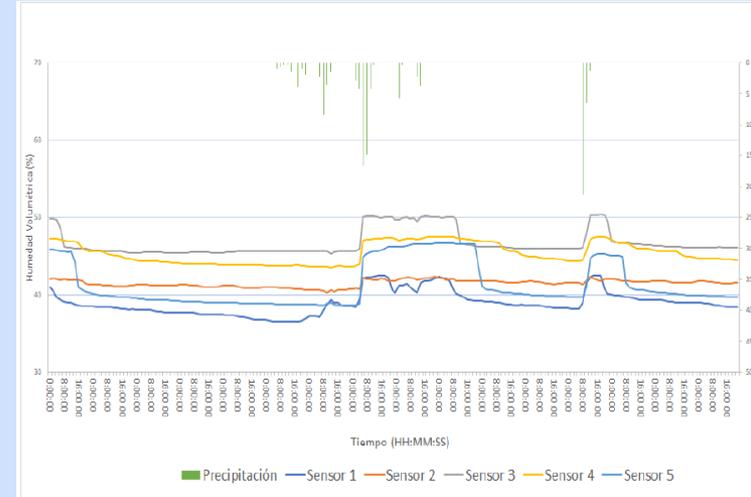


MODULO 3 – AGUA EN LA ATMÓSFERA Y EN EL SUELO



Edición 2023

Agustín Menta y Leticia Martínez

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay

amenta@fing.edu.uy lmartinez@fagro.edu.uy

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

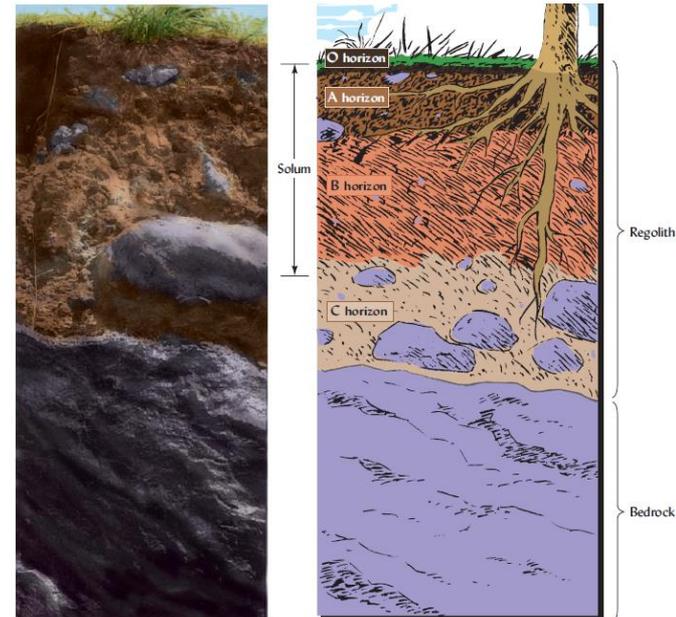
Objetivos:

1. Descripción del suelo y propiedades mas importantes.
2. Contenido agua en el suelo. Parámetros hídricos.
3. Determinación contenido de agua a diferentes potenciales.
4. Métodos para medir agua en el suelo
5. Infiltración en el suelo

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

SUELO

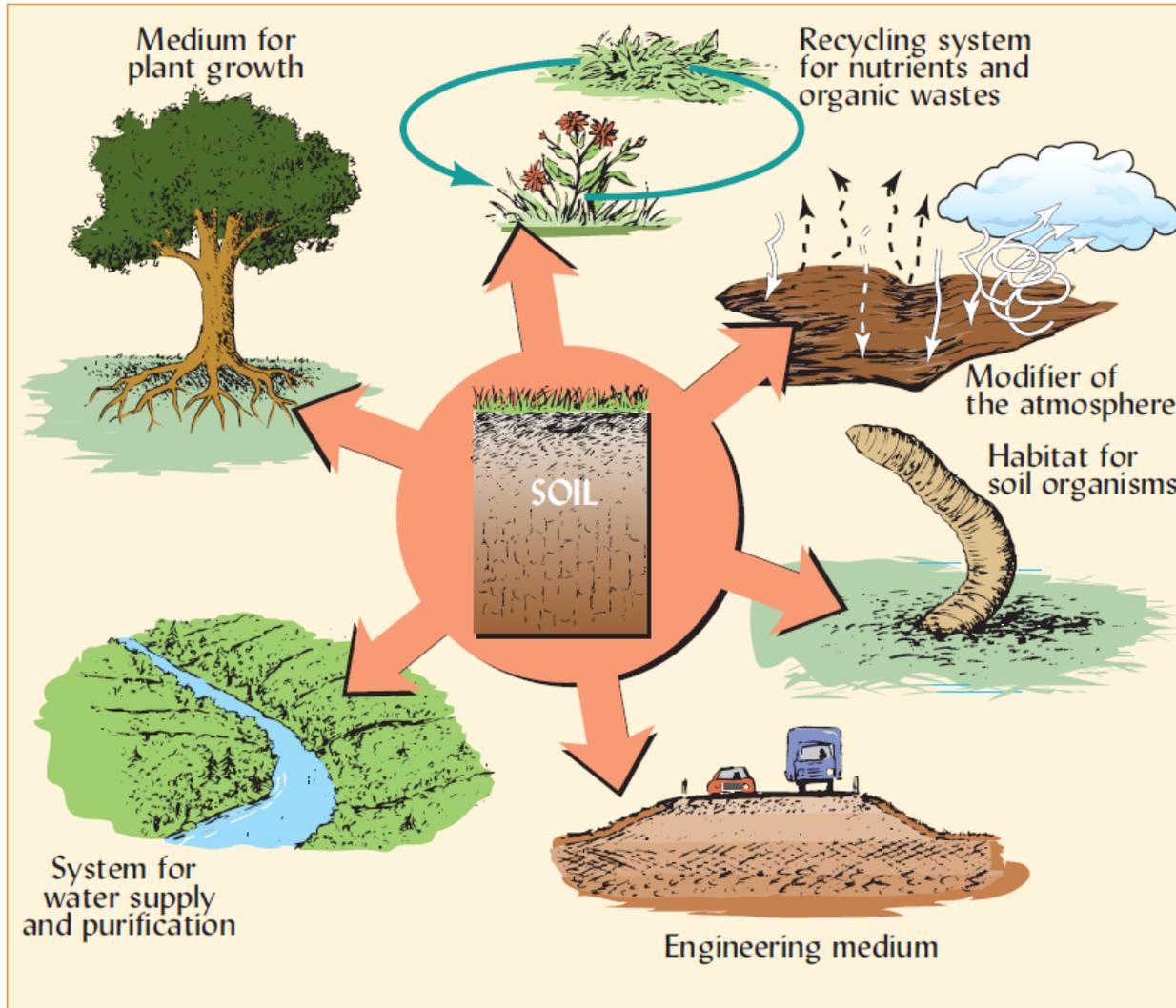
Colección de cuerpos naturales que ocupan diferentes posiciones y porciones de la superficie de la tierra, que reúnen propiedades que le dan soporte y nutrientes a las plantas, y que fueron originados por el **efecto integrado del clima, el relieve y los organismos vivos**, actuando sobre el material parental, durante períodos de tiempo variables



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

- En el siglo XXI, la población humana que demanda todos los productos que dependen del suelo aumentará en varios miles de millones (población esperada es de 9 a 10 billones en el siglo).
- La cantidad de suelo disponible para satisfacer estas demandas no aumentará.
- La base de recursos se está reduciendo debido a la degradación del suelo y la urbanización.
- Comprender cómo manejar mejor el recurso del suelo es esencial para nuestra supervivencia y para el mantenimiento de un hábitat suficiente para las otras criaturas que comparten este planeta con nosotros. El estudio de la ciencia del suelo nunca ha sido más importante de lo que es hoy. **Weil y Brady (2017)**

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

¿Por qué es importante medir el agua en el suelo?

- El suelo es la principal reserva de agua para el crecimiento de las plantas, por su capacidad para almacenarla e ir cediéndola a medida que la requieran.
- La mayoría del agua que se encuentra en ríos, lagos y acuíferos ha pasado a través de los suelos o ha fluido por su superficie. Por lo tanto es el primer filtro para conservar la calidad del agua.
- Importancia:
 - Meteorización de minerales
 - Descomposición de MO
 - Crecimiento de las plantas
 - Contaminación cuerpos de agua



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

¿Por qué es importante medir el agua en el suelo?

INFLUYE EN:

- la génesis y evolución del suelo (meteorización, procesos de formación)
- las propiedades mecánicas (consistencia, plasticidad, expansión-contracción)
- el movimiento y disponibilidad de nutrientes para la planta
- la cantidad de aire e intercambio de gases (respiración de raíces y actividad microbiana)
- en los cambios en la temperatura del suelo
- en el estado químico del suelo (oxidación, reducción)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

¿Por qué es importante medir el agua en el suelo?

PROCESOS DEL AGUA EN EL SUELO:

- Expansión-Contracción
- Adhesión
- Formación de agregados
- Reacciones químicas
- Tasas de Infiltración/Escurrentía/Evapotranspiración

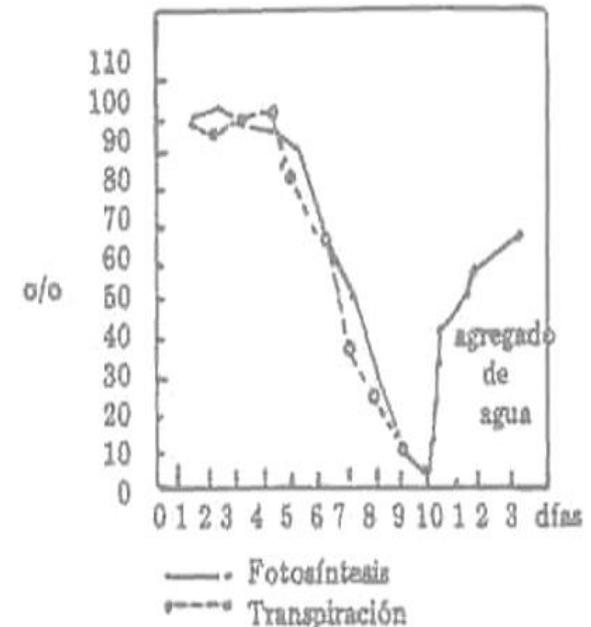
MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DÉFICIT DE AGUA:

- Se da cuando la velocidad de pérdida de agua supera la ganancia (la demanda atmosférica supera a la oferta edáfica)
- Mayor duración e intensidad a medida que disminuye el agua en el suelo o aumenta el poder evaporante de la atmósfera

EFFECTOS:

- Germinación y Emergencia
- Fotosíntesis y Transpiración
- Crecimiento Vegetativo
- Período Reproductivo
- Período de Maduración



Disminución simultánea de las tasas de fotosíntesis y transpiración en tomate sujeto a déficit de agua creciente y recuperación luego del riego. (Brix, 1962, cit. por Kramer, 1969)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

EXCESO DE AGUA:

- Mayoría de los poros tienen agua
- Se reduce el intercambio gaseoso suelo-atmósfera
- Deficiencia de O_2 y exceso de CO_2 . El O_2 se difunde 10.000 veces mas lentamente en agua que en aire

EFEKTOS:

- ✓ reducción de la respiración: menor crecimiento
- ✓ enlentecimiento del metabolismo activo (absorción de agua y nutrientes)
- ✓ respiración anaerobia: aumento de sustancias tóxicas (etanol)
- ✓ mayor riesgo e incidencia de algunas enfermedades
- ✓ pérdidas de N por volatilización y lavado en suelo
- ✓ reducción de Fe y Mn que pasan a formas mas disponibles causando toxicidad en suelo



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

BALANCE HIDRICO

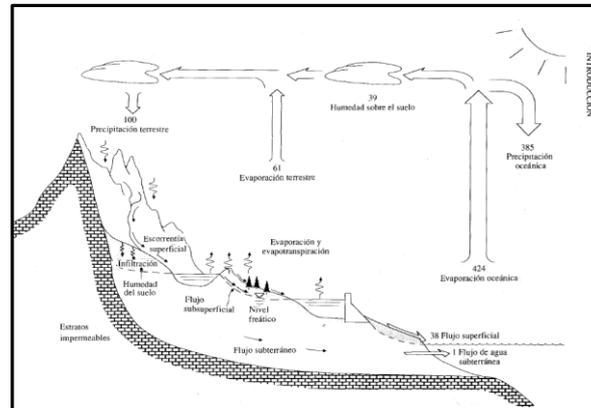
Cuantificar los diferentes componentes que participan en el Ciclo Hidrológico

$$P - ETR - Qs = \pm \Delta s \pm \Delta Gw$$

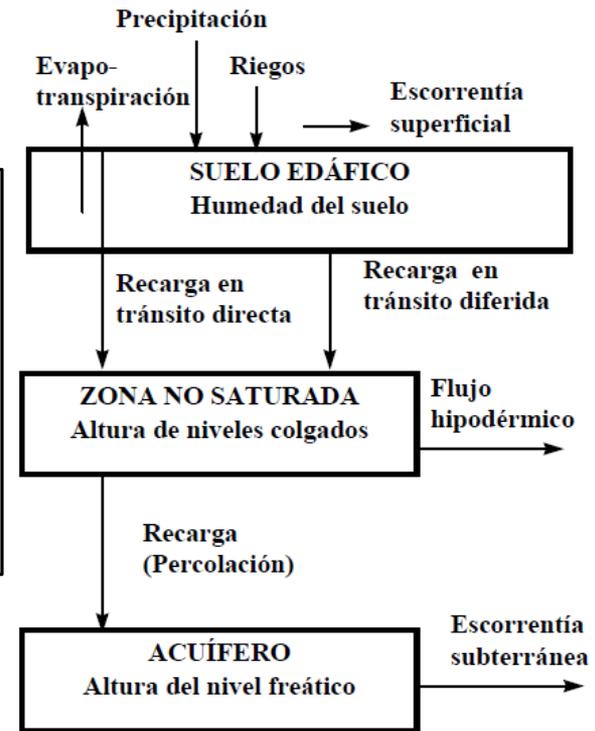
$$ETR = I + E + T$$

Se puede evaluar a nivel de:

