

Metodología de muestreo y determinación de agua del suelo

Información para Extensión en Línea N°

29



INTA Ediciones

Colección
DIVULGACIÓN

ISSN 2250-8511 - en línea N° 28

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria
Estación Experimental Agropecuaria Marcos Juárez
Ruta Pcial. N° 12 - Km 36 - CC 21
2580 Marcos Juárez - Córdoba - Tel. 03472 - 425001
eeamjuarez.cd@inta.gov.ar - inta.gov.ar



Secretaría
de Agroindustria



Ministerio de Producción y Trabajo
Presidencia de la Nación

Metodología de muestreo y determinación de agua del suelo

Gudelj, Olga; Arce, Juan; Gudelj, Vicente
INTA EEA Marcos Juárez
gudelj.olga@inta.gob.ar

Palabras clave: agua útil – muestreo - suelo

Introducción

El agua afecta directamente todas las funciones que el suelo desempeña en beneficio de las plantas, a través de su efecto sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. Según Andrade (2016), el agua es el principal factor limitante para los rendimientos de los cultivos a nivel global. En términos generales los cultivos extensivos tradicionales como el maíz o la soja requieren entre 400 y 700 mm de agua durante todo el ciclo de crecimiento, dependiendo de las condiciones ambientales que regulan la tasa de evapotranspiración, lo cual representa algo así como 4 a 7 millones de litros de agua por hectárea. Ese volumen de agua deberá ser extraído del suelo a través de las raíces de los cultivos, desde la siembra hasta la madurez fisiológica del cultivo (Gil, 2015). Este autor asemeja el suelo a un “silo de agua”, cuya capacidad de almacenaje está determinada por su textura (proporción de arcilla, limo y arena), por la profundidad que alcancen las raíces y por la posibilidad de reabastecer esa capacidad a través de la infiltración de las lluvias y/o riego. Distintos investigadores consideran que existe una relación entre la lámina de agua y la degradación y erosión de los suelos. La pérdida de profundidad efectiva del horizonte superficial en concordancia con pérdidas de materia orgánica provoca una disminución de la lámina de agua disponible para la absorción por los cultivos y en consecuencia una menor autonomía del suelo para soportar sequías estacionales (Marelli, 1989; Casas e Irurtia, 1995; Gil, 1997, citados por Micucci, 2003; Chagas et al., 1993). Estos problemas se vuelven críticos en el caso del cultivo de maíz, o en suelos someros con problemas de tosca (sudeste y sudoeste de la región pampeana) o con horizontes subsuperficiales fuertemente arcillosos (sector este de la pampa ondulada). También es un dato muy necesario a la hora de tomar decisiones relacionadas con el manejo agronómico como planificación de las rotaciones, factibilidad de respuestas a la fertilización entre otras. (Micucci et al., 2003).

Dada la importancia de la determinación del agua del suelo como herramienta necesaria para ajustar la toma de decisiones en el manejo de los sistemas agrícolas, en el presente informe se sintetizan conceptos relacionados al tema y se expone sobre la metodología de muestreo y formas de cálculos, al tiempo que se presentan resultados publicados por otros autores y resultados de mediciones locales referidas al almacenaje del agua del suelo.

Coeficientes hídricos: estados energéticos del agua edáfica

Al caracterizar el agua del suelo en función de la fuerza de retención ejercida por el mismo, se definen las constantes o coeficientes hídricos:

Capacidad de campo (CC)

La CC se define como la cantidad de agua que un suelo retiene contra la gravedad cuando se deja drenar libremente (Gaucher, 1971). El agua a CC es la que en su mayor parte queda en los microporos. El agua correspondiente a este estado de humedad del suelo será diferente de uno a otro suelo según varíe la textura y la estructura, y en un mismo suelo según la variación de la forma y las dimensiones de los poros. Ratto (2000), reporta que este coeficiente se obtiene “in situ” y la técnica consiste en, después de una lluvia adecuada o de regar copiosamente un área, tapar la superficie para evitar pérdidas por evaporación y dejar drenar por 2-3 días, con lo que se supone que el suelo llega al equilibrio. Por otra parte, Taboada & Micucci (2004), informan que existe una dificultad en saber cuándo el movimiento descendente del agua ha disminuido dado que muchos suelos, aún aquellos con textura gruesa, continúan drenando durante varias semanas, y por consiguiente, afirman que un medio práctico de evitar esta dificultad consiste en definir el contenido hídrico en CC en términos de succión mátrica, no existiendo un único valor de potencial mátrico para definir la CC. Así,

en muchos suelos se ha encontrado que 33 kPa (0,33 bares) es un valor aceptable, mientras que en otros 10 kPa parece más apropiado.

