húmedo.

La textura del suelo (porcentajes relativos de arena, limo y arcilla en un suelo) tiene, en cierta medida, un efecto sobre la compactación. Los suelos que contienen partículas de igual tamaño tienen un menor potencial de compactación que los suelos que tienen partículas de diferentes tamaños. Las partículas más pequeñas pueden llenar los espacios entre partículas de mayor tamaño, lo que aumenta la densidad del suelo. Un suelo franco arenoso es el más susceptible a la compactación, mientras que las arenas puras, arcillas, limos, son los menos susceptibles. La estructura del suelo también juega un papel en el potencial de compactación. La materia orgánica mejora la estructura del suelo mediante la creación de los agregados en el mismo. Suelos con mayores niveles de materia orgánica, en general, tienen una mejor estructura del suelo y resisten mejor la compactación.

SÍNTOMAS DE LA COMPACTACIÓN:

Dado que la compactación del suelo afecta el crecimiento de las raíces, los síntomas por encima del suelo pueden tomar muchas formas. Los signos de compactación pueden incluir:

- Plantas de menor tamaño, achaparradas y de escaso crecimiento en forma aislada o pequeños grupos de plantas con esta sintomatología rodeadas de plantas normales. El marchitamiento de las plantas en ciertas áreas de un campo puede ser señal de compactación. Esto puede deberse a que los sistemas radiculares poco profundos no permiten absorber la humedad en el subsuelo a profundidades mayores.
- Patrones visibles de parches o rodales de plantas achaparradas dentro del cultivo.
- Malformación en el crecimiento de las raíces, incluye raíces planas, cortas, delgadas y torcidas. Las raíces que crecen en un suelo con compactación subsuperficial pueden crecer más de manera horizontal que vertical y tener un sistema radicular poco profundo.
- El crecimiento por encima del suelo está directamente relacionado con el crecimiento de la raíz debajo del suelo. Si el crecimiento de raíces se ve perjudicado, el crecimiento vegetativo por encima del suelo es probable que se afecte.
- Falta de nutrientes en los cultivos puede ser otro signo de la compactación. Ya que las raíces son las vías para que los nutrientes del suelo lleguen al cultivo, las restricciones a las raíces pueden reducir la interceptación de éstas a los nutrientes en el suelo. Deficiencias de fósforo, potasio y nitrógeno, pueden ser síntomas secundarios de la compactación del suelo.

- Agua en superficie o erosión causada por el agua, pueden deberse a una compactación del suelo. Al reducirse el espacio de los poros del suelo, entonces el agua no es absorbida con la misma facilidad.
- La compactación es un proceso rápido. La actuación de los elementos compactadores sobre cada punto dura escasos segundos, por lo que no da tiempo a que se produzca expulsión de agua del interior del terreno. En consecuencia, el proceso tiene lugar sin drenaje, por lo que sólo tiene sentido en el caso de suelos parcialmente saturados..

En la Figura 7 se ilustra el proceso de disminución de volumen de un elemento de suelo debido a la presión que le ejerce un compactador actuando rápidamente. Durante el proceso, permanecen fijos el volumen de sólidos (V_s) y el de agua (V_a). La posibilidad de compresión se reduce a la disminución de volumen del aire de (V_{ai}) sin compactación a un volumen de aire final (V_{af}) donde $V_{ai} > V_{af}$ debido a la:

- Compresión del aire
- Disolución de aire en agua
- Expulsión de aire

Las dos primeras componentes son reversibles, y se recuperan una vez que deja de actuar la fuerza de compresión. La única compresión remanente es la debida a la expulsión de aire. Dicha compresión exige naturalmente que la estructura de las partículas del suelo se acomode al nuevo volumen de poros.

EFECTOS DE LA COMPACTACIÓN DEL SUELO

Como vimos, la compactación del suelo produce un aumento en su resistencia mecánica, destruye y debilita su estructura, un empaquetamiento muy denso de las partículas del suelo y un aumento en su densidad aparente. Todo esto hace disminuir la porosidad total reflejado en la macroporosidad (porosidad de mayor tamaño) llamada porosidad de aireación del suelo. Los efectos que la compactación produce, se traducen en un menor desarrollo del sistema radical de las plantas y, por lo tanto, un menor desarrollo de la planta en su conjunto, lo que redundaría en una menor producción. Algunos valores críticos de densidad aparente que indican según su textura, suelos compactados que muestran los problemas mencionados se pueden observar (cuadro 1).

CUADRO. 1: VALORES CRÍTICOS DE DENSIDAD APARENTE

Textura	Densidad
Franco-arcillosa	1.55
Franco-limosa	1.65
Franco-arenosa fina	1.80
Arenosa-franca fina	1.85

MATERIALES:

- Suelo arcilloso, franco y arenoso
- Recipientes plásticos
- Semillas de culantro o plántulas de apio
- Medidor de transpiración
- Medidor de área foliar
- Balanzas
- Hornos

PROCEDIMIENTO

- Se agrega suelo a los recipientes plásticos con una humedad aceptable para sembrar (no saturado ni seco). Se debe de ir agregando capas de suelo humedeciéndose y compactándose hasta obtener 25 cm de altura de suelo.
- Se siembran las semillas de culantro en surco continuo o las plántulas de apio de entre cuatro a seis por grupo dependiendo del recipiente que se tiene. Se deben de contar las semillas que se siembran y las que nacen para calcular un porcentaje de germinación.
- Se debe de tener los cuidados en el tiempo para un buen desarrollo de las plantas como por ejemplo estar regándolas.
- Se evalúa en el tiempo el punto indicado para comenzar a medir transpiración, temperatura.
- Cuando se tiene un crecimiento aceptable se procede a arrancar las plantas las cuales se separan en sus partes (raíces, tallos, y hojas) de manera individual para el caso del apio y tres muestras en el caso del culantro .
- Se mide el área foliar.
- Se pesa el peso húmedo de cada una de sus partes.
- Se pesa el peso seco: Se secan cada una de sus partes (raíces, tallos y hojas) en el horno a 75 °C por tres o cuatro días.

- Se trasladan los valores de producción a toneladas por hectáreas y se comparan producciones.
- Se define cual es el tipo de suelo compactado con producciones mayores.
- Definir si se presentaron diferencias en las temperaturas, transpiraciones y fotosíntesis con respecto a la compactación del suelo, en las plantas.

PREGUNTAS

- ¿Qué es compactación superficial del suelo y que es compactación subsuperficial, y normalmente que lo provocan?
- ¿Cómo afecta el tamaño de los poros del suelo la compactación del mismo?
- ¿Cómo afecta la continuidad de los poros la compactación?
- ¿Qué es tortuosidad del suelo?
- ¿Qué cultivo soporta la compactación siendo muy productiva y por qué?



El Trabajo es vida.

Thomas Carlyle (1795-1881)

PRÁCTICA: MOVIMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO EN FLUJO NO SATURADO

OBJETIVOS

- Simular el movimiento del agua en el suelo tanto en perfil uniforme como en diferentes estratigrafías del suelo.
- Determinar el flujo de humedecimiento del agua en el suelo tanto en un perfil uniforme como en un perfil con diferentes horizontes.

INTRODUCCIÓN

La teoría del movimiento del agua en el suelo está basada en una generalización de la Ley de Darcy, deducida para la circulación en un medio poroso, que expresa que “ la velocidad de circulación de agua en un medio poroso saturado, es directamente proporcional a la diferencia de presión hidráulica entre dos puntos y a la conductividad del suelo al agua, e inversamente a la distancia entre los dos puntos”.

Este principio es aplicable tanto a flujos saturados como insaturados, sí bien en suelos no saturados, la conductividad depende mucho del potencial mátrico existente y del tipo de suelo.

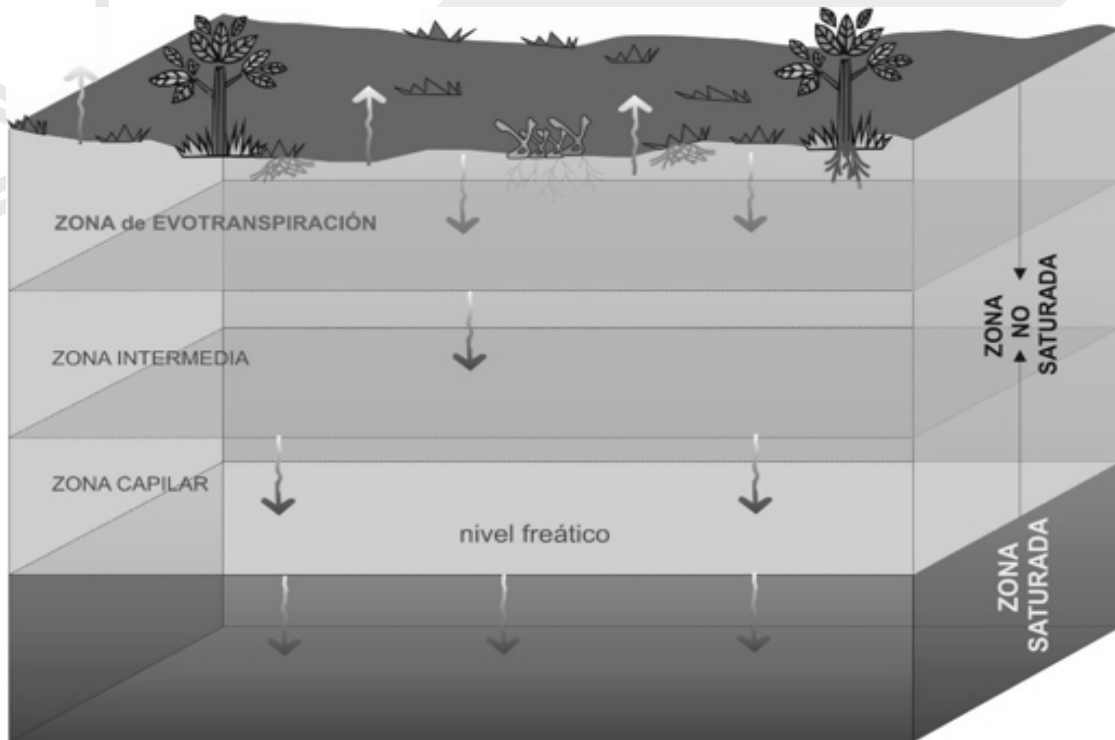


FIGURA 9: ZONAS DEL SUELO SATURADAS E INSATURADAS

El movimiento del agua a través del interior del perfil del suelo, es dominado por las características de dicho sistema poroso. El flujo de agua es gobernado por un factor hidráulico, un factor gravitacional y un factor de capilaridad del suelo. En un suelo no saturado el movimiento del agua está dado por la conductividad hidráulica insaturada y la sortividad. Como el agua solo se trasmite a través de los poros, el flujo que circula será proporcional al diámetro de los poros, disminuyendo conforme los diámetros se reducen, pero esta disminución de velocidad, aparte del efecto geométrico, es aun en mayor grado para los pequeños poros, debido a que la movilidad de las moléculas de agua unidas a las partículas sólidas, es muy baja por los efectos de adsorción (sortividad). Conforme el contenido de humedad baja, disminuye el potencial mátrico y la conductividad insaturada tiende a disminuir con mayor rapidez.

SORTIVIDAD (S)

Es una medida de la habilidad que tiene un suelo de absorber agua durante el proceso de humedecimiento. En general cuanto mayor es el valor de S, mayor será el volumen de agua que puede ser absorbida y en forma más rápida. La sortividad (S) se puede calcular a partir de las mediciones de infiltración acumulada "Iac (cm)" en función del tiempo acumulado "f(t)" realizadas durante la primera etapa de la infiltración. Para calcular S se debe de graficar la "Iac (cm)" sobre el eje de ordenadas "y", en función de la raíz cuadrada del tiempo acumulado, " $t^{1/2}$ " sobre el eje de abscisas "x". La pendiente de la porción lineal es la sortividad y presenta unidades de "longitud / tiempo^{1/2}". Un ejemplo de cálculo de sortividad es el que se muestra (Figura 10).

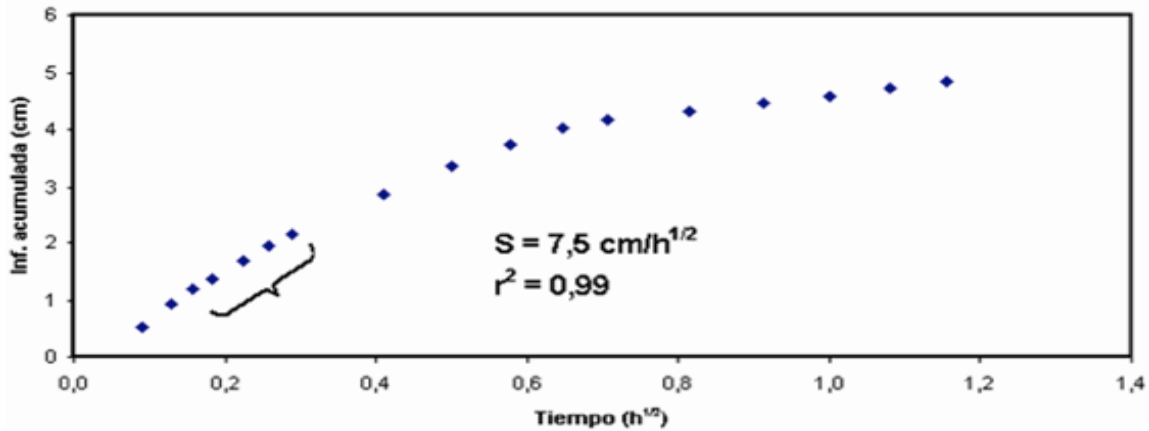


FIGURA 10: EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN Y MEDIDA DE LA SORTIVIDAD DE UN SUELO

FLUJO ESTACIONARIO

Se puede estimar a partir de las mediciones de infiltración acumulada que se establece en función del tiempo acumulado "lac(t)" en la etapa final. Es la pendiente de la sección lineal de la gráfica en función del tiempo acumulado "t". Presenta unidades de "longitud / tiempo" y es equivalente.

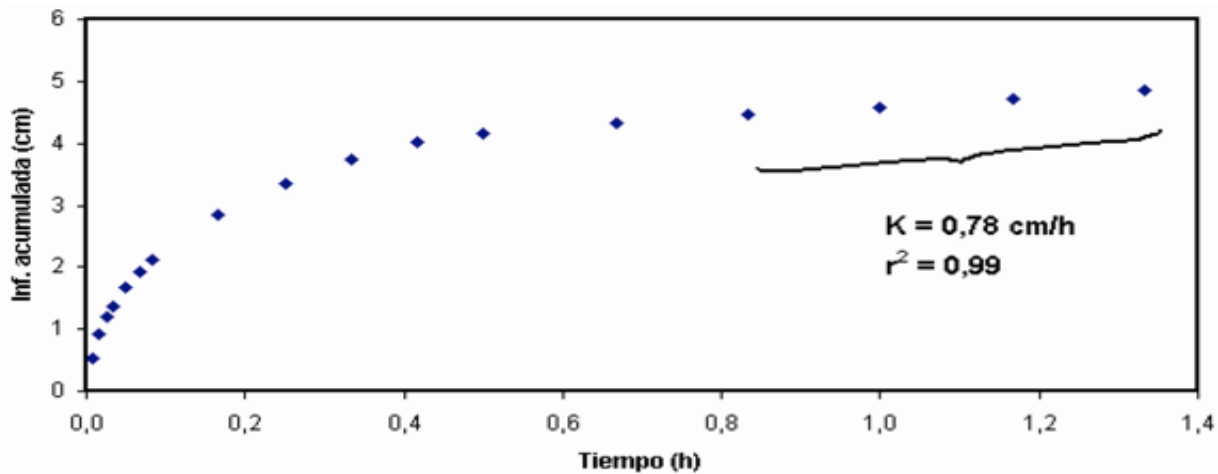


FIGURA 11: EJEMPLO DE IDENTIFICACIÓN Y MEDIDA DEL FLUJO ESTACIONARIO

El agua como un líquido o como vapor siempre presenta movimiento tanto en dirección vertical como en dirección horizontal en el perfil del suelo, sea este uniforme o estratificado. Como ejemplo el movimiento es hacia abajo (vertical) cuando llueve o cuando se riega y el movimiento es hacia arriba cuando se presenta la evapotranspiración. Un ejemplo del movimiento horizontal es el movimiento del agua hacia el centro del surco al aplicar agua en un riego por surcos. Por lo anterior el agua se puede mover en cualquier dirección dependiendo de las condiciones.

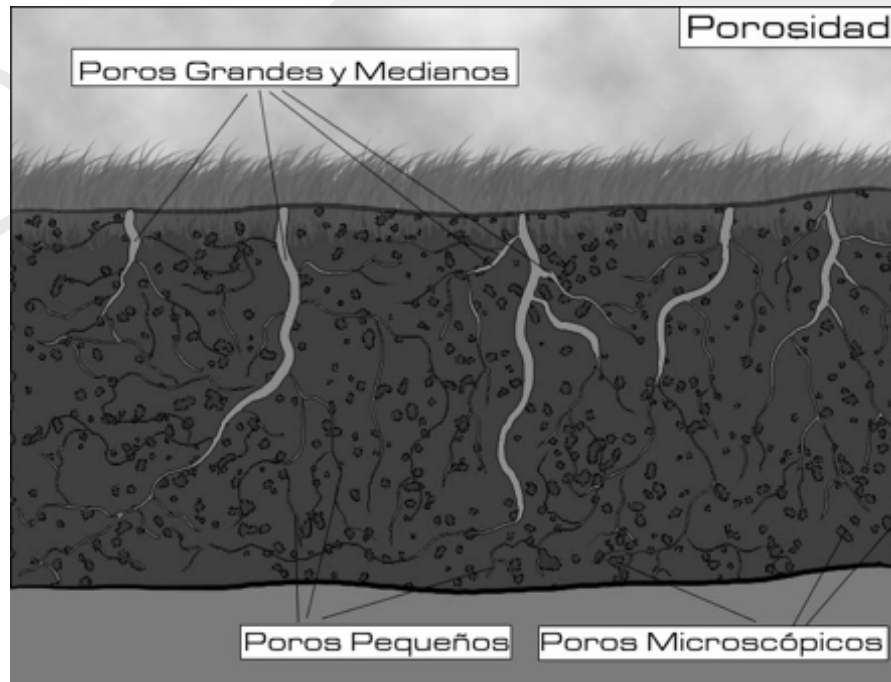


FIGURA 12: POROSIDAD DEL SUELO

El agua y el aire fluyen a través de los poros (Figura 12 y 13) del suelo que se encuentran entre los agregados llamados porosidad inter agregados (que normalmente son los poros grandes y medianos) e intra agregados del suelo (que normalmente son los poros pequeños). El aire de la zona radical está cargado de dióxido de carbono como resultado del metabolismo de las raíces de las plantas, por ello, debe de existir un intercambio con el aire de la superficie del suelo.

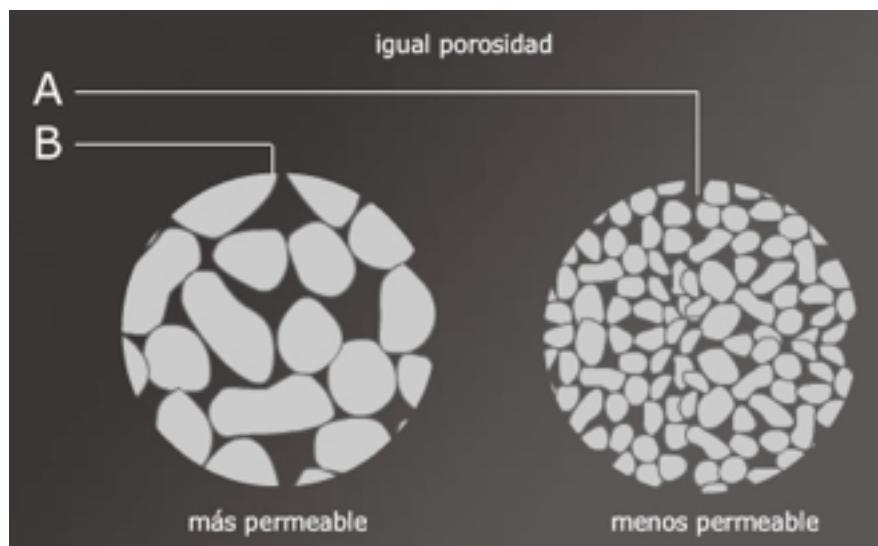


FIGURA 13: PERMEABILIDAD CON IGUAL POROSIDAD PERO DIFERENTE TAMAÑOS DE POROS

Los poros del suelo varían en tamaño, número, distribución y continuidad, dependiendo de cada textura y estructura presente en el suelo, materia orgánica y agentes cementantes, procesos de secado y humedad del suelo, mineralogía del suelo, manejo del suelo (creación de capas compactadas por el uso indiscriminado de maquinaria agrícola) y otros.

En suelos de texturas gruesas el agua permanece a veces casi enteramente en los bordes y puntas de las partículas, formando bolsas de aire discontinuas. En suelos de buena agregación, los espacios grandes que quedan entre los agregados (con una alta conductividad en condiciones de saturación) se transforman, cuando se vacían, en barreras que obstaculizan el flujo de líquidos de un agregado al otro vecino. De modo que la transición de la saturación a la insaturación lleva consigo generalmente una caída violenta en la conductividad hidráulica, que puede disminuir varios órdenes de magnitud (a veces hasta $1/100000$ de su valor en condiciones de saturación) a medida que la succión se aumenta de 0 a -1 kPa (bar o atm). En condiciones de succiones mayores, o sea, con menores contenidos de humedad, la conductividad puede ser tan pequeña que se requieren gradientes de succión muy grandes, o períodos de tiempo muy largos para estimar en forma apreciable el flujo del agua. También debe considerarse que, cuando el sistema suelo-agua está sometido a succiones demasiado grandes, aparte del incremento en la tortuosidad y el descenso del número y tamaño de los poros conductores, puede haber un cambio en la viscosidad del agua absorbida, lo que lleva a una reducción aún mayor de la conductividad.

En condiciones de saturación, los suelos más conductivos son aquellos en que los poros grandes y continuos constituyen la mayor parte del volumen de poros del suelo, mientras que los suelos menos conductivos son aquellos en los cuales el volumen de poros consiste en numerosos microporos. Así, los suelos arenosos conducen agua mucho más rápidamente que los suelos arcillosos con mala estructura. Sin embargo, se produce exactamente lo contrario en condiciones de no saturación, dado que los suelos con poros grandes se vacían rápidamente, con un ligero aumento de la succión, y se hacen no conductivos; su conductividad disminuye así en gran medida y en forma repentina. En un suelo con pequeños poros, por otra parte, muchos de ellos permanecen llenos y plenamente conductivos aún bajo condiciones de succión apreciable, de tal forma que la conductividad hidráulica no disminuye tan violentamente y puede ser mayor que la de un suelo arenoso sometido a la misma succión. Dado que en condiciones de campo el suelo se encuentra no saturado la mayor parte del tiempo, generalmente ocurre que el flujo es más apreciable y persiste durante mayor tiempo en suelos arcillosos que en suelos arenosos. Por esta razón, la existencia de una barrera de arena en el perfil de un suelo de textura fina, lejos de promover el flujo de agua, puede en realidad impedirlo en condiciones no saturadas, hasta que el agua se acumule sobre la arena y disminuya la succión lo suficiente para que el agua penetre en los poros de la arena.

MATERIALES

- Recipiente de vidrio
- Tres tipos de suelos diferentes en estado completamente seco
- Bureta
- Equipo sostenedor de la bureta
- Cápsula de aluminio

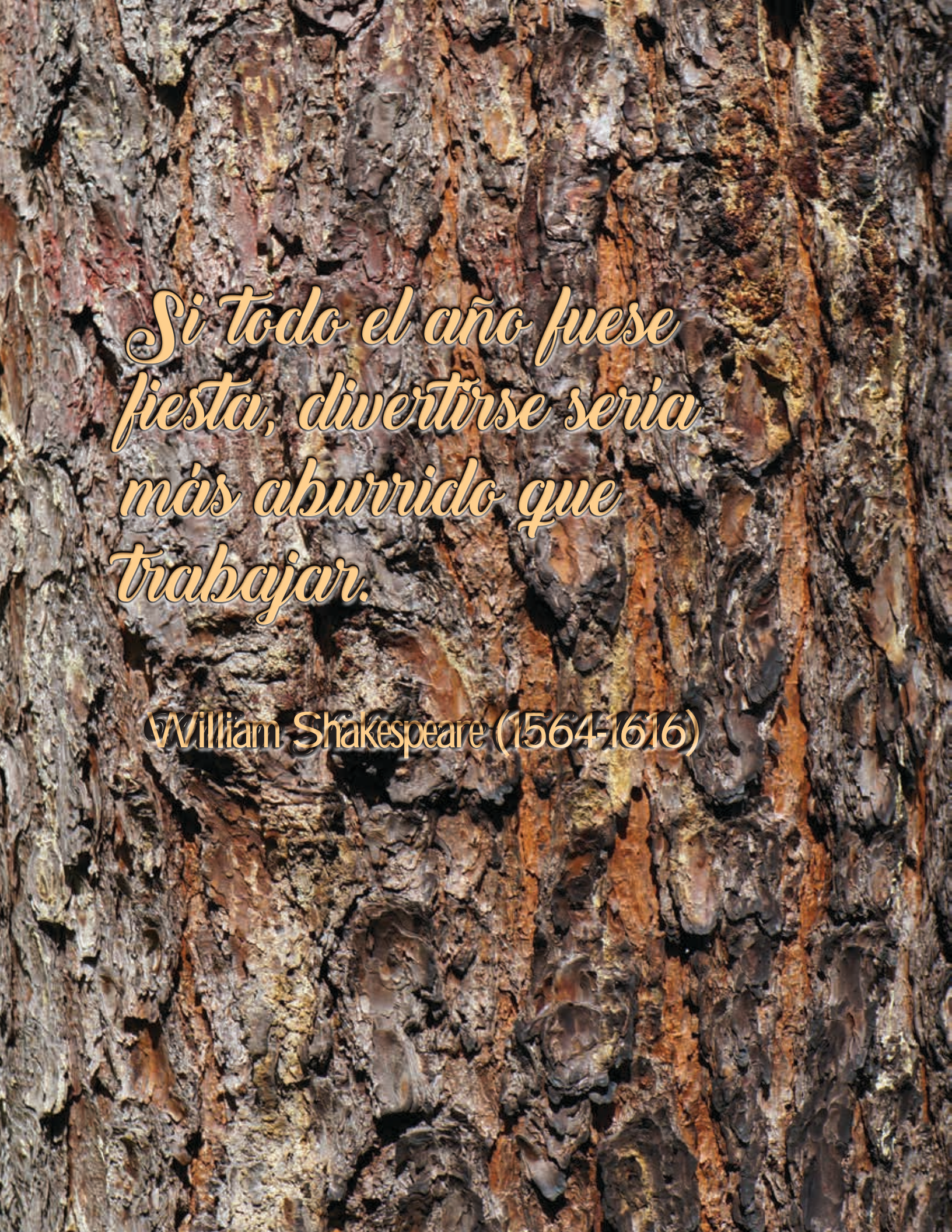
PROCEDIMIENTO

- Llenar con dos o tres tipos de suelo diferentes el recipiente de vidrio con diferentes grosores de los horizontes de cada suelo.
- El llenado debe de ser contrastante en los espacios porosos como por ejemplo, una capa arenosa, otra arcillosa y otra orgánica.
- Cada capa debe tener como mínimo 10 cm de grosor.
- Se debe de llenar un recipiente simulando un suelo con un horizonte único y profundo para compararlo.
- Montar la bureta en el sujetador de la misma.
- Llenar la bureta de agua.
- Colocar la bureta en el centro del recipiente.
- Dejar salir el agua al centro del recipiente con los horizontes del suelo en estado seco.
- Graficar el movimiento del agua en el perfil del suelo con respecto al tiempo.