- Región
- Cuencas o Microcuencas
- Parcelas Experimentales
- Lisímetros



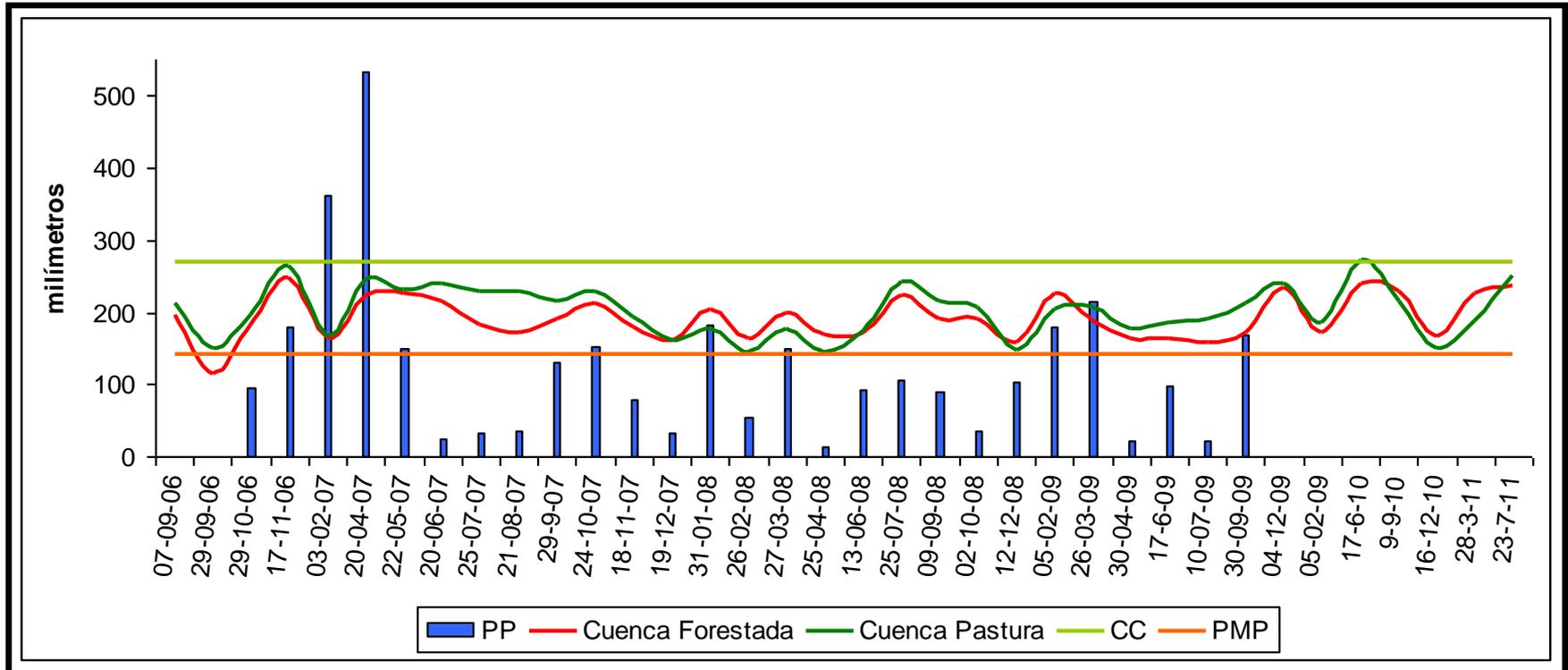
Extraído de Hidrología Aplicada
Ven Te Chow, 1994



Extraído de Manual Visual Balan v 2.0

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Microcuencas Experimentales

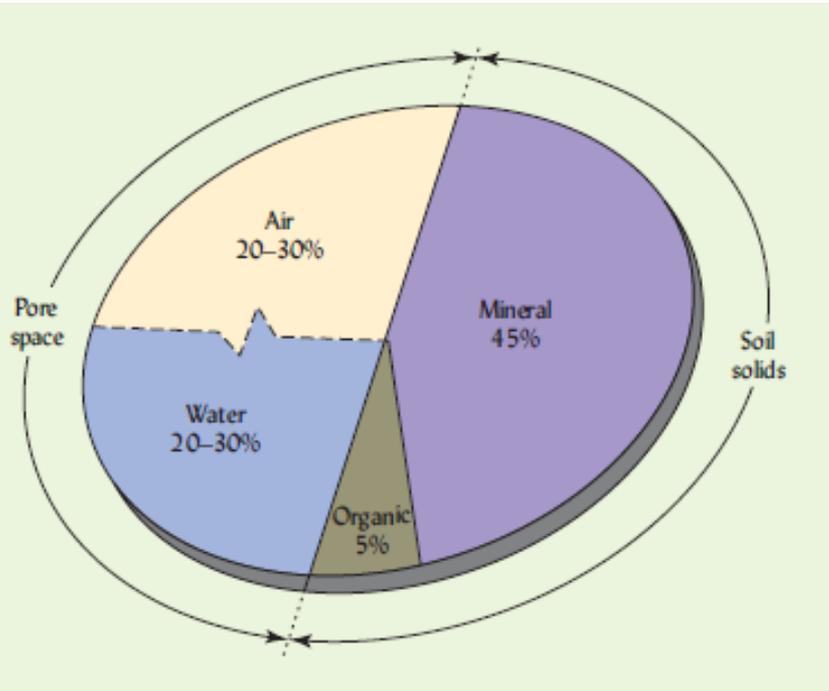


Variación del almacenamiento del contenido de agua en el suelo bajo dos coberturas: pastura y forestación (*Eucalyptus sp.*) medido en microcuencas experimentales, Piedras Coloradas - Paysandú

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN IDEAL DEL SUELO

El suelo es un sistema complejo donde interactúan tres fases:
Sólida, Líquida y Gaseosa



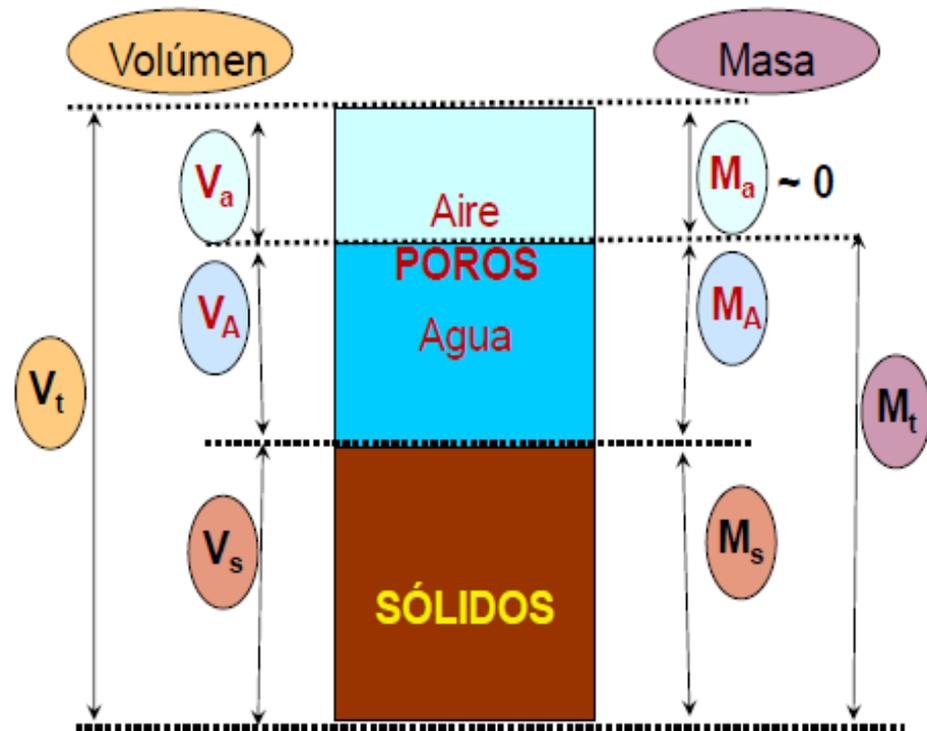
Extraído de Weil y Brady (2017)

- Composición ideal en volumen de un suelo en buena condición para el crecimiento de la planta
- Mineral: Material derivado de las rocas
- Orgánico: en peso corresponde solo al 2% pero su incidencia es mucho mayor
- Espacio Poroso determina muchas de las propiedades físicas e hídricas y está muy relacionado con la textura y estructura del suelo.
- **Suelos a mayor profundidad contienen menos materia orgánica, menos espacio poroso, y mayor contenido de microporos que los superiores**

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN DEL SUELO RELACIONES MASA-VOLUMEN

- Fase Sólida: **Matriz**
- Fase Líquida: **Solución**
- Fase Gaseosa: **Atmósfera**



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN DEL SUELO-TEXTURA

- La **proporción de partículas** en los diferentes rangos de tamaños define la **textura de un suelo**.
- La textura tiene una elevada influencia en muchas de las propiedades de los suelos

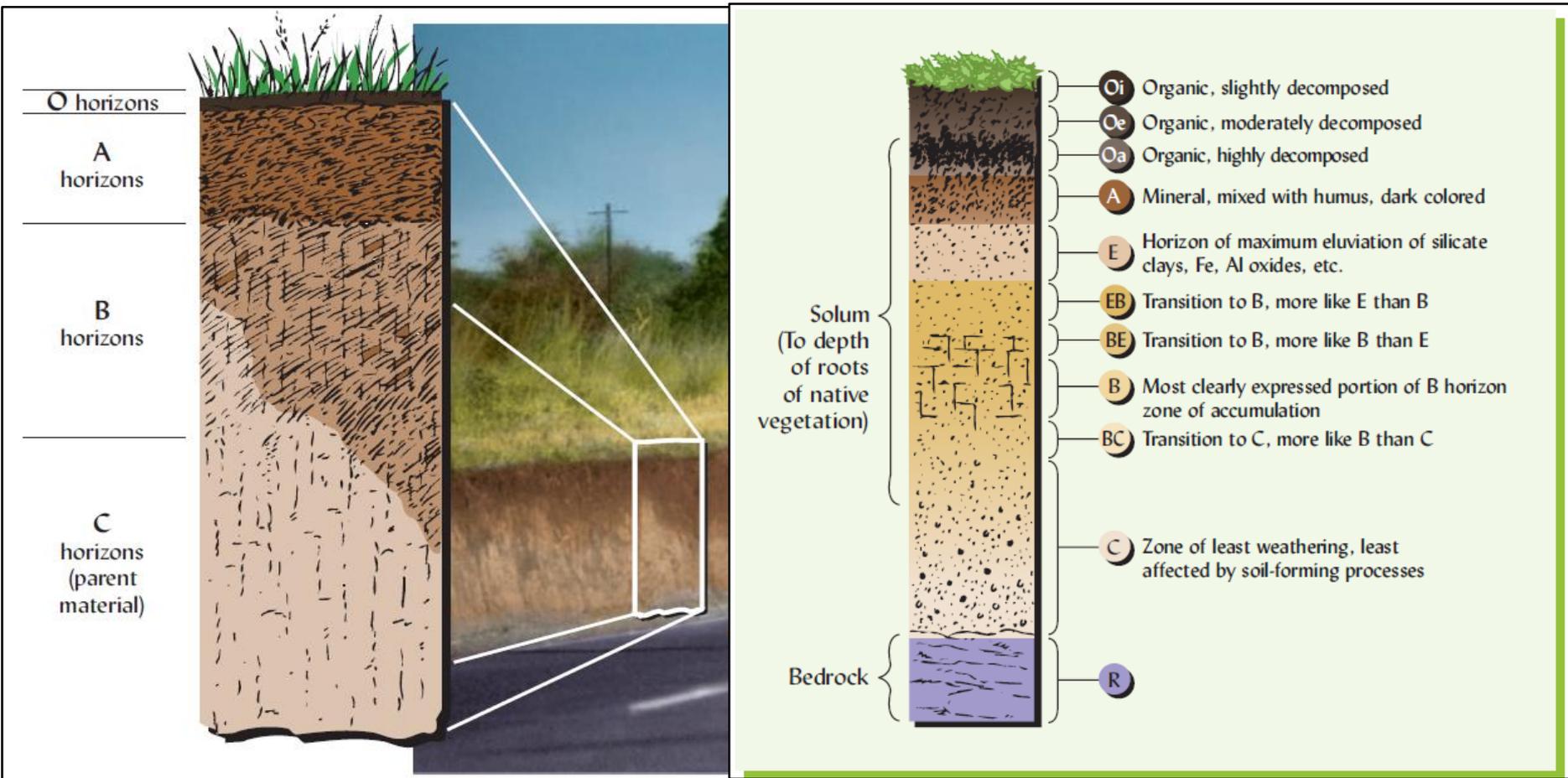
Table 1.2

SOME GENERAL PROPERTIES OF THE THREE MAJOR SIZE CLASSES OF INORGANIC SOIL PARTICLES

Property	Sand	Silt	Clay
1. Range of particle diameters in millimeters	2.0–0.05	0.05–0.002	Smaller than 0.002
2. Means of observation	Naked eye	Microscope	Electron microscope
3. Dominant minerals	Primary	Primary and secondary	Secondary
4. Attraction of particles for each other	Low	Medium	High
5. Attraction of particles for water	Low	Medium	High
6. Ability to hold chemicals and nutrients in plant-available form	Very low	Low	High
7. Consistency when wet	Loose, gritty	Smooth	Sticky, malleable
8. Consistency when dry	Very loose, gritty	Powdery, some clods	Hard clods

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN Y MORFOLOGÍA DE SUELOS



Extraído de Weil y Brady (2017)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Perfiles de Suelo y Nomenclatura

Los seis grandes horizontes de suelo son designados con las letras mayúsculas

O,A,E,B,C y R

Los subhorizontes son designados con letras minúsculas o números acompañando las letras mayúsculas (Bt, Ap, Oi, etc.)

- Horizontes O: Se pueden distinguir tres subhorizontes:
 - Oi horizonte orgánico poco descompuesto
 - Oe horizonte con materiales húmicos, descomposición intermedia pero con mucha fibra aún.
 - Oa horizonte que contiene los materiales sápricos, muy descompuestos que ya no tiene mucha fibra.