Humedad equivalente (HE)

La HE es un valor que trata de reflejar en laboratorio la máxima capacidad de retención en un suelo. Es por convención, la cantidad de agua que retiene una muestra de suelo cuando se la somete, previamente saturada, a una fuerza igual a 1000 veces la gravedad, lo que representa una fuerza equivalente a 0,3 atmósferas ó 0,03MPa (Ratto, 2000). El dato de HE se puede encontrar para una gran cantidad de series de suelo de la región pampeana en las cartas de suelo publicadas por INTA.

Punto de marchitez permanente (PMP)

Debido a las extracciones por parte de los vegetales y por la evaporación, la humedad disminuye. Si la desecación del suelo prosigue, el vegetal continúa transpirando, y vaciando una parte de su agua, las células pierden su turgencia y la planta se marchita. Si el suelo recibe en ese momento un aporte de agua, la planta puede volver a tomarla y sobrevivir; la humedad correspondiente define el punto de marchitez temporal. Por el contrario si la sequedad del suelo se intensifica, el vegetal acentúa su marchitamiento y muere. La humedad del suelo en este estado se llama PMP, característica que depende fundamentalmente de la textura y de la materia orgánica.

Del total de agua que puede almacenar un suelo, parte de esa cantidad no puede ser extraída por la planta, alcanzando ésta un nivel de stress hídrico que produce un marchitamiento permanente (Gil, 2015). Taboada & Micucci (2004) informan que se tomó un valor directo medido de potencial mátrico para definir al PMP, siendo el valor estándar 1,5 MPa (15 bares).

En el cuadro 1 se puede apreciar la variación de los valores de PMP con la variación de la textura del suelo. En el Anexo de este informe, se presentan algunos valores de PMP, para suelos del área de la EEA Marcos Juárez y para suelos del Centro-Sur de la Provincia de Santa Fe.

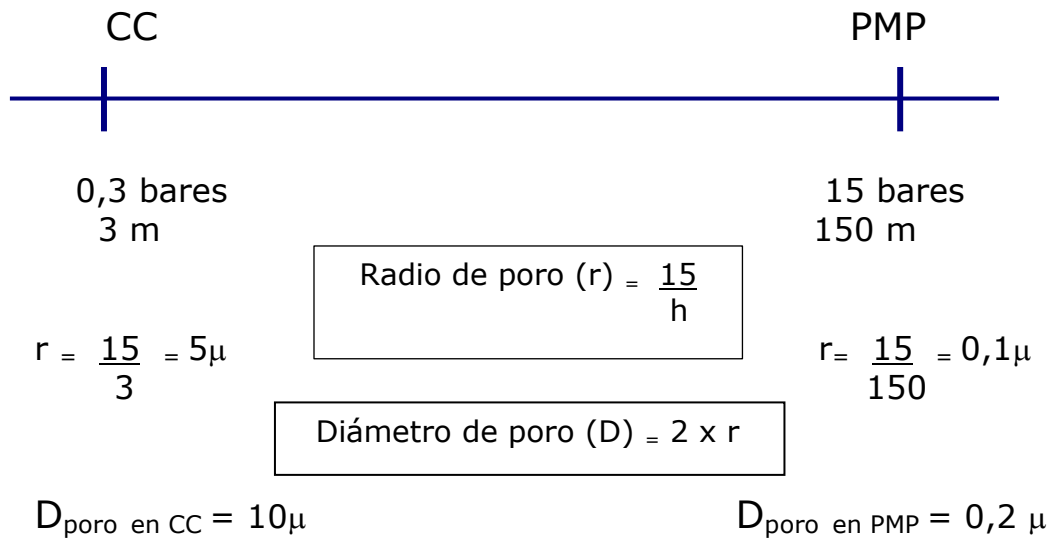
Cuadro 1. Valores de PMP según textura de suelo

Componente	Humedad (%)
Arena	2-5
Limo	8-10
Limo arcilloso	15
Turba	50

Fuente: Ratto, 2000.