Calcular la velocidad del movimiento del agua en el suelo definiendo si es mayor la velocidad del movimiento vertical o la del movimiento horizontal.

PREGUNTAS

- ¿Qué efecto tiene las capas compactadas sobre el movimiento del agua y el aire del suelo?
- ¿Qué efecto tienen las diferencias texturales en los horizontes del suelo (anisotropía textural) sobre el movimiento del agua y el aire del suelo?
- ¿Qué efecto tiene la discontinuidad de los poros en el movimiento del agua en el suelo y en el movimiento del aire?
- ¿Cómo se define (se mide) el volumen para los macroporos, mesoporos y microporos?



*Si todo el año fuese
fiesta, divertirse sería
más aburrido que
trabajar.*

William Shakespeare (1564-1616)

PRÁCTICA: RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIDO CON TENSIÓMETRO, MESA DE SUCCIÓN Y BLOQUES DE YESO Y NYLON

OBJETIVOS

- Comprender el funcionamiento del tensiómetro, mesa de succión y láminas de nylon.
- Realizar curva de desabsorción con un tensiómetro desde 0.0 hasta su mayor alcance según la altura del lugar, de 0.0 a 0.1 bares de succión.
- Calcular las humedades gravimétricas, volumétricas y espacios porosos totales y espacios aéreos conforme varía la humedad del suelo .

INTRODUCCIÓN

RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

La función de absorber, retener y suministrar agua es una de las misiones ecológicas fundamentales que desempeña el suelo. A medida que el suelo pierde humedad el agua es retenida con mayor fuerza y se hace menos disponible para las plantas debido a que el agua

sale de los poros grandes donde es retenida con poca fuerza y conforme se gasta de estos sectores, comienza el agua a salir de los poros medios y luego, continúa con los más pequeños donde es retenida con mayor fuerza. La relación entre el contenido de humedad y tensión con que está retenida el agua en sistema poroso del suelo llamado la matriz del suelo se expresa por medio de la curva de desabsorción de agua del suelo llamada curva de retención de humedad.

TENSIÓMETRO

El tensiómetro (Figura 14) mide la tensión (presión negativa o presión de succión en la matriz del suelo) o fuerza (indicada en centibares "cb") con que el agua es retenida dentro del sistema poroso del suelo en la zona no saturada (Cuadro 2 y 3).

La tensión que mide el tensiómetro es llamado también el valor absoluto del potencial matricial negativo en suelos no saturados (donde no existen problemas de salinidad en el suelo que provoquen un potencial de solutos en el suelo y la altura de referencia para medir con el tensiómetro se toma la superficie del suelo). El valor de tensión medido se relaciona con un cierto contenido de agua disponible para las plantas, pero no determina directamente el contenido de agua del suelo.

La unidad de presión negativa o positiva en el sistema internacional (SI) es el pascal (Pa) donde $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ (newton / metro²) ($1 \text{ hPa} = 100 \text{ Pa}$ y $1 \text{ kPa} = 1000 \text{ Pa}$).

A través de los años, un sin número de unidades han sido usadas para expresar succión, tensión, stress o potencial. Algunas de las unidades más comunes son:

- Bares (bar)
- Centímetro de columna de agua (cmca)
- Centímetro de mercurio (cmHg)
- Pulgadas de columna de agua (pulg ca)
- Atmósferas (Atm)
- Centibares (cb)
- Milibares (mb)
- Joules / kg
- Libras / Pul²
- Ergios / gr
- Dinas / cm²
- pF

CUADRO. 2: EQUIVALENCIAS DE UNIDADES DE PRESIÓN EN UNIDADES DE PRESIÓN DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

Unidades de Presión	Unidades de Presión (S.I.)
1 bar	10^5 Pa
1 atm = 76,00021 cm Hg	$1,01325 \cdot 10^5$ Pa
1 cm Hg (0°C)	$1,33322 \cdot 10^3$ Pa
1 baria = 1 dina/cm ² (C.G.S.)	10^{-1} Pa
1 kg/cm ²	$9,80665 \cdot 10^4$ Pa
1 psi (pound per square inch)	$6,89476 \cdot 10^3$ Pa
1 torr (mm Hg a 0°C)	$1,33322 \cdot 10^2$ Pa
1 in. Hg (1 pulgada de Hg)	$3,386 \cdot 10^3$ Pa
1 kp/cm ²	$9,807 \cdot 10^4$ Pa
1 m de H ₂ O - 0,1 kg/cm ²	9,806,65 Pa
1 cm de H ₂ O (1 cm ca)	98,0665 Pa = 0,98 hPa

CUADRO. 3: CONVERSIÓN DE UNIDADES DE POTENCIAL DE AGUA DEL SUELO

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

El tensiómetro es un instrumento que indica el esfuerzo que han de realizar las raíces del cultivo para extraer del suelo la humedad que necesita, actuando como una raíz artificial. Consiste en un tubo sellado herméticamente, equipado con una punta cerámica porosa (dicha cápsula de porcelana permite el paso de agua, pero impide el paso de partículas de suelo y de aire) y un vacuómetro, este último con una escala de 0 a 100 cb. El ámbito efectivo de lectura del tensiómetro es de 0 a 0.8 bares (80 cb), por lo que, para la determinación de valores de succión mayores a 0.8 bares, es necesario el uso de otros aparatos. En algunos suelos arenosos, las lecturas de los tensiómetros cubren hasta un 80% del agua disponible para las plantas.

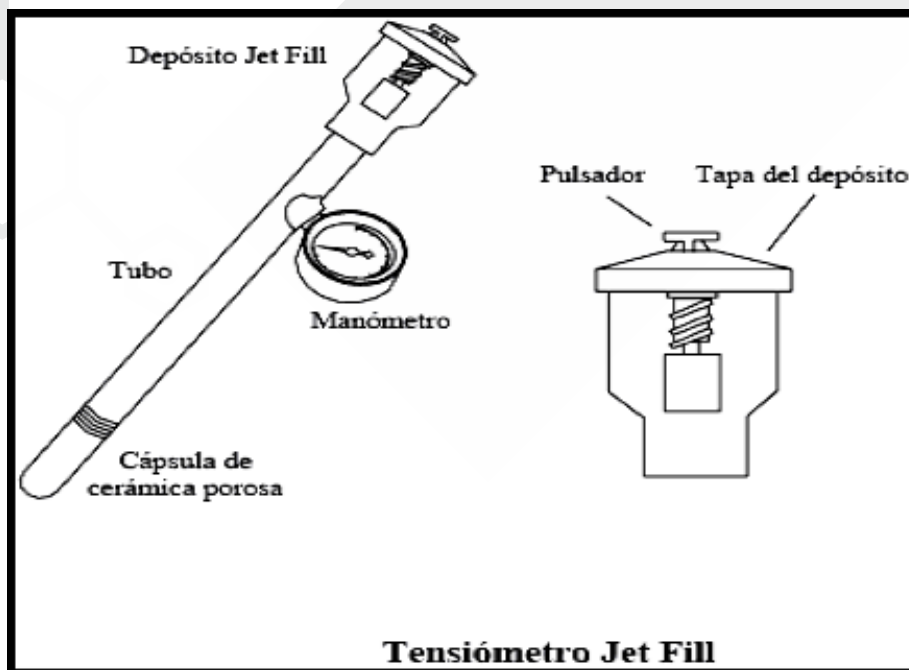


FIGURA 14: PARTES DE UN TENSIÓMETRO JET FILL

Se coloca en el suelo de forma que controle la humedad disponible en toda la zona de crecimiento de las raíces. Cuando el tensiómetro es instalado (Figura 15), el agua dentro del instrumento entra en contacto con el agua retenida en los poros del suelo, fluyendo en ambas direcciones a través de la cerámica porosa hasta establecer un equilibrio.

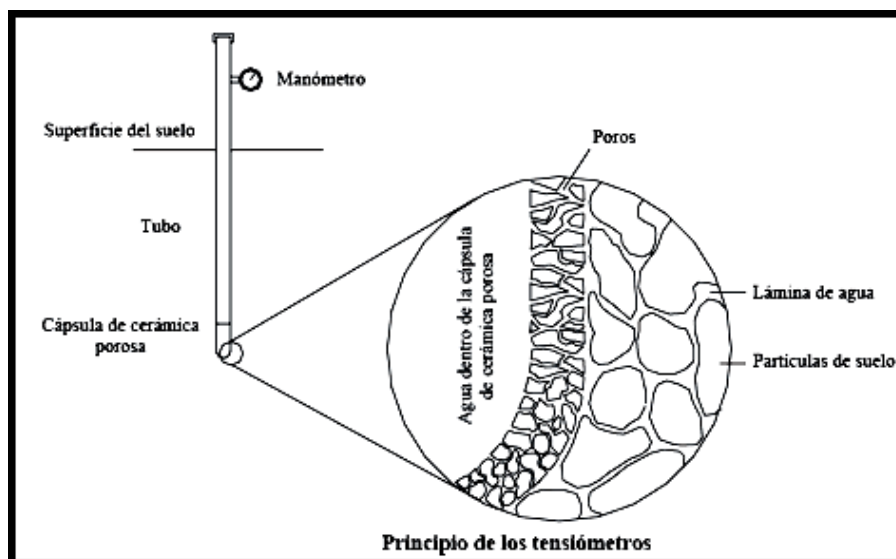


FIGURA 15: FUNCIONAMIENTO DEL TENSIÓMETRO EN EL SUELO

Según el suelo pierde agua por efecto de la transpiración, evaporación o absorción por las plantas, donde al ir disminuyendo el contenido de agua en el suelo vaciándose primero los poros grandes, luego medios y por último los más pequeños, se crea una tensión o succión en el sistema aumentando gradualmente según el suelo continúa perdiendo humedad. Esta tensión se mide en el tensiómetro haciendo uso de un indicador de tensión (Figura 16). Cuando se humedece el suelo ya sea por lluvia o riego se vuelven a llenar los poros, por lo cual; el tensiómetro vuelve a absorber humedad del suelo, reduciéndose la tensión, con lo que el vacuómetro señalará un valor menor.



FIGURA 16: CONDICIONES PARA EL BUEN FUNCIONAMIENTO DEL TENSÍMETRO

De esta forma las lecturas del tensiómetro pueden relacionarse con la humedad disponible para las plantas, pero no puede utilizarse para determinar directamente el contenido de humedad en el suelo (gravimétricamente expresado en porcentaje por peso o volumétricamente expresado en porcentaje por volumen).

Es aconsejable hacer una calibración del tensiómetro durante la época del cultivo, determinando la humedad del suelo por medio del secado de muestras al horno. Así podemos relacionar las lecturas de tensión indicadas por el tensiómetro con el contenido real de humedad en el suelo.

Como se mencionó las unidades que se utilizan en las medidas con el tensiómetro son los centibares (cb), es decir la centésima parte de un bar, donde un cb es equivalente a 7,5002 mm de Hg. (760 mm de Hg son equivalentes a 1 atmósfera (atm) y a 1,013 bares (bar)). La presión atmosférica a nivel del mar es de 101.3 cb. Esto quiere decir que el agua que está dentro del cuerpo del tensiómetro antes que empiece a hacer vacío está a una presión positiva de 101.3 cb a nivel del mar. A medida que comienza a producirse vacío dentro del tensiómetro la presión positiva va disminuyendo, tal como se ve en el ejemplo del cuadro 4 y figura 17. De lo anterior se deduce que la máxima lectura que puede dar un tensiómetro a nivel del mar es de 101.3 cb. Sin embargo, esta lectura nunca se alcanza por dos razones:

- La escala de los tensiómetros solamente va hasta 100 cb
- No se puede lograr el vacío absoluto dentro del cuerpo de un tensiómetro

Haciendo el mismo ejercicio a nivel de 2600 msnm, cuya presión atmosférica es de 540 mm de Hg, se deduce que el máximo valor teórico de vacío que se puede lograr es de 72 cb. Sin embargo, el máximo valor real que se obtiene es de alrededor de 65 cb.

¿Cómo interpretar las lecturas realizadas con un tensiómetro?

- **De 0 a 10 cb:** indican que el suelo está recién regado y que permanece aún saturado. Estos valores son normales si se considera un período de un día o dos después de un riego, aunque si perduran indican un exceso de humedad, generalmente debido a un riego demasiado abundante.
- **De 10 a 20 cb:** indican que el suelo está a capacidad de campo y la humedad está a disposición de la planta con un esfuerzo mínimo, por lo que no requiere riego todavía.
- **De 30 a 60 cb:** en esta gama de lecturas está asegurada una buena oxigenación de las raíces. En zonas calurosas y cuando se intente regar suelos muy arenosos, es recomendable iniciar los riegos con lecturas de 40 a 45 cb. En las zonas más frescas o en suelos con un gran poder de retención, se iniciarán con lecturas de 45 a 60 cb.
- **De 70 cb o superiores:** indican que el suelo está un poco más seco, la planta empieza a trabajar más para extraer el agua del suelo.

CUADRO 4: PRESIÓN ATMOSFÉRICA Y PRESIÓN DENTRO DEL TENSÍOMETRO

Presión atmosférica (presión positiva) en mm de Hg	Presión atmosférica (presión positiva) en cb	Presión dentro del tensiómetro (presión negativa) en cb
760 (Presión a nivel del mar)	101.3	0
700	93.3	8.0
600	80.0	21.3
500	66.6	34.6
400	53.3	48.0
300	40.0	61.3
200	26.6	74.6
100	13.3	88.0
0	0	101.3

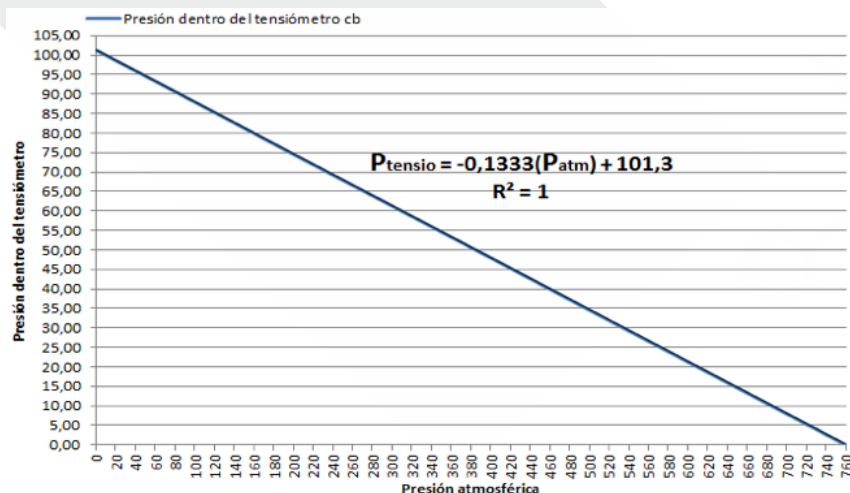


FIGURA 17: VARIACIÓN DE LA PRESIÓN DENTRO DEL TENSIÓMETRO (CB) SEGÚN PRESIÓN ATMOSFÉRICA

En la (Figura 18), se puede interpretar que para una lectura, por ejemplo, de 30 cb (se puede interpretar de la misma manera para una tensión de 80 cb), se tiene:

- Un suelo arcilloso dispondrá de casi la totalidad del agua de la reserva útil.
- Un suelo limoso ya habría agotado casi el 50% de dicha reserva.
- Un suelo limo-arenoso tendría agotada más del 50% de la reserva útil de agua.
- Un suelo areno-limoso sólo dispondría de menos del 25% de agua utilizable y se habría agotado más del 75 % del agua del suelo.

Para concluir, la relación tensión-humedad, a partir de 10 cb, no se puede interpretar de forma lineal y directa según la lectura del vacuómetro. Esta lectura, según la textura del suelo (arcillosa, arenosa, etc.) permite relacionar la tensión con la disponibilidad de agua en el suelo, o dicho de otra manera, evaluar el agotamiento de la reserva útil de agua.

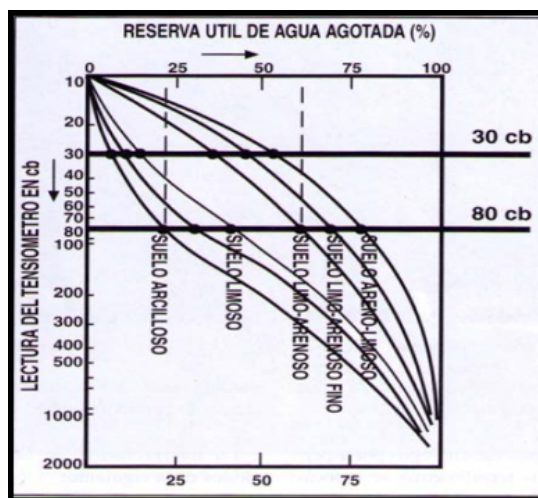


FIGURA 18: INTERPRETACIÓN DE LAS LECTURAS DEL TENSIÓMETRO RESPECTO A LA TEXTURA DEL SUELO

¿Dónde se instala el tensiómetro?

La instalación del tensiómetro debe ser en la zona de mayor actividad de raíces, en el bulbo húmedo que forme la aplicación del riego (línea de goteros, surco de riego, etc.). Generalmente, se ubican en pares, uno superficial localizado en la zona de mayor cantidad de raíces y el otro más profundo que se utiliza para medir la profundidad del riego.

Ventajas:

- Muy rápido y práctico para medir la tensión de agua del suelo "in situ".
- Bajo costo y fáciles de instalar.
- No están influidos por el contenido de sales del agua del suelo.

Desventajas:

- No mide directamente el contenido de agua del suelo, por ello se debe utilizar la curva de retención de humedad para cada tipo de suelo, la cual relaciona el contenido de humedad con la tensión a la que está retenida.
- Requieren un mantenimiento periódico.
- No funciona bien en suelos muy secos o de texturas gruesas.

MESA DE SUCCIÓN (0 - 0.1 BAR)

Consiste en una caja de metal llena $\frac{3}{4}$ partes de arena con tamaños de grano de 73 micrones aproximadamente y una tela filtro de 140 - 150 micrones. Dentro de la caja y la arena se encuentra una tubería perforada conectada a una tubería móvil en sentido vertical para ejercer succión desde los cero hasta los 0.1 bar (1.0 metros de columna de agua). Se utilizan muestras de suelos indisturbadas para un máximo de 40 unidades dependiendo del diámetro.

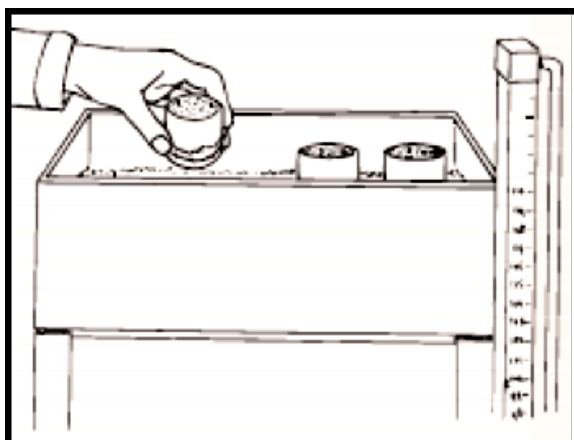


FIGURA 19: MESA DE SUCCIÓN UTILIZADA PARA MEDIR ENTRE 0 Y 0.1 BAR

FUERZAS DE RETENCIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Cuando el suelo tiene un contenido de humedad determinado, el agua se encuentra llenando los poros más pequeños, por cuanto los grandes son los primeros que se vacían debido a que estos poros retienen el agua a menor presión. Hay presencia de dos tipos de fuerzas que ayudan al suelo a retener el agua. Una de estas lo constituye la atracción que se ejerce desde las superficies de las partículas del suelo para con las moléculas de agua, conocida como fuerzas de adhesión, y la otra, es la atracción que existe entre las moléculas de agua, denominada fuerzas de cohesión.

Estas fuerzas actúan conjuntamente y hacen posible que las partículas del suelo retengan el agua y a su vez controlen su movimiento y utilización.

En el nivel freático (NF) la presión de succión (tensión) es igual a cero, en la medida que se asciende hacia la superficie del suelo la presión se vuelve más negativa. En condiciones ideales de equilibrio estático del suelo con el medio, la presión en un punto arriba del nivel freático sería igual a la altura de dicho punto que tiene sobre el NF lo que equivale a decir que no existe flujo. Cuando ocurre flujo y las presiones permanecen constantes, para cualquier instante de tiempo "t", lo que se tienen son condiciones de equilibrio dinámico.

Dos mecanismos de retención de humedad por parte del suelo, se pueden reconocer; la adsorción, el cual es producto de las fuerzas electrostáticas que mantienen el agua adherida a la superficie de las partículas sólidas. Estas fuerzas pueden ser de gran magnitud, y pueden ser responsables de la retención contra altas fuerzas de succión, de cantidades de agua en los suelos arcillosos. La tensión superficial, es el segundo mecanismo.

TENSIÓN SUPERFICIAL

Las moléculas de un líquido sufren atracción entre sí por las fuerzas de Van der Waals. Cuando un líquido tiene una superficie libre de contacto con otro líquido, las moléculas de la superficie sufren una compresión que se opone a incrementar el área de dicha superficie. Este fenómeno se llama tensión superficial, y se debe a la desigualdad de las fuerzas de atracción a que queden sometidas las moléculas en la superficie de contacto entre líquido y sólido que son mayores de un lado que de otro.

La tensión superficial puede ser expresada en dinas/cm. Además, posee la tensión superficial más elevada de todos los líquidos comunes. Esto significa que dividir o modificar la superficie de una gota requiere una fuerza de considerable magnitud. Esta elevada tensión superficial da al agua una capacidad erosiva grande.

BLOQUES DE YESO O NYLON

Este método consiste en la estimación del contenido de humedad del suelo empleando para ello las propiedades eléctricas de resistencia (o conductancia) de un bloque poroso de yeso en el suelo o un bloque de nylon. Se han utilizado materiales para la fabricación de los bloques tales como yeso, nylon, fibra de cristal y la combinación de estos materiales con yeso (Figura 20).

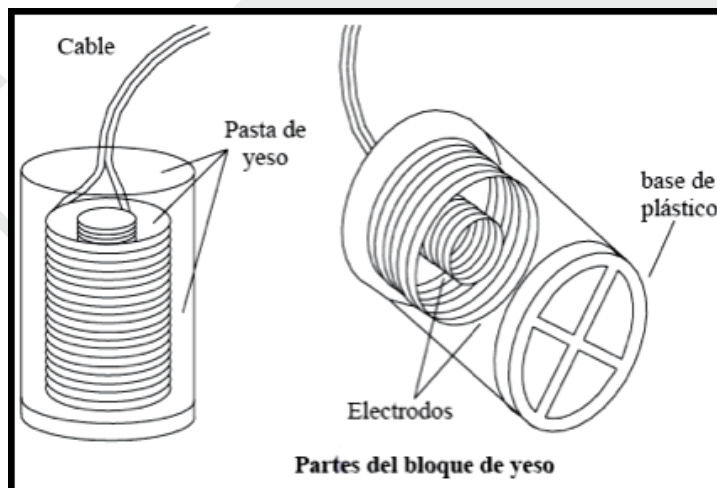


FIGURA 20: BLOQUE DE YESO

Una vez instalados, la humedad del bloque tiende a equilibrarse con la del suelo. A medida que se modifican las condiciones de humedad en el suelo se altera a su vez la humedad del bloque, sus propiedades eléctricas y la resistencia entre los electrodos. Cuando el suelo está húmedo, la resistencia eléctrica es baja, según el suelo y el bloque pierden humedad, la resistencia aumenta. Esta resistencia se lee mediante el uso de un contador portátil (el medidor que se utiliza para bloques de yeso es diferente al de bloques de nylon). Es aconsejable hacer una calibración del instrumento determinando la humedad del terreno secando muestras al horno por medio del método gravimétrico o volumétrico. Así podemos establecer una relación entre las propiedades eléctricas del instrumento y el contenido real de humedad en el suelo.