Table 2.6
SOME COMMON SUBHORIZON DISTINCTIONS WITHIN MASTER HORIZONS³

Lower Case Symbol	Distinction	Lower Case Symbol	Distinction
a	Highly decomposed organic matter	n	Accumulation of sodium
b	Buried soil horizon	o	Accumulation of iron and aluminum oxides
c	Concretions or nodules	p	Plowing or other disturbance
co	Coprogenous earth	q	Accumulation of silica
d	Dense unconsolidated materials	r	Weathered or soft bedrock
di	Diatomaceous earth	s	Illuvial organic matter and iron, aluminum oxides
e	Intermediately decomposed organic matter	se	Presence of sulfides
f	Frozen soil	ss	Slickensides (shiny clay wedges)
ff	Dry permafrost	t	Accumulation of silicate clays
g	Strong gleying (mottling)	u	Human-manufactured artifacts
h	Illuvial accumulation of organic matter	v	Plinthite (high iron, red material)
i	Slightly decomposed organic matter	w	Distinctive color or structure without clay accumulation
j	Jarosite (yellow sulfate mineral)	x	Fragipan (high bulk density, brittle)
jj	Cryoturbation (frost churning)	y	Accumulation of gypsum
k	Accumulation of carbonates	yy	Gypsum >50% of soil by mass
kk	Engulfment of carbonates, >50% of soil by mass	z	Accumulation of soluble salts
m	Cementation or induration		

³Based on information in Soil Survey Staff (2014)

Extraído de Weil y Brady (2017)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN Y MORFOLOGÍA DE SUELOS

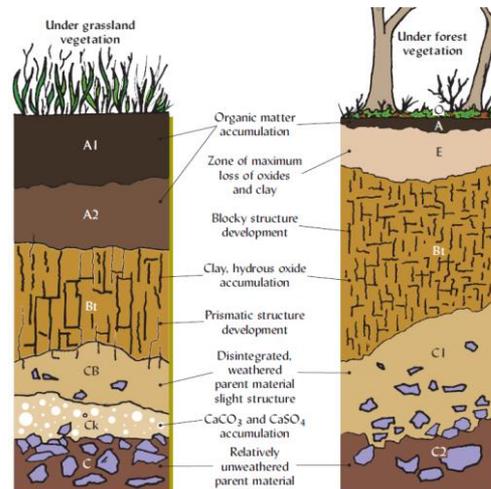
- En suelos imperturbados, por ejemplo bosques, la **materia orgánica de hojas caídas y materiales de animales tienden a acumularse en la superficie**. Luego van descendiendo por procesos de transformación y descomposición física y bioquímica y son la base de las nuevas capas. Estas capas son denominadas **Horizontes O**. Generalmente son ausentes en regiones de pasturas.
- Los **horizontes A** son las capas más cercanas a la superficie que son dominadas por partículas minerales pero se han oscurecido por la **acumulación de materia orgánica**
- En algunos suelos que son **intensamente meteorizados y lixiviados** que no acumulan materia orgánica. Esos horizontes son denominados **Horizontes E**. Generalmente se encuentran por debajo del A y tienen un color más brillante que el A y los inferiores.



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

COMPOSICIÓN Y MORFOLOGÍA DE SUELOS

- Las capas debajo de los horizontes A y O contienen menos materia orgánica. Tienen **contenido variable de arcillas silicatadas, hierro, óxidos de aluminio, yeso o carbonato de calcio**. Estos materiales han sido lixiviados (proceso de iluviación) desde horizontes superiores o se han generado allí por procesos de meteorización. Estos horizontes son denominados **Horizontes B**. El **material parental no es fácilmente discernible**
- Las raíces y microorganismos frecuentemente se extienden por debajo de los horizontes B, **generando cambios químicos en el agua del suelo, meteorización del regolito** y la formación de los **Horizontes C**. Los horizontes C son la última parte del perfil de suelo. Pueden ser o no del mismo material que el material parental.
- Los **Horizontes R**, son la roca consolidada con poca muestra de meteorización



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DENSIDAD DE LOS SÓLIDOS O DENSIDAD REAL

- **Promedio ponderado** de las densidades de las partículas sólidas del suelo
- Masa por unidad de volumen de los sólidos del suelo. Los suelos varían entre 2.6 y 2.75 Mg/m³(por feldespatos y cuarzos, MO disminuye DR) (Mg, megagramos).

$$\text{Densidad real} = \frac{\text{Kg sólidos (Ms)}}{\text{V sólidos (Vs)}}$$



$$V_s = 0,5 \text{ m}^3 \left\{ \begin{array}{l} \text{1,33 Mg} \end{array} \right. = \frac{1,33 \text{ Mg}}{0,5 \text{ m}^3} = 2,6 \text{ Mg m}^{-3}$$

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DENSIDAD APARENTE

Masa de sólidos por unidad de volumen total de suelo seco (sólidos + poros)

Suelos arenosos 1.6 Mg/m³

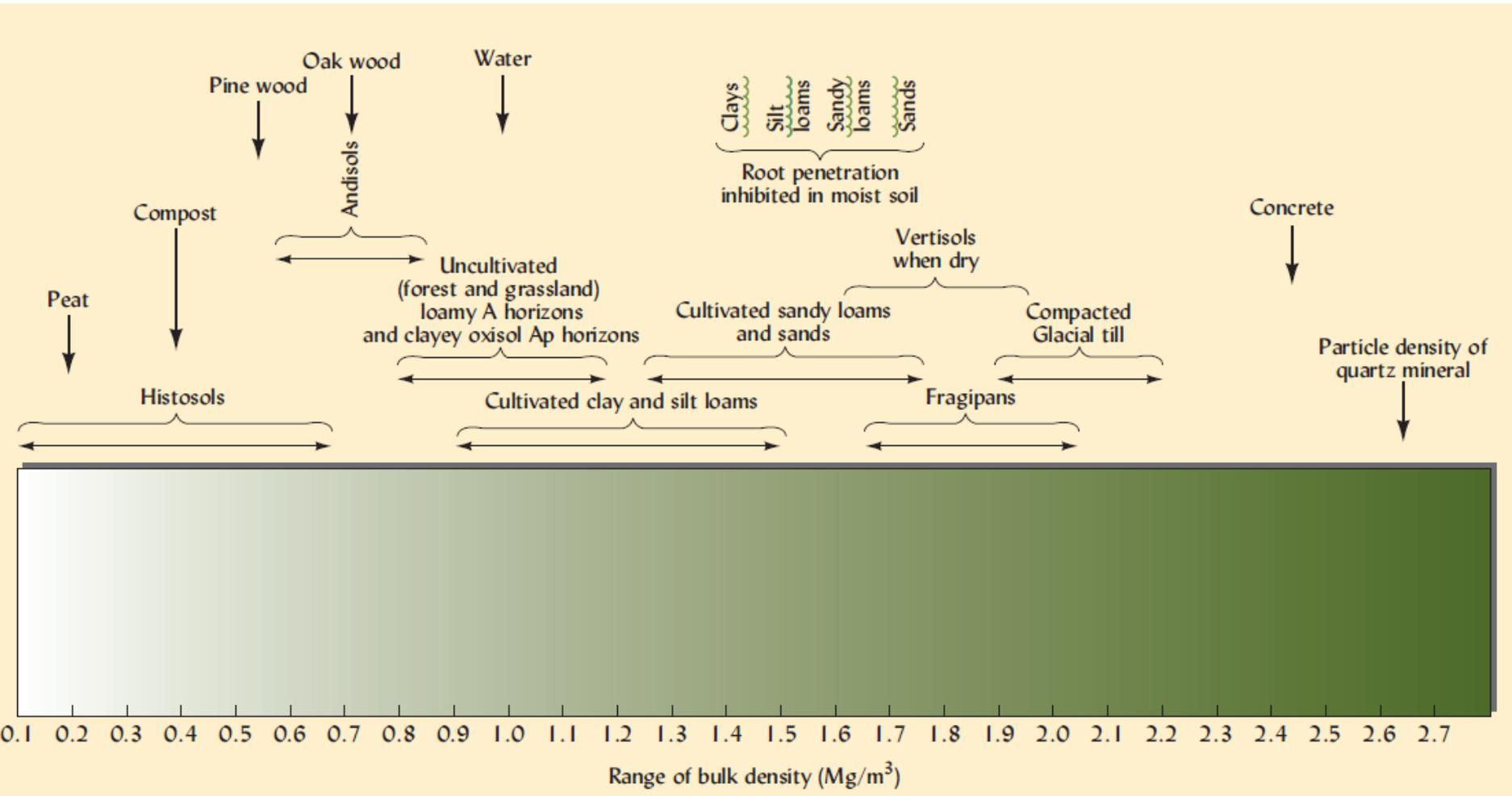
Suelos arcillosos bien agregados 1.1 Mg/m³

$$D_{ap} = \frac{Mg \text{ de sólidos } (Ms)}{m^3 \text{ Vol total } (Vt)}$$

$$V_t = 1,0 \text{ m}^3 \left[\begin{array}{c} \text{[Diagrama de un cubo dividido en dos partes: la parte superior es azul y la inferior es roja, con '1,33 Mg' escrito en la parte roja]} \\ 1,33 \text{ Mg} \end{array} \right] = \frac{1,33 \text{ Mg}}{1,0 \text{ m}^3} = 1,33 \text{ Mg m}^{-3}$$

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DENSIDAD APARENTE

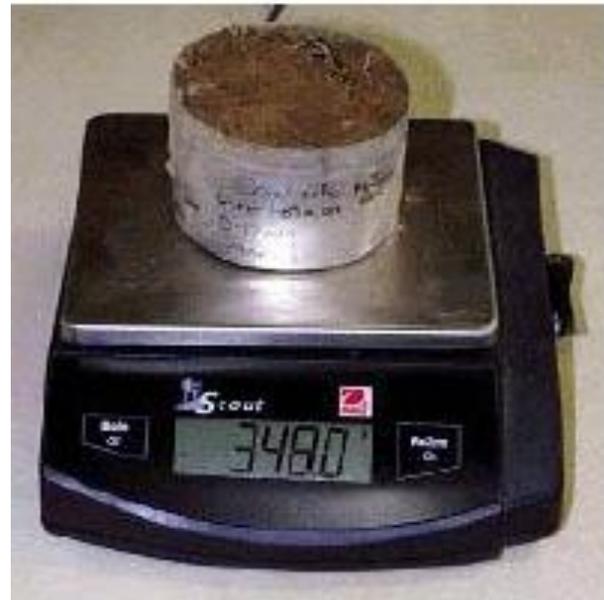


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE

Se deben tomar **Muestras imperturbadas**

$$\text{Densidad aparente} = \frac{\text{Masa suelo seco (Mg)}}{\text{Volúmen suelo imperturbado (m}^3\text{)}}$$



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE

- **Método de campo**

Se retira un volumen de suelo, se seca y se pesa, se mide el volumen que ocupaba con el agua que se coloca



- **Método del agregado**

Una cobertura de parafina sólida sobre el agregado permite sumergirlo en agua y por diferencia de peso, se determina el volumen desplazado

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

POROSIDAD TOTAL

- **Volumen relativo de poros en el suelo**
- Entre 30 y 60%
- Texturas mas gruesas tienen menor volumen de poros que las texturas mas finas

$$P_t = \frac{V_a + V_w}{V_t}$$

- P_t porosidad total del suelo
- V_a Volumen de aire
- V_w volumen de agua
- V_t Volumen total del suelo



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

POROSIDAD TOTAL

MACROPOROS

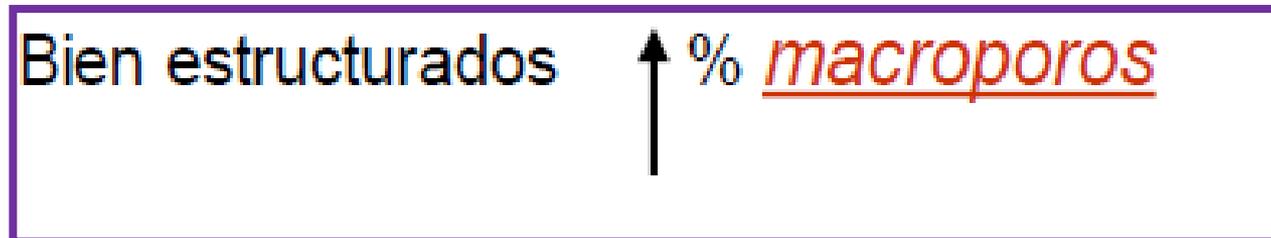
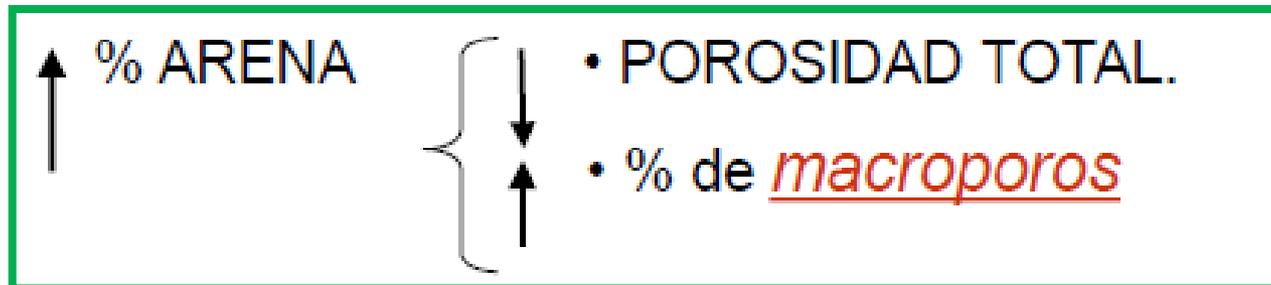
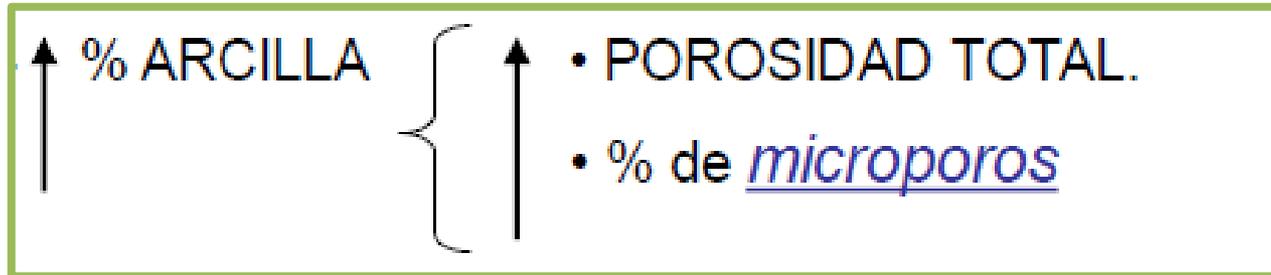
- Movimiento de agua libre
- Aireación
- Crecimiento radicular
- Actividad de mesofauna