Determinación

Para expresar la disponibilidad de agua para el cultivo en lámina de agua, primero hay que determinar los coeficientes hídricos: CC y PMP. Estos se consideran como límite superior e inferior del agua del suelo aprovechable por las plantas o agua útil. En el siguiente esquema se presentan estos límites y su relación con el tamaño de diámetros de poros del suelo (en micra, μ) y la tensión con la que está retenida el agua en bares o columna de agua expresada en metro, así como las equivalencias entre unidades de presión.



Poros entre 10 y 0,2 μ de diámetro = agua útil para el cultivo

$$1 \text{ bar} = 1 \text{ kg.cm}^{-2} = 1 \text{ atmósfera} = 1 \text{ columna de agua de } 10 \text{ m}$$

Considerando la ecuación de capilaridad*, la medida del radio de un poro se obtiene al hacer el cociente entre 15 (valor constante que surge de aplicar la ecuación de capilaridad) y la altura de la columna de agua correspondiente.

**Ecuación de capilaridad*

$$h = \frac{2 \sigma \cdot \cos \alpha}{\rho \cdot g \cdot r}$$

$$h = \frac{15}{r}$$

$$r = \frac{15}{h}$$

σ = tensión superficial del agua; ρ = densidad del líquido; g = constante de gravedad; α = ángulo de contacto

Según Gil (2015), con frecuencia y para simplificar el análisis, se considera erróneamente que el agua entre CC y PMP es igualmente disponible para las plantas en todo el intervalo, y que el crecimiento y la transpiración de las mismas no se ven afectados dentro de ese rango. Sin embargo, reporta este autor, es reconocido que se requiere más energía para extraer agua a medida que el suelo se seca y que el cultivo puede manifestar estrés hídrico mucho antes de alcanzar el marchitamiento. Por ello, dentro del rango de agua útil se suele hablar de agua de fácil y de lenta disponibilidad para las plantas.

En el cuadro 2 se presentan los valores obtenidos de CC y PMP de mediciones realizadas en la EEA Marcos Juárez (suelo con textura franco limosa) en los distintos horizontes del perfil de suelo.

Cuadro 2. CC y PMP por espesor del perfil de suelo de la serie de suelo Marcos Juárez.

Profundidad (cm)	CC (%)	PMP (%)
0-20	31	13
20-60	28	17
60-100	25	15
100-150	24	12

I - Muestreo de suelo



Plan de muestreo

Antes de iniciar el trabajo de extracción de las muestras de suelo se debe considerar la realización de un plan de muestreo que debe contemplar los siguientes aspectos:

- Momento de muestreo
- Profundidad de medición
- Materiales necesarios
- Criterios para la toma de muestras
- Número de muestras a tomar
- Manejo de las muestras y tiempo de secado

▪ **Momento de muestreo**

El momento de realización del muestreo depende de cuál es el objetivo: si se necesita definir la siembra o fertilización de un cultivo, conocer la cantidad de agua útil al momento de la implantación es muy importante. Por ejemplo, en la zona del INTA Marcos Juárez (Sudeste de Córdoba) si se tiene menos de 100 mm de agua útil hasta 1,5 m de profundidad no es muy recomendable la implantación de trigo dado que los meses de invierno son de bajas precipitaciones, y se resentirá el crecimiento del cultivo. A la vez, si se dispone de una buena reserva de humedad, es más factible aumentar la dosis de fertilizante, principalmente nitrogenado en cultivos gramíneos, y conseguir una buena eficiencia de uso del nitrógeno. En el caso de soja una buena reserva de humedad a la siembra permite la posibilidad de utilizar variedades de mayor potencial de rendimiento. La determinación de agua al momento de la siembra es vital para definir la implantación y manejo de un cultivo. Pero si se quiere conocer la eficiencia de uso de agua, es necesaria la determinación en el momento de siembra y también en el momento de madurez fisiológica del cultivo.