MATERIALES

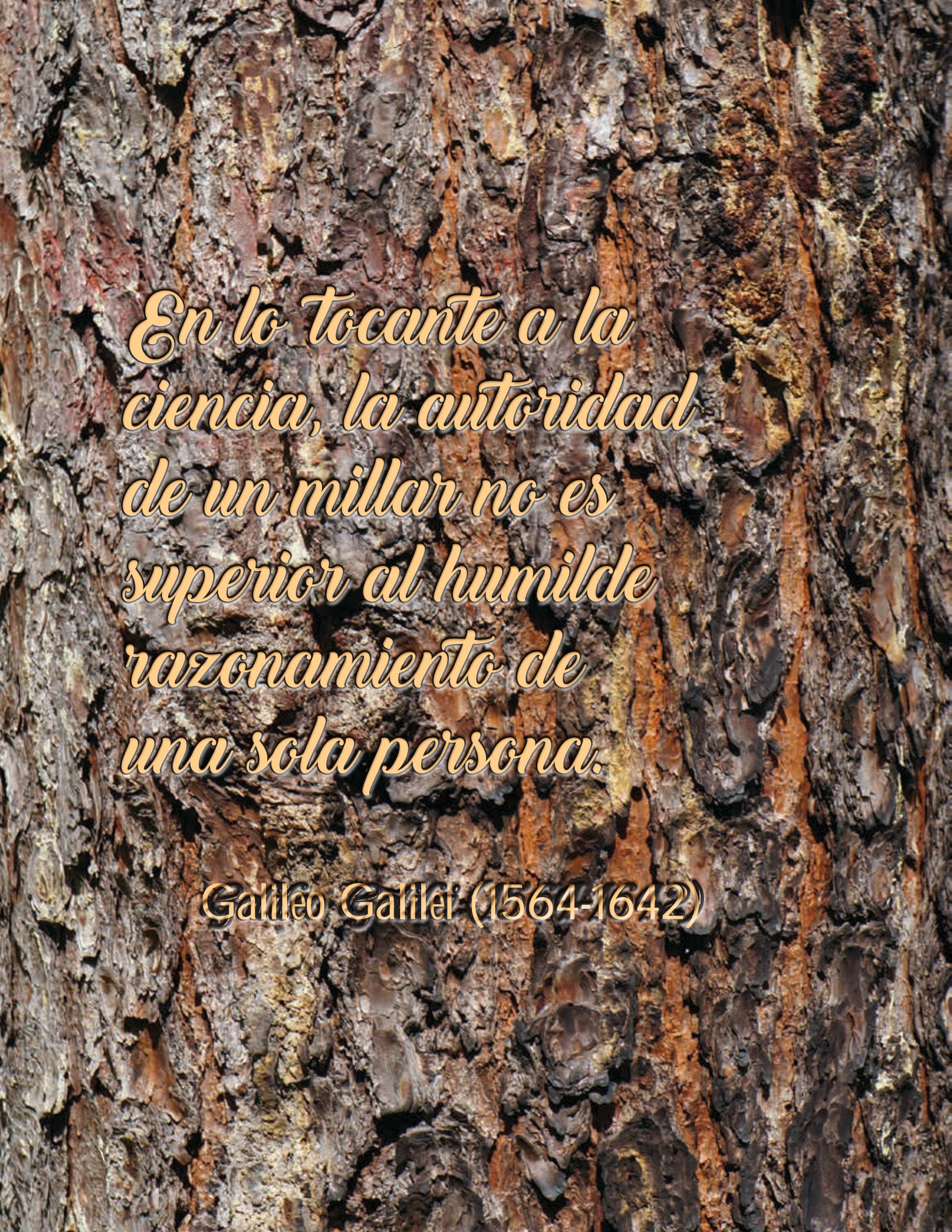
- Cilindros de 2.0 cm de altura por 4.8 cm de diámetro
- Mazo
- Bolsas plásticas
- Bloques de madera
- Malla antiáfida o malín
- Liga de hule
- Tensiómetros
- Bloques de nylon
- Bloques de yeso
- Suelo
- Recipientes contenedores de suelo
- Medidor de resistencia eléctrica para bloques de nylon y medidor de humedad para bloques de yeso
- Balanzas
- Capsulas de aluminio

PROCEDIMIENTO

- Tomar un suelo y llenar un recipiente y llevarlo a un punto de saturación, tomar una muestra de este suelo saturado y medir su humedad.
- Tomar dos muestras de suelo del recipiente con un cilindro de 4,8 mm de diámetro y 20 mm de altura, la primera para calcular densidad aparente conforme los procedimientos vistos anteriormente y la segunda para continuar con el procedimiento siguiente.
- Dejar las caras planas de la muestra del suelo a ambos lados.
- Pesarse la muestra a saturación e instalar los cilindros dentro de las cajas de arena y ejercer una succión de 25 cm por 48 horas y volver a pesar el peso húmedo.
- Repetir el paso anterior para succiones de 50, 75 y 100 cm de succión de agua en el suelo.
- Construir la curva de retención de agua en el suelo desde 0 - 100 cmca de succión vrs humedad del suelo.
- Luego al suelo del recipiente se le instala un tensiómetro, un bloque de yeso y una capsula de nylon previamente saturada a una misma profundidad y tomar las lecturas respectivamente a dicho nivel de saturación.
- Tomar muestras de suelo cada vez que aumente la succión de agua en el suelo (el suelo se va secando) visto en el vacuómetro del tensiómetro, a la misma profundidad de los instrumentos instalados y se pesa para medir la humedad, juntamente realizando las lecturas tanto del tensiómetro como de resistencia eléctrica de los bloques de yeso y la humedad del suelo de los bloques de nylon.
- Construir las curvas de tensión de humedad del suelo leídas con el tensiómetro, bloques de nylon y bloque de yeso versus la humedad del suelo.
- Calcular la densidad aparente con la muestra de suelo indisturbadas tomada para este fin.
- Calcular la humedad volumétrica.

PREGUNTAS

- Investigar cual es la máxima presión de succión que se puede medir en un suelo en Cartago según su altura con un tensiómetro y definir sus limitaciones de uso
- ¿Cuáles son los rangos de humedad del suelo de sensibilidad de los métodos utilizados?
- ¿Cómo se calcula el espacio aéreo?
- Con un valor de densidad real de partículas de 2.60 gr/cm^3 calcular los espacios aéreos encontrados y construir los gráficos de dentro de las curvas ya confeccionadas.



*En lo tocante a la
ciencia, la autoridad
de un millar no es
superior al humilde
razonamiento de
una sola persona.*

Galileo Galilei (1564-1642)

PRÁCTICA: RETENCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO MEDIDO CON OLLAS DE PRESIÓN

OBJETIVOS

- Confeccionar curvas de desabsorción con ollas de presión
- Comprender el uso y manejo de los equipos
- Relacionar las curvas de absorción con contenidos de agua en el suelo

INTRODUCCIÓN

El agua es retenida en el suelo de dos maneras. Puede acumularse en el suelo debido a la presencia de una capa impermeable debajo de la superficie, la cual impide el drenaje normal. Tal acumulación resulta en una saturación del suelo, una condición frecuente llamada anegamiento o inundación. El anegamiento es una característica permanente de algunos suelos, pero en otros puede ser temporal, ocurriendo solo durante un período de drenaje lento seguido de una entrada de exceso de agua. El anegamiento de los suelos agrícolas es difícilmente considerado una buena característica; el agua almacenada en tales casos está simplemente en ese lugar debido a que no puede encontrar otra salida.

El segundo mecanismo de retención del agua por los suelos es la capilaridad. Como vimos en la anterior práctica este fenómeno es causado por dos fuerzas:

- **La adhesión:** la atracción de las superficies de las partículas de suelo por las moléculas de agua.
- **La cohesión:** la atracción de las moléculas de agua entre sí.

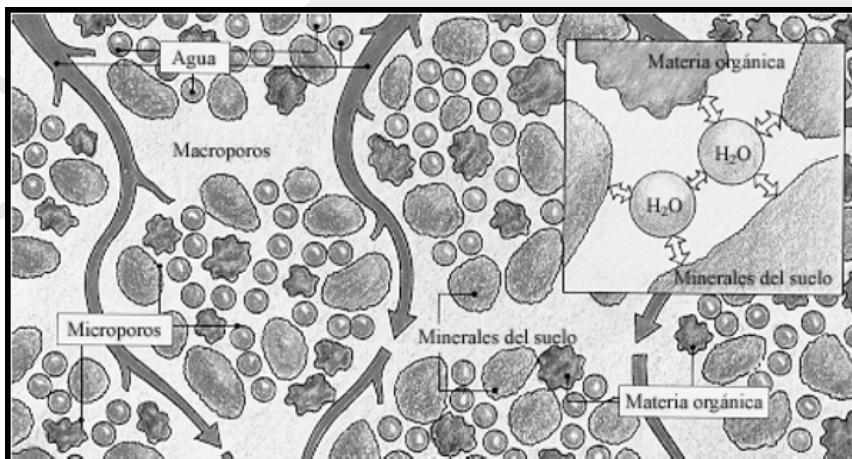


FIGURA 21: LOS COMPONENTES DE LA ESTRUCTURA DEL SUELO

Los minerales del suelo con materia orgánica forman las unidades estructurales del suelo o agregados (terrones naturales). Los microporos (Figura 21) dentro de los agregados y los macroporos entre los agregados llevan aire, agua y facilitan la penetración de las raíces. Cuando hay una pequeña cantidad de agua se mantiene cohesionada prácticamente dentro de los microporos y debe ser aplicada una gran fuerza para removerla del suelo. En suelos secos, la mayoría del agua es mantenida en poros muy pequeños, fuertemente unidos. Las plantas no pueden usar el agua desde tales poros, por lo tanto, son incapaces de crecer bien bajo tales condiciones.

La capacidad de retención de agua del suelo en un lugar particular depende de la profundidad del suelo, el volumen de los poros o espacios y la proporción de los vacíos que retienen agua contra el empuje de la fuerza de gravedad. En un suelo arenoso hay, por lo general, un volumen total relativamente grande de poros o espacios entre las partículas minerales grandes, pero la mayoría de los poros son tan grandes que el agua de lluvia drena a través de ellos y relativamente poca es retenida dentro del perfil. En suelos arcillosos puede ser esperada la situación opuesta, ya que puede haber una proporción grande de poros o espacios tan pequeños que el agua de infiltración puede entrar, parcialmente bajo la acción capilar, el agua no puede drenar y puede solo ser movida por las raíces de las plantas y/o la lenta evaporación dentro de cualquier espacio lleno de aire y agua dentro del suelo. En suelos arcillosos muy compactos, tanto la entrada como la salida del agua pueden ser muy lentas.

En términos prácticos, el agua en el suelo presenta diferentes tasas de disponibilidad para las plantas creciendo sobre él, donde estas cantidades de agua disponible normalmente asociadas a una determinada tensión interna, traducida como la presión negativa ejercida por una columna de agua. En términos prácticos, la presión es una fuerza que se realiza por ejemplo para empujar un cuerpo, la tensión es la misma magnitud de fuerza, pero en sentido contrario, es decir tirando o halando a el mismo cuerpo, por lo que la presión cambia de signo pasando a ser positiva a negativa. Las cantidades de agua mencionadas están relacionadas con el contenido volumétrico de agua en el suelo y que incide sobre la fuerza con que esta retenida el agua en el suelo y se denominan constantes hídricas (Figuras 22, 23, 24, 25 y 26; Cuadros 5, 6 y 7). Los valores más utilizados de límites de tensión a la que está retenida el agua en el suelo y que definen su estado energético son capacidad de campo (cc) y punto de marchitez permanente (pmp), y corresponden a un porcentaje de humedad del suelo, que son característicos para cada suelo.

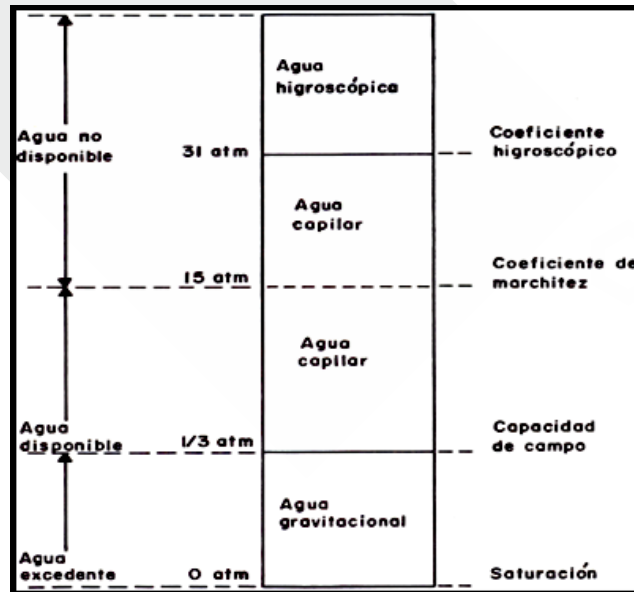


FIGURA 22: CONSTANTES HÍDRICAS DEL SUELO

CAPACIDAD DE CAMPO

Después de la lluvia o del riego, se producirá un movimiento descendente relativamente rápido de una parte del agua, en respuesta al gradiente de potencial, en particular dado por el componente gravitacional. Transcurridos 2 o 3 días este movimiento descendente se tornará prácticamente despreciable. El suelo está entonces a su capacidad de campo. En este punto, el agua habrá sido eliminada de los macroporos y su lugar habrá sido ocupado por el aire. Los mesoporos y los microporos o poros capilares están aún llenos con agua, parte de la cual podrá ser utilizada por las plantas. La tensión de la matriz del suelo (sistema poroso del suelo) variará ligeramente de un suelo a otro, pero se encontrará en el rango de 0.1 a 0.3 bar. El movimiento de agua continuará teniendo lugar, pero la velocidad del mismo (flujo no saturado) es muy lenta, puesto que será ahora debida principalmente a fuerzas capilares.

El concepto de capacidad de campo es bastante antiguo en el área del uso y manejo del agua, desarrollado en base a experiencias prácticas y científicas, y que simplifica los cálculos de necesidades de agua de riego, balances hídricos y otros. Sin embargo, no es un concepto muy riguroso desde el punto de vista científico y no es un valor único que siempre ocurra en el suelo. La dinámica del agua en el suelo provocada por las pérdidas (drenaje profundo, evaporación y transpiración) y por las ganancias (lluvia y riego), determina que nunca se alcance en la práctica una condición de equilibrio entre el agua del suelo y la fuerza gravitacional. Las causas de que la capacidad de campo no sea siempre la misma son varias. Una es la histéresis y otra es la posible existencia de una capa poco permeable de suelo poco profunda que mantiene el suelo saturado y que actúa como una barrera al movimiento del agua gravitacional. Los cambios de textura y estructura dentro del perfil del suelo influyen marcadamente la dinámica del agua, tanto "gravitacional" como "retenida".

Por lo expuesto, es muy recomendable realizar las determinaciones directamente en el campo, donde la medida toma en consideración las características del perfil del suelo incluyendo la secuencia de horizontes contrastantes que pueda ocurrir y no existe una perturbación mecánica como la que en alguna medida impone el uso de muestreadores. No obstante, el procedimiento de campo es muy tedioso, consume mucho tiempo y puede fracasar si las

condiciones del tiempo cambian súbitamente durante la determinación y se tornan muy adversas. Por ello es que, pese a las limitaciones anotadas, la determinación en el laboratorio sigue siendo utilizada de preferencia, aparte de que permite procesar simultáneamente un número de muestras muy superior al que puede evaluarse en el campo.

En la determinación de laboratorio es muy importante usar muestras indisturbadas para la estimación de capacidad de campo, ya que si se usan muestras molidas y tamizadas (lo que es corriente en propiedades químicas de suelo), se crea una microporosidad capaz de retener agua a esas bajas succiones de matriz, que no existe en el campo y por lo tanto no lo representa.

La experiencia alcanzada en condiciones de riego y de seco, indica que las determinaciones a 0.1 bar de tensión en muestras indisturbadas constituyen un mejor estimador de laboratorio de la capacidad de campo que las realizadas sobre muestras molidas y tamizadas a 0.33 bar.

PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE

A medida que las plantas absorben agua de un suelo, ellas pierden la mayor parte de la misma por evapotranspiración en las superficies foliares. Algo de agua se pierde también por evaporación directamente desde la superficie del suelo. Ambas pérdidas ocurren simultáneamente. Mientras el suelo se va secando, las plantas comienzan a marchitarse durante las horas del día, especialmente si las temperaturas son elevadas y hay algún movimiento de viento. Al comienzo las plantas recobran su vigor y su turgencia durante la noche, pero finalmente la velocidad de suministro de agua a las plantas desde el suelo será tan lenta que permanecen marchitas noche y día. Aunque no están muertas, las plantas se encuentran ahora en condiciones de marchitez permanente y morirán si no se agrega agua al suelo. Una medida de la tensión de la matriz del suelo arrojará un valor de alrededor de 15 bar para la mayoría de las plantas. Algunas xerófitas continuarán extrayendo agua a esta y aún a tensiones más elevadas.

El contenido de humedad del suelo en este estado se denomina coeficiente o punto de marchitez permanente. El agua remanente en el suelo se encuentra en los microporos más pequeños y alrededor de las partículas de suelo en forma de películas. Es obvio que una cantidad considerable del agua en los suelos no es disponible para las plantas.

El concepto de punto de marchitez permanente fue definido de la manera siguiente: el punto de marchitez permanente es el contenido de agua que hay en el suelo en el cual una planta marchita no recobra la turgencia, aunque se le coloque en un suelo con una humedad mayor o igual a capacidad de campo por 12 horas. Se ha criticado estos conceptos señalando que el marchitamiento ocurre cuando el potencial interno de agua en las plantas alcanza valores bajos (se trata de valores negativos por ser potencial) y se pierde turgencia, debido

a que la velocidad de absorción de agua desde el suelo por parte de las plantas no puede hacer frente a las pérdidas por evapotranspiración, determinadas por la radiación y otros factores atmosféricos. Ello implica que puede haber deficiencia de agua para las plantas y aún marchitamiento permanente, con altos contenidos de agua en el suelo. Los planteamientos anteriores ponen de relieve la debilidad de considerar al punto de marchitez como una constante de caracterización de suelos, al menos desde un punto de vista científico riguroso. Sin embargo, su utilidad deriva de que la mayoría de las plantas de cultivo son mesofíticas (plantas y comunidades vegetales que viven en condiciones ambientales intermedias entre el medio seco y el medio acuático), mostrando marchitez permanente cuando la succión de la matriz del suelo en la totalidad del volumen de suelo explorado por sus raíces está comprendida entre 10 y 20 bar, y porque la variación del contenido de agua retenida entre esos valores es muy estrecha en generalidad de los suelos. Por lo tanto, sí se consideran además los inevitables errores de la determinación analítica, puede aceptarse al contenido de agua retenida a 15 bar como un estimador válido del punto de marchitez permanente, definido como el límite inferior del rango de disponibilidad de agua para las plantas.

CUADRO. 5: VALORES NORMALES DE CAPACIDAD DE CAMPO Y PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE PARA SUELOS DE DIFERENTES TEXTURAS

TEXTURA	CAPACIDAD DE CAMPO	PUNTO DE MARCHITEZ PERMANENTE
Arenoso	5 -15	3 -8
Franco arenoso	10 -20	6 -12
Franco	15 -30	8 -17
Franco arcilloso	25 -35	13 -20
Arcilloso	30 -70	17 -40

COEFICIENTE HIGROSCÓPICO

Si se coloca un suelo seco al aire, en una atmósfera saturada con vapor de agua (al menos 98% de humedad relativa), aquel adsorberá agua en las superficies de las partículas del suelo, sobre todo los coloides. Esta agua está asociada a las superficies de las partículas del suelo, sobre todo los coloides como agua absorbida. Está agua está retenida tan fuertemente que en su mayor parte se considera no líquida y solamente puede moverse en forma de vapor. La tensión de la matriz del suelo en este punto es de alrededor de 31 bar. El contenido de humedad del suelo en equilibrio con la atmósfera saturada se denomina coeficiente higroscópico. Como podría esperarse, los suelos ricos en material coloidal retendrán más agua en esta condición que los arenosos y que aquellos de bajo contenido de arcilla y de humus.

CUADRO 6: RELACIONES DE DIFERENTES MANERAS DE EXPRESAR LA HUMEDAD DEL SUELO

pF	Altura de la Columna de Agua (cm)	Atmósferas	Valores de Presión
0	1	1/1000	
1	10	1/100	
2	100	1/10	
2.54	346	0.33	Capacidad de Campo
3	1000	1	
4	10000	10	
4.2	15849	15	Punto de Marchitez
4.4	31623	31	Humedad Higroscópica
5	100000	100	
6	1000000	1000	
7	10000000	10000	

CUADRO 7: VALORES DEL POTENCIAL MÁTRICO O SUCCIÓN DE LA MATRIZ DEL SUELO PARA CUATRO CONDICIONES DE HUMEDAD

Condición del agua del suelo	cm	Ergios/g	Julios/ kg	Dinas/ cm ²	Bars	Atm.
Saturación (aproximada)	-1	-980	-0.098	-980	-9.8*10 ⁻⁴	-1*10 ⁻³
Capacidad de campo	-100	-9.8*10 ⁴	-9.800	-9.8*10 ⁴	-9.098*10 ⁻²	-0.1
Punto de marchitez	-1.5*10 ⁴	-1.47*10 ⁷	-1470	-1.47*10 ⁷	-14.7	-14.7
Seco al aire (H _c =0.85)	-2.2*10 ⁵	-2.16*10 ⁸	-2.16*10 ⁴	-2.16*10 ⁸	-216	-216

CLASIFICACIÓN BIOLÓGICA DEL AGUA EN EL SUELO

Existe una relación definida entre la retención de agua y su utilización por las plantas. El agua gravitacional es obviamente de poco valor para las plantas y puede ser perjudicial ya que disminuye la aireación, y con ello, la absorción de nutrientes y de agua por las raíces.

En oposición, el agua retenida en el suelo entre su capacidad de campo (0,1 - 0,3 bar) y el coeficiente de marchitez (15 bar) se considera utilizable por las plantas y como tal es agua disponible. El agua retenida a tensiones de la matriz del suelo mayores de 15 bar se define como no disponible para la mayoría de las plantas.

En la mayor parte de los suelos, el crecimiento óptimo de las plantas tiene lugar cuando el contenido de humedad del suelo se mantiene próximo a su capacidad de campo con una tensión de la matriz del suelo de 1 bar o menos. Así, el rango de humedad para el crecimiento óptimo de las plantas no se extiende en el rango completo de agua disponible en el suelo. El concepto de agua disponible es de utilidad en la caracterización de los suelos para estimar su capacidad de suministro de agua a las plantas y además es útil para calcular riegos o balances hídricos.

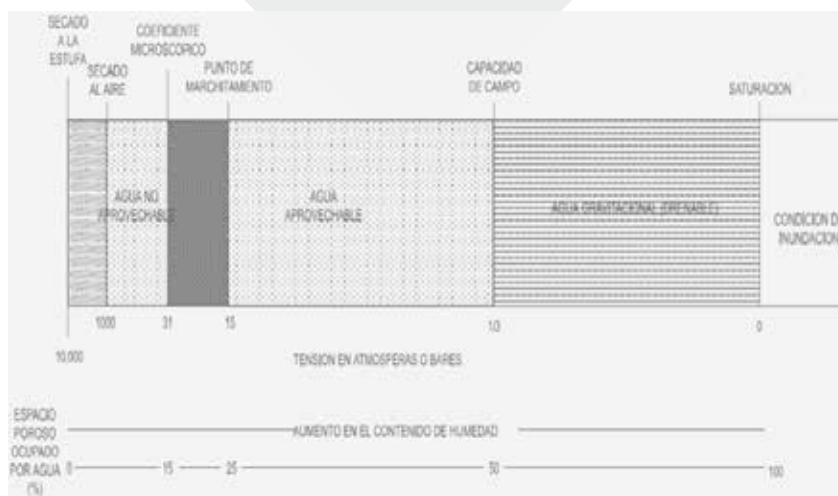


FIGURA 23: CONSTANTES HÍDRICAS, TIPOS DE AGUA DEL SUELO RESPECTO A LA TENSIÓN DEL SISTEMA POROSO O MATRIZ DEL SUELO.



FIGURA 24: CONDICIONES DE HUMEDAD PARA SUELOS DE DIFERENTES TEXTURAS

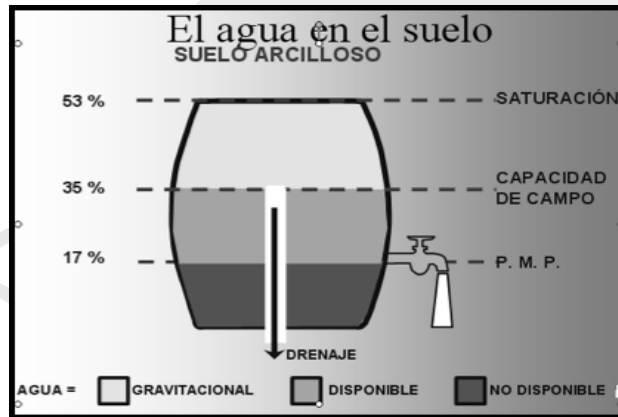


FIGURA 25: EJEMPLO DE CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL AGUA EN EL SUELO

El suelo es un medio poroso que presenta una fase sólida, líquida y gaseosa. En este cuerpo trifásico se produce el almacenamiento y transporte de fluidos como el agua y/o el aire. Es por ello que la caracterización de los poros del suelo es fundamental para conocer su capacidad de almacenamiento y conducción.

La retención del agua en los poros del suelo ocurre cuando el potencial de succión es mayor que el potencial gravitacional. Para poder realizar las curvas de desabsorción de agua en el suelo se requiere de los equipos llamados ollas de presión como se muestra (Figura 26). Las curvas de retención de humedad del suelo o curvas de desabsorción de humedad del suelo se refieren a los contenidos de humedad que se obtienen de las muestras de suelo indisturbadas (cilindros de 2.0 alto x 4.8 cm de diámetro) que han estado sujetas a tensiones distintas en todo el rango, desde saturación (tensión de valor cero) hasta 15 atmósferas, graficado con la tensión respectiva (Figura 27 y 28).

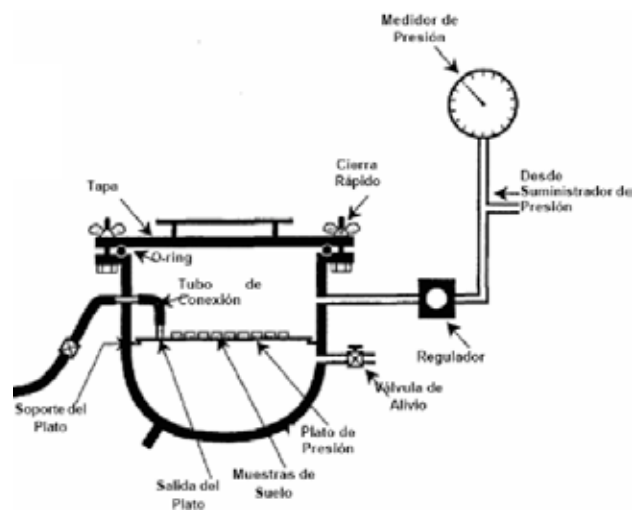


FIGURA 26: DIAGRAMA DE LAS OLLAS DE PRESIÓN

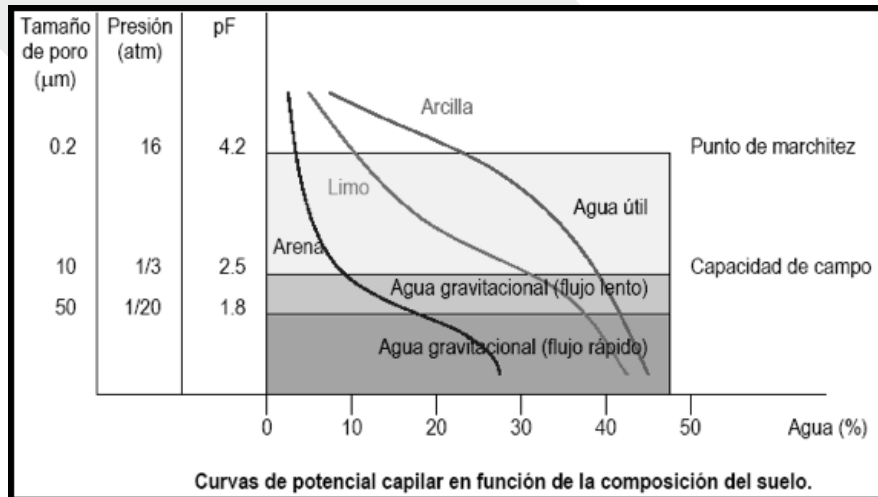


FIGURA 27: CURVAS DE DESABSORCIÓN QUE MUESTRA EL AGUA ÚTIL, DRENAJE LENTO Y DRENAJE RÁPIDO DEL AGUA EN EL SU LO SEGÚN TAMAÑO DE POROS Y DIFERENTES UNIDADES DE PRESIÓN

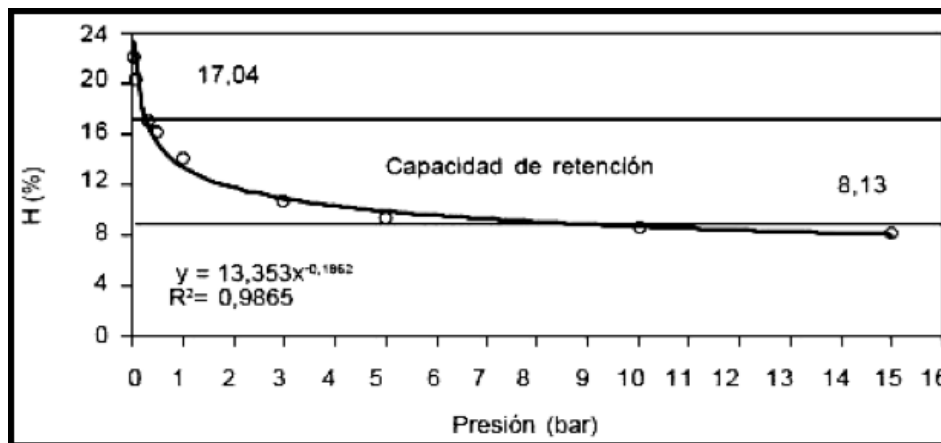


FIGURA 28: EJEMPLO DE CURVA DE DESABSORCIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO

MATERIALES

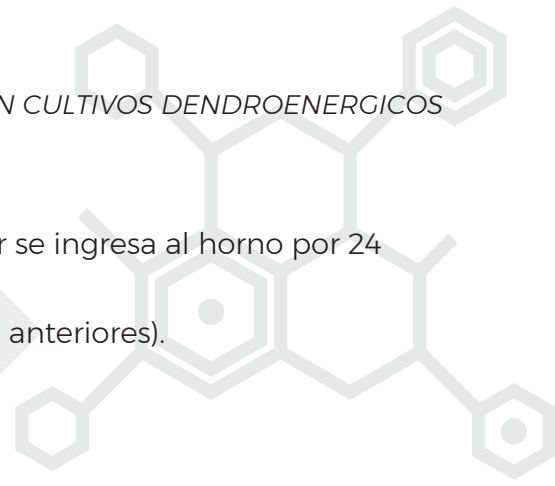
- Cilindro de 4.8 cm de diámetro y 2.0 cm de altura, y cilindro de 4.8 cm de diámetro y cilindro de 4.8 cm de altura
- Ligas de hule
- Plato poroso cerámico con capacidad de 0 - 5 bar
- Plato poroso cerámico con capacidad de 5 - 15 bar
- Cortador llamado Cutter
- Tijera
- Malín
- Cilindros de hule
- Ollas de presión con capacidad de 0 - 5 bar.
- Ollas de presión con capacidad de 5 - 15 bar.
- Cilindros de aire comprimido.
- Manómetros y válvulas de aire a presión.
- Palto recolector de agua a la salida de las ollas de presión.