MICROPOROS

- Retención de agua contra la gravedad

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

POROSIDAD PROMEDIO DE LOS SUELOS



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

POROSIDAD PROMEDIO DE LOS SUELOS

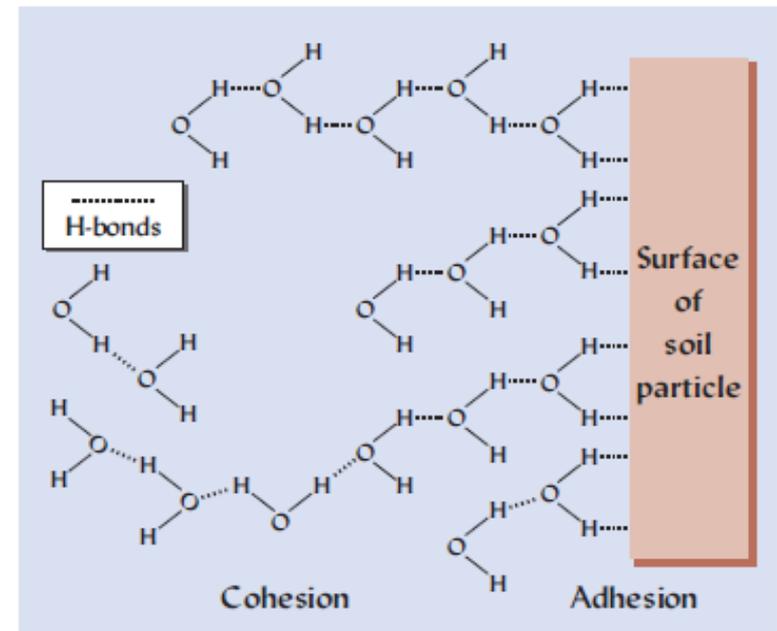
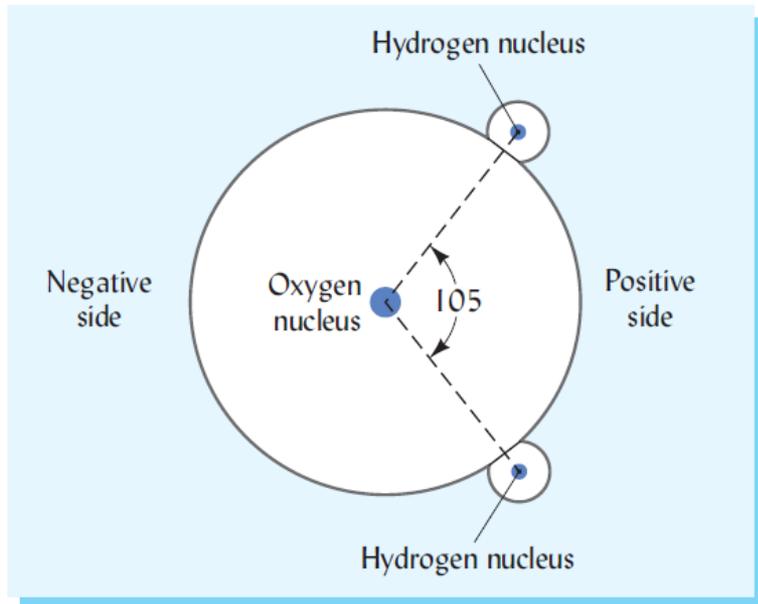
Porosidad Total = Macroporos + Microporos

- $PT = [1 - (D_{ap}/D_{real})] * 100$
- Microporos = Contenido de agua a CC (%HV)
- Macroporos = PT - Microporos

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

PROPIEDADES DEL AGUA-POLARIDAD

- La polaridad de la molécula del agua hace que se atraigan entre sí (cohesión)
- También que se adhiera a las arcillas (adhesión o adsorción)



Extraído de Weil y Brady (2017)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

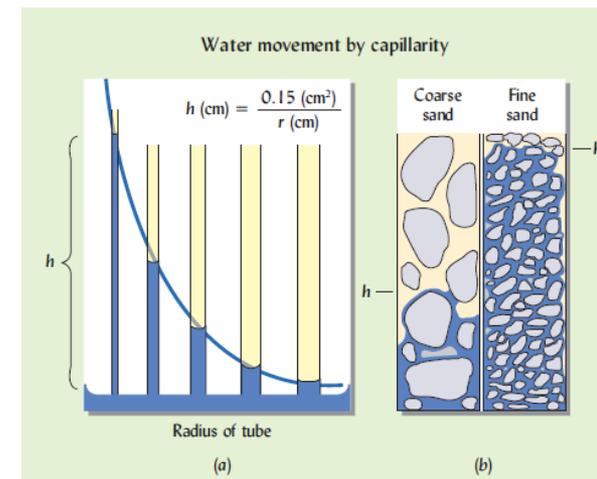
PROPIEDADES DEL AGUA- TENSIÓN SUPERFICIAL-CAPILARIDAD

- La **tensión superficial** es debido a la mayor cohesión que existe entre las moléculas de agua respecto con el aire alrededor. Agua tiene alta tensión.
- La tensión superficial + adhesión al sólido genera el fenómeno de **Capilaridad**.
- El ascenso capilar en la realidad es menor al observado en laboratorio (tubos) debido a la **NO uniformidad de los capilares** y la existencia de aire atrapado.
- Mayor ascenso se da en arcillas limosas aunque le lleva más tiempo por fuerzas de fricción.
- Altura de ascenso es inversamente proporcional al diámetro y directamente proporcional a la tensión superficial

$$h = \frac{2T}{r\rho g}$$

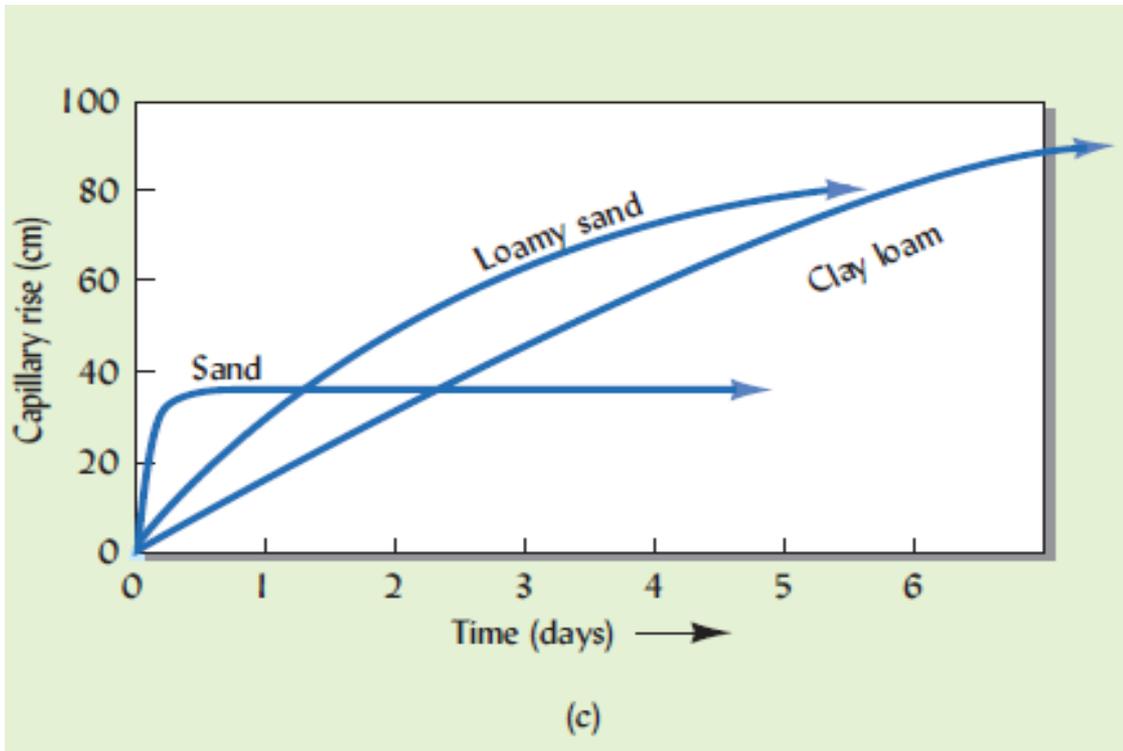
T: tensión superficial
r: radio del tubo
 ρ : densidad del líquido
g: fuerza de gravedad

Para el agua $h \text{ (cm)} = \frac{0,15 \text{ (cm}^2\text{)}}{r \text{ (cm)}}$
(T= 20°C)

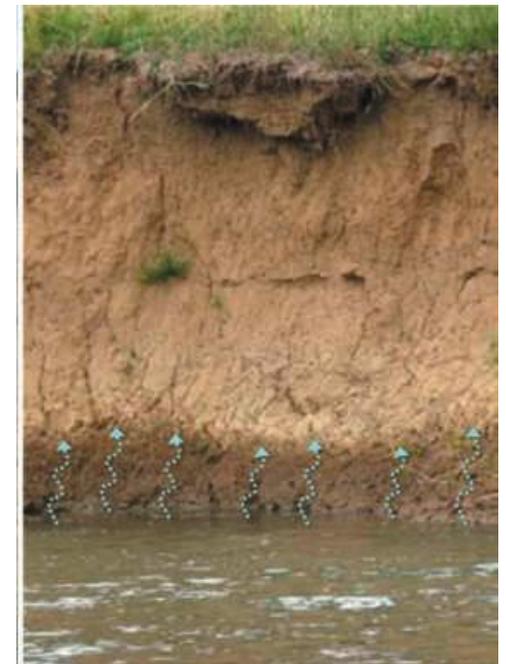


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

PROPIEDADES DEL AGUA-TENSIÓN SUPEFICIAL-CAPILARIDAD



Extraído de Weil y Brady (2017)



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO

- Sólo se evalúa la energía potencial
- En suelos húmedos las partículas de agua tienen más libertad de movimiento
- En suelo seco están más retenidas a las partículas y con menor energía de movimiento



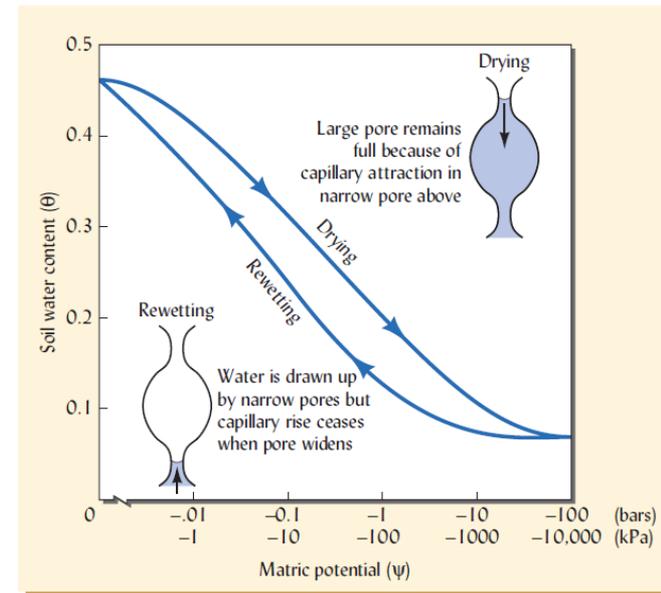
El agua se mueve de más húmedo a más seco

- Potencial del agua se mide como diferencia respecto al agua (Ψ_t)

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_h \text{ (Pa)}$$

Donde:

- Ψ_g es la potencial gravitacional
- Ψ_m es la potencial matricial (unión a las partículas) siempre (-)
- Ψ_o (osmótica, se debe a sustancias disueltas en el agua, + concentrada, menor potencial)
- Ψ_h hidrostática (siempre +)

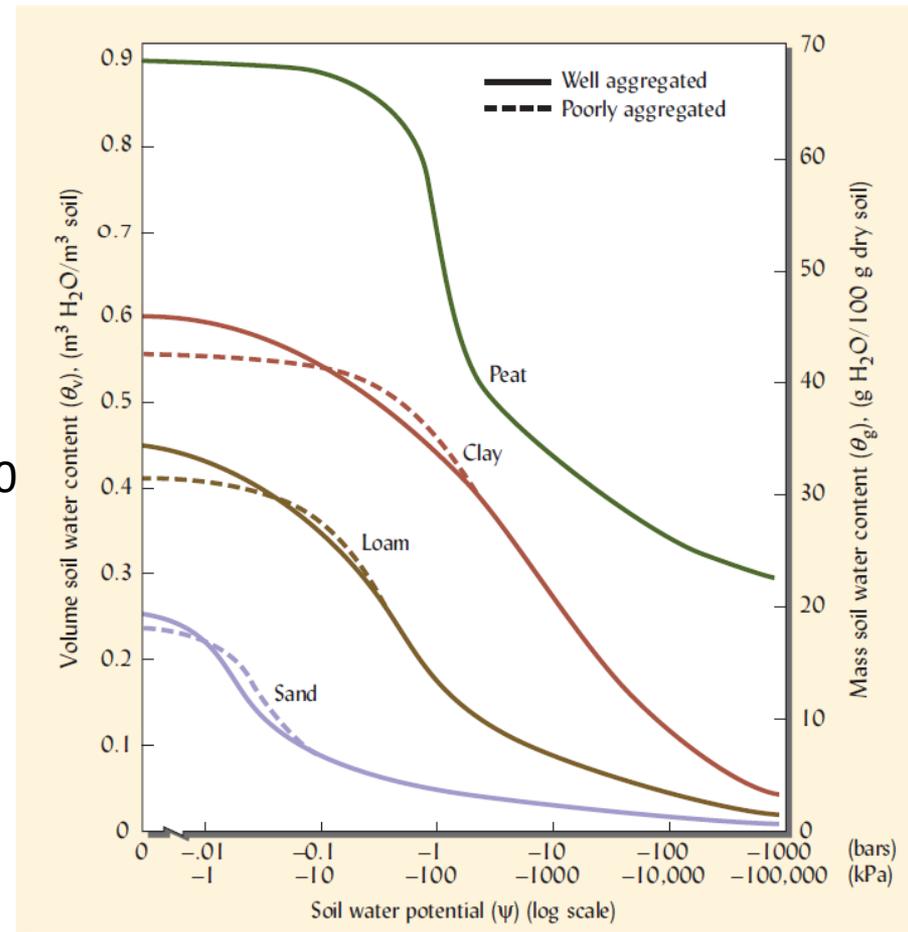


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA Y CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

Importancia de medir:

- **Cantidad de agua** → Indica la significancia
- **Potencial del agua** → Indica la capacidad de movimiento
- En la curva se observa que las arcillas retienen + Agua al mismo Potencial
- Sin embargo el agua es retenida con mas fuerza
- La **estructura del suelo** define la curva entre 0 y -100 Kpa
- La **textura del suelo** define el resto de la curva



Extraído de Weil y Brady (2017)