▪ **Profundidad de medición**

Las raíces de los principales cultivos extensivos tienen una gran capacidad exploratoria a través de todo el perfil del suelo, si bien la mayor densidad se da en los primeros centímetros del mismo. La profundidad máxima de enraizamiento para los distintos cultivos posee un rango muy amplio que va desde los 150 hasta los 300 cm, según revisión hecha por Borg y Grimes (1986) citado por Andriani (2000). Considerando el espesor de los horizontes por sus características texturales, profundidad efectiva y densidad de raíces, en general se mide la humedad del suelo hasta los 2 m de profundidad. Para la serie de suelo Marcos Juárez, suelo Argiudol típico, se estableció tomar las muestras en los siguientes espesores del perfil edáfico: 0-20 cm, 20-60 cm, 60-100 cm, 100-150 cm y 150-200 cm. De todos modos, si hubiere tosca o ascenso de la napa freática, se reduce la profundidad.

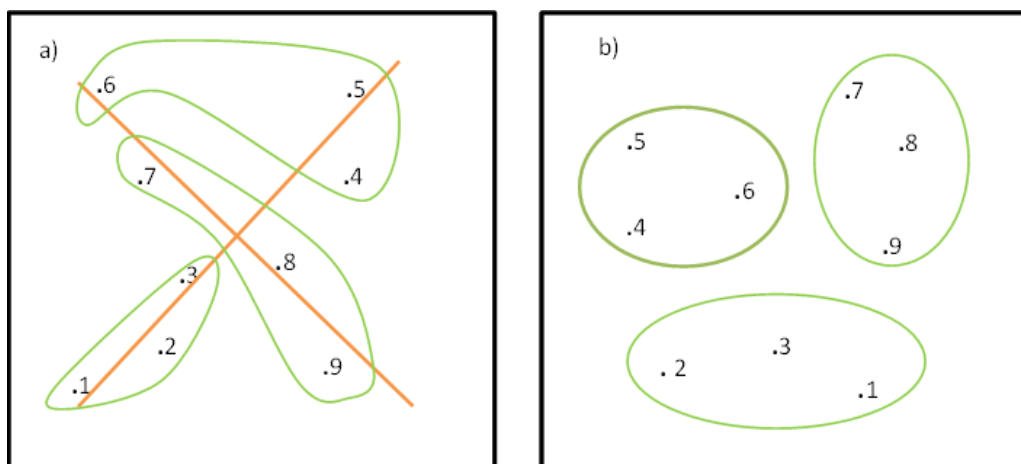
Materiales necesarios

- ✓ Barreno muestreador
- ✓ Tarros de aluminio con tapa numerados y con su tara. Dimensiones aproximadas: 8 cm de diámetro x 8 cm de altura (considerar la cantidad de tarros de acuerdo a los espesores a medir). También pueden utilizarse bolsas de polietileno.
- ✓ Regla graduada
- ✓ Planilla de registro y bolígrafo
- ✓ Balanza de precisión (0,1-0,05 g)
- ✓ Estufa estabilizada en 105°C.
- ✓ Elementos de protección personal (EPP): guantes, gorra, botas, protector solar, etc.

▪ Criterios para la toma de muestras

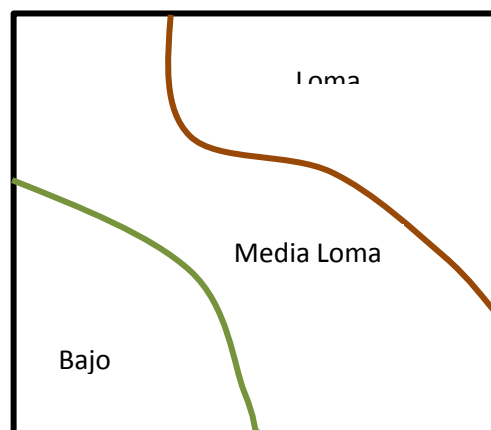
El sitio de muestreo debe ser representativo de la situación a estudiar. Si el lote es homogéneo, el muestreo se puede realizar recorriendo el lote en zigzag según dos diagonales que se cruzan (Fig. 1 a), o en zigzag al azar (Fig. 1b). En ambos casos se dejan alrededor de 50 m desde los bordes del terreno y se recogen tres muestras compuestas de tres sub-muestras cada una.

Figura 1. Esquemas de distintas formas de toma de muestras en un lote homogéneo.