PROCEDIMIENTO DE METODOLOGÍA DE UTILIZAR UNA MUESTRA PARA TODOS LOS PUNTOS DE LA CURVA DE DESABSORCIÓN

(Es más exacta la metodología de utilizar una muestra para cada punto de la curva de desabsorción y no se utiliza malín o algún tipo de filtro que obstruye el contacto directo del plato de cerámica y la muestra de suelo que también causa error)


- Tome una muestra de suelo dentro del cilindro de 2.0 cm de altura dejándola con ambas caras planas.
- Tome una muestra de suelo dentro del cilindro de 4.8 cm de altura dejándola con ambas caras planas.
- Medir densidad aparente con el cilindro de 4.8 cm de altura.
- Poner el malín y el cilindro de hule a ambos cilindros.
- Poner los dos cilindros de las muestras a saturar.
- Confeccionar la curva de desabsorción con el cilindro de 2.0 mm de altura.
- Pesar la muestra cuando está saturada.
- Ingresar el plato poroso de cerámica respectivamente saturado dentro de la olla con capacidad de 0 - 5 atm. Si se tienen platos porosos con capacidades de 0.5; 1.3, y 5 atm se deben de ingresar saturados para realizar las respectivas medidas de retención de humedad del suelo cada vez que se quiera determinar un punto que tenga la capacidad o menor de dicho plato.
- Ingresar la muestra dentro de la olla de presión de 0 - 5 bar sobre el plato poroso saturado.
- Ingresar una presión de 0.3 bar y dejar hasta no obtener agua en la salida de la olla de presión.
- Abrir la olla de presión y pesar la muestra.
- Repetir el procedimiento de los pasos 9 y 10 para 1.0; 3.0; 5.0; atmósfera de presión.
- Cambiar la olla para capacidad de 10.0 y 15.0 atm repitiendo el procedimiento de los puntos 9 y 10.
- Ingresar el plato poroso de cerámica respectivamente saturado dentro de la olla con capacidad de 0 - 15 atm.

- Al tomar el peso después de haber puesto la muestra a 15 bar se ingresa al horno por 24 horas a 105 °C.
- Pesar la muestra seca (este peso sirve para todas las muestras anteriores).
- Calcular humedades gravimétricas.
- Calcular humedades volumétricas.
- Confeccionar la curva de desabsorción.
- Entregar datos entre compañeros para la comparación, el análisis y discusión.
- Calcular densidad aparente y porosidad total usando densidad real de partículas de 2.65 gr/cm³.



PREGUNTAS

- ¿Cuánto volumen de la porosidad total pertenece a macro meso y micro porosidad respectivamente, de las muestras procesadas?
- ¿Cuál es la mayor, media y menor cantidad de agua respecto a la pregunta anterior?
- ¿Cuánto volumen de espacio de los poros pertenece a la cantidad de agua útil, al drenaje lento y al drenaje rápido de agua en el suelo?
- ¿Qué tamaño de poros pertenece a los macro, meso y microporos?



*Psiquiatría: El
único negocio donde
el cliente nunca tiene
la razón.*

S. Kent

PRÁCTICA: INFILTRACIÓN DEL AGUA EN EL SUELO

OBJETIVOS

- Determinar los valores y el comportamiento (modelo matemático) de las velocidades de infiltración instantánea y acumulada del suelo
- Determinar los valores y el comportamiento (modelo matemático) de la lámina infiltrada acumulada en el suelo
- Determinar el valor de velocidad de infiltración básica del suelo

INTRODUCCIÓN

La infiltración se refiere a la entrada vertical de agua en el perfil del suelo, cuando este no está saturado. La dinámica de este proceso está relacionada directamente con la cantidad y calidad de poros (meso y macroporos). De esta forma se puede hablar de capacidad de infiltración como la velocidad con que el agua puede entrar en el suelo, la cual si el suelo está seco; la velocidad de infiltración de agua es alta al inicio y luego va disminuyendo hasta llegar a un valor constante que sería una etapa equilibrada que a esta última etapa también es llamada tasa o velocidad de infiltración básica.

En el estudio de la capacidad de infiltración de un suelo se considera el flujo de agua en su condición no saturada y esta es la diferencia fundamental con la medida de conductividad hidráulica el cual por lo general es un único valor, en la que se considera el flujo de agua en un suelo saturado.

Los principales factores que afectan a la infiltración de agua en el suelo son:

- El contenido hídrico inicial
- Permeabilidad superficial que depende de características internas del suelo (textura, estructura, espacio poroso, presencia de horizontes compactados, actividad de organismos, contenido de materia orgánica y mineralogía principalmente),
- Duración de la lluvia (o bien riego) y
- Temperatura del suelo y del agua.
- El conocimiento de la infiltración es importante para:
Escoger y diseñar los sistemas de riego en la finca y que sean adecuados para el suelo en cuestión
Cuantificación de la lámina de agua a aplicar, así como de su frecuencia en la finca.
Evaluar la lluvia efectiva infiltrada y el escurrimiento causado por la misma.
El tiempo de estancamiento de agua sobre la superficie del suelo.

La cantidad de agua que se infiltra en un suelo por unidad de tiempo bajo condiciones de campo es expresada en cm o mm de lámina de agua por hora o por minuto.

La velocidad de agua infiltrada disminuye conforme aumenta la cantidad infiltrada de agua que ya ha entrado en el suelo en un tiempo acumulado. De estas dos variables se establece la tasa de velocidad de infiltración constante o velocidad de infiltración básica.

Para la estimación de la infiltración del agua en el suelo se usara el método del cilindro unitario (Figura 29) o el método del doble cilindro (Figura 30) llamados anillos concéntricos aunque es bueno mencionar que las velocidades de infiltración obtenidas con el método del doble anillo en condiciones de no saturación no son muy representativas del comportamiento del suelo en condiciones de campo ya que no es habitual, ni aún siquiera cuando se riega que sobre la superficie del terreno haya una lámina de agua de varios cm de altura y sólo es así en condiciones excepcionales como las inundaciones o las grandes avenidas de agua.

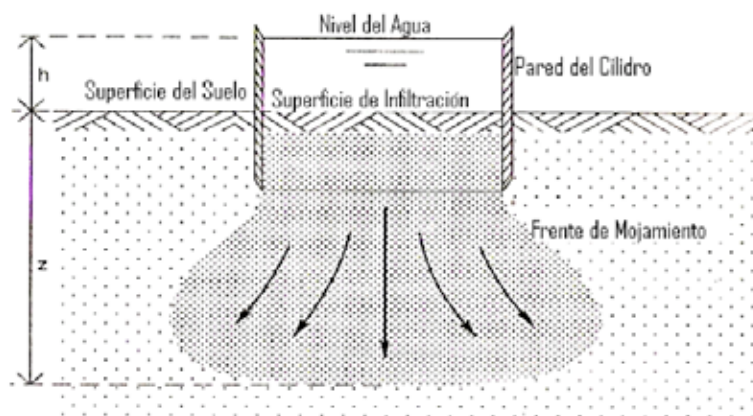


FIGURA 29: ESTIMACIÓN DE LA INFILTRACION DEL AGUA EN EL SUELO CON EL MÉTODO DEL CILINDRO UNITARIO

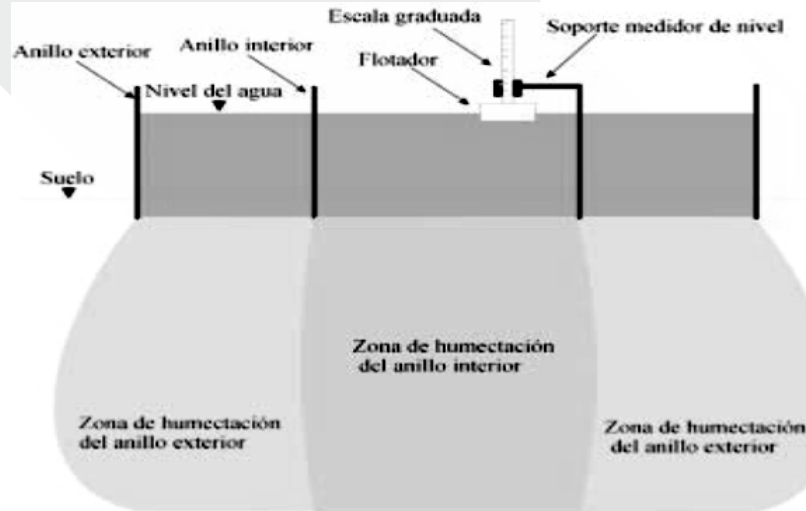


FIGURA 30: MÉTODO DEL DOBLE CILINDRO PARA MEDIR INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO

En el método del doble cilindro desarrollado (Figura 31), parte de la idea de que colocados los dos cilindros y obtenido el estado de saturación, la diferencia de nivel del agua (H) en los anillos interior y exterior provoca un flujo de agua que será de entrada hacia el anillo interior si la altura es mayor en el tubo exterior, o de salida si es inferior.

En cualquier caso, además de la componente del flujo de agua (QH) debida a la diferencia de nivel (H) entre los dos anillos, el agua abandona ambos cilindros por la superficie del suelo en el que están instalados como consecuencia de su porosidad.

Por tanto, el flujo neto que abandona (o penetra en su caso) el anillo interior es en realidad el resultado de dos componentes:

- La componente debida a la diferencia de nivel de agua entre los anillos
- La componente debida a la capacidad de absorción del suelo, la infiltración propiamente.

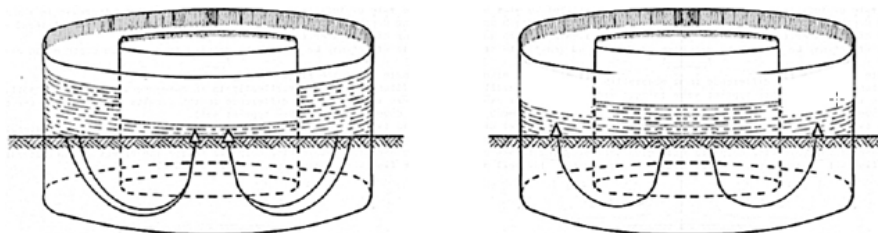


FIGURA 31: EFECTO DE LA DIFERENCIA DE NIVELES DE AGUA ENTRE AMBOS ANILLOS.

A) EL FLUJO ENTRA HACIA EL ANILLO INTERIOR,

B) EL FLUJO ABANDONA DEL ANILLO INTERIOR.

El problema radica precisamente en poder aislar la componente del flujo de agua "QH" debida a la diferencia de nivel "H" entre los dos anillos de la componente de infiltración a partir del valor del flujo neto del tubo interior (valor objeto de la medición). Para ello se adopta la hipótesis de que la componente debida a la absorción es constante durante la realización de la experiencia y no resulta afectada por los cambios del nivel del agua en el cilindro interior. La hipótesis efectivamente es válida si las medidas se realizan en un corto espacio de tiempo y si "H" se mantiene relativamente pequeño. Por otra parte, si $H=0$ entonces el flujo en el tubo interior se debe únicamente a la absorción del suelo, siendo éste precisamente el propósito de la técnica propuesta (Figura 32).

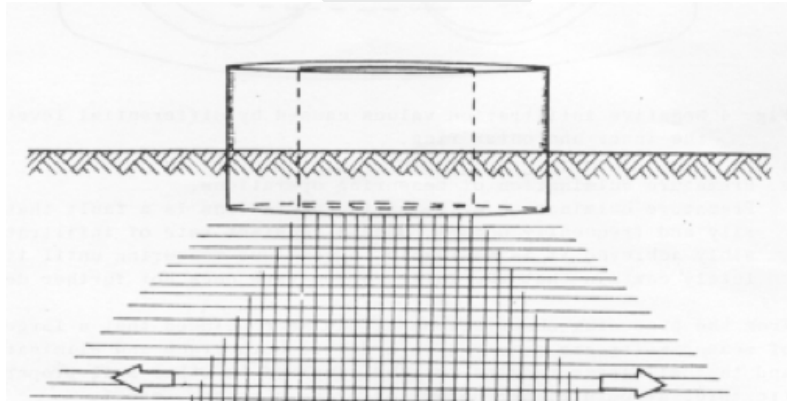


FIGURA 32: DIAGRAMA DEL FLUJO DE INFILTRACIÓN DE AGUA EN EL SUELO CON EL MÉTODO DEL DOBLE ANILLO

ELECCIÓN DE UBICACIÓN DE LOS ANILLOS

La bondad de los datos y la fiabilidad de los resultados obtenidos dependen en gran medida de la idoneidad del lugar elegido para su realización y de la conveniencia de la metodología usada. Los aspectos más relevantes a considerar en relación a la ubicación de los anillos son los siguientes:

- Se debe encontrar una localización representativa del suelo a estudiar
- Evita ubicar los anillos en zonas compactadas. Los terrenos compactados por vehículos o personas presentan una tasa de infiltración menor que las zonas adyacentes (sobre todo en los suelos de textura fina). Tener cuidado y evitar compactar el suelo con las propias pisadas cuando se busca el lugar idóneo o como durante la colocación de los anillos.
- En los suelos ricos en arcillas expansibles no instalar los anillos sobre las grietas de expansión-contracción. Cuando la textura del terreno es fina el tamaño de los poros es muy pequeño y la absorción del agua se ve más afectada por la estructura del suelo si existe.
- La tasa de infiltración es particular para cada horizonte del suelo, asumiéndose homogénea en todo el espesor del mismo. En suelos con varios horizontes de características diferentes, el paso del frente húmedo de un horizonte a otro quedará reflejado en la tasa de infiltración medida con el instrumento escogido para medir la velocidad de infiltración de agua en el suelo.

Modelo matemático de infiltración de agua en el suelo

Con la ecuación de Kostyakov se logra hacer una aproximación teórica del comportamiento de la infiltración en el suelo, permitiendo así calcular la lámina de agua acumulada luego de cierto tiempo de riego o de lluvia. Los datos obtenidos en este ensayo serán representados usando la ecuación de Kostyakov:

$$lac = A * t^B$$

(ecuación 1)

Donde:

lac = infiltración acumulada (cm)

t = tiempo acumulado (horas)

A y B = parámetros que dependen del suelo y de su condición física los cuales deben ser calculados.

La ecuación 1 representaría cualquiera de los dos ejemplos que se muestran (Figura 33) calculando para cada una de ellos los valores de A y B.

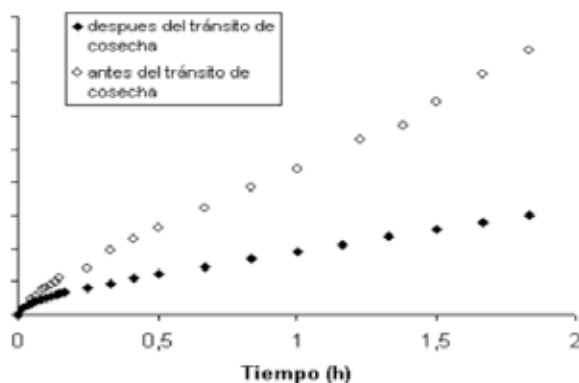


FIGURA 33: DIFERENCIA DE LA INFILTRACIÓN ACUMULADA EN EL SUELO DEBIDO AL TRÁNSITO DE COSECHA

Al igual que en la práctica de curvas de desabsorción de agua, la formula (1) puede ser expresada en su forma logarítmica y graficada en papel milimétrico. Su forma logarítmica es la siguiente:

$$\text{Log lac} = \text{Log A} + B * \text{Log t}$$

(ecuación 2)

Al relacionar los valores "Log lac" y Log "t" en un gráfico, se pueden estimar los parámetros "A" y "B".

El parámetro "A" es el intercepto en el eje "y" y representa la cantidad de infiltración durante el intervalo inicial; depende de la estructura y de la condición del suelo en el momento en que se aplica el agua. Si el suelo tiene grietas y poros grandes, el valor de "A" es relativamente mayor que si solamente tiene poros pequeños.

El parámetro "B" es la pendiente e indica la forma en que la velocidad de infiltración se reduce con el tiempo. Depende de los cambios de estructura que puede sufrir el suelo durante el humedecimiento.

Para estimar la ecuación 1 se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$B = \frac{\sum \text{Log}^{\text{lac}} \log t - \frac{\sum \log^{\text{lac}} \sum \log t}{n}}{\sum \text{Log}^2 - \frac{(\sum \log t)^2}{n}}$$

Nota: (t = t_{ac})

(ecuación 3)

$$\log A = \frac{\sum \log^{\text{lac}}}{n} - B \frac{\sum \log t}{n}$$

(ecuación 4)

$$t = \text{Antilog} \left(\frac{\log_{\text{lac}} - \log A}{B} \right)$$

(ecuación 5)

$$r^2 = \frac{\left(\sum \log t \log t - \frac{\sum \log^{\text{lac}} \sum \log t}{n} \right)^2}{\left(\sum \log^2 \text{lac} - \frac{(\sum \log^{\text{lac}})^2}{n} \right) \left(\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n} \right)}$$

(ecuación 6)

Diferenciando (derivando) la ecuación (1) de infiltración acumulada con respecto al tiempo, se obtiene:

$$\frac{dl}{dt} = B * A * (t)^{B-1}$$

(ecuación 7)

En la ecuación anterior, dl/dt es la velocidad de infiltración instantánea o V_{inst} (cm/hr), t es el tiempo acumulado en horas, de referencia durante el cual hay entrada constante de agua al perfil de suelo (por ejemplo, se puede saber cuál es la velocidad instantánea de entrada del agua luego de dos horas de riego), A y B son las constantes determinadas con anterioridad quedando de la siguiente manera

$$V_{\text{infins}} \text{ (cm/h)} = B * A * (t)^{B-1}$$

(ecuación 8)

Se utiliza la ecuación 7 para calcular la velocidad de infiltración instantánea correspondiente a la velocidad de infiltración básica que se define como aquella velocidad relativamente constante considerándose como un cambio en la velocidad de infiltración instantánea menor del 10% de la velocidad media en la lectura anterior. Si no se logra encontrar en la prueba de campo por falta de tiempo la velocidad relativamente constante o infiltración básica entonces se puede estimar mediante la siguiente relación:

$$t_b = 10^{-(B-1)}$$

Donde

tb = tiempo estimado en que se presenta la velocidad de infiltración básica (hr).

B = es el parámetro encontrado en este método indirecto.

Iac = infiltración acumulada en (cm).

“ t_b ” se sustituye en la ecuación 7 y se obtiene el valor de la velocidad de infiltración básica

Método directo de cálculo de la velocidad de infiltración básica

Se puede utilizar un método directo con el cual en las cuatro ecuaciones se sustituye la infiltración acumulada por la velocidad de infiltración instantánea y con los mismos procedimientos para establecer la ecuación de infiltración acumulada, se establece la ecuación de velocidad de infiltración instantánea (Figura 34).

$$V_{\text{infi}} \text{ (cm/hr)} = a * (t)^b \quad \text{ecuación 10}$$

Las ecuaciones para encontrar los valores y estimar la ecuación 9, quedan de la siguiente manera:

$$b = \frac{\sum \text{Log}^{Viins} \log t - \frac{\sum \log^{Viins} \sum \log t}{n}}{\sum \text{Log}^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n}}$$

Nota: ($t = t_{ac}$)

(ecuación 11)

$$\log a = \frac{\sum \log^{Viins}}{n} - b \frac{\sum \log t}{n}$$

(ecuación 12)

$$t = \text{Antilog} \left(\frac{\log^{Viins} - \log a}{b} \right)$$

(ecuación 13)

$$r^2 = \frac{\left(\sum \log^{Viins} \log t - \frac{\sum \log^{Viins} \sum \log t}{n} \right)^2}{\left(\sum \log^2 Viins - \frac{(\sum \log^{Viins})^2}{n} \right) \left(\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n} \right)}$$

(ecuación 14)

Donde:

Viins = Vinfins = velocidad de infiltración instantánea (cm/hr).

t = tiempo acumulado en (hr).

El parámetro “a” es el intercepto en “y o en Vinfins” y el parámetro “b” es la pendiente de la

ecuación linealizada.

Para calcular el tiempo estimado en que se presentaría la velocidad de infiltración básica se utiliza la ecuación

$$t_b = 10 * b$$

(ecuación 15)

Donde:

t_b = tiempo estimado en que se presenta la velocidad de infiltración básica (hr).

b = es el parámetro encontrado en este método directo.

V_{iins} = **V_{infins}** = velocidad de infiltración instantánea (cm/hr)

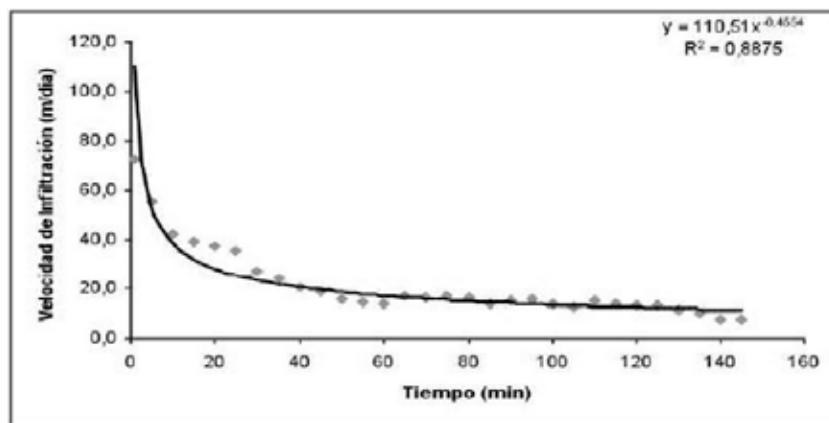


FIGURA 34: EJEMPLO DE LA CURVA DE VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN DE MANERA DIRECTA Y EL MODELO MATEMÁTICO ENCONTRADO

MATERIALES

- Cilindro de lectura (cilindro más alto y de menor diámetro)
- Cilindro protector (cilindro más bajo y de mayor diámetro)
- Mazo
- Bloque de madera de 5" * 5" y con una longitud de 25"
- Agua
- Saco de tela
- Regla de 30 cm como mínimo
- Cinta adhesiva

PROCEDIMIENTO

- Colocar los anillos sobre la ubicación elegida comprobando que no queden ni piedras ni raíces bajo el filo de ninguno de ellos que puedan deformar los aros con facilidad o dañarlos permanentemente.
- Asegurar que el cilindro interior esté totalmente centrado en el cilindro exterior.
- Clavar los cilindros en el suelo a igual profundidad en todo su perímetro. Los anillos ladeados o que no han sido introducidos de forma homogénea presentan mayor riesgo de sufrir fugas de agua.
- Tanto el anillo exterior como el interior deben llegar hasta 10 cm de profundidad para evitar en mayor medida el drenaje lateral.
- Agregar agua al anillo exterior cubriendo la superficie del suelo dentro de él con una tela y una vez logrado el nivel requerido o previamente definido, quitar la tela. Ésto se hace con el objetivo de no erosionar el fondo y evitar la alteración en los datos de infiltración obtenidos por el posible movimiento horizontal del agua o sellado de la superficie.
- Comprobar que no existan fugas de agua provocadas por la presencia de piedras o raicillas. Si se quiere mantener constante el nivel del agua durante toda la experiencia deberás utilizar algún tipo de dispositivo dispensador.
- Agregar seguidamente agua al anillo interno hasta la altura de lectura inicial o tiempo cero la cual debe coincidir con la altura del agua del cilindro externo para evitar el flujo entre los cilindros; tomar la altura del agua inicial con la regla e inicie inmediatamente el conteo del tiempo. Escribir las lecturas de altura y tiempo en el registro de datos (cuadro 8).
- Es aconsejable realizar las medidas a intervalos regulares, ya sea de tiempo o de descenso de la lámina de agua en el interior del cilindro; de este modo es más fácil identificar cuándo la tasa de absorción permanece constante.
- Una vez alcanzada la velocidad de infiltración constante o la lámina de infiltración constante en un mismo tiempo, es aconsejable continuar las medidas por al menos tres veces dichas lecturas constantes o hasta tener la absoluta certeza de que el agua está circulando por un mismo horizonte.
- Debido a la elevada variabilidad de los suelos y a los posibles errores asociados al método es necesario realizar más de una medida de infiltración de agua en el suelo; en cualquier caso, para estar seguros de que todos los resultados de las pruebas son correctos deberán contrastarse con otras propiedades del suelo determinantes del movimiento del agua en el

suelo como la textura, la estructura, el contenido en materia orgánica y otros.