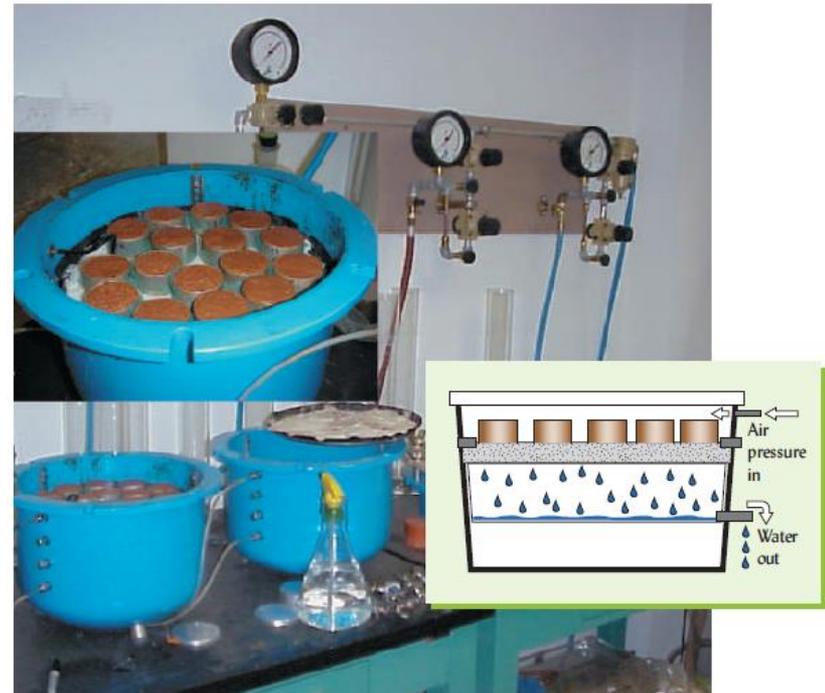
MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO-TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Construcción Curva Tensión-Humedad:

Olla de Richards o Membrana de Presión

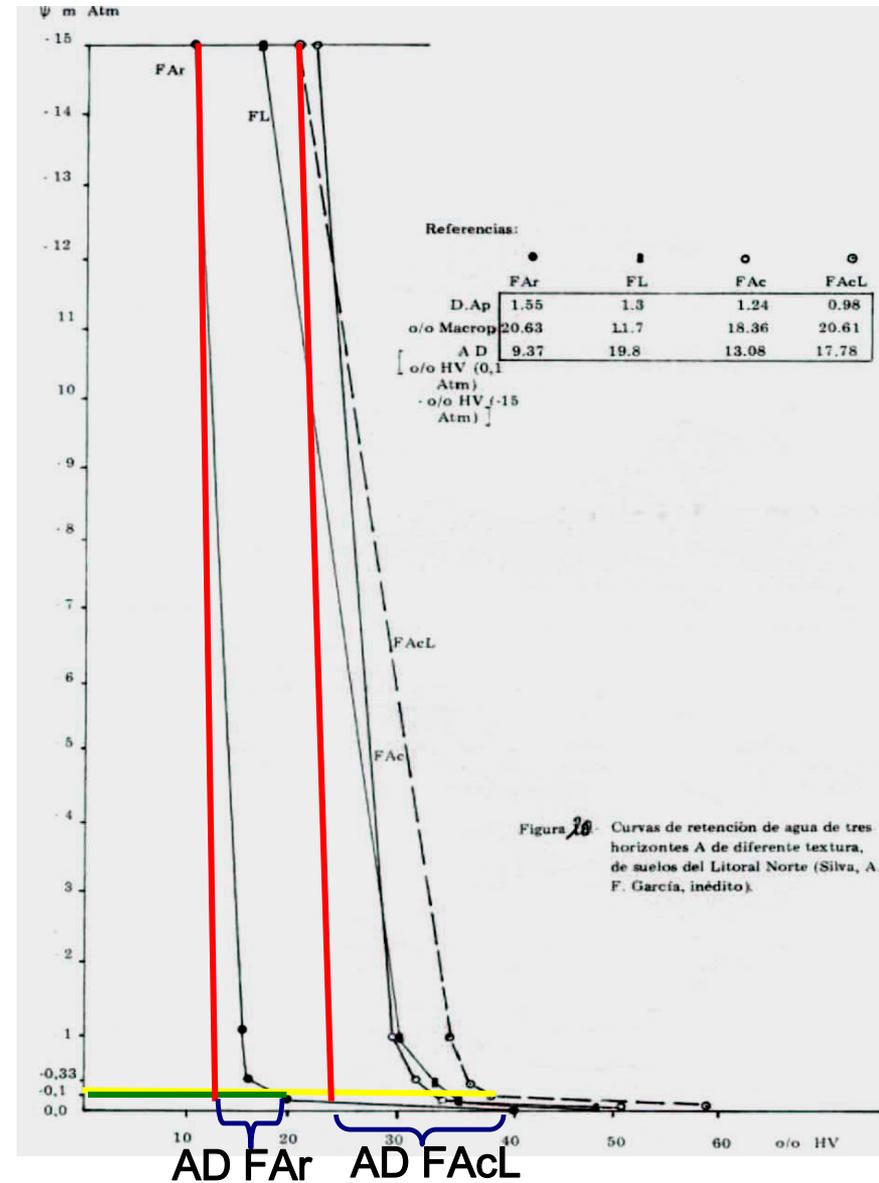
- Permite llevar hasta -1500 KPa
- Se aplica presión y luego se mide humedad gravimétrica
- Permite construir las curvas características



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO

Curvas de retención de agua de horizontes A de diferente textura de suelos del Litoral Norte (Silva, A., García, F. sin publicar)

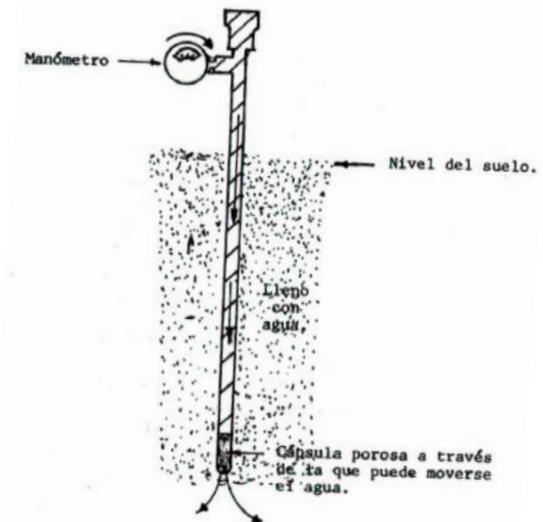


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO-TÉCNICAS DE MEDICIÓN

TENSIÓMETROS

- Mide la tenacidad con la que el agua es adherida a las partículas. Es una medida de Ψ_m
- Consiste en un tubo de plástico con una cerámica porosa en la punta abajo y un sello hermético arriba. El agua se moverá de mayor potencial a menor potencial.
- Funcionan entre 0 y -85 Kpa. Cerca de CC.
- Usado en sistema de riego

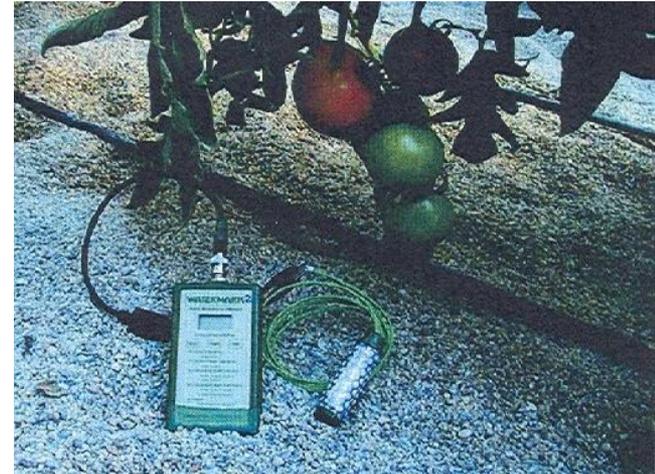


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

ENERGÍA DEL AGUA EN EL SUELO-TÉCNICAS DE MEDICIÓN

BLOQUES DE YESO DE RESISTENCIA ELÉCTRICA

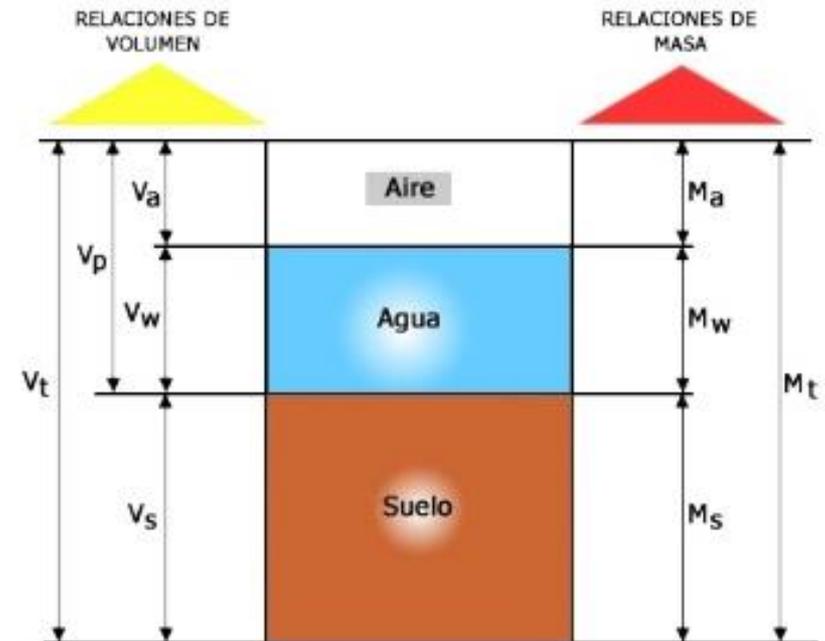
- Bloques de yeso que absorben agua.
- Mide la resistencia al pasaje de la corriente eléctrica
- Se debe calibrar para cada suelo
- Los bloques de yeso se rompen por lo que solo duran 1 temporada de riego aproximadamente.



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

- **Contenido en peso (HP)**: Masa de agua en un peso (1 kg) de suelo seco.
- **Contenido Volumétrico (HV)**: Volumen de agua en un volumen (1 m³) de suelo seco.
- **Altura de agua**: Lámina en mm

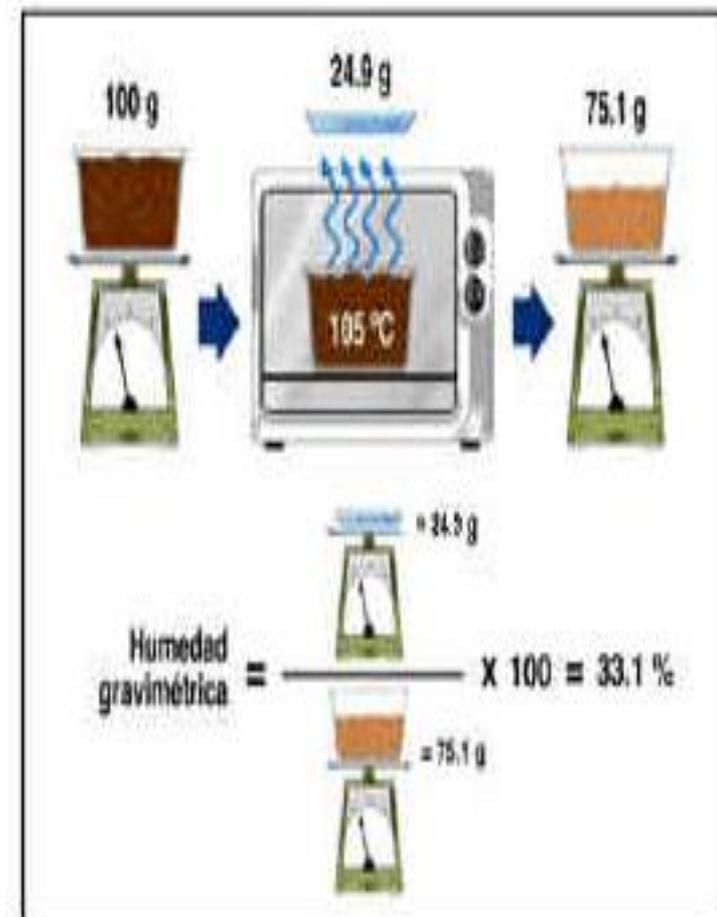


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

Contenido en Peso (HP)

$$\text{HP}(\%) = \frac{\text{Masa de agua}(\text{Kg})}{\text{Masa de suelo seco}(\text{Kg})} * 100$$

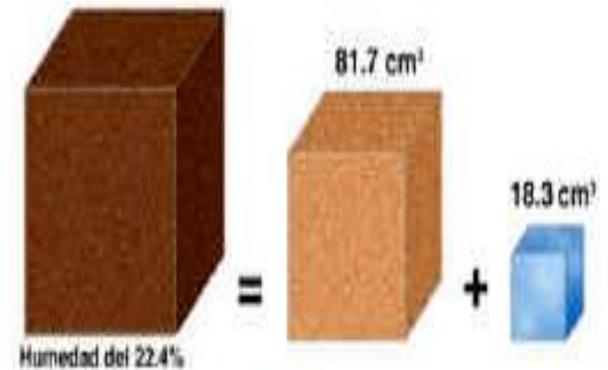


MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

Contenido Volumétrico (Hv)

$$HV(\%) = \frac{\text{Volumen de agua (m}^3\text{)}}{\text{Volumen de suelo seco (m}^3\text{)}} *$$



A diagram showing the calculation of volumetric moisture content. It features a light brown rectangular block labeled "81.7 cm³" at the bottom and a blue rectangular block labeled "18.3 cm³" above it. A horizontal line is drawn between the two blocks, with an equals sign to the left and "X 100 = 22.4 %" to the right. The text "Humedad volumétrica" is written to the left of the equals sign.

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

Relación entre HV y HP

$$HV = \frac{\text{Volumen de agua}}{\text{Volumen de suelo}} = \frac{\frac{kg\text{Agua}}{\rho\text{Agua}}}{\frac{kg\text{Suelo}}{\rho\text{Suelo}}} = \frac{kg\text{Agua}}{kg\text{ Suelo}} * \frac{\rho\text{Suelo}}{\rho\text{Agua}} = HP * DAp$$

=HP =DAp
=1 g/cm³

$$HV = HP * DAp_{\text{suelo}}$$

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

Altura de agua en mm

- Permite calcular la cantidad de agua necesaria para el riego y/o la profundidad que alcanza en el perfil del suelo una determinada cantidad de agua
- Es equivalente al contenido porcentual volumétrico para 10 cm
- Para una profundidad diferente:

$$\text{mm} = \text{HV}(\%) * \frac{\text{Espesor (cm)}}{10 \text{ cm}}$$

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO-Formas de Expresión

Ejemplo:

Un suelo presenta una profundidad de 32 cm, una $D_{ap}=1.26 \text{ Mg/m}^3$ y un $HP(\%)=25$. Calcule el contenido total de agua en mm

Solución:

$$HV(\%) = HP(\%) * D_{ap} = 1.26 * 0.25 = 31.5\%$$

$$L(mm) = 31.5mm * \frac{0.32m}{0.1m} = \mathbf{100.8mm}$$

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Valores de contenido de agua en el suelo que se toman como parámetros para caracterizar los diferentes horizontes del suelo:

- **Máxima capacidad de retención**
- **Agua gravitacional (MCR-CC). Importante para transporte contaminantes**
- **Capacidad de campo (CC)**
- **Punto de Marchitez Permanente (PMP)**
- **$AD=CC-PMP$**

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Máxima Capacidad de Retención

- Se da en suelo saturado
- Potencial es aproximadamente 0
- Se mantiene poco tiempo
- Agua gravitacional
- Llena los macroporos

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Capacidad de Campo

Se define como el mayor contenido de agua disponible para las plantas y a partir del cual el drenaje interno es despreciable.