Si en el lote se observan diferencias de relieve (lomas, medias lomas y partes bajas) (Fig. 2), se debe muestrear cada sitio como zonas homogéneas diferentes. De igual manera se debe proceder si en el lote se aprecian diferencias de vegetación y/o de color de suelo.

Figura 2. Esquema con diferenciación de zonas según relieve.



Número de muestras a tomar

Para una superficie de 30 ha, se extraen con el barreno 3 muestras compuestas de 3 submuestras. Así, las submuestras 1, 2 y 3 componen la muestra 1; las submuestras 4, 5 y 6 la muestra 2 y las submuestras 7, 8 y 9, la muestra 3. Para mayor superficie se aumenta el número de extracciones en forma proporcional (Novello *et al.*, 1994).

• Manejo de las muestras

Una vez que se extrajo la muestra con el barreno inmediatamente se coloca en el recipiente (tarro de aluminio), previamente numerado y con su tara, se tapa y se registra su identificación en la planilla. Si no se cuenta con los tarros indicados se pueden usar bolsas de polietileno, aunque en este caso luego se deberá trasvasar cada muestra a los tarros para poder colocar en estufa para su secado.

II - Cálculos

Se denomina humedad del suelo a la proporción de agua contenida en él. Es muy dinámica y depende del clima, de las plantas, de la profundidad del suelo y de las características y condiciones físicas del perfil. En determinado momento y profundidad es muy variable y depende de la ubicación en el terreno del punto en consideración (Forsythe, 1980). La heterogeneidad, en sentido horizontal y vertical, de la distribución del agua del suelo puede deberse a:

- Crecimiento desparejo de las plantas y la distribución de raíces.
- Tipo y distribución de la cobertura del suelo.
- Variaciones de estructura de suelo, contenido de materia orgánica y textura.
- Cambios en la densidad aparente, variación del volumen poroso y distribución de tamaño de poros.
- Diferencias en la velocidad de infiltración después de una lluvia.
- Irregularidad en la topografía de la superficie.

Humedad Gravimétrica (H)

Es la forma más básica de expresar el contenido hídrico del suelo y se define como la masa de agua (m_a) contenida en una masa de sólidos (m_s) del suelo. Se expresa en gramo agua/gramo suelo ($g \cdot g^{-1}$).

$$H = \frac{m_a}{m_s} \frac{g}{g}$$

La masa de suelo seco es la masa del suelo puesta en una estufa a una temperatura de 105°C hasta que pierda toda la masa de agua (aunque no el agua químicamente ligada), es decir, hasta peso constante. Para ello, y dependiendo de la cantidad de masa de suelo, la muestra debe mantenerse en estufa de 24 a 48 h seguidas.

La humedad de suelo porcentual se determina por diferencia de masa y se expresa en porcentaje (%).

Fórmula:
$$H (\%) = \frac{\text{masa suelo húmedo} - \text{masa suelo seco}}{\text{masa suelo seco}} \cdot 100$$

En forma práctica:

$$H (\%) = \frac{\text{peso suelo húmedo} - \text{peso suelo seco}}{\text{peso suelo seco} - \text{tara del tarro}} \cdot 100$$

Por ejemplo, si la humedad de un suelo es 25 %, significa que en 100 gramos del suelo que se secó había 25 gramos de agua.

Humedad volumétrica, (Θ)

La humedad volumétrica se obtiene de la relación entre el volumen de agua del suelo con el volumen total de suelo. Se expresa en $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$.

$$\Theta = \frac{V_a \text{ cm}^3}{V \text{ cm}^3}$$

La humedad volumétrica se puede conocer afectando al dato de humedad gravimétrica el cociente entre densidad aparente del suelo (DA) y densidad aparente del agua (D_{agua}).

$$\Theta = \frac{DA}{D_{\text{agua}}} \cdot H$$

Dónde: DA = densidad aparente del suelo ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)
D agua = densidad aparente del agua ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)
H = humedad gravimétrica ($\text{g}.\text{g}^{-1}$)

Como la D_{agua} se considera $1 \text{ g}.\text{cm}^{-3}$, entonces, se puede obtener la humedad volumétrica a través del producto entre la humedad gravimétrica y la DA del suelo

$$\Theta = DA \cdot H$$

La DA del suelo es la relación entre la masa (secada en estufa a 105°C) de las partículas del suelo y el volumen total que éstas ocupan, es decir, incluye el