- Es recomendable tomar lecturas a los 0, 1, 2, 3, 4 y 5 minutos y a los 10, 20, 30, 45, 60, 90 y 120 minutos y luego cada hora hasta que la velocidad de entrada sea casi constante (velocidad de infiltración básica).
- Para el método indirecto o derivado se grafica de la siguiente manera: dibuje un gráfico en papel Log-Log de 3x3 ciclos y use los valores de "t" (tiempo acumulado,) en el eje X, e "Iac" (infiltración acumulada) en el eje "Y" Otra forma de graficarlo es usando papel milimétrico, pero en este caso se debe calcular con anterioridad el Log de "Iac" y el Log de "t" para obtener una línea recta.
- Dibuje la recta de mejor ajuste y determine los valores de las constantes "A" y "B", que son necesarias para complementar las ecuaciones 1, 8 y 9. La pendiente es "B" y el valor de "A" es el intercepto de la línea de mejor ajuste en el eje Y, y es igual al valor de "Iac" cuando "t" es la unidad (1 minuto, 1 hora o 1 segundo, según las unidades de tiempo utilizadas).
- 14. Para el método directo se grafica de la siguiente manera: dibuje un gráfico en papel Log-Log de 3x3 ciclos y use los valores de "t" (tiempo acumulado,) en el eje X, y "Vinfins" (velocidad de infiltración instantánea) en el eje "Y" Otra forma de graficarlo es usando papel milimétrico, pero en este caso se debe calcular con anterioridad el Log de "Vinfins" y el Log de "t" para obtener una línea recta.
- Dibuje la recta de mejor ajuste y determine los valores de las constantes "a" y "b", que son necesarias para complementar las ecuaciones 10 y 15. La pendiente es "b" y el valor de "a" es el intercepto de la línea de mejor ajuste en el eje Y, y es igual al valor de "Vinfins" cuando "t" es la unidad (1 minuto, 1 hora o 1 segundo, según las unidades de tiempo utilizadas)

PREGUNTAS

- ¿Para qué es útil conocer la velocidad de infiltración básica? Explique todos los casos en riego, drenaje, conservación de suelo y otros.
- Qué diferencia existe entre la velocidad de infiltración instantánea y la velocidad de infiltración básica, cual es mayor?



*Trabaja en impedir
delitos para no
necesitar castigos.*

Confucio (551 A.C. - 478 A.C.)

COMPONENTES DEL SISTEMA TRIFÁSICO (SÓLIDO, LÍQUIDO Y GASEOSO) DEL SUELO

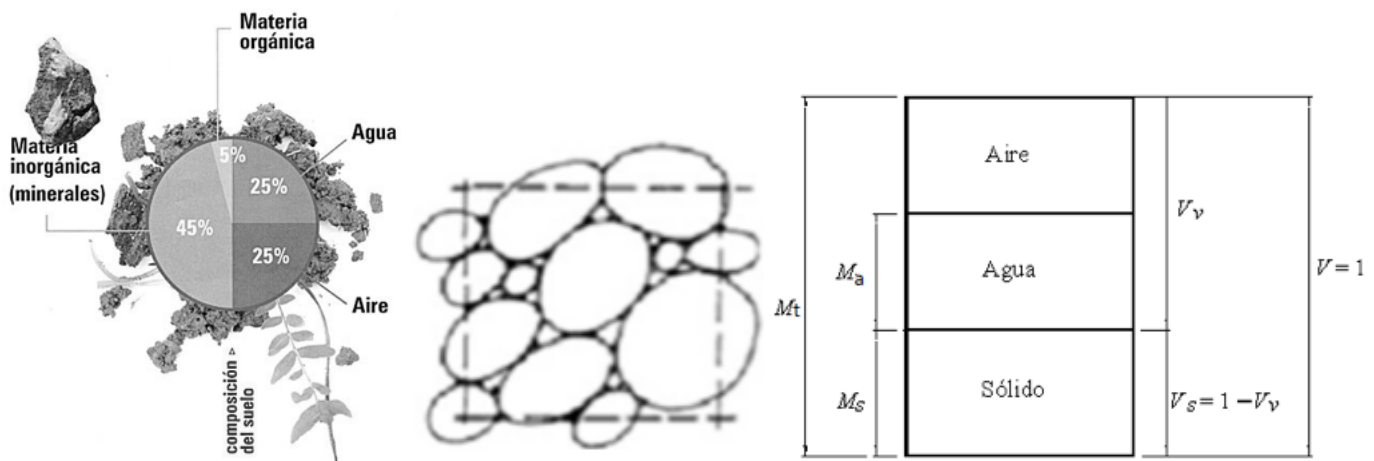


FIGURA 35: PROPORCIONALIDAD DE LOS ELEMENTOS TRIFÁSICOS DEL SUELO

De la figura se puede deducir que: El suelo está compuesto principalmente por material mineral, material orgánico, agua y aire; para los cuales se puede obtener lo siguiente.

- M_a = masa de agua
- M_s = masa de sólidos (masa del suelo mineral + masa materia orgánica)
- M_t = masa total (masa del aire + masa del agua + masa de sólidos)
- V_v = volumen de vacíos (volumen de aire + volumen de agua)
- V_s = volumen de sólidos (suelo mineral + materia orgánica)
- V = volumen total
- En el caso de que el volumen total fuera igual a la unidad "1" el volumen de sólidos estaría expresado como dicha unidad menos el volumen de vacíos ($V_s = 1 - V_v$)



*Ciencia sin seso,
locura doble.*

Baltasar Gracián (1601-1658)



RELACIONES MATEMÁTICAS Y EJERCICIOS DEL SISTEMA TRIFÁSICO DEL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

$$v_t = v_s + v_{ai} + v_a$$

(ecuación 16)

$$v_t = v_s + v_p$$

(ecuación 17)

$$v_p = v_{ai} + v_a$$

(ecuación 18)

Donde:

- v_t = volumen total en el suelo (cm^3)
- v_s = volumen de suelo (partículas) (cm^3)
- v_{ai} = volumen de aire (cm^3)
- v_a = volumen de agua (cm^3)
- v_p = Volumen de poros (cm^3)

DENSIDAD REAL O DENSIDAD DE PARTÍCULAS O PESO ESPECÍFICO REAL

$$\bar{\delta}_r = \frac{p_s}{v_s} = \frac{m_s}{v_s}$$

(ecuación 19)

Donde:

- $\bar{\delta}_r$ = densidad real (g/cm^3)
- p_s = peso del suelo (g)
- v_s = volumen suelo (cm^3)
- m_s = masa del suelo (g)

DENSIDAD APARENTE O PESO ESPECÍFICO APARENTE

$$\delta_{ap} = \frac{ps}{vt} = \frac{ms}{vt} \quad (\text{ecuación 20})$$

Donde

- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- ps = peso del suelo (g)
- vt = volumen total (cm³)
- ms = masa del suelo (g)

HUMEDAD GRAVIMÉTRICA

En proporción:

$$g = \frac{ma}{ms} = \frac{pa}{ms} \quad \begin{matrix} (\text{g de agua}) \\ (\text{g de suelo}) \end{matrix} \quad (\text{ecuación 21})$$

En porcentaje:

$$\theta_g = \frac{ma}{ms} * 100 = \frac{pa}{ms} * 100 \quad \begin{matrix} (\text{g de agua}) \\ (\text{g de suelo}) \end{matrix} \quad (\text{ecuación 22})$$

ma se calcula con la siguiente ecuación:

$$ma = mt - ms \quad (\text{ecuación 23})$$

Donde:

- θ_g = humedad gravimétrica (g de agua / g de suelo)
- ma = masa del agua que está en el suelo (g)
- ms = masa del suelo seco (sin agua) (g)
- mt = masa total del suelo o masa del suelo húmedo (g)

En proporción:

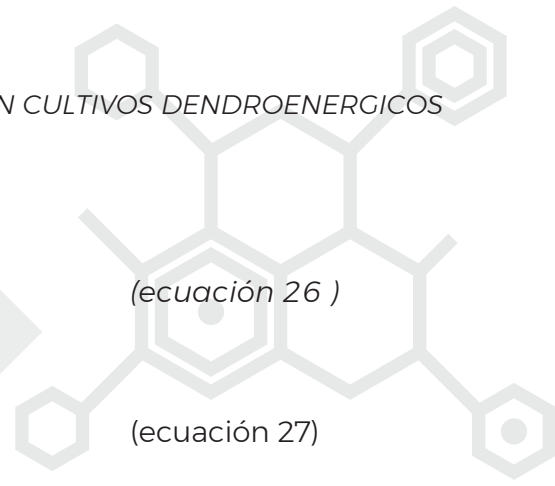
$$\theta_g = \frac{psh - pss}{pss} \quad \begin{matrix} (\text{g de agua}) \\ (\text{g de suelo}) \end{matrix} \quad (\text{ecuación 24})$$

En porcentaje:

$$\theta_g = \frac{psh - pss}{pss} * 100 \quad (\text{ecuación 25})$$

Donde:

- psh = peso de suelo seco (g)
- pss = peso suelos húmedo (g)
- θ_g = humedad gravimétrica (g/g)



(ecuación 26)

(ecuación 27)

HUMEDAD VOLUMÉTRICA

En proporción:

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} \frac{(\text{cm}^3 \text{ de agua})}{(\text{cm}^3 \text{ de agua} + \text{cm}^3 \text{ de aire} + \text{cm}^3 \text{ de suelo})}$$

En porcentaje:

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} * 100$$

Donde :

- θ_v = humedad volumétrica (cm³ de agua / (cm³ de suelo)
- v_a = el volumen de agua del suelo (cm³)
- v_t = volumen total del suelo (cm³)

De las ecuaciones 20, 21 y 26 tenemos

$$\delta_{ap} = \frac{m_s}{v_t} \quad (1)$$

$$\theta_g = \frac{m_a}{m_s}$$

$$m_s = \frac{m_a}{\theta_g} \quad (2)$$

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t}$$

$$v_t = \frac{v_a}{\theta_v} \quad (3)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (1) tenemos:

$$\delta_{ap} = \frac{\frac{m_a}{\theta_g}}{\frac{v_a}{\theta_v}}$$

$$\delta_{ap} = \frac{m_a * \theta_v}{v_a * \theta_g}$$

$$\delta_{ap} = \frac{\delta_a * \theta_v}{\theta_g}$$

(ecuación 28)

Como θ_a es la densidad del agua equivalente a 1.0 g/cm³ tenemos

$$\delta_{ap} = \frac{\theta_v}{\theta_g}$$

$$\theta_v = \delta_{ap} * \theta_g$$

(ecuación 29)

Donde:

- θ_v = humedad volumétrica (% o proporción)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³ o kg/l o ton/m³)
- θ_g = humedad gravimétrica (% o proporción)

COLUMNA O ALTURA DE AGUA EN EL SUELO

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t}$$

$$\theta_v = \frac{\text{área} * h_a}{\text{área} * \text{prof}}$$

$$h_a = \theta_v * \text{prof} \quad (\text{ecuación 30})$$

Sustituyendo la ecuación 29 en la ecuación 30.

$$h_a = \delta_{ap} * \theta_g * \text{prof} \quad (\text{ecuación 31})$$

Donde:

- h_a = altura de agua en el suelo (cm)
- θ_v = humedad volumétrica del suelo (proporción)
- prof = profundidad en el suelo (cm)
- δ_{ap} = densidad aparente

En porcentaje:

$$h_a = \frac{\theta_v * \text{prof}}{100}$$

(ecuación 32)

Sustituyendo la ecuación 29 en la ecuación 32

$$h_a = \frac{\delta_{ap} * g * \text{prof}}{100}$$

(ecuación 33)

Donde:

- h_a = altura de agua en el suelo (cm)
- θ_v = humedad volumétrica del suelo (%)

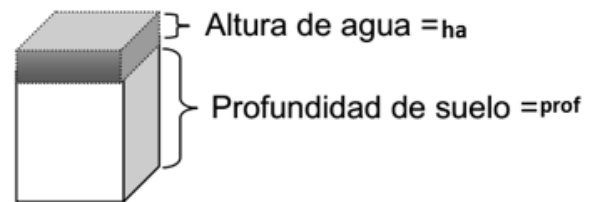


FIGURA 36: RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA Y LA ALTURA DE AGUA EN EL SUELO

DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO

Capacidad de campo

La capacidad de campo se puede estimar:

- Por medidas de la variación de humedad del suelo en el campo cada seis u ocho horas encontrando que en el momento en que es casi constante la pérdida de agua por el paso del drenaje rápido al drenaje lento (despreciable) se considera la humedad de capacidad de campo:
- Uso de ollas de presión con presiones de 1/10 (arenosos) a 1/3 (francos) atm
- Conociendo los porcentajes de arena, limo, arcilla y materia orgánica, (figura 27) ecuaciones generales
- $ccg (1/3 \text{ atm}) = 0.6382 * \% \text{arcilla} + 0.2845 * \% \text{limo} + 0.0507 * \% \text{arena}$ (ecuación 34)
- $ccg (1/3 \text{ atm}) = 0.555 * \% \text{arcilla} + 0.187 * \% \text{limo} + 0.027 * \% \text{arena}$ (ecuación 35)
- $ccg (1/3 \text{ atm}) = 0.61 * \% \text{arcilla} + 0.25 * \% \text{limo} + 0.023 * \% \text{arena}$ (ecuación 36)
- $ccg (1/3 \text{ atm}) = 15.691 + 0.566 * \% \text{arcilla} + 0.092 * \% \text{limo} + 1.787 * \% \text{materia orgánica}$ 8.412 δ
ap (ecuación 37)
- $ccv (1/3 \text{ atm}) = 0.2576 - 0.002 \% \text{arena} + 0.0036 * \% \text{arcilla} + 0.0299 * \% \text{materia orgánica}$
(ecuación 38)
- $ccv (1/10 \text{ atm}) = 0.4118 - 0.003 \% \text{arena} + 0.0023 * \% \text{arcilla} + 0.0317 * \% \text{materia orgánica}$
(ecuación 39)

Ecuación específica para suelos arenosos

- $ccg = 8.658 + 2.571 * \% \text{materia orgánica} + 0.296 * \% \text{limo}$ (ecuación 40)

Conocimiento del punto de marchitez permanente:

- $ccg = 2.0421 * pmp - 2.3823$ (ecuación 41)
- $ccg = 1.3514 * pmp + 6.7567$ (ecuación 42)
- pmp = punto de marchitez permanente (porcentaje en peso de agua)

Conocimiento del punto de saturación (ps):

- $ccg = (ps / 1.84) - 0.48$ (ecuación 43)

Donde:

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

- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm^3)
- ps = punto de saturación (porcentaje en peso de agua)

PUNTO DE MARCHITES PERMANENTE (PMP)

El punto de marchitez permanente se puede estimar

- por medio de medidas de campo utilizando plantas
- ollas de presión
- conociendo el punto de capacidad de campo

$$pmpg (15 \text{ atm}) = 0.4897 * cc + 1.1666$$

(ecuación 44)

con cc en porcentaje

$$pmp (15 \text{ atm}) = \frac{cc}{1.85}$$

(ecuación 45)

esta ecuación 45 sirve para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar.

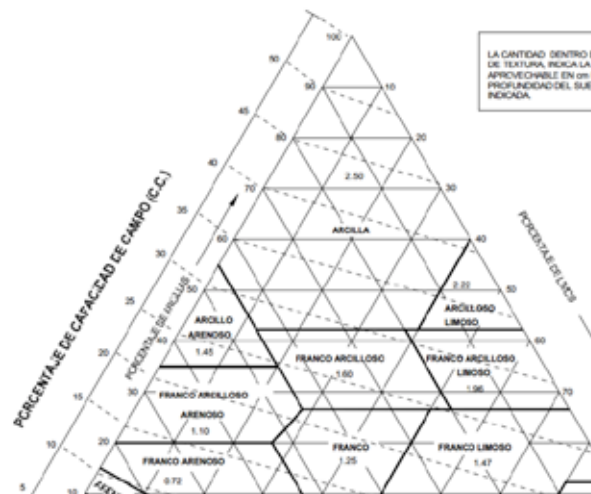


FIGURA 37: DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CAMPO POR MEDIO DE LA TEXTURA

- $pmpg (15 \text{ atm}) = 0,74 * cc - 5$ (ecuación 46)
- suelos arcillosos $pmp (15 \text{ atm}) = \frac{cc}{2.0}$ (ecuación 47)

suelos medios $pmp (15 \text{ atm}) = \frac{cc}{2.1}$ (ecuación 48)

suelos livianos $pmp (15 \text{ atm}) = \frac{cc}{2.2}$ (ecuación 49)

Estas ecuaciones 47, 48 y 49 sirven para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar

- conociendo los % de arena, limo, arcilla, materia orgánica y densidad aparente.

$$\text{pmpg (15 atm)} = 0.57 * \% \text{arcilla} + 0.12 * \% \text{limo} + 0.001 * \% \text{arena} \quad (\text{ecuación 50})$$

$$\text{pmpg(15 atm)} = 5.387 + 0,469 * \% \text{arcilla} + 0,02 * \% \text{limo} + 0,6909 * \% \text{materia orgánica} \quad (\text{ecuación 51}).$$

$$\text{pmpv (15 atm)} = 0.026 + 0.005 * \% \text{arcilla} + 0.0158 * \% \text{ materia orgánica} \quad (\text{ecuación 52})$$

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)
- pmpv = punto de marchitez permanente volumétrico (porcentaje en volumen de agua)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)

HUMEDAD APROVECHABLE O AGUA ÚTIL (θ_{AP} O AU)

$$\text{aug} = \theta_{apg} = \text{ccg} - \text{pmpg} \quad (\text{ecuación 53})$$

$$\text{auv} = \theta_{apv} = \text{ccv} - \text{pmpv} \quad (\text{ecuación 54})$$

Donde:

- au = agua útil (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- θ_{ap} = humedad aprovechable (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- pmp = punto de marchitez permanente (g = % gravimétrico o v = %volumétrico).

ALTURA O LÁMINA DE AGUA APROVECHABLE = ALTURA O LÁMINA DE AGUA ÚTIL O (HAA O HAU).

De la ecuación 29 y la 53 sustituimos θ_v por auv y dividimos entre 100 debido a que se encuentra en porcentaje (%)

$$\text{hau} = \frac{\text{auv} * \text{prof}}{100} \quad (\text{ecuación 55})$$

Sustituyendo la ecuación 54 en la ecuación 55

$$\text{hau} = \frac{(\text{ccv} - \text{pmpv}) * \text{prof}}{100} \quad (\text{ecuación 56})$$

Sustituyendo la ecuación 28 en la ecuación 55

$$\text{hau} = \frac{(\text{ccg} * \delta_{ap} - \text{pmpg} * \delta_{ap}) * \text{prof}}{100} \quad (\text{ecuación 57})$$

$$\text{hau} = \frac{(\text{ccg} - \text{pmpg}) * \delta_{ap} * \text{prof}}{100} \quad (\text{ecuación 58})$$

Donde:

- θ_v = humedad volumétrica (%)
- a_{uv} = agua útil volumétrica (%)
- h_{au} = altura de agua útil (cm)
- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- pmp = punto de marchitez permanente (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- $prof$ = profundidad en el suelo (cm)

La ecuación 58 es utilizada para encontrar la lámina de riego bruta (Lrb)

Si la cc y el pmp se encuentran en proporción las ecuaciones 56, 57 y 58 quedan de la siguiente manera:

$$h_{au} = (ccv - pmpv) * prof \quad \text{(ecuación 59)}$$

$$h_{au} = (ccg * \delta_{ap} - pmpg * \delta_{ap}) * prof \quad \text{(ecuación 60)}$$

$$h_{au} = (ccg - pmpg) * \delta_{ap} * prof \quad \text{(ecuación 61)}$$

Donde:

- h_{au} = altura de agua útil (cm)
- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- pmp = punto de marchitez permanente (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- $prof$ = profundidad en el suelo (cm).

UMBRAL DE RIEGO (UR) O MÁXIMO AGOTAMIENTO DE AGUA (MAA O AGUA FÁCILMENTE DISPONIBLE (AFD) EN EL SUELOS PARA LAS PLANTAS

Se considera que para suelos medios cerca de un tercio de la humedad aprovechable es fácilmente disponible. A medida que se va secando el suelo es más difícil para las plantas extraer agua por la que comúnmente se riega antes que el contenido de agua llegue a pmp , de esta forma, se fija un umbral de riego que es un porcentaje de la humedad aprovechable que viene a ser el máximo agotamiento de agua en el suelo permisible que se puede consumir por la evapotranspiración antes de que se riegue de nuevo.

El umbral de riego depende fundamentalmente de dos factores que son el suelo y la planta. Si la planta no es tolerante al déficit hídrico y es exigente en necesidades hídricas normalmente se tienen porcentajes de umbrales de riego bajos y viceversa. Se puede tomar un umbral de riego aceptable como el siguiente (recordando que depende de la planta y el suelo, y puede ser modificado para casos exigentes en disminuirlo o por el contrario aumentarlo por alguna razón dada):

$$urg = maag = afdg = \frac{ccg - pmpg}{3} = \frac{aug}{3}$$

(ecuación 62)

urg = maag = afdg = 33,3333 % de agotamiento máximo del agua útil gravimétrico

(ecuación 63)

$$urv = \delta_{apv} = \frac{ccv - pmpv}{3} = \frac{auv}{3}$$

(ecuación 64)

urv = maav = afdv = 33,3333 % de agotamiento máximo del agua útil volumétrico

(ecuación 65)

Donde:

- ur = umbral de riego (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{apv} = humedad de agua aprovechable volumétrica (%)
- maa = máximo agotamiento de agua permisible en el suelo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- afd = agua fácilmente disponible (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- au = agua útil (g = % gravimétrico o v = %volumétrico).

UMBRAL DE RIEGO (UR) O MÁXIMO AGOTAMIENTO DE AGUA (MAA) O AGUA FÁCILMENTE DISPONIBLE (AFD) EN EL SUELOS PARA LAS PLANTAS EXPRESADO COMO UNA LÁMINA DE RIEGO

Utilizando las ecuaciones 56, 57 y 58 junto con la definición del umbral de riego:

$$hafd = \frac{(ccv - pmpv)}{100} * prof * ur \quad (ecuación 66)$$

$$hafd = \frac{(ccg * \delta_{ap} - pmpg * \delta_{ap})}{100} * prof * ur \quad (ecuación 67)$$

$$hafd = \frac{(ccg - pmpg)}{100} * \delta_{ap} * prof * ur \quad (ecuación 68)$$

Donde:

hafd = altura de agua fácilmente disponible (cm)

- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- pmp = punto de marchitez permanente (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- prof = profundidad en el suelo (cm)
- ur = umbral de riego (proporción o decimal)

Si la cc y el pmp se encuentran en proporción las ecuaciones 66, 67 y 68 quedan de la siguiente manera

$$hau = (ccv - pmpv) * prof * ur \quad (ecuación 69)$$

$$hau = (ccg * \delta_{ap} - pmpg * \delta_{ap}) * prof * ur \quad (ecuación 70)$$

$$hau = (ccg - pmpg) * \delta_{ap} * prof * ur \quad (ecuación 71)$$

Donde:

- hau = altura de agua útil (cm)
- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- pmp = punto de marchitez permanente (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- prof = profundidad en el suelo (cm)
- ur = umbral de riego (proporción o decimal)

AGUA DIFÍCILMENTE DISPONIBLE O AGUA DE RESPALDO (ADD O AR) EN EL SUELO PARA LAS PLANTAS

$$addg = arg = \frac{2 * aug}{3} \quad (ecuación 72)$$

$$addg = arg = 66,6666 \% \quad (ecuación 73)$$

$$addg = arg = aug - urg \quad (ecuación 74)$$

$$addv = arv = \frac{2 * auv}{3} \quad (ecuación 75)$$

$$addv = arv = 66,6666 \% \quad (ecuación 76)$$

$$addv = arv = auv - urv \quad (ecuación 77)$$

Donde:

- add = agua difícilmente disponible en el suelo para las plantas (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- ar = agua de respaldo en el suelo para las plantas (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- au = agua útil (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- ur = umbral de riego (g = % gravimétrico o v = %volumétrico).

CANTIDAD DE HUMEDAD PARA LLEVAR AL SUELO DESDE UN PUNTO D HUMEDAD HASTA CAPACIDAD DE CAMPO

$$\theta_{(cc-ph)g} = ccg - \theta_{dphg}$$

(ecuación 78)

$$\theta_{(cc-ph)v} = ccv - \theta_{dphv}$$

(ecuación 79)

Si el punto de humedad es el umbral de riego

$$\theta_{(cc-ur)g} = ccg - \theta_{durg}$$

(ecuación 80)

$$\theta_{(cc-ur)v} = ccv - \theta_{durv}$$

(ecuación 81)

Donde:

- $\theta_{(cc-ph)}$ = cantidad de humedad necesaria para llevar el suelo desde un punto de humedad hasta capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción)
- $\theta_{(cc-ur)}$ = cantidad de humedad necesaria para llevar el suelo desde un umbral de riego hasta capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción)
- ph = punto de humedad (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción)
- cc = a capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción)
- θ_{dph} = humedad disponible en un punto de humedad dada (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción)
- θ_{dur} = humedad disponible al punto del umbral de riego (g = % gravimétrico o v = %volumétrico o en proporción).

ALTURA DE AGUA PARA LLEVAR AL SUELO DESDE UN PUNTO DE HUMEDAD HASTA CAPACIDAD DE CAMPO

Sustituyendo las ecuaciones 79 y 78 en las ecuaciones 56 y 58 respectivamente

$$ha_{(cc-ph)v} = \frac{(ccv - \theta_{dphv})}{100} * prof \quad (ecuación 82)$$

$$ha_{(cc-ph)g} = \frac{(ccg - \theta_{dphg})}{100} * \delta_{ap} * prof \quad (ecuación 83)$$

Si el punto de humedad es el umbral de riego:T

$$ha_{(cc-ur)v} = \frac{(ccv - \theta_{durv})}{100} * prof \quad (ecuación 84)$$

$$ha_{(cc-ur)g} = \frac{(ccg - \theta_{durg})}{100} * \delta_{ap} * prof \quad (ecuación 85)$$

En proporción:

$$ha(cc-ph)v = (ccv - \theta_{dphv}) * prof \quad (ecuación 86)$$

$$ha(cc-ph)g = (ccg - \theta_{dphg}) * \delta_{ap} * prof \quad (ecuación 87)$$

si el punto de humedad es el umbral de riego

$$ha(cc-ur)v = (ccv - \theta_{durv}) * prof \quad (ecuación 88)$$

$$ha(cc-ur)g = (ccg - \theta_{durg}) * \delta_{ap} * prof \quad (ecuación 89)$$

Donde:

- $ha(cc-ph)v$ = altura de agua necesaria para llevar desde un punto de humedad volumétrica cualquiera hasta capacidad de campo (cm)
- $ha(cc-ph)g$ = altura de agua necesaria para llevar desde un punto de humedad gravimétrica cualquiera hasta capacidad de campo (cm)
- cc = capacidad de campo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- θ_{dph} = humedad disponible de un punto de humedad en que se encuentra el suelo (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- θ_{dur} = humedad disponible desde un umbral de riego (g = % gravimétrico o v = %volumétrico)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³).