- Luego de la lluvia (H_v disminuye por gradiente hidráulico)
- Se da de 1 a 3 días luego de la lluvia
- Salió el agua contenida en los macroporos
- Potencial está entre -10 a -30 KPa
- Se da flujo insaturado
- Llena los macroporos

Como determinamos CC?

- A campo: Saturar el suelo y medir el contenido de agua luego de 48 h.
- En laboratorio: Contenido de agua retenida a -10 KPa
- Estimada: Mediante ecuaciones que involucran textura y MO

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Punto de Marchitez Permanente

Se define como el contenido de agua en el que las mayorías de las plantas entran en estrés hídrico (una planta marchita no recupera su turgencia, aunque después se ponga en atmósfera saturada por 12 h).

- Agua contenida en los microporos
- Potencial a -1500 Kpa

Como determinamos PMP?

- En laboratorio: Contenido de agua retenida a -1500 KPa
- Estimada: Mediante ecuaciones que involucran textura y MO

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

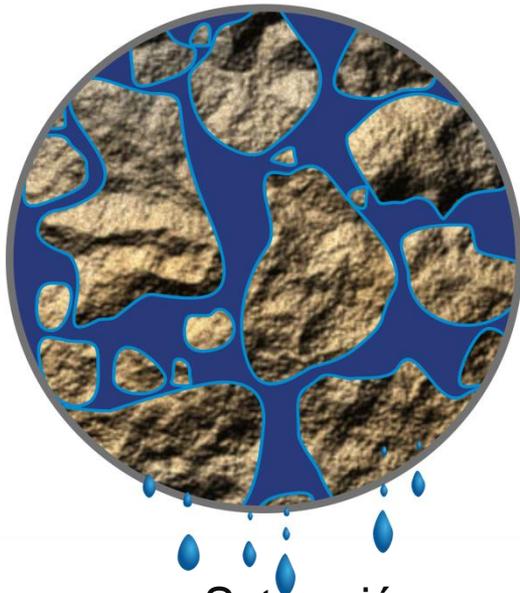
CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Agua Disponible

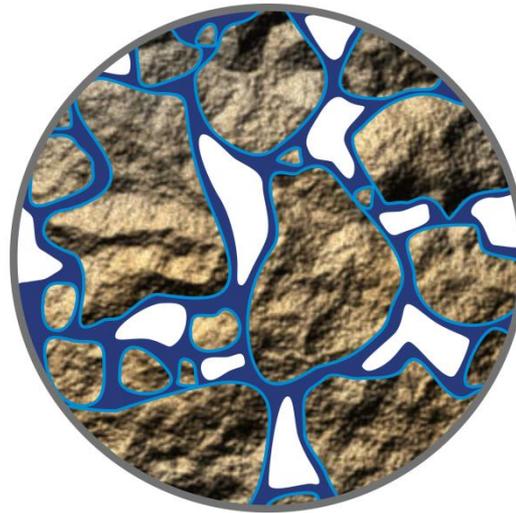
- Agua que puede retener el suelo con menos energía que la que pueden vencer las raíces, en el espesor de suelo explorado.
- Es la **máxima cantidad de agua que la planta** puede disponer para su absorción en un determinado perfil (en teoría, porque no toda es fácilmente disponible)
- **Útil para caracterizar los suelos, calcular láminas de riego o realizar balances hídricos**
- El agua por encima de CC no se considera AD

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

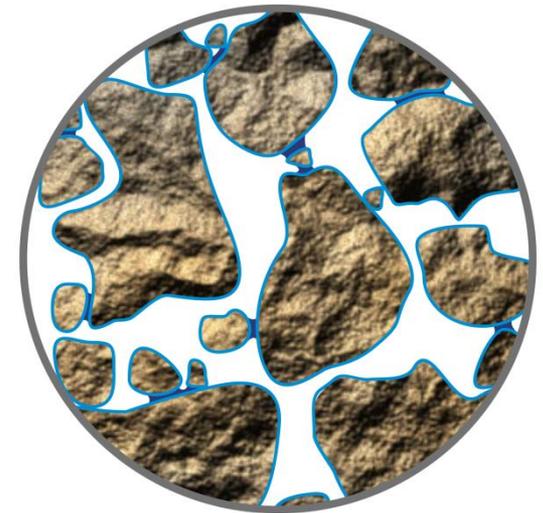
Ejemplo Franco Limoso



Saturación



Capacidad de Campo



Punto de Marchitez Permanente



$$AD = CC - CMP = 10 \text{ g}$$

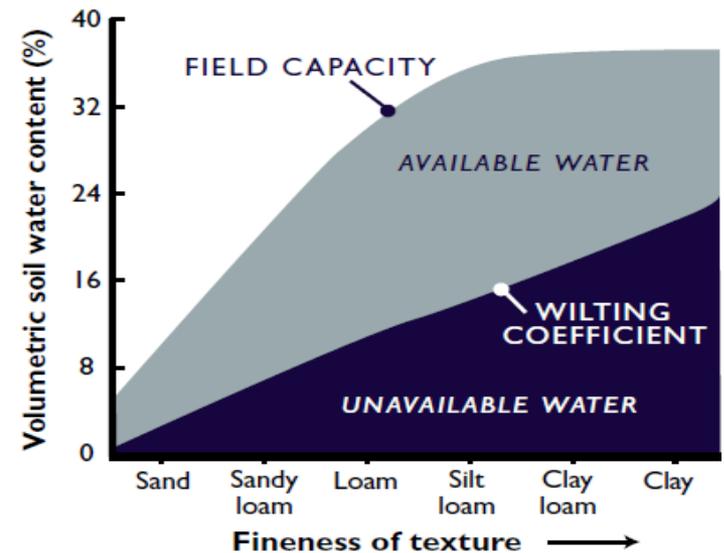
MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Agua Disponible y Textura

- Los contenidos de humedad a igual energía de retención son diferentes según la textura
- Los rangos de humedad del suelo entre 2 energías de retención (ej. -10 y -1500 KPa) difieren según la textura
- Importancia en cuanto a determinar la cantidad de agua aprovechable en el suelo desde un punto de vista agrícola.

<u>Clase Textural</u>	<u>Agua Disponible</u> (cm ³ .cm ³ suelo).100
• Franco Arenoso	5
• Franco	10
• Franco Limoso	15 – 20
• Franco Arcillo Limoso	20 – 25
• Arcillo Limoso	20 – 25
• Arcilloso	15 - 20



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO- Parámetros Hídricos

Estimación en función de textura y MO

Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. Silva et al., 1988

$$CC (A) = 21.977 - 0.681(AR\%) + 2.601(MO\%) + 0.127(AC\%)$$

$$CC (A \text{ arenosos}) = 8,658 + 2,571 (MO\%) + 0,296 (L\%)$$

$$PMP (A+B) = -4.671 + 0.498(AC\%) + 1.291(MO\%)$$

CC= Capacidad de campo a 10KPa, % en peso

PMP= Punto de marchitez permanente a 1500KPa, % en peso

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

MÉTODOS PARA MEDIR EL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO

DIRECTOS

- ✓ Método gravimétrico

INDIRECTOS

- ✓ Sonda de neutrones
- ✓ Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)
- ✓ Reflectometría en el dominio de la frecuencia (FDR)
- ✓ Sensoramiento Remoto



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- ↑ Método directo, buena precisión
- ↑ Método estándar con el que se calibran los otros métodos
- ↑ Medidas a cualquier profundidad y contenido de agua
- ↓ Resultado diferido en el tiempo. No sirve para monitoreo continuo
- ↓ Es un método destructivo, lento y laborioso



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

MÉTODO GRAVIMÉTRICO

- ✓ Se debe medir DAp
- ✓ Se basa en diferencia de peso.

$$\text{HP}(\%) = \frac{(\text{Ph}-\text{Ps})}{\text{Ps}} * 100$$

- Ph: peso del suelo húmedo
- Ps: peso del suelo seco

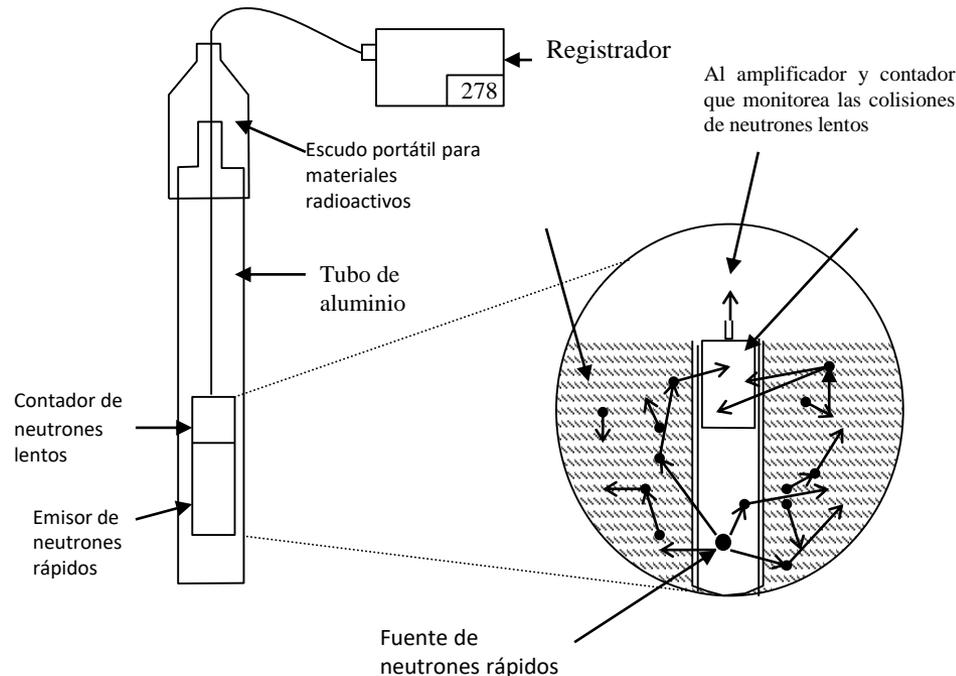
- ✓ Se debe secar la muestra a 105° C por 24 h o hasta que el peso sea constante. El peso perdido representa el contenido de agua.



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

SONDA DE NEUTRONES

Emite neutrones rápidos y cuando chocan con los átomos de hidrógeno que en su mayoría pertenecen al agua, disminuyen su velocidad y se dispersan y son registrados por el medidor de átomos lentos.



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

SONDA DE NEUTRONES

- ↑ Método indirecto
- ↑ Mas rápido, no destructivo
- ↑ Repeticiones periódicas (mismo lugar y profundidad)
- ↑ Mide un volumen de suelo

- ↓ Necesita calibración
- ↓ Se debe agregar un tubo de acceso en el suelo
- ↓ Aunque la radioactividad (Americio-Berilio) es muy baja, existe.
- ↓ Se pierden neutrones hacia la atmósfera en medidas de poca profundidad.
- ↓ Dificultad en suelos pedregosos

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO



Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)

Mide tiempo que le lleva a una onda electromagnética atravesar el suelo y el grado de disipación del pulso cuando choca con las partículas del suelo.

Determina la permitividad dieléctrica del medio

↑ Método Indirecto, no destructivo

↑ Permite mediciones puntuales o monitoreo continuo en el tiempo

↑ Requieren menos calibración por la frecuencia (1-3 GHz)

↓ Mas caro que los FDR

↓ Solo se mide un cilindro de unos 3 cm alrededor de los electrodos.

Unidades de medida	Porcentaje de contenido volumétrico de agua (VWC) Periodo (lectura de sensor sin procesar)	
Resolución	VWC: 0,1% Unidades VWC EC: 0,01 mS/cm Temperatura: 0,2 °F (0,1 °C)	
Precisión	VWC: ±3,0% de contenido volumétrico de agua con conductividad eléctrica < 2 mS/cm EC: ± 0,1 mS/cm Temperatura: ± 1,8 °F (± 1 °C)	
Rango	VWC: 0% a la saturación (<i>la saturación es normalmente de alrededor del 50% de agua volumétrica</i>) EC: 0 a 5 mS/cm Temperatura: -22 a 140 °F (-30 a 60 °C)	
Alimentación	4 baterías AA Las baterías de litio optimizan la duración de la batería	
Capacidad del registrador	50,000 medidas	
Pantalla	Pantalla LCD gráfica retroiluminada de alto contraste	
GPS	Precisión < 2,5m	
Peso	4,3 lbs. (1,9 kg)	
Dimensiones del cabezal de la sonda	2,4" x 1,4" (6cm x 3,5cm)	
Dimensiones de la barra	Longitud extendida: 38" (96,5cm) Longitud plegada: 23" (58,4cm) Ancho: 1,4" (3,5cm)	
Dimensiones disponibles de las varillas	Césped	1,5" (3,8cm)
	Corta	3" (7,6cm)
	Mediana	4,7" (12cm)
	Larga	7,9" (20cm)
	Diámetro:	0,2" (0,5cm)
	Separación:	1,2" (3cm)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR)-Conductividad Eléctrica

- ✓ También mide CE en volumen del suelo esté saturado o no.
- ✓ Existen dos mecanismos que gobiernan en el suelo a medida que el suelo se seca:
 - 1) Mayor concentración de sales y por lo tanto mayor CE
 - 2) Aumenta la tortuosidad en los electrodos por lo tanto disminuye CE

Domina el segundo proceso por lo tanto a medida que disminuye VWC también disminuye CE

- ✓ Por lo anterior mediciones en diferentes momentos, solo es comparable si se está en mismo contenido VWC. Se recomienda medir siempre a CC.
- ✓ Para evitar esto, se establece el Índice de Salinidad:

$$IS = \frac{CE \left(\frac{mS}{cm} \right)}{VWC} \quad Ejm: \frac{0.25 \text{ mS/cm}}{0.22}$$



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Permitividad Dieléctrica del suelo

- ✓ Habilidad o capacidad de un material de polarizarse como consecuencia de la aplicación de un Campo Eléctrico
- ✓ En realidad se mide la permitividad relativa

$$\epsilon_{rel} = \frac{\epsilon_{abs}}{\epsilon_0}$$

ϵ_0 permitividad del vacío ($8.884 \times 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$)

- ❖ ϵ agua=81
- ❖ ϵ partículas minerales=3-5
- ❖ ϵ agua=1

La permitividad está compuesta por una parte real e imaginaria:

$$\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$$

ϵ' constante dieléctrica que mide el contenido de agua en el suelo

ϵ'' constante que depende de la conductividad eléctrica del suelo σ y de la frecuencia del E aplicado

$$\epsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0}$$

En arcillas, suelos salinos y alto contenido de MO la dependencia de ϵ'' puede ser significativa para frecuencias bajas

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)

- ✓ Mide **permitividad del suelo** mediante la respuesta a cambios en la **capacitancia del suelo** y la relaciona con la humedad del suelo $\varepsilon(\theta)$
- ✓ Mayor contenido de humedad, mayor capacitancia generada



<https://www.metergroup.com/en/meter-environment/expertise-library/video-ech20-soil-sensor-installation>



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)

- ↑ Método Indirecto, no destructivo
- ↑ Permite mediciones continuas o monitoreo continuo en el tiempo
- ↑ Económicos
- ↓ Precisa calibración
- ↓ Afectado por la arcilla, sales y contenido de MO
- ↓ Afectado por grietas y pedregosidad

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR)

- ✓ El sensor EC 5 mide en 0.07 GHz
- ✓ El equipo viene calibrado con suelos hasta 8 dS/m
- ✓ En agua el valor no es de 100% sino entre 50 y 60%. Se debería usar ecuación cuadrática en vez de lineal. Suelos saturados en ese %.
- ✓ Ejemplo de calibración para un suelo mineral:

$$\theta = 8.5 * 10^{-4} * RAW - 0.48$$

RAW es la respuesta del sensor con 3V de excitación.

IMPORTANTE: Si se cambia el V de excitación, cambia la ecuación de calibración!!

Si se cambia de logger, cambia la ecuación.

2.1 Specifications

Measurement Time: 10 ms (milliseconds)

Accuracy: at least 0.03 m³/m³ typical soils, up to 8 dS/m
With soil-specific calibration: ±0.02 m³/m³ (±2%)

Resolution: 0.001 m³/m³ VWC in mineral soils, 0.25% in growing media

Power Requirements: 2.5 VDC to 3.6 VDC @ 10 mA

Output: 10 to 40% of excitation voltage (250 to 1,000 mV at 2,500 mV excitation)

Operating Environment: -40 to 50 °C¹

Range of Measurement: 0 to 100%

Sensor dimensions: 8.9 cm × 1.8 cm × 0.7 cm

Connector Types: 3.5 mm (stereo) plug or stripped & tinned lead wires (Pigtail)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Calibración

- ✓ La mayoría de los equipos vienen con calibración para ciertos tipos de suelos pero siempre es aconsejable realizar calibración para el suelo en consideración.
- ✓ TDR con período y FDR con frecuencia
- ✓ Calibración inicial frecuencia normalizada:

$$SF = \frac{SF_a - SF_s}{SF_a - SF_w}$$

- SF_a aire
- SF_s suelo
- SF_w agua

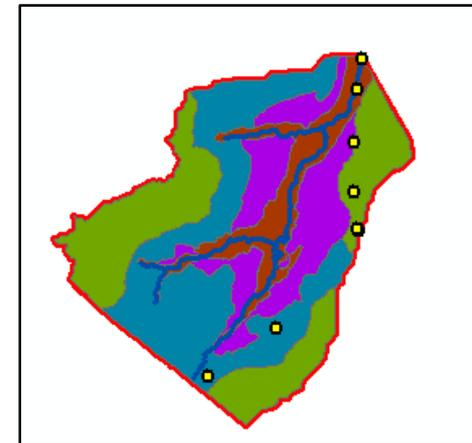
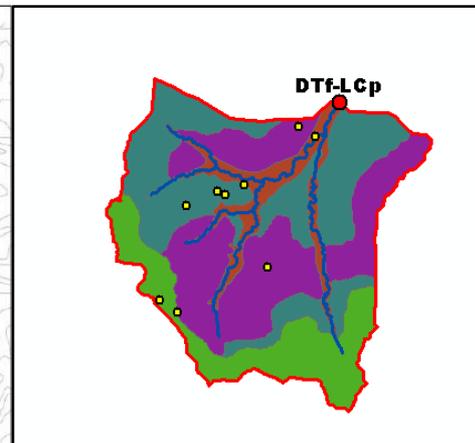
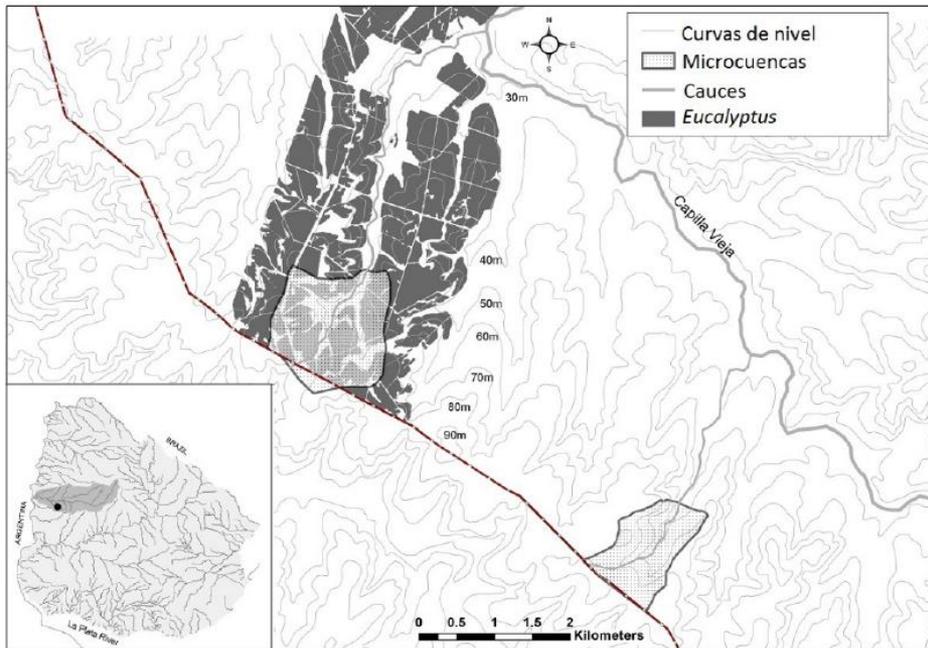
$$\theta = \frac{(SF-c)^{1/b}}{a} \quad a,b,c \text{ parámetros de calibración}$$

- ✓ Curvas de calibración:
 - ❖ FDR: Morgan 1999, Leib 2003, Fores 2004, Silva 2007
 - ❖ TDR: Tommaselli 2001, Silva 2005, Souza 2006

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

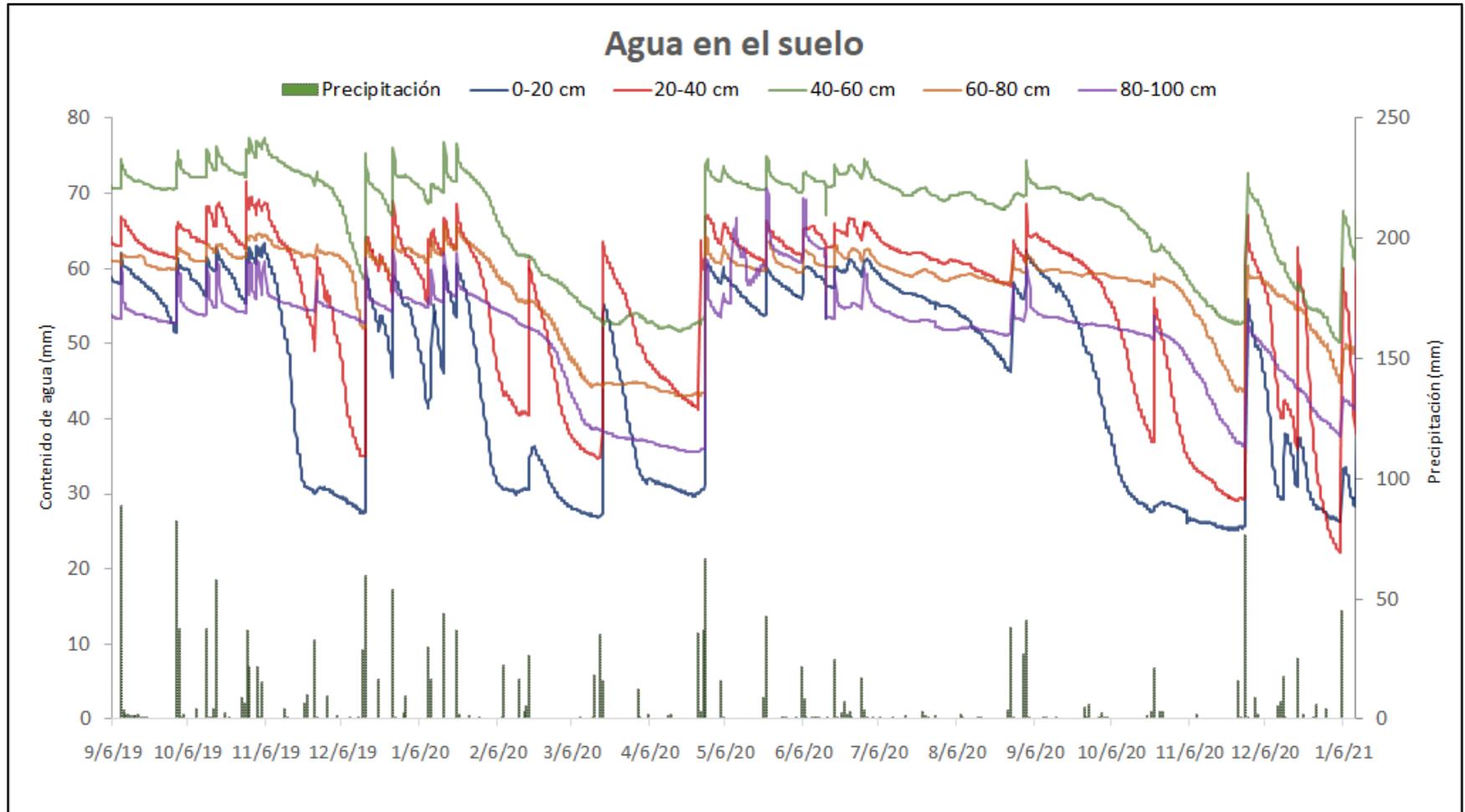
Ejemplo Monitoreo y Calibración en Microcuencas Experimentales

Monitoreo continuo en dos microcuencas experimentales bajo diferentes usos de suelos (Pasturas y Forestal)



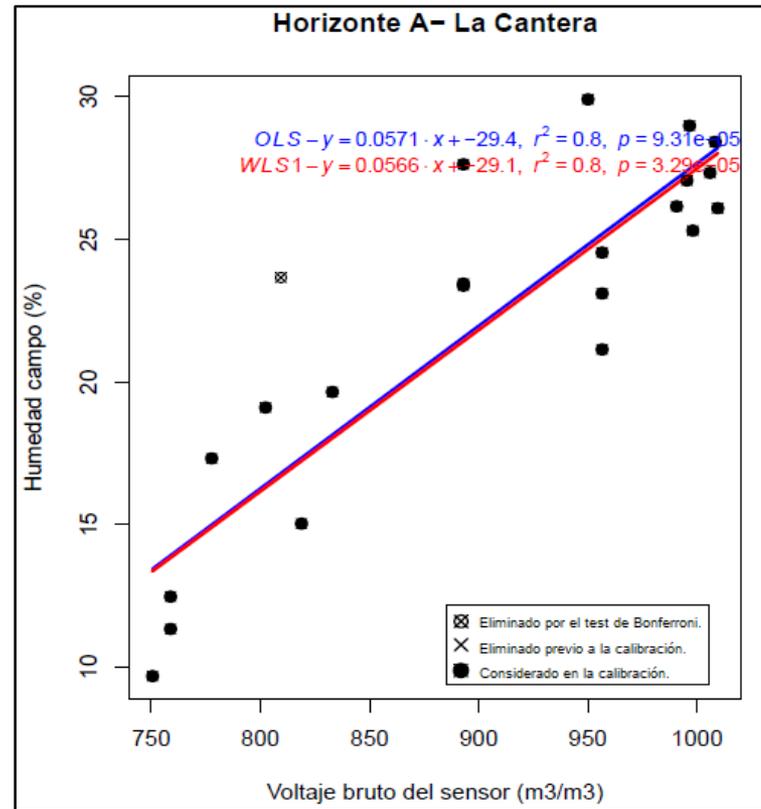
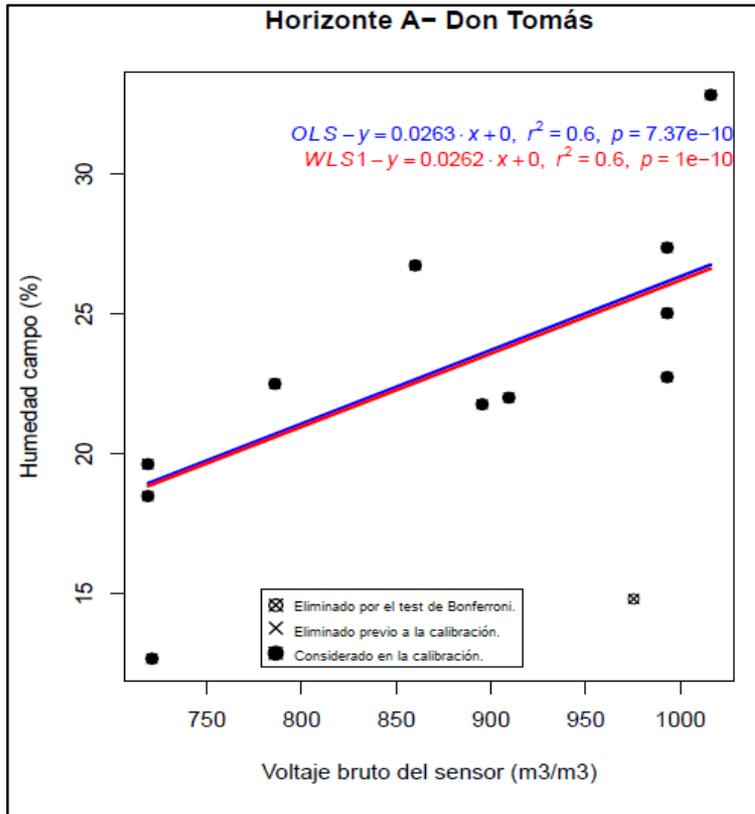
MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Ejemplo Monitoreo y Calibración en Microcuencas Experimentales