POROSIDAD DEL SUELO TOTAL

En proporción:

$$E = \frac{v_p}{v_t} \quad (ecuación 90)$$

Sustituyendo la ecuación 17 en la ecuación 90

$$E = \frac{v_t - v_s}{v_t}$$

$$E = 1 - \frac{v_s}{v_t}$$

$$E = 1 - \frac{v_s * m_s}{v_t * m_s}$$

$$E = 1 - \frac{\frac{m_s}{v_t}}{\frac{m_s}{v_s}}$$

$$E = \frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r}$$

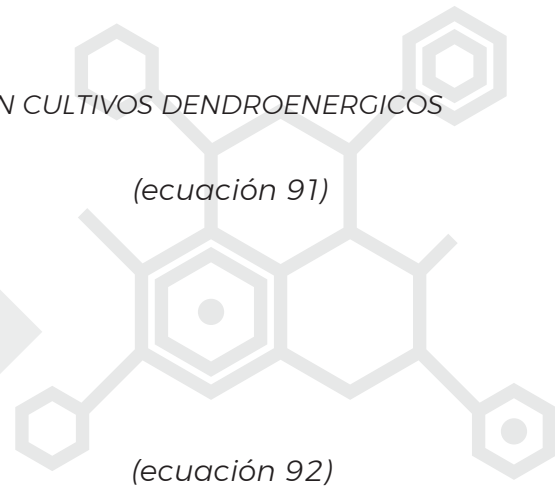
En porcentaje:

$$E = \frac{vp}{vt} * 100$$

$$E = \left(\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

Donde:

- E = porosidad (en proporción o en porcentaje)
- Vp = volumen de poros (en proporción o en porcentaje)
- Vt = volumen total (en proporción o en porcentaje)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- δ_r = densidad real (g/cm³).



ALTURA DE AGUA O LÁMINA DE AGUA NECESARIA PARA LLEVAR A SATURACIÓN UN SUELO

Es la cantidad de agua que se necesita en un suelo para llevarlo a saturación desde cualquier punto de humedad que existe en el suelo

$$H_{sat} = (\%E - \theta_{ve}) * prof. \quad (ecuación 93)$$

Sustituyendo la ecuación 29 en la ecuación 93

$$H_{sat} = (\%E - (\theta_{ge} * \delta_{ap})) * prof. \quad (ecuación 94)$$

Donde:

- H_{sat} = altura de agua o lámina de agua necesaria para saturar el suelo desde una humedad dada a una profundidad específica (cm)
- E = porosidad del suelo total (% volumétrico)
- θ_{ve} = humedad volumétrica existente en el suelo (%)
- θ_{ge} = humedad gravimétrica existente en el suelo (%)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)
- prof = profundidad del suelo (cm)
- $\%E - \theta_{ve}$ = espacio lleno de aire (que puede ser lleno de agua para saturarse)

Debido a la propiedad física específica del suelo llamada infiltración de agua, no se logra saturar el suelo a dicha profundidad al aplicarle la altura de agua calculada principalmente en los horizontes superficiales del suelo debido a que el agua continua infiltrando hacia las capas inferiores, a excepción de suelos arcillosos pesados con arcillas expandibles que impiden la infiltración o en su defecto la disminuyen casi a cero; o a capas con muy baja o casi cero capacidad de infiltración como capas compactadas.

POROSIDAD OCUPADA POR EL AIRE

Utilizando la definición de los elementos de la figura 35

En proporción:

$$E_{ai} = \frac{(v_p - v_a)}{v_t} \quad (\text{ecuación 95})$$

Donde:

- E_{ai} = poros llenos de aire ($\text{cm}^3 / \text{cm}^3$ proporción volumétrica)
- v_p = volumen de poros (proporción)
- v_a = volumen de agua (proporción)
- v_t = volumen total (proporción)
- en porcentaje

$$E_{ai} = \frac{(v_p - v_a)}{v_t} * 100 \quad (\text{ecuación 96})$$

E_{ai} = poros llenos de aire (% volumétrica)

- v_p = volumen de poros (cm^3)
- v_a = volumen de agua (cm^3)
- v_t = volumen total (cm^3)

Deducción de ecuaciones en unidades de proporción como:

$$E = \frac{v_p}{v_t} \rightarrow v_p = E * v_t \text{ en proporción} \quad (\text{ecuación 97})$$

Sustituyendo la ecuación 97 en la ecuación 95

$$E_{ai} = \frac{(E * v_t - v_a)}{v_t}$$

$$E_{ai} * v_t = E * v_t - v_a$$

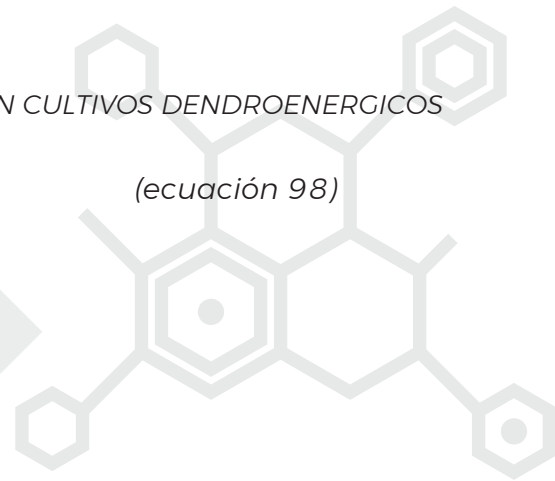
$$E_{ai} * v_t - E * v_t = - v_a$$

$$v_a = E * v_t - E_{ai} * v_t$$

$$v_a = v_t * (E - E_{ai})$$

Donde:

- v_a = volumen del agua (cm³)
- v_t = volumen total (cm³)
- E = porosidad total (cm³ / cm³ proporción volumétrica)
- E_{ai} = porosidad del aire (cm³ / cm³ proporción volumétrica)



(ecuación 98)

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} \rightarrow v_a = \theta_v * v_t$$

(ecuación 99)

Sustituyendo la ecuación 99 en la ecuación 98

$$v_a = v_t * (E - E_{ai})$$

$$\theta_v * v_t = v_t * (E - E_{ai})$$

$$\theta_v = (E - E_{ai})$$

(ecuación 100)

$$E_a = \theta_v = (E - E_{ai})$$

(ecuación 101)

Donde:

- θ_v = humedad volumétrica (cm³ / cm³ proporción volumétrica)
- E_a = porosidad ocupada por el agua (cm³ / cm³ proporción volumétrica)
- E = porosidad total (cm³ / cm³ proporción volumétrica)
- E_{ai} = porosidad del aire (cm³ / cm³ proporción volumétrica)

En porcentaje:

Como:

$$E = \frac{v_p * 100}{v_t} \quad v_p = \frac{E * v_t}{100}$$

(ecuación 102)

$$E_{ai} = \frac{(v_p - v_a) * 100}{v_t}$$

$$E_{ai} = \left(\frac{v_p - v_a}{v_t} \right) * 100$$

(ecuación 103)

Donde:

- E = porosidad total (% volumétrica)
- $\overline{E_{ai}}$ = poros llenos de aire (% volumétrica)

- v_p = volumen de poros (cm^3)
- v_a = volumen de agua (cm^3)
- v_t = volumen total (cm^3)

Sustituyendo la ecuación 102 en la ecuación 103

$$E_{ai} = \left(\frac{E \cdot v_t}{100 \cdot v_t} - \frac{v_a}{v_t} \right) \cdot 100$$

$$E_{ai} = \left(\frac{E}{100} - \frac{v_a}{v_t} \right) \cdot 100$$

$$E_{ai} = E - \frac{v_a \cdot 100}{v_t}$$

$$E_{ai} - E = - \frac{v_a \cdot 100}{v_t}$$

$$v_t \cdot (E_{ai} - E) = - v_a \cdot 100$$

$$v_a = \frac{v_t \cdot (E - E_{ai})}{100} \quad (\text{ecuación 104})$$

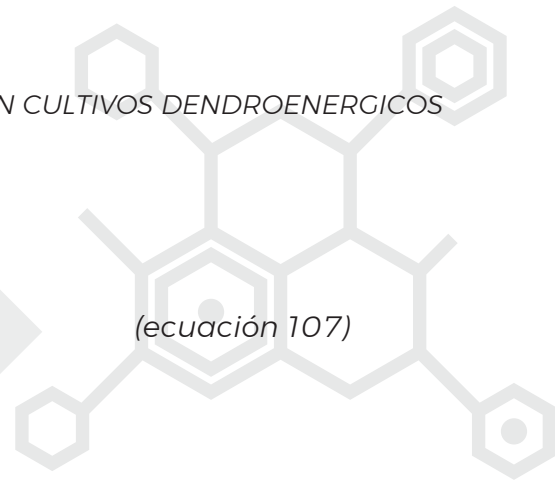
$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} \cdot 100 \rightarrow v_a = \frac{\theta_v \cdot v_t}{100} \quad (\text{ecuación 105})$$

$$\frac{\theta_v \cdot v_t}{100} = \frac{v_t \cdot (E - E_{ai})}{100}$$

$$\theta_v = (E - E_{ai}) \quad (\text{ecuación 106})$$

Donde:

- se observa que la ecuación 101 es igual a la ecuación 106
- θ_v = humedad volumétrica (% volumétrica)
- E = porosidad total (% volumétrica)
- E_{ai} = poros llenos de aire (% volumétrica)
- v_p = volumen de poros (cm^3)
- v_a = volumen de agua (cm^3)
- v_t = volumen total (cm^3).



(ecuación 107)

(ecuación 108)

SATURACIÓN DE AGUA DEL ESPACIO POROSO

En proporción:

$$SE = \frac{v_a}{v_p}$$

En porcentaje:

$$SE = \frac{v_a}{v_p} * 100$$

Donde:

- SE = saturación del espacio poroso (cm³ / cm³ proporción volumétrica o en porcentaje volumétrica)
- v_a = volumen de agua (cm³)
- v_p = volumen de poros (cm³)

En proporción tenemos

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} \rightarrow v_a = v_t * \theta_v$$

(ecuación 109)

$$E = \frac{v_p}{v_t} \rightarrow v_p = E * v_t$$

(ecuación 110)

Sustituyendo las ecuaciones 109 y 110 en la ecuación 107

$$SE = \frac{v_a}{v_p}$$

$$SE = \frac{v_t * \theta_v}{E * v_t}$$

$$SE = \frac{\theta_v}{E}$$

(ecuación 111)

en porcentaje tenemos

$$\theta_v = \frac{v_a}{v_t} * 100 \rightarrow v_a = v_t * \frac{\theta_v}{100}$$

(ecuación 112)

$$E = \frac{v_p}{v_t} * 100 \rightarrow v_p = \frac{E * v_t}{100}$$

(ecuación 113)

sustituyendo las ecuaciones 112 y 113 en la ecuación 107

$$SE = \frac{v_a}{v_p}$$

$$SE = \frac{\frac{vt * \theta_v}{100}}{\frac{E * vt}{100}}$$

$$SE = \frac{vt * \theta_v * 100}{E * vt * 100}$$

$$SE = \frac{\theta_v}{E}$$

(ecuación 114)

Donde se observa que las ecuaciones 111 y 113 son iguales

En proporción

Utilizando las ecuaciones 29, 91 y 114:

$$\theta_v = \theta_g * \delta_{ap}$$

$$E = \frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r}$$

$$SE = \frac{\theta_v}{E}$$

Sustituyendo las ecuaciones 29 y 91 en la ecuación 114

$$SE = \frac{\theta_g * \delta_{ap}}{\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r}}$$

$$SE = \frac{\theta_g * \delta_{ap}}{\frac{\delta_r - \delta_{ap}}{\delta_r}}$$

$$SE = \frac{\theta_g * \delta_{ap}}{\frac{1}{\delta_r - \delta_{ap}}}$$

$$SE = \frac{\delta_r * \theta_g * \delta_{ap}}{\delta_r - \delta_{ap}}$$

(ecuación 115)

Donde:

- SE = saturación de agua del espacio poroso (% volumétrica)
- δ_r = densidad real (2.65 g/cm³)
- θ_g = humedad gravimétrica (proporción)
- δ_{ap} = densidad aparente (g/cm³)

RELACIÓN DE POROS

En proporción:

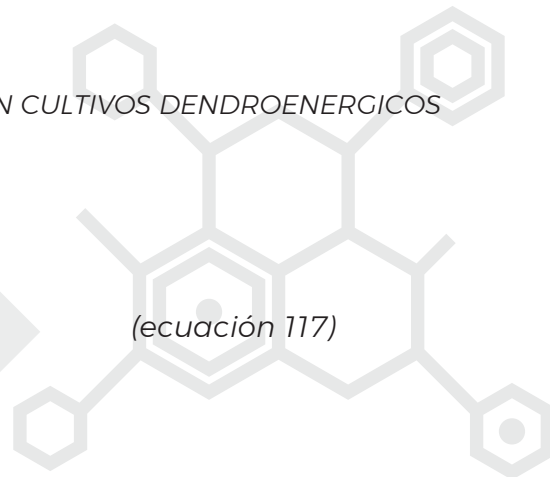
$$e = \frac{vp}{vs}$$

En proporción:

$$e = \frac{vp * 100}{vs}$$

Donde:

- vp = volumen de poros (cm^3)
- vs = volumen del suelo (cm^3)



(ecuación 118)



*Ciencia sin
conciencia no es más
que ruina del alma.*

François Rabelais (1494-1553)



PRACTICA DE CONTENIDO DE HUMEDAD EN EL SUELO.

1.-Una muestra de suelo con 40% de porosidad tiene un volumen total de 120 cm³ y un contenido de humedad de 0.3 cm³/cm³. Si la densidad de la fase sólida es de 2.5 g/cm³. ¿Cuál es la densidad aparente?

Procedimiento 1

De la ecuación 90:

$$E = \frac{v_p}{V_t} * 100$$

$$v_p = \frac{E * v_t}{100}$$

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

$$v_p = 48 \text{ cm}^3$$

De la ecuación 17

$$v_t = v_s + v_p$$

$$v_s = v_t - v_p$$

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

$$v_s = 72 \text{ cm}^3$$

De la ecuación 19

$$\bar{\rho}_r = \frac{p_s}{v_s}$$

$$p_s = \bar{\rho}_r * v_s$$

$$p_s = 2.5 \text{ (g/cm}^3) * 72 \text{ cm}^3$$

$$p_s = 180 \text{ g.}$$

De la ecuación 20

$$\bar{\rho}_{ap} = \frac{p_s}{v_t}$$

$$\bar{\rho}_{ap} = \frac{180 \text{ g}}{120 \text{ cm}^3}$$

$$\bar{\rho}_{ap} = 1.5 \text{ g/cm}^3$$

Procedimiento 2

Utilizando la ecuación 92:

$$E = \frac{(1 - \bar{\rho}_{ap}) * 100}{\bar{\rho}_r}$$

$$E = 40 \%$$

$$40 = \frac{(1 - \bar{\rho}_{ap}) * 100}{\bar{\rho}_r}$$

$$\frac{(1 - \bar{\rho}_{ap})}{\bar{\rho}_r} = \frac{40}{100}$$

$$\frac{\bar{\rho}_{ap}}{\bar{\rho}_r} = 0.40 - 1$$

$$\frac{\bar{\rho}_{ap}}{\bar{\rho}_r} = -0.60$$

$$\bar{\rho}_{ap} = 0.60 * \bar{\rho}_r$$

$$\bar{\rho}_{ap} = 0.6 * 2.5$$

$$\bar{\rho}_{ap} = 1.5 \text{ g/cm}^3$$

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

Mediante la ecuación 21:

$$\Theta_g = \frac{m_a}{m_s}$$

$$\Theta_g = 0,15 \text{ g/g}$$

$$\frac{m_a}{m_s} = 0,15 \text{ g/g}$$

$$m_a = 0,15 \text{ g/g} * m_s$$

$$m_a = 0,15 \text{ g/g} * 200 \text{ g}$$

$$m_a = 30 \text{ g}$$

Calculando el suelo húmedo (sh) tenemos:

$$sh = 200 \text{ g} + 30 \text{ g}$$

$$sh = 230 \text{ g}$$

Procedimiento 2

Mediante la ecuación 24:

$$\Theta_g = \frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} \quad \begin{matrix} \text{(g de agua)} \\ \text{(g de suelo)} \end{matrix}$$

$$\Theta_g = 0,15 \text{ g/g}$$

$$\frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} = 0,15 \text{ g/g}$$

$$p_{sh} - p_{ss} = 0,15 * p_{ss}$$

$$p_{sh} = p_{ss} + 0,15 * p_{ss}$$

$$p_{sh} = 1,15 p_{ss}$$

$$p_{sh} = 1,15 * 200$$

$$p_{sh} = 230 \text{ g}$$

Procedimiento 3

Mediante regla de 3

$$0,15 \text{ g a} : 1 \text{ g s} :: x \text{ g a} : 200 \text{ g s}$$

$$0,15 \text{ g a} * 200 \text{ g s} = 1 \text{ g s} * x \text{ g s}$$

$$30 \text{ g a} = x \text{ g s}$$

$$\text{Peso de suelo húmedo} = 200 \text{ g s} + 30 \text{ g a}$$

$$\text{Peso de suelo húmedo} = 230 \text{ g}$$

Procedimiento 4

Mediante razonamiento

$$\text{Si } \frac{0,15 \text{ g agua}}{1 \text{ g suelo}}$$

Entonces:

$$\frac{0,15 \text{ g agua}}{1 \text{ g suelo}} * \frac{100}{100} = \frac{15 \text{ g agua}}{100 \text{ g suelo}}$$

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

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

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

Procedimiento 4 = 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:

$$p_a = 230 \text{ g} * \frac{0,15 \text{ g de agua}}{1 \text{ g de suelo}}$$



pa = 34.5 g de agua

Al realizar la resta da:

pss = 230 g - 34,5 g

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:

psh = 1.15 pss

$$pss = \frac{psh}{1.15}$$

$$Pss = \frac{230 \text{ g}}{1.15}$$

Pss = 200 g de suelo, lo cual es correcto .

3. Un suelo tiene una porosidad de 0.45 cm³/cm³. Si el contenido de humedad del suelo es de 0,20 g/g y la densidad de partículas promedio es de 2.6 g/cm³. Calcule los centímetros de agua en una profundidad de 30 cm de suelo.

$$E = \frac{0.45 \text{ cm}^3}{\text{cm}^3}$$

$$E = \frac{0.45 \text{ cm}^3}{\text{cm}^3} * \frac{100}{100}$$

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

Utilizando la ecuación 92

$$E = \left(\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

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

$$\frac{45}{100} = \frac{1 - \delta_{ap}}{2,6}$$

$$0.45 - 1 = \frac{-\delta_{ap}}{2,6}$$

$$0.55 * 2.6 = -\delta_{ap}$$

$$0.55 * 2.6 = \delta_{ap}$$

$$\delta_{ap} = 1.43 \text{ g/cm}^3$$

Utilizando la ecuación 29

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_v = 1.43 * 0,20$$

$$\Theta_v = 0.286$$

Utilizando la ecuación 30

- ha = $\Theta_v * \text{prof}$
- ha = $\Theta_v * \text{prof}$
- ha = 0.286 * 30 cm
- ha = ha = $\Theta_v * \text{prof}$
- ha = 0.286 * 30 cm
- had = 8,58 cmca
- v * prof
- ha = 0,286 * 30 cm
- had = 8,58 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 g/cm^3

Procedimiento 1

Utilizando la ecuación 92:

$$E = \left(1 - \frac{\delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

$$50 = \left(1 - \frac{\delta_{ap}}{2.6} \right) * 100$$

$$\frac{50}{100} = 1 - \frac{\delta_{ap}}{2.6}$$

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

$$- 0,50 * 2.6 = - \delta_{ap}$$

$$0,50 * 2.6 = \delta_{ap}$$

$$\delta_{ap} = 1.30 \text{ g/cm}^3$$

Utilizando la ecuación 29:

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_{ccg} = \frac{\Theta_{vcc}}{\delta_{ap}}$$

$$\Theta_{ccg} = \frac{0.40}{1.30}$$

$$\Theta_{ccg} = 0.3077 \text{ g/g}$$

Utilizando la ecuación 45:

$pmpg (15 \text{ atm}) = ccg / 1,85$ esta ecuación 45 sirve para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar

$$pmpg = 0.3077 \text{ (g/g)} / 1,85$$

$$pmp = 0.1663 \text{ (g/g)}$$

Utilizando la ecuación 61 (está dada en proporción):

$$hau = (ccg - pmpg) * \delta_{ap} * prof$$

$$hau = (0.3077 - 0,1663) * 1.30 * 80$$

$$hau = 14.70$$

Procedimiento 2:

Utilizando la ecuación 44:

$$pmpg = 0.4897 * cc + 1.1666 \quad \text{con cc en \%}$$

$$pmpg = 0.4897 * (0.3077 * 100) + 1.1666$$

$$pmpg = 16.23 \%$$

$$pmpg = 16.23 / 100$$

$$pmpg = 0.1623$$

Utilizando la ecuación 61 (está dada en proporción):

$$hau = (ccg - pmpg) * \delta_{ap} * prof$$

$$hau = (0,3077 - 0.1623) * 1.30 * 80$$

$$hau = 15.12 \text{ cm}$$

Procedimiento 3:

Utilizando la ecuación 45:

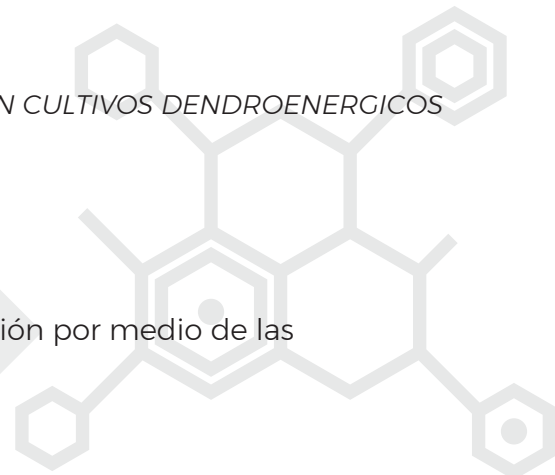
$pmp (15 \text{ atm}) = cc / 1,85$ esta ecuación 45 sirve para datos gravimétricos y volumétricos por ser un escalar

$$pmp = (0.4 \text{ cm}^3/\text{cm}^3) / 1.85$$

$$pmp = 0.2162$$

Utilizando la ecuación 59:

$$hau = (ccv - pmpv) * prof$$



$$hau = (0.40 - 0.2162) * 80$$

$$hau = 14.70 \text{ cm}$$

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

5.-Se tiene un suelo en el que un volumen de 1000 cm³ tendría 340 cm³ de agua a cc. La porosidad es de 54%. ¿Qué volumen de agua requiere la capa arable (15 cm de profundidad) por hectárea para quedar a cc si el suelo se encuentra a pmp?

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

Utilizando la ecuación 92:

$$E = \left(\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

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

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

$$0.54 - 1 = \frac{-\delta_{ap}}{2,65}$$

$$-0.46 * 2.65 = -\delta_{ap}$$

$$0.46 * 2.65 = \delta_{ap}$$

$$\delta_{ap} = 1.325 \text{ g/cm}^3$$

Estimando la humedad ccv:

$$ccv = \frac{340 \text{ cm}^3 \text{ de agua a cc}}{1000 \text{ cm}^3}$$

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

$$ccg = \frac{0,34}{1,325}$$

$$ccg = 0,2566$$

utilizando la ecuación 44

$$pmpg = 0.4897 * cc + 1.1666$$

$$pmpg = 0.4897 * (0.2566 * 100) + 1.1666$$

$$pmpg = 13.73 \%$$

$$pmpg = 13.73 \% / 100$$

$$pmpg = 0.1373 \text{ en proporción}$$

Utilizando la ecuación 61 (está dada en proporción):

$$hau = (ccg - pmpg) * \delta_{ap} * \text{prof}$$

$$hau = (0.2566 - 0.1373) * 1.325 * 15$$

$$hau = 2.37 \text{ cm}$$

Para pasarlo a volumen por hectárea:

$$\text{Vol/ha} = 2,37 \text{ cm} * \frac{1.0 \text{ m}}{100 \text{ cm}} * \frac{100 \text{ m} * 100 \text{ m}}{1.0 \text{ ha}}$$

$$\text{Vol/ha} = 237 \text{ m}^3 / \text{ha}$$

6.-Un terrón natural de suelo húmedo tiene un volumen de 150 cm³, un peso húmedo de 240 g y un espacio ocupado por aire de 0.15 cm³/cm³. Si la densidad de partículas es de 2.65 g/cm³. Calcular:

- Densidad aparente en base a peso seco
- Contenido de humedad en base a peso (o gravimétrico)
- Contenido de humedad en base a volumen (o volumétrico)
- Porosidad total

$$\bar{\delta}_a = \frac{p_a}{v_a} \implies v_a = \frac{p_a}{\bar{\delta}_a}$$

Calculando el espacio ocupado por aire:

$$v_{ai} = v_t * \% v_{ai}$$

$$v_a = \frac{p_a}{\bar{\delta}_a} \implies v_a = \frac{p_a}{1}$$

$$v_{ai} = 150 * \text{cm}^3 * 0,15 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} * 100$$

$$v_a = p_a \quad (4)$$

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

Sustituyendo (3) y (4) en (1) tenemos

Calculando el espacio ocupado por agua y por el suelo:

$$0.3774 p_s + p_a = 127.5 \quad (5)$$

De la ecuación 16:

Sustituyendo (2) en (5)

$$v_t = v_s + v_{ai} + v_a$$

$$0.3774 (240 - p_a) + p_a = 127.5$$

$$90.576 - 0.3774 * p_a + p_a = 127.5$$

$$150 = v_s + 22.5 + v_a$$

$$0.6226 * p_a = 127.5 - 90.576$$

$$v_s + v_a = 150 - 22.5$$

$$0.6226 * p_a = 36.924$$

$$v_s + v_a = 127.5 \quad (1)$$

$$p_a = \frac{36.924}{0.6226}$$

$$p_h = p_s + p_a$$

$$p_a = 59.3061 \text{ g} \implies v_a = 59.3061 \text{ cm}^3$$

$$240 = p_s + p_a$$

Sustituyendo en (2) tenemos

$$p_s = 240 - p_a \quad (2)$$

$$p_s = 240 - p_a \quad (2)$$

De la ecuación 19:

$$p_s = 240 - 59.3061$$

$$\bar{\delta}_r = \frac{p_s}{v_s} \implies v_s = \frac{p_s}{\bar{\delta}_r}$$

$$p_s = 181.6939 \text{ g}$$

$$v_s = \frac{p_s}{\bar{\delta}_r} \implies v_s = \frac{p_s}{2,65}$$

Utilizando la ecuación 16

$$v_s = 0.3774 * p_s \quad (3)$$

$$v_t = v_s + v_{ai} + v_a$$

$$v_t = v_s + v_{ai} + v_a$$

Además:

$$v_s = 150 - 22.5 - 59.3061$$

$$v_s = 68.1939$$

Calculando la densidad aparente en base a peso seco según ecuación 20.

$$\delta_{ap} = \frac{p_s}{v_t}$$

$$\delta_{ap} = \frac{181.6939}{150}$$

$$\delta_{ap} = 1.2113 \text{ g / cm}^3$$

Calculando en contenido de humedad en base a peso (o gravimétrico) mediante las ecuaciones 21 y 22.

En proporción:

$$g = \frac{m_a}{m_s} \frac{(\text{g de agua})}{(\text{g de suelo})}$$

$$\Theta_g = \frac{59,3061}{181,6939} \frac{(\text{g de agua})}{(\text{g de suelo})}$$

$$\Theta_g = 0,3264 \text{ g/g}$$

En porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{m_a}{m_s} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{59,3061}{181,6939} \frac{(\text{g de agua})}{(\text{g de suelo})} * 100$$

$$\Theta_g = 32,64 \% (\text{g/g})$$

Calculando el contenido de humedad en base a volumen (o volumétrico)

Utilizando las ecuaciones 26 y 27:

En proporción:

$$\Theta_v = \frac{v_a}{v_t} \frac{(\text{cm}^3 \text{ de agua})}{(\text{cm}^3 \text{ agua} + \text{cm}^3 \text{ aire} + \text{cm}^3 \text{ suelo})}$$

$$\Theta_v = \frac{59,3061 \text{ cm}^3}{150 \text{ cm}^3}$$

$$\Theta_v = 0,3954 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

En porcentaje:

$$\Theta_v = \frac{v_a}{v_t} * 100$$

$$\Theta_v = \frac{59,3061 \text{ cm}^3}{150 \text{ cm}^3} * 100$$

$$\Theta_v = 39,54 \% (\text{cm}^3 / \text{cm}^3)$$

Utilizando la ecuación 29:

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \delta_g$$

En proporción:

$$\Theta_v = 1.2113 \text{ g / cm}^3 * 0,3264 (\text{g/g})$$

$$\Theta_v = 0.3955$$

En porcentaje:

$$\Theta_v = 1.2113 \text{ g / cm}^3 * 32.64 \%$$

$$\Theta_v = 39.55 \% (\text{volumen})$$

Calculando la porosidad total

Procedimiento 1

Utilizando la ecuación 91 y 92 tenemos

En proporción

$$E = 1 - \frac{\delta_{ap}}{\delta_r}$$

$$E = 1 - \frac{1.2113 \text{ g / cm}^3}{2.65 \text{ g/cm}^3}$$

$$E = 1 - 0.4570$$

$$E = 0.5429$$

En porcentaje

$$E = \left(1 - \frac{\delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

$$E = \left(1 - \frac{1.2113 \text{ g/cm}^3}{2.65 \text{ g/cm}^3} \right) * 100$$

$$E = (1 - 0.4570) * 100$$

$$E = 0.5429 * 100$$

$$E = 54.29 \% \text{ (es volumétrico)}$$

Procedimiento 2

utilizando las ecuaciones 18 y 90 tenemos

$$v_p = v_{ai} + v_a$$

$$E = \frac{v_p}{v_t}$$

Sustituyendo la ecuación 18 dentro de la ecuación 90 tenemos:

En proporción

$$E = \frac{v_{ai} + v_a}{v_t}$$

$$E = \frac{22.5 \text{ cm}^3 + 59.3061 \text{ cm}^3}{150 \text{ cm}^3}$$

$$E = 0.5453$$

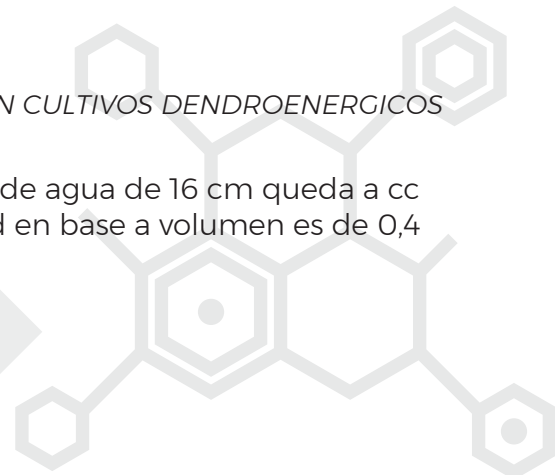
en porcentaje

$$E = \left(\frac{v_{ai} + v_a}{v_t} \right) * 100$$

$$E = \frac{(22.5 \text{ cm}^3 + 59.3061 \text{ cm}^3)}{150 \text{ cm}^3} * 100$$

$$E = 0.5453 * 100$$

$$E = 54.53 \%$$



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 cm³/cm³. Indique:

- Capacidad de campo del 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 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 E = 50%; $\bar{\delta}_r$ (g/cm³) = 2,60

Calculando el pmpv utilizando la ecuación 59

$$hau = (ccv - pmpv) * prof$$

$$\frac{hau}{prof} = (ccv - pmpv)$$

$$\frac{hau - ccv}{prof} = - pmpv$$

$$\frac{16 - 0.4}{80} = - pmpv$$

$$0.2 - 0.4 = - pmpv$$

$$- 0.2 = - pmpv$$

$$pmpv = 0.2 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

Calculando el agua útil

procedimiento 1: volumétrica

Utilizando la ecuación 53:

$$aug = \Theta_{ap}g = cc - pmp$$

$$aug = \Theta_{ap}g = 0.4 - 0.2$$

$$aug = \Theta_{ap}g = 0.2 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

procedimiento 2: gravimétrica

utilizando la ecuación 92

$$E = \frac{(1 - \bar{\delta}_{ap})}{\bar{\delta}_r} * 100$$

$$E = 50 \%$$

$$50 = \frac{(1 - \bar{\delta}_{ap})}{\bar{\delta}_r} * 100$$

$$\frac{(1 - \bar{\delta}_{ap})}{\bar{\delta}_r} = \frac{50}{100}$$

$$\frac{\bar{\delta}_{ap}}{\bar{\delta}_r} = 0.50 - 1$$

$$\frac{\bar{\delta}_{ap}}{\bar{\delta}_r} = -0.50$$

$$\bar{\delta}_{ap} = -0.50 * \bar{\delta}_r$$

$$\bar{\delta}_{ap} = 0.50 * 2.6$$

$$\bar{\delta}_{ap} = 1.3 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Utilizando la ecuación 29

$$\Theta_v = \bar{\delta}_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_g = \frac{\Theta_v}{\bar{\delta}_{ap}}$$

De donde se deduce para capacidad de campo

$$ccg = \frac{ccv}{\bar{\delta}_a}$$

$$ccg = \frac{0.4}{1.3}$$

$$ccg = 0.3 \text{ g} / \text{g}$$

O en términos porcentuales

$$ccg = 0.3 * 100$$

$$ccg = 30 \%$$

para el punto de marchitez permanente

$$pmpg = \frac{pmpv}{\delta_{ap}}$$

$$pmpg = \frac{0.2}{1.3}$$

$$pmpg = 0.15$$

o en términos porcentuales

$$pmpg = 0.15 * 100$$

$$pmpg = 15 \%$$

Calculando el agua útil gravimétrica utilizando la ecuación 53

$$au = ccg - pmpg$$

$$au = 30 - 15$$

$$au = 15 \%$$

De donde se observa que el $au = 15\% = 0.2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ para una densidad aparente de $\delta_{ap} = 1.3 \text{ g/cm}^3$

Procedimiento 3: gravimétrica

Utilizando las ecuaciones 54 y 29 (esta última despejada respectivamente)

$$a_{uv} = \Theta_{apv} = ccv - pmpv$$

$$a_{uv} = \Theta_{apv} = 0.2 \text{ cm}^3 / \text{cm}^3$$

$$\Theta_g = \frac{\Theta_v}{\delta_{ap}}$$

Se deduce que

$$aug = \frac{a_{uv}}{\delta_{ap}}$$

$$aug = \frac{0.2}{1.3}$$

$$aug = 0.15$$

Y en términos porcentuales

$$aug = 0.15 * 100$$

$$aug = 15 \%$$

Luego, continuando con el ejercicio tenemos:

Cálculo de la lámina infiltrada utilizando la ecuación física que define la velocidad

$$\text{velocidad} = \frac{\text{distancia}}{\text{tiempo}}$$

$$\text{distancia} = \text{velocidad} * \text{tiempo}$$

$$h_{ainf} = 0.8 \text{ (cm / h)} * 20 \text{ h}$$

$$h_{ainf} = 16 \text{ cm}$$

Donde h_{ainf} (altura de agua infiltrada) viene a ser h_{ad} (la altura de agua disponible), por lo cual utilizando la ecuación 58

$$h_{au} = \frac{(ccg - pmpg) * \delta_{ap} * \text{prof}}{100}$$

Sustituyendo el $pmpg$ por el contenido de humedad

$$h_{au} = \frac{(30 - 10) * 1.3 * 80}{100}$$

$$h_{au} = 20.8 \text{ cm}$$

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

Utilizando la misma ecuación la ecuación 58

$$h_{au} = \frac{(ccg - pmpg) * \delta_{ap} * \text{prof}}{100}$$

$$\text{prof} = \frac{h_{ad} * 100}{(ccg - pmpg) * \delta_{ap}}$$



$$\text{prof} = \frac{16 * 100}{(30 - 10) * 1.3}$$

$$\text{prof} = 61.54 \text{ cm}$$

por lo que solamente 61.54 cm de 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.
- 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 ccg (40% en base a peso)?
- ¿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:

$$\text{Vol agua} = 350 \text{ g} - 280 \text{ g}$$

Debido a que el agua tiene 1 g / 1 cm³

$$\text{Vol agua} = 350 \text{ cm}^3 - 280 \text{ cm}^3$$

$$\text{Vol agua} = 70 \text{ cm}^3$$

Cálculo de la humedad gravimétrica con la ecuación 25:

En porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{350 - 280}{280} * 100$$

$$\Theta_g = 25 \%$$

Calculando la humedad volumétrica con la ecuación 29:

$$\Theta_v = \bar{\delta}_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_v = 1.3 * 25$$

$$\Theta_v = 32.5 \text{ cm}^3 \text{ de agua} / \text{cm}^3 \text{ de suelo}$$

Calculando la altura de agua mediante la ecuación 30:

$$h_a = \Theta_v * \text{prof}$$

$$h_a = \frac{32.5 * 30}{100}$$

$$h_a = 9.75 \text{ cm}$$

calculando la altura de agua que queda a capacidad de campo

$$\text{agua total} = (9.75 + 1.4) \text{ cm}$$

$$\text{agua total} = 11.15 \text{ cm}$$

Utilizando la ecuación 30

$$ha = \Theta_v * prof$$

$$prof = \frac{hau}{\Theta_{vau}}$$

$$prof = \frac{hau}{\Theta_{gau} * \delta_{ap}}$$

$$prof = \frac{hau}{\Theta_{gau} * \delta_{ap} * 100}$$

$$prof = \frac{11,15}{\frac{40 * 1,3}{100}}$$

$$prof = 21.49 \text{ cm}$$

Cálculo del volumen de agua a agregar mediante la ecuación 25:

En porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{psh - pss}{pss} * 100$$

$$\Theta_g * \frac{pss + pss}{100} = psh$$

$$psh = \frac{\Theta_g * pss + pss}{100}$$

$$psh = \frac{40 * 280 + 280}{100}$$

$$psh = 392 \text{ g}$$

$$\text{Volumen de agua a agregar} = 392 - 350 \text{ g}$$

$$\text{Volumen de agua a agregar} = 392 - 350 \text{ cm}^3$$

$$\text{Volumen de agua a agregar} = 42 \text{ cm}^3$$

Calculando la altura de agua

Como se le añaden 42 cm³ o 42 g de agua

Utilizando la ecuación 32 y la 29:

$$ha = \frac{\Theta_v * prof}{100}$$

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

Sustituyendo la ecuación 29 en la 32 tenemos

$$ha = \frac{\delta_{ap} * g * prof}{100}$$

$$ha = \frac{1,3 * (40 - 25) * 30}{100}$$

$$ha = 5,85 \text{ cm}$$

9.- Con el objetivo de conocer la δ_{ap} 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 g 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:

- Si el ur es de 30% , ¿cuántos gramos de agua habría que agregar a un macetero cilíndrico de 40 cm de alto y 30 cm de diámetro que se llena con este suelo?.
- ¿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

$$v_t = 10 * 10 * 10 \text{ cm} * \text{cm} * \text{cm}$$

$$v_t = 1000 \text{ cm}^3$$

Calculando la densidad aparente mediante la ecuación 20:

$$\delta_{ap} = \frac{p_s}{v_t}$$

$$\delta_{ap} = \frac{1400 \text{ g}}{1000 \text{ cm}^3}$$

$$\delta_{ap} = 1.4 \text{ g} / \text{cm}^3$$

Calculando la humedad gravimétrica saturado con la ecuación 25 en porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{1900 - 1400}{1400} * 100$$

$$\Theta_g = 35.71 \%$$

Calculando la humedad gravimétrica a capacidad de campo con la ecuación 25 en porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{1570 - 1250}{1250} * 100$$

$$\Theta_g = 25.60 \%$$

Calculando la humedad gravimétrica a punto de marchitez permanente con la ecuación 25 en porcentaje:

$$\Theta_g = \frac{p_{sh} - p_{ss}}{p_{ss}} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{1320 - 1175}{1175} * 100$$

$$\Theta_g = 12.34 \%$$

Calculando la ecuación 68 para calcular la altura de agua:

$$h_{afd} = \frac{(ccg - pmpg) * \delta_{ap} * prof * ur}{100}$$

$$h_{afd} = \frac{(25.60 - 12.34) * 1.4 * 40 * 30}{100}$$

$$h_{afd} = 2.2277 \text{ cm}$$

Calculando el volumen de agua para conocer el peso:

$$\text{volumen agua} = h_{afd} * \pi * r^2$$

$$\text{volumen agua} = 2.2277 * 3.141593 * (15)^2$$

$$\text{volumen agua} = 1574.67 \text{ cm}^3$$

$$\text{peso de agua} = 1574.67 \text{ g}$$

Calculando la humedad a capacidad de campo volumétrica con la ecuación 29:

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_{vcc} = \delta_{ap} * \Theta_{gcc}$$

$$\Theta_{vcc} = 1.4 * 25.6$$

$$\Theta_{vcc} = 35.84 \%$$

Calculando el volumen en una hectárea:

$$\text{Vol/ha} = 100 \text{ m} * 100 \text{ m} * 0.80 \text{ m}$$

$$\text{Vol/ha} = 8000 \text{ m}^3$$

$$\text{Volumen de agua} = 8000 \text{ m}^3 * (35.84 \%) / 100$$

$$\text{Volumen de agua} = 2867.20 \text{ m}^3$$

10.- Calcular el volumen de agua en media hectárea de un suelo que tiene un contenido de humedad gravimétrico de un 23% $\delta_{ap} \text{ (g/cm}^3\text{)} = 1.35$ y una profundidad de 75 cm.

Calculando el volumen total de suelo:

$$\text{Vol-agua} = \frac{31.05}{100} * 3750 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol-tot m}^3 = 100 \text{ m} * 100 \text{ m} * 0.75 \text{ m} * 0.5$$

$$\text{Vol-agua} = 1164.37 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol-tot m}^3 = 3750 \text{ m}^3$$

Calculando la humedad volumétrica con la ecuación 29 :

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_v = 1.35 * 23$$

$$\Theta_v = 31.05 \%$$

Calculando el volumen de agua:

$$\text{Vol-agua} = \frac{\Theta_v (\%)}{100} * \text{Vol-tot (m}^3\text{)}$$

11. Se determina que la porosidad de suelo mineral es de un 50%, se sabe que son necesarios 12cm 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 (prof) del perfil?
- suponiendo una densidad real de partículas = 2.65 g/cm³ ¿cuál sería la profundidad (prof) del perfil?

De la ecuación 18:

$$v_p = v_{ai} + v_a$$

$$E = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

Pero al estar saturado tenemos

$$50 = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$v_p = v_a$$

$$32 = \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

Pero el v_a se divide en tres volúmenes como sigue

$$32 = \frac{350 + 1200}{x}$$

$$v_{a1} = v_{a_{0-18\%}}$$

$$32 * x = 1550$$

$$v_{a2} = v_{a_{18\%-cc}}$$

$$x = \frac{1550}{32}$$

$$v_{a3} = v_{acc-SE}$$

$$v_a = v_{a_{0-18\%}} + v_{a_{18\%-cc}} + v_{a_{cc-SE}} \quad (1)$$

$$x = 48,43 \text{ cm}$$

Utilizando la ecuación 32 :

b) Calculando la densidad aparente del suelo mediante la ecuación 92:

$$h_a = \frac{\Theta_v * \text{prof}}{100}$$

$$E = \frac{(1 - \bar{\delta}_{ap}) * 100}{\bar{\delta}_r}$$

Llamando "x" a la profundidad del perfil

$$h_a = \frac{\Theta_v * x}{100}$$

$$E = 50 \%$$

$$\Theta_v = \frac{h_a * 100}{x}$$

$$50 = \frac{(1 - \bar{\delta}_{ap}) * 100}{\bar{\delta}_r}$$

$$\Theta_{v_{0-18\%}} = v_{a_{0-18\%}} = 18\% \quad (2)$$

$$\frac{(1 - \bar{\delta}_{ap})}{\bar{\delta}_r} = \frac{50}{100}$$

$$\Theta_{l_{8\%-cc}} = v_{a_{18\%-cc}} = \frac{3,5 * 100}{x} = \frac{350}{x} \quad (3)$$

$$\frac{\bar{\delta}_{ap}}{\bar{\delta}_r} = 0.50 - 1$$

$$\Theta_{cc-SE} = v_{a_{cc-SE}} = \frac{12 * 100}{x} = \frac{1200}{x} \quad (4)$$

$$\frac{\bar{\delta}_{ap}}{\bar{\delta}_r} = -0,50$$

Sustituyendo 2, 3 y 4 en 1

$$\bar{\delta}_{ap} = -0.50 * \bar{\delta}_r$$

$$v_a = 18 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$\bar{\delta}_{ap} = 0.50 * 2.65$$

$$\delta_{ap} = 1.325 \text{ g / cm}^3$$

Utilizando la ecuación 29 y 32

$$h_a = \frac{\theta_v}{100} * \text{prof}$$

$$\theta_v = \delta_{ap} * \theta_g$$

$$h_a * 100 = \theta_v * \text{prof}$$

$$\theta_v = \frac{h_a * 100}{\text{prof}}$$

$$\theta_v = \frac{h_a * 100}{x}$$

$$\theta_v = \delta_{ap} * \theta_g$$

Sustituyendo tenemos:

$$\delta_{ap} * \theta_g = \frac{h_a * 100}{x}$$

$$\theta_g = \frac{h_a * 100}{\delta_{ap} * x}$$

$$v_a = v_{a_{0-18\%}} + v_{a_{18\%-cc}} + v_{a_{cc-SE}} \quad (1)$$

$$v_a = \theta_g_{0-18\%} * \delta_{ap} + \theta_g_{18\%-cc} * \delta_{ap} + \theta_g_{cc-SE} * \delta_{ap}$$

$$v_a = 18 * \delta_{ap} + \frac{3.5 * 100}{\delta_{ap} * x} * \delta_{ap} + \frac{12 * 100}{\delta_{ap} * x} * \delta_{ap}$$

$v_a = E$ porque está saturado

$$50 = 18 * \delta_{ap} + \frac{350}{\delta_{ap} * x} * \delta_{ap} + \frac{1200}{\delta_{ap} * x} * \delta_{ap}$$

$$50 = 18 * 1.325 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$50 = 23.85 + \frac{350}{x} + \frac{1200}{x}$$

$$50 - 23.85 = \frac{350 + 1200}{x}$$

$$26.15 = \frac{1550}{x}$$

$$x = \frac{1550}{26.15}$$

$$x = 59.27 \text{ cm}$$

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 con la ecuación 20:

$$\delta_{ap} = \frac{ps}{vt}$$

$$\delta_{ap} = \frac{800 \text{ g}}{640 \text{ cm}^3}$$

$$\delta_{ap} = 1.25 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Calculando el volumen de agua:

$$p_{agua} = 1000 \text{ g} - 800 \text{ g}$$

$$p_{agua} = 200 \text{ g}$$

$$V_{agua} = 200 \text{ cm}^3$$

Calculando la humedad gravimétrica con la ecuación 22:

$$\Theta_g = \frac{ma}{ms} * 100$$

$$\Theta_g = \frac{(1000 - 800) * 100}{800}$$

$$\Theta_g = 25 \%$$

Calculando la humedad volumétrica con la ecuación 29:

$$\Theta_v = \delta_{ap} * \Theta_g$$

$$\Theta_v = 1.25 * 25 \%$$

$$\Theta_v = 31.25 \%$$

Calculando la porosidad total mediante la ecuación 92:

$$E = \left(\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

$$E = \left(\frac{1 - 1.25}{2.65} \right) * 100$$

$$E = 52.83 \%$$

Calculando el volumen de poros por medio de la ecuación 90 despejada respectivamente

$$v_{poros} = v_{total} * E$$

$$v_{poros} = 640 \text{ cm}^3 * (52.83 / 100)$$

$$v_{poros} = 338.11 \text{ cm}^3$$

Calculando el volumen de suelo por medio de la ecuación 17 despejada respectivamente

$$v_{suelo} = v_{total} - v_{poros}$$

$$v_{suelo} = (640 - 338.11) \text{ cm}^3$$

$$v_{suelo} = 301.89 \text{ cm}^3$$

13.- Se tienen 5 ha de maravilla con una profundidad radicular de 80 cm se está regando con un umbral de riego (ur) de 30% en un suelo con las siguientes características:

Profundidad	ccg (%)	pmpg (%)	δ_{ap} (g/cm ³)
0-25	30	12	1,41
25-45	30	12	1,42
45-80	28	11	1,35

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

Calculando las alturas de agua que pueden ser absorbidas en cada estrato hasta capacidad de campo desde el punto de marchitez permanente en términos gravimétricos tenemos por medio de la ecuación 58:

$$hau = \frac{(ccg - pmpg)}{100} * \delta_{ap} * prof$$

$$hau1 = \frac{(30 - 12) * 1.41 * 25}{100}$$

$$hau1 = 6.345 \text{ cm} \approx 63.45 \text{ mm}$$

Lo que nos dice es que en los 25 cm del estrato 1 puede 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 utilizando el concepto de la ecuación 63:

$$hau1ur = 6.345 \text{ cm} * (30 / 100)$$

$$hau1ur = 1.9035 \text{ cm} \approx 19.04 \text{ mm}$$

Lo que nos indica que en los 25 cm del estrato 1 se pueden almacenar 1.9035 cm \approx 19.04 mm desde el punto del umbral de riego hasta capacidad de campo

Para este cálculo se utiliza la ecuación 58:

$$hau2 = \frac{(30 - 12) * 1.42 * 20}{100}$$

$$hau2 = 5.112 \text{ cm} \approx 51.12 \text{ mm}$$

lo que nos dice es que en los 20 cm del estrato 2 puede almacenar 5.112 cm \approx 51.12 mm de agua desde el punto de marchitez permanente hasta capacidad de campo

Desde el umbral de riego

$$hau2ur = 5.112 \text{ cm} * (30 / 100)$$

$$hau2ur = 1.5336 \text{ cm} \approx 15.34 \text{ mm}$$

Lo que nos indica que en los 20 cm del estrato 2 se pueden almacenar 1.5336 cm \approx 15.34 mm desde el punto del umbral de riego hasta capacidad de campo:

Para este cálculo se utiliza la ecuación 58:

$$hau3 = \frac{(28 - 11) * 1.35 * 35}{100}$$

$$hau3 = 8.033 \text{ cm} \approx 80.33 \text{ mm}$$

Lo que nos indica que en los 35 cm del estrato 3 se pueden almacenar 8.033 cm \approx 80.33 mm desde el punto marchitez permanente hasta capacidad de campo

Desde el umbral de riego

$$hau3ur = 8.033 \text{ cm} * (30 / 100)$$

$$hau3ur = 2.41 \text{ cm} \approx 24.10 \text{ mm}$$

lo que nos indica que en los 35 cm del estrato 2 se pueden almacenar 2.41 cm \approx 24.10 mm desde el punto del umbral de riego hasta capacidad de campo

Al caer una lluvia de 25 mm antes del riego (en el umbral de riego), donde el primer estrato puede soportar 19.035 mm tenemos

Estrato 1 = (hadlur - lluvia) cm
Sobrante en el estrato 1 = (1.9035 - 2.5) cm

Sobrante en el estrato 1 = - 0.5965 cm

Lo que nos indica que todo el estrato 1 llega a capacidad de campo y sobra 0.5965 centímetros de columna de agua que pasa al estrato

Cálculo en el estrato 2:

El estrato 2 se encuentra entre los 25 - 45 cm de profundidad lo cual nos dice que tiene un grosor de 20 cm.

El agua en centímetros que entra desde el umbral de riego hasta capacidad de campo por cm de grosor del estrato se calcula de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Agua que entra}}{\text{grosor del estrato}} = \frac{1.5336 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = \frac{0.0767 \text{ cm agua}}{\text{de grosor del Estrat-2}}$$

Los cm que ocupa en el estrato 2 sería lo que sobra en el estrato 1 dividido entre los cmca / cm grosor del estrato 2

$$-0.5965 \text{ cm} / 0.0767 \text{ cm agua} = \frac{7.777 \text{ cm}}{\text{cm de grosor Estrat-2}}$$

Lo que profundiza es la unión del estrato 1 y del estrato 2

$$\text{cm estrato1} + \text{cm estrato 2} = (25 + 7,777) \text{ cm} = 32,78 \text{ cm}$$

Si se supone que el suelo se encuentra en el umbral de riego y si queda un nivel freático de 25 cm de profundidad desde la superficie del suelo nos indica que estarían saturados los 55 cm restantes hasta la capa impermeable abarcando los 35 cm del estrato 3 y los 20 cm del estrato 2.

Por esto el total de cm de agua que una lluvia dejaría un hasta cc a 25 cm sería:

$$\text{Estrato 3} + \text{Estrato 2} = \text{total agua de lluvia} \\ 24.10 \text{ mm} + 5.34 \text{ mm} = 39.44 \text{ mm} \approx 3.9944 \text{ cm}$$

Si se supone que el suelo se encuentra en el punto de marchitez permanente el total de cm de agua de lluvia para dejarlo en cc el suelo sería

$$\text{Estrato 3} + \text{Estrato 2} = \text{total agua de lluvia} \\ 80.33 \text{ mm} + 51.12 \text{ mm} = 131.45 \text{ mm} \approx 13.151 \text{ cm}$$

Calculando la porosidad total de los 3 estratos suponiendo una densidad real de partículas de 2.65 g/cm³ y utilizando la ecuación 92 tenemos:

- Estrato 1:

$$E = \left(\frac{1 - \delta_{ap}}{\delta_r} \right) * 100$$

$$\text{Est1} = \left(\frac{1 - 1.41}{2.65} \right) * 100$$

$$\text{Est1} = 46.79 \%$$

- Estrato 2:

$$\text{Est2} = \left(\frac{1 - 1.42}{2.45} \right) * 100$$

$$\text{Est2} = 42.04 \%$$

- Estrato 3:

$$E = \left(\frac{1 - 1.35}{2.45} \right) * 100$$

$$\text{Est3} = 44.89 \%$$

Calculando la ccv con la ecuación 29 de los 3 estratos tenemos:

Estrato 1

$$\Theta_{ccv} = \delta_{ap} * \Theta_{ccg}$$

$$\Theta_{ccv1} = 1,41 * 30$$

$$\Theta_{ccv1} = 42.3 \%$$

Estrato 2

$$\Theta_{ccv2} = 1.42 * 30$$

$$\Theta_{ccv2} = 42.6 \%$$

Estrato 3

$$\Theta_{ccv3} = 1.35 * 28$$

$$\Theta_{ccv3} = 37.8 \%$$

Cálculo de la humedad volumétrica faltante a saturar en los estratos 2 y 3 tenemos:

- Estrato 2

$$\Theta_{faltante2} = E2 - \Theta_{ccv2}$$

$$\Theta_{faltante2} = 42.09 - 42.60$$

De donde se supondría que no existe macroporos o son prácticamente despreciables por lo cual se consideraría el estrato dos como saturado:

- Estrato 3

$$\Theta_{faltante3} = E3 - \Theta_{ccv3}$$

$$\Theta_{faltante3} = 44.89 - 37.80$$

$$\Theta_{faltante3} = 7.09 \%$$

Calculando la altura de agua para saturar el estrato 3 utilizando la ecuación 32 tenemos:

$$ha3 = \frac{\Theta_{v3}}{100} * prof3$$

$$ha3 = \frac{7.09}{100} * 35 \text{ cm}$$

$$ha3 = 2.48 \text{ cm}$$

Por esto el total de cm de agua que una lluvia dejaría un hasta saturación partiendo del umbral de riego sería:

$$\text{Total agua de lluvia} \\ 3.9944 \text{ cm} + 2.48 \text{ cm} = 6.4744 \text{ cm}$$

Si se supone que el suelo se encuentra en el punto de marchitez permanente el total de cm de agua de lluvia para dejar saturado el suelo sería

$$\text{Total agua de lluvia} \\ 13.151 \text{ cm} + 2.48 \text{ cm} = 15.631 \text{ cm}$$

EJERCICIO A 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	ccg(%)	pmpg (%)	δ_{ap} (g/cm ³)
0-30	30	15	1.35
30-80	28	13	1.40

- Si el UR es 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 qué profundidad?
- Si se saca una muestra de 100 cc desde el primer estrato antes del riego, ¿cuánto pesaría dicha muestra?

*Para enseñar a
los demás, primero
has de hacer tu
algo muy duro: has
de enderezarte a ti
mismo.*

Buda (563 A.C. - 486 A.C.)



PRÁCTICA DE INFILTRACIÓN

a.-Calcular la velocidad de infiltración básica para la siguiente medida desarrollada en el campo mediante el método del cálculo de la ecuación de infiltración acumulada, luego derivar dicha ecuación para encontrar la ecuación de velocidad de infiltración instantánea.

Número de medidas	Tiempo hr:min	Lectura cm
	12:17	4.96
1	12:20	4
2	12:28	2.97
3	12:33	1.84
4	12:36 / 12:37	1.2 / 4.96
5	12:47	2.48
6	12:57 / 13:06	1.97 / 0.54
7	13:06 / 13:08	0.54 / 6.68
8	13:23	3.85
9	13:38 / 13:40	1.11 / 6.41
10	13:55 / 13:58	3.8 / 6.87
11	14:12	4.21
12	14:32	1.19

Utilizando las siguientes ecuaciones 3, 4 y 5:

$$B = \frac{\sum \log I_{ac} \log t - \frac{\sum \log I_{ac} \sum \log t}{n}}{\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n}}$$

NOTA: (T = T_{AC})

$$\log A = \frac{\sum \log I_{ac}}{n} - B \frac{\sum \log t}{n}$$

$$t = \text{Anti log} \left(\frac{\log I_{ac} - \log A}{B} \right)$$

Para estimar el tiempo en que se presenta la velocidad de infiltración básica después de encontrar el modelo de infiltración básica y haberlo derivado para estimar indirectamente el modelo de velocidad de infiltración instantánea se utiliza la ecuación 9

$$t_b = 10 * -(B-1)$$

donde

- t_b = tiempo estimado en que se presenta la velocidad de infiltración básica en hr
- B = es el parámetro encontrado en este método directo
- lac = infiltración acumulada en cm
- t = tiempo acumulado

1.-Cálculo de los tiempos, láminas infiltradas y velocidades de infiltración tanto instantáneas como acumuladas juntamente con los logaritmos para estimar el modelo de Kostiakov para infiltración acumulada y por medio de la derivación de dicho modelo encontrar la ecuación o modelo de la velocidad de infiltración instantánea para luego estimar la velocidad de infiltración básica.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Número de medts	Tiempo hr:min	Lectura cm	Tiempo instantáneo min	Tiempo instantáneo hr	Tiempo acumulab min	Tiempo acumulab hr	Lámina infiltrada cm	Velocidad infiltración cm/hr	Lámina infiltrada acumulada cm	Velocidad infiltración acumulada cm/hr	$\log(ta_{rr})$	$\log^2(ta_{rr})$	$\log(lac_{mm})$	$\log(ta_{rr}) * \log(lac_{mm})$
	12:17	4,96												
1	12:20	4	3,00	0,05	3,00	0,05	0,96	19,20	0,96	19,20	-1,300	1,6927	-0,0177	0,02
2	12:28	2,97	8,00	0,13	11,00	0,18	1,08	7,73	1,99	1,85	-0,7368	0,5428	0,2989	-0,22
3	12:33	1,84	5,00	0,08	15,00	0,27	1,18	13,56	3,12	1,70	-0,5740	0,3295	0,4942	-0,28
4	12:36/ 12:37	12/4,96	3,00	0,05	19,00	0,32	0,64	12,80	3,76	1,87	-0,4994	0,2494	0,5752	-0,29
5	12:47	2,48	1,00	0,17	29,00	0,48	2,48	11,88	6,24	2,91	-0,3158	0,0997	0,7952	-0,25
6	12:57/ 13:06	197/0,54	1,00	0,17	39,00	0,65	0,51	3,06	6,75	1,38	-0,1871	0,0350	0,8293	-0,16
7	13:06/ 13:08	0,54/6,68	9,00	0,15	48,00	0,80	1,43	9,53	8,18	1,23	-0,0969	0,0094	0,9128	-0,09
8	13:23	3,85	5,00	0,25	63,00	1,05	2,83	11,32	11,01	1,49	0,0212	0,0004	1,0418	0,02
9	13:38/ 13:40	11/6,41	5,00	0,25	78,00	1,30	2,74	11,96	13,75	1,58	0,1189	0,0180	1,1883	0,18
10	13:55/ 13:58	3,8/6,87	5,00	0,25	93,00	1,55	2,61	11,44	15,36	1,55	0,1803	0,0362	1,2188	0,23
11	14:12	4,21	11,00	0,23	107,00	1,78	2,66	11,40	19,02	1,67	0,2512	0,0631	1,2792	0,32
12	14:32	1,19	20,00	0,33	127,00	2,12	3,02	9,06	22,04	1,41	0,3257	0,1160	1,3432	0,44
Sumatorias para utilizarlas en las fórmulas y poder estimar el modelo matemático propuesto por Kostiakov =											-2,8086	3,1773	9,9040	-0,1211

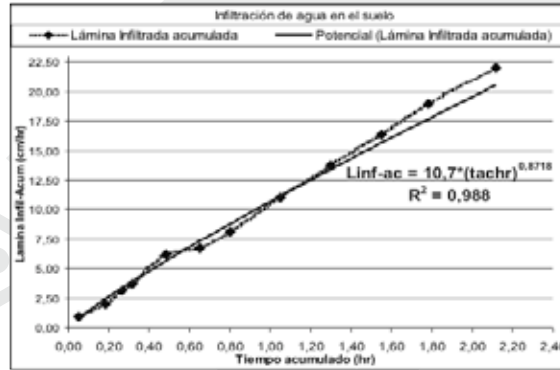
donde la identificación de las columnas 12, 13, 14 y 15 de la anterior tabla son las siguientes

tac_{hr} =	tiempo acumulado en horas
$\text{Log}(tac_{hr})$ =	logaritmo en base 10 del tiempo acumulado en horas
$\text{Log}^2(tac_{hr})$ =	logaritmo en base 10 del tiempo acumulado en horas al cuadrado
lac_{mm} =	lámina infiltrada acumulada en milímetros
$\text{Log}(lac_{mm})$ =	logaritmo en base 10 de la lámina infiltrada acumulada mm

2- Cálculo de las ecuaciones de infiltración acumulada, velocidad de infiltración instantánea y el valor de la velocidad de infiltración básica

Suma ($\text{Log}(tac_{hr})$) =	-2,81
(Suma ($\text{Log}(tac_{hr})$)) ² =	7,89
Suma ($\text{Log}^2(tac_{hr})$)	3,18
Suma ($\text{Log}(lac_{mm})$)	9,90
Suma ($\text{Log}(tac_{hr}) * \text{Log}(lac_{mm})$)	-0,12
Parámetro B =	0,8718
Log A =	1,03
Parámetro A =	10,7
Ecuación infiltración acumulada =	$I_{ac} = 10,7 * t(ac_{hr})^{0,8718}$
Cálculo de la ecuación de la velocidad infiltración instantánea derivando el modelo anterior =	$(0,8718 * 10,7) * tac_{hr}^{(0,8718-1)}$
Ecuación de la velocidad infiltración instantánea =	$V_{ininst} = 9,3283 * t(ac_{hr})^{-0,1282}$
Cálculo del tiempo de velocidad infiltración básica (hr) =	$10 * 0,1282$
Tiempo de velocidad infiltración básica (hr) =	1,282 hr
Cálculo de la velocidad infiltración básica (cm/hr) =	$9,3283 * (1,282)^{-0,1282}$
Velocidad infiltración básica (cm/hr) =	9,04

3- Graficando la curva de la lámina infiltrada acumulada versus el tiempo acumulado y calculando la ecuación que representa la curva de la lámina infiltrada acumulada para comprobar el cálculo anterior hecho



donde Linf-ac = Iac(cm)

Se logra observar que la ecuación de la infiltración acumulada son idénticas la calculada y la dada por Excel en el gráfico lo que indica que está bien calculada.

b.- Calcular la velocidad de infiltración básica para la siguiente medida desarrollada en el campo utilizando el método del cálculo de la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea de manera directa

Se utilizan los cálculos anteriores para con las ecuaciones 11, 12, 13 y 15

$$b = \frac{\sum \log V_{iins} \log t - \frac{\sum \log V_{iins} \sum \log t}{n}}{\sum \log^2 t - \frac{(\sum \log t)^2}{n}}$$

$$\log a = \frac{\sum \log V_{iins}}{n} - b \frac{\sum \log t}{n}$$

$$t = \text{Antilog} \left(\frac{\log V_{iins} - \log a}{b} \right)$$

NOTA: (T = T_{AC})

$$t_b = 10 * b$$

Donde:

- t_b = tiempo estimado en que se presenta la velocidad de infiltración básica en hrs
- b = es el parámetro encontrado en este método directo
- V_{iins} = V_{infin} (cm/hr) = velocidad de infiltración instantánea de este método directo en cm/hr

Como se logra ver en las ecuaciones, ya fueron calculados respectivamente los valores de ellas que se muestran en los cuadros anteriores a excepción del $\text{Log}(V_{\text{infins}}(\text{cm/hr}))$ y del $\text{Log}(\text{tachr}) * \text{Log}(V_{\text{infins}}(\text{cm/hr}))$ por lo que solamente se añaden los siguientes logaritmos

1.- Cálculo de los tiempos, láminas infiltradas y velocidades de infiltración tanto instantáneas como acumuladas juntamente con los logaritmos para estimar el modelo de Kostiakov para la ecuación o modelo de la velocidad de infiltración instantánea de manera directa para luego estimar la velocidad de infiltración básica.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Número de mediciones	Tempo	lectura	Tempo instantáneo	Tempo instantáneo	Tempo acumulado	Tempo instantáneo	lámina infiltrada instantánea	Velocidad infiltración instantánea	lámina infiltrada acumulada	Velocidad infiltración acumulada	$\text{Log}(t_{a_i})$	$\text{Log}^2(t_{a_i})$	$\text{Log}(t_{a_i})$	$\text{Log}(t_{a_i}) * \text{Log}(t_{a_i})$	$\text{Log}(V_{\text{infins}}(\text{cm/hr}))$	$\text{Log}(V_{\text{infins}}(\text{cm/hr})) * \text{Log}(t_{a_i})$
	hr:min	cm	min	hr	min	hr	cm	cm/hr	cm	cm/hr						
1	2:7	496														
2	2:20	4	3:0	0:5	3:0	0:5	0:96	9:20	0:96	9:20	-13:00	169:27	-0:077	0:02	12883	-1:67
3	2:28	297	8:0	0:8	1:0	0:8	1:08	7:73	1:99	10:85	-0:738	0:5428	0:2889	-0:22	0:8879	-0:65
4	2:33	184	5:0	0:8	1:0	0:7	1:18	8:55	3:12	11:70	-0:5740	0:3295	0:4942	-0:28	1:1823	-0:65
5	2:36/2:37	12/496	3:0	0:5	3:0	0:32	0:64	12:80	3:76	14:87	-0:6894	0:2894	0:5752	-0:29	1:1072	-0:55
6	2:47	248	1:00	0:7	2:00	0:48	2:48	14:88	6:24	12:91	-0:3168	0:0997	0:7952	-0:25	1:0726	-0:37
7	2:57/3:05	197/0:54	1:00	0:7	3:00	0:65	0:51	3:05	6:75	11:38	-0:3771	0:0850	0:8239	-0:15	0:4857	-0:09
8	3:06/3:08	0:54/6:68	9:0	0:5	4:00	0:80	1:43	9:53	8:8	11:23	-0:0969	0:0094	0:928	-0:09	0:9992	-0:09
9	3:23	385	5:0	0:25	6:00	1:5	2:83	11:32	10:1	11:49	0:022	0:0004	1:048	0:02	1:0588	0:02
10	3:38/3:40	111/641	5:0	0:25	7:00	1:30	2:74	11:95	13:75	11:58	0:109	0:080	1:188	0:18	1:0388	0:12
11	3:55/3:58	3:8/6:87	5:0	0:25	8:00	1:5	2:61	11:44	15:36	11:55	0:188	0:0862	1:288	0:23	1:087	0:18
12	4:12	421	4:00	0:23	10:00	1:8	2:66	11:40	19:02	11:67	0:2512	0:0631	1:292	0:32	1:0569	0:27
13	4:32	19	2:00	0:33	12:00	2:2	3:02	9:05	22:04	11:41	0:3257	0:1060	1:342	0:44	0:9571	0:31
Sumatorias para utilizarlas en las fórmulas y poder estimar el modelo matemático propuesto por Kostiakov =																
											-2,8086	3,1773	9,9040	-0,4211	12,1746	-3,1708

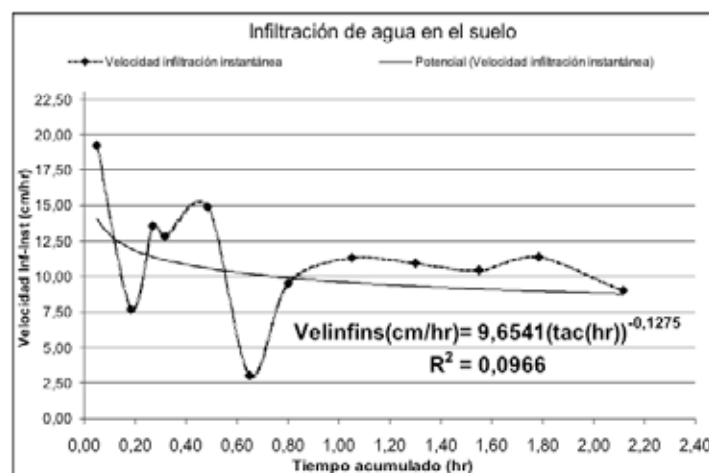
Donde la identificación de las columnas 12, 13, 14, 16 y 17 de la anterior tabla son las siguientes

tac_{hr} =	tiempo acumulado en horas
$\text{Log}(tac_{hr})$ =	logaritmo en base 10 del tiempo acumulado en horas
$\text{Log}^2(tac_{hr})$ =	logaritmo en base 10 del tiempo acumulado en hr al cuadrado
$V_{infin}_{(cm/hr)}$ =	velocidad de infiltración instantánea en cm/horas
$\text{Log}(V_{infin}_{(cm/hr)})$ =	logaritmo velocidad de infiltración instantánea en cm/hr

Con los datos añadidos y los anteriores realizados mostrados en la tabla anterior se procede a calcular los nuevos parámetros "a" y "b" para establecer la ecuación de la velocidad de infiltración instantánea utilizando el método directo y poder calcular la velocidad de infiltración básica.

Suma ($\text{Log}(tac_{hr})$) =	-2.81
(Suma ($\text{Log}(tac_{hr})$)) ² =	7.89
Suma ($\text{Log}^2(tac_{hr})$) =	3.18
Suma ($\text{Log}(V_{infin}_{(cm/hr)})$) =	12.17
Suma ($\text{Log}(tac_{hr}) * \text{Log}(V_{infin}_{(cm/hr)})$) =	-3.17
b =	-0.1275
Log a =	0.98
a =	9.6541
Modelo de la velocidad de infiltración instantánea =	$V_{infinst} = 9.6541 * (tac_{hr})^{-0.1275}$
Cálculo del tiempo de velocidad infiltración básica (hr) =	$10 * 0.1275$
Tiempo de velocidad infiltración básica (hr) =	1.275
Cálculo de la velocidad infiltración básica (cm/hr) =	$9,6541 * (1.275)^{-0.1275}$
Velocidad infiltración básica (cm/hr) =	9.35

Graficando la curva de la velocidad de infiltración instantánea versus el tiempo acumulado y calculando la ecuación que representa la curva de la lámina infiltrada acumulada para comprobar el cálculo anterior hecho.



Se logra observar que las ecuaciones de la velocidad de infiltración instantánea la calculada y la dada por Excel en el gráfico son idénticas lo que indica que los cálculos son correctos. Además, se logra observar que las velocidades de infiltración básica obtenidas son valores cercanos de los métodos directo y el derivado. Es bueno mencionar que no siempre los valores son cercanos debido a que las ecuaciones usualmente son diferentes.

La ventaja del método directo sobre el derivado consiste en que se puede obtener un valor de r^2 el cual nos dice cuanto el modelo matemático encontrado representa lo medida en el campo o cuanto representa la realidad que se presenta en el suelo en el proceso de infiltración de agua en el suelo. En el método derivado el r^2 que muestra corresponde a la ecuación de infiltración acumulada y no a la ecuación encontrada producto de la derivación. El método directo muestra un r^2 del 9,66% lo cual es bajo. El método indirecto dio una ecuación para la velocidad de infiltración instantánea que no tiene r^2 pero por su semejanza a la ecuación del método directo nos indica que la representación de la realidad del suelo muy posiblemente sea semejante la del método directo (baja).

Hora de Lectura (hr:min)	Lectura de Infiltración (cm)
11:00	18,0
11:01	18,5
11:03	19,7
11:05	20,7
11:07	21,6
11:09	22,5
11:11	23,3
11:13	24,0
11:15	24,8
11:20	26,6
11:23	22,3
11:25	23,0
11:27	23,8
11:30	24,9
11:35	26,8
11:40	28,3
11:45	30,3
11:46	25,5
11:48	26,3
11:50	27,0
11:55	28,5
11:56	19,2
12:01	21,8
12:05	23,5
12:10	25,8
12:20	29,2
12:20	29,2
12:22	22,1
12:25	23,5
12:30	25,7
12:31	16,5
12:35	18,4
12:40	20,6
12:45	22,9
12:50	25,2
12:55	27,1
13:00	29,8
13:01	25,0
13:05	26,2
13:10	27,7

BIBLIOGRAFÍA

- AGUADO, E. 2001. Understanding Weather and Climate. Prentice Hill. New Cork.
- ALFONSO, A. 2000. Necesidades de agua en el cultivo de maíz. Disponible en:
www.inea.uva.es/web/materiales/web/riego/anuncios/trabajos/Necesidades%20de%20agua%20en%20el%20maíz.pdf
- ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. Crop Evapotranspiration. Roma, España.
- BOUWER H. 1999. Predicting infiltration and ground-water mounds for artificial recharge, Journal of Hydrologic Engineering, October 1999, pp. 350-357.
- BUTLER, S. 1957. Engineering Hydrology. Prentice Hall Inc. EE.UU. 356 PÁGS.
- CALVO, J. 1999. Principios de hidrología forestal tropical. Inst. Tecnol. Costa Rica, Esc. Ing. Forestal, Cartago, Costa Rica. 136 págs.
- CANTER, L.W.; KNOX, R.C. 1985. "Septic Tank System Effects on Ground Water Quality", Lewis Publishers, Inc
- CARTAGENA, J.R. (sf). Relaciones agua suelo planta. Universidad Nacional Medellín. Colombia. 11 p.
- DUARTE, O.; DÍAZ, E. 2003. Tecnología de Tierras y Aguas Evaporación y Evapotranspiración. 17 p.
- FAO. 1990. Las Necesidades de agua de los cultivos. Roma, Italia.
- FAO. (sf). Evapotranspiración del cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos (56). 326 p.
- FASSBENDER, H.W.; E. BOERNEMIZA. 1987. Química de Suelos, con énfasis en suelos de América Latina. IICA. 5ta. Reimpresión. San José. 420 p.
- FETTER, C.W. 1996. Contaminant Hydrogeology. Prentice Hall. 1993.
- FETTER, C.W. 1988. Applied Hydrogeology. Prentice Hall. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2009. Albedo and reflectance anisotropy. 20p.

- FREEZE, A.; CHERRY J. 1979. GROUNDWATER. PRENTICE HALL. FUENTES, L. 1989. Iniciación a la meteorología agrícola. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- GARCIA, J.; SOSA, F.; FERNANDEZ, J. (sf). Agua del suelo. Universidad Nacional de Tucumán. Argentina. 17 p.
- GRASSI, C. 1976. Resumen de propiedades físicas del suelo, métodos de riego. CIDIAT. Mérida, Venezuela. 265 págs.
- GRASSI, C. 1988. Fundamentos del Riego. Mérida, Venezuela. Serie Riego y Drenaje RD-38.
- GRASSI, C. 1993. Fundamentos de Riego. CIDIAT. Mérida
- GUEVARA, D.J. 1988. Meteorología. Ediciones de la Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.
- HERAS, R. 1972. Manual de hidrología, Hidrología agrícola. Esc. Hidrología, Madrid, España. 330 págs
- Herrera, I. I. 1995. Manual de hidrología. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 223 p.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE (ITESO). 1995. Notas sobre el curso de Energía Solar. Jalisco, México. 158p.
- JACKSON M.B., 1985. Ethylene and the responses of plants to soil water logging and submergence. Ann Rev Plant Physiol 36, 145-174.
- Jury, W.; Gardner, W. R.; Gardner, W. H. 1991. Soil Physics, Wiley. Fifth edition. California.
- KAWASE M., 1972. Effect of flooding on ethylene concentration in horticultural plants. J Am Soc Hort Sci 97, 584-588.
- KAWASE M., 1978. Anaerobic elevation of ethylene concentration in waterlogged plants. Am J Bot 65, 736-740.
- LALLANA, V.; LALLANA M. 2001. Manual de Prácticas de Fisiología Vegetal. Universidad Nacional Entre Ríos (UNER), Argentina. 10 p.
- LEACH, E.; EINFELD, C.G.; HARLIN, C.C. 1980, Summary of Long-Term Rapid Infiltration.
- LINSLEY, R.; KOHLER, M.; PAULUS, L. 1958. Hydrology for engineers. McGraw Hill, Nueva York. 340 págs.
- ONU, 1972. Manual de instrucciones, estudios hidrológicos. ONU Publ. N° 70, San José, Costa Rica. 540 págs.

- OROZCO, EO; PADILLA, T; SALGUERO, M. 2003. Metodología para la determinación de áreas de recarga hídrica natural. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía / Instituto Nacional de Bosques. 106 p.
- PADILLA, TA. 2003. Evaluación del potencial hídrico en la microcuenca del río Cantil, para el aprovechamiento de las aguas subterráneas en la finca Sabana Grande, El Rodeo, Escuintla, Guatemala. Tesis MSc. Costa Rica, Universidad de Costa Rica. 102 p.
- RUIZ, R. 2006. Manejo del riego y suelo en el cultivo del palto. (Seminario). Chile. 20 p.
- SALISBURY, B. F.; ROSS, C. W. 1992. Fisiología Vegetal. Editorial Iberoamericana. México. 759 p.
- SÁNCHEZ, F. 2006. Evapotranspiración. Universidad de Salamanca (Geología). Salamanca. España. 8p.
- SCHOSINSKY, G.; LOSILLA, M. 2000. Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual.- Rev. Geol. Amér. Central, 23: 43-55.
- SCHOSINSKY, G. 2007. Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. Costa Rica, Escuela Centroamericana de geología / Universidad de Costa Rica. 18 p.
- SCHOSINSKY, G.; LOSILLA, M. 2003. Notas del curso de hidrología con énfasis en balance hídrico: curso de capacitación. Guatemala, USAC, Facultad de Agronomía. 15 p.
- SEGERER, C.; VILLODAS, R. 2006. Unidad 6. Evaporación, transpiración y evapotranspiración. Mendoza, Argentina. 30 p.
- SRK CONSULTING. 2010. Llenado Rajo al Cierre: Proyecto Mina Invierno. Santiago, Chile. 22 p.
- SYSTEM STUDIES. U.S. ENVIROMENTAL PROTECTION AGENCY. EPA-600/2-80-165. LÓPEZ J. 1996. "Comparación de dos métodos para el cálculo de ETO en Venezuela" disponible en: [www.pegasus.ucla.edu/ve/BIOAGO/Rev17\(1\)/6.%20Comparación%20de%20dos%20métodos.pdf](http://www.pegasus.ucla.edu/ve/BIOAGO/Rev17(1)/6.%20Comparación%20de%20dos%20métodos.pdf)
- UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES (UBA). (sf). Las plantas y el agua. Cátedra de Fisiología Vegetal, Facultad de Agonomía. Argentina. 68 p.
- VILLAFÁILA, E.; WYSS, F. 2009. Riego en horticultura. Agencia Extensión Rural INTA. Argentina. 49 p
- WALTON, W, 1970. Ground water resource evaluation. Mc Graw Hill, New York. 664 págs.
- WERE, A.; VILLAGARCÍA, L.; DOMINGO, F. 2002 "¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?". Disponible en: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=287985>

- http://aguas.igme.es/igme/publica/depuracion_aresidual/3.pdf
- <http://www.inta.gov.ar/manfredi/info/documentos/docsuelos/neceriego58.htm>
- <http://www.exp.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=8&codigo=04&fichero=1138110070804>
- <http://www.fago.edu.uy/~edafologia/curso/Material%20de%20lectura/FISICAS/fisicas.pdf>
- http://www.fing.uncu.edu.ar/catedras/hidrologia_i/teoria/H1_07_U10.PDF
- <http://www.mitecnologico.com/Main/SuspensionesYColoides>
- <http://www1.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFEstructura.htm>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/fusion/fusion.htm>
- <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/estadistica/otros/vapor1/vapor1.htm>
- http://www.siar.cl/docs/protocolos/curvas_humedad.pdf
- http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm
- http://www.vaxasoft.com/doc_edu/qui/pvh2o.pdf
- <http://www.youblisher.com/files/publications/3/12210/pdf>



Ingeniería en
Energías
Renovables