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

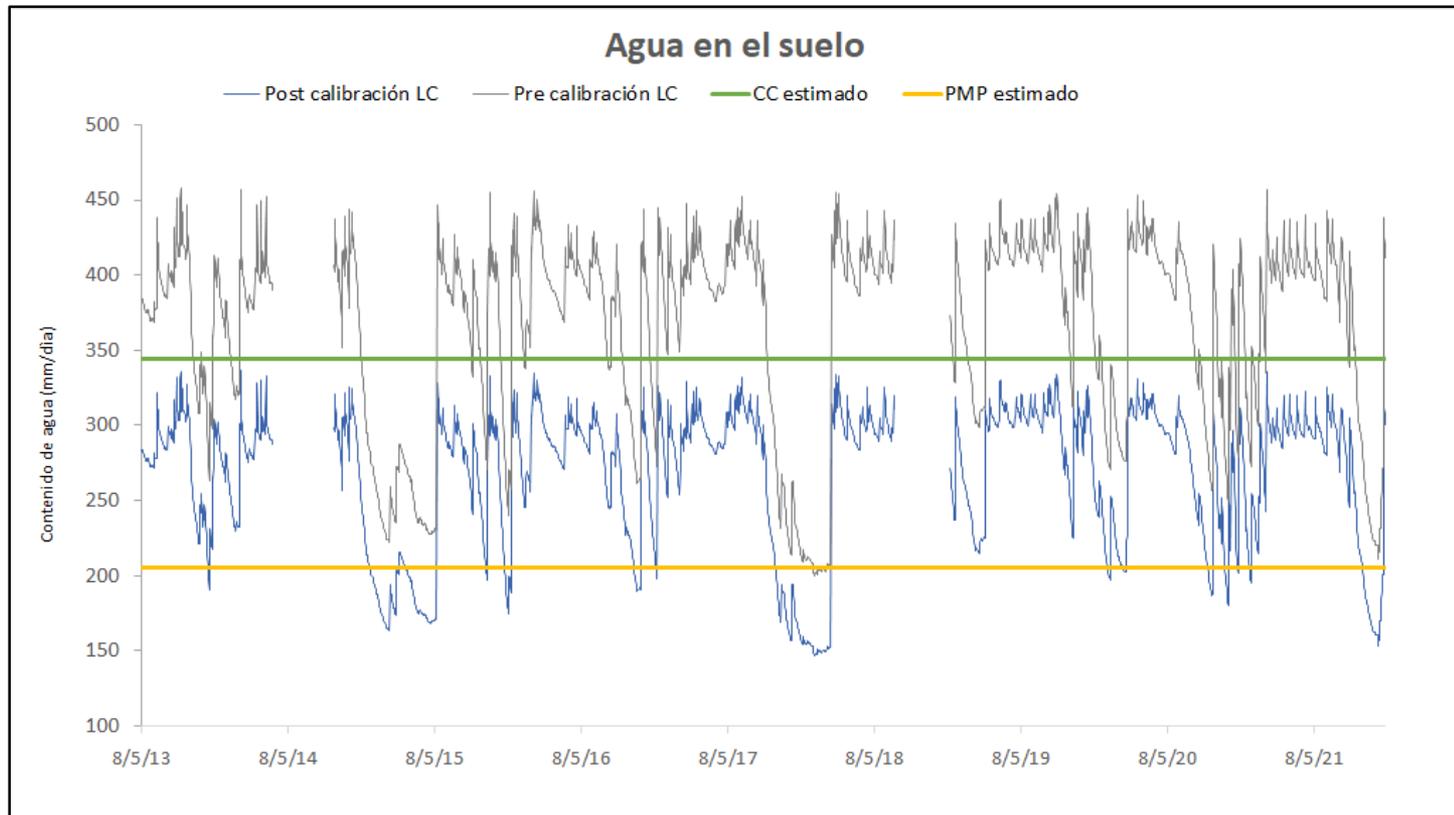
Ejemplo Monitoreo y Calibración en Microcuencas Experimentales



MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Ejemplo Monitoreo y Calibración en Microcuencas Experimentales

- ❑ Intención Inicial: Calibración Contenido volumétrico de humedad por profundidad pero por pocos datos, se optó por horizonte.
- ❑ Se calibró con el **dato de frecuencia** y no con el contenido volumétrico.



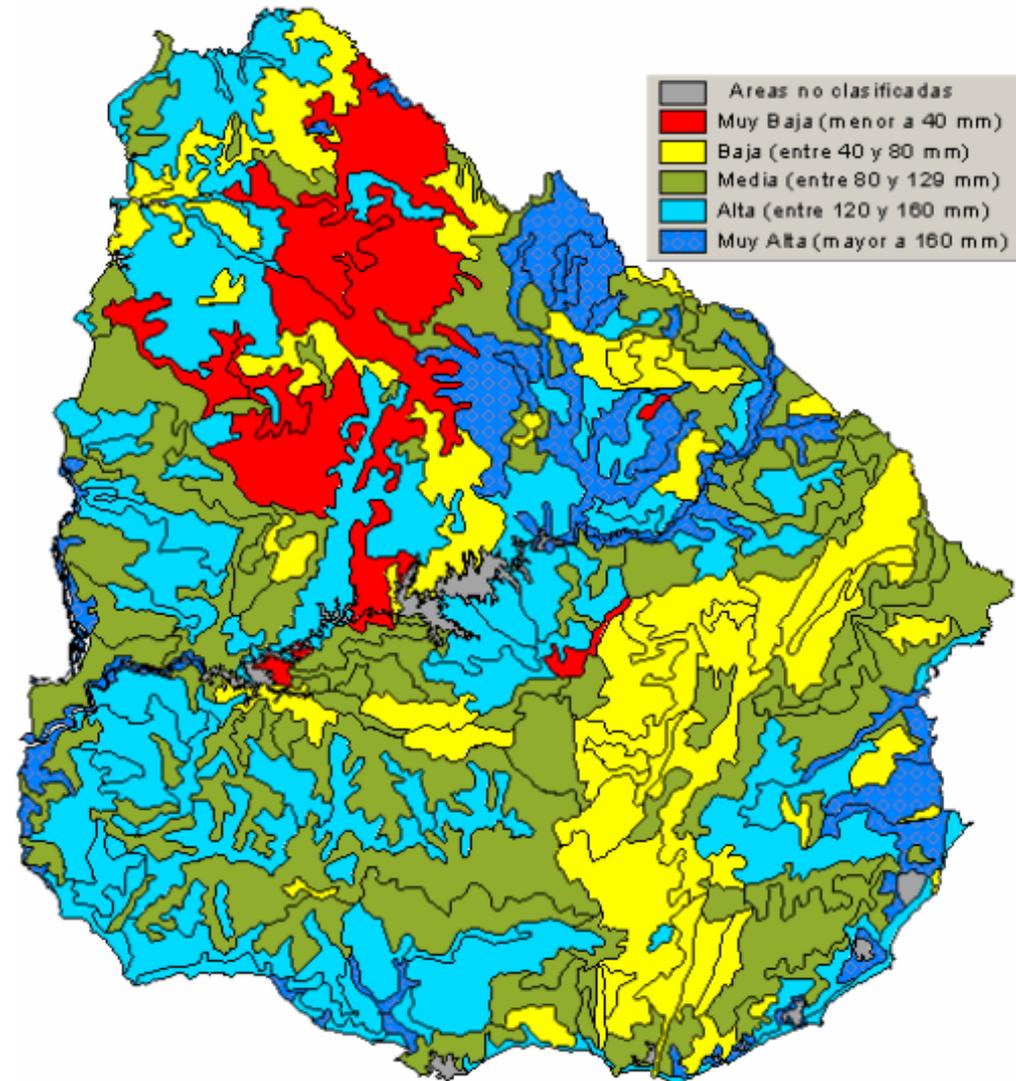
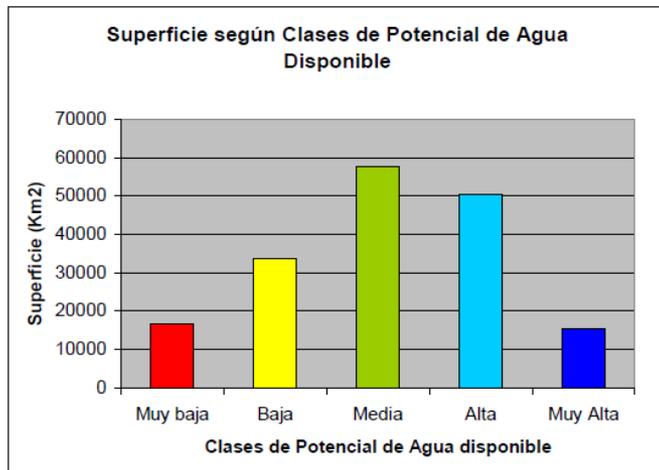
MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Contenido de Agua a campo según textura

Agua disponible del suelo	Palpamiento o apariencia del suelo		
	Textura arenosa	Textura media	Textura arcillosa
0 a 25 %	Seco, suelto, fluye entre los dedos	Seco, polvoroso, en ocasiones ligeramente costroso, pero fácilmente reducible a polvo	Duro, desecado, agrietado, en ocasiones con granos sueltos a flor de superficie
25 a 50 %	Parece seco, no se forma bola con la presión	Tiende a desmoronarse pero se mantiene compacto con la presión	Algo moldeable, forma bola con la presión
50 a 75 %	No se forma bola con la presión o tiende a formar bola, pero rara vez se mantiene compacta	Forma bola un tanto plástica y en ocasiones puede alisarse ligeramente con la presión	Forma bola, brota entre los dedos al apretar
75 % hasta capacidad máxima (100%)	Tiende a aglutinarse o forma bola de poca consistencia, se desmenuza fácilmente y nunca queda lisa	Forma bola y es muy moldeable; fácilmente se alisa siempre que tenga un porcentaje elevado de arcilla	Brota fácilmente entre los dedos; parece aceitosa al tacto
A capacidad máxima (100 %)	Al comprimir, no brotan gotas de agua en la superficie de la muestra pero sí queda en la mano el contorno húmedo de la bola	Al comprimir no brotan gotas de agua en la superficie de la muestra pero sí queda en la mano el contorno húmedo de la bola	Al comprimir no brotan gotas de agua en la superficie de la muestra pero sí queda en la mano el contorno húmedo de la bola.

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

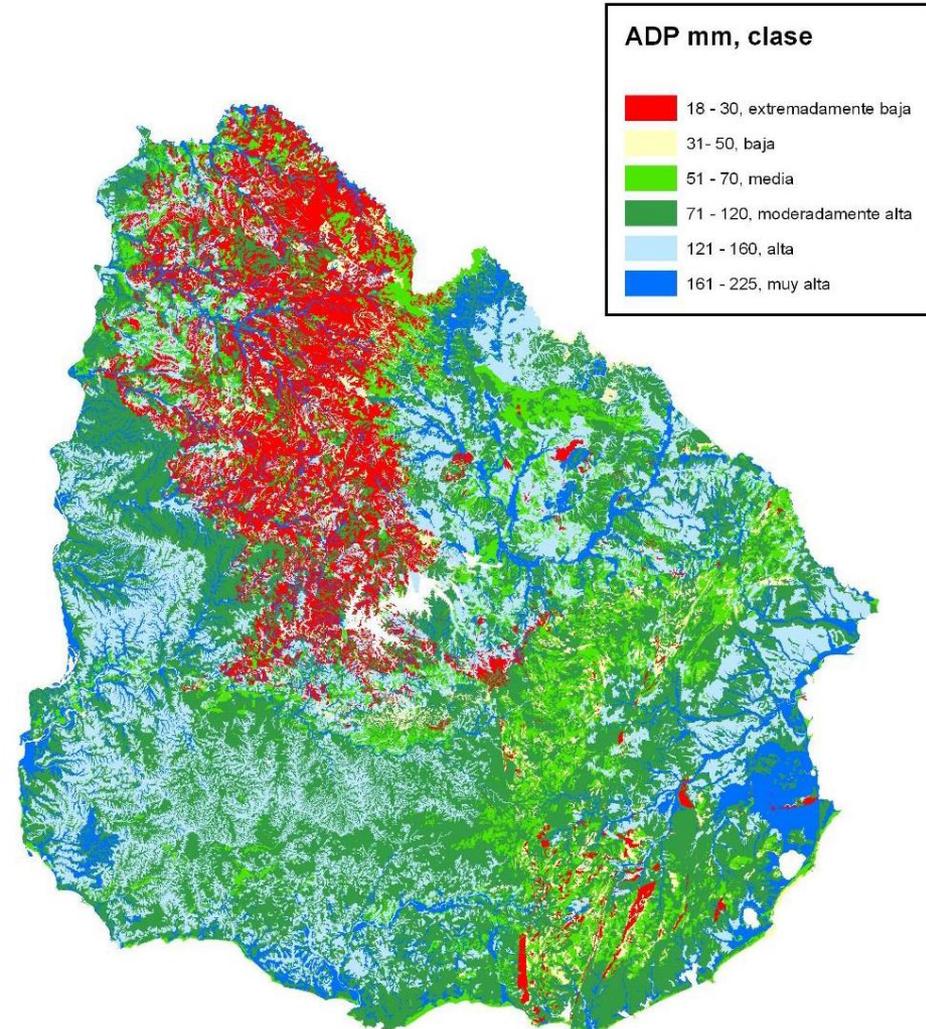
AD de las Tierras de Uruguay



Extraído de Molfino y Califra (2001)

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

AD de las Tierras de Uruguay



Fuente Estimación de Agua Disponible en los Grupos Coneat. Año 2009. INIA-MGAP

MEDICIÓN DE AGUA EN EL SUELO

Bibliografía

- Daniels, W. L. (2016). *The Nature and Properties of Soils*, Ray R. Weil and Nyle C. Brady. Pearson Press, Upper Saddle River NJ, 2017. 1086 p. 164.80.ISBN-10:0-13-325448-8;ISBN-13:978-0-13-325448-8.AlsoavailableaseTextfor 67.99.
- Hillel, D. (1998) *Environmental Soil Physics*. Cap. 1, 6, 7, 8, 14 y 16.
- Hillel, D. (1982) *Introduction to Soil Physics*. Cap. 2, 5, 6, 7, 12 y 13.
- Molfino, J. *Estimación del agua disponible en los grupos CONEAT – Metodología empleada (2009)*. MGAP-DGRNR-DSA. <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/publicaciones/estimacion-agua-disponible-grupos-coneat-metodologia-empleada>
- Molfino, J.; Califra, A. (2001) *Agua disponible de las tierras del Uruguay*. MGAP-DGRNR-DSA
<http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/111219220807174344.pdf>
- Silva, A., Ponce de León, J., García, F., & Durán, A. (1988). Aspectos metodológicos en la determinación de la capacidad de retener agua de los suelos del Uruguay. *Boletín de Investigación*, 1988 (10): 20 p.
- Topp, G. C., Parkin, G. W., Ferré, T. P., Carter, M. R., & Gregorich, E. G. (2008). Soil water content. *Soil sampling and methods of analysis*, 939-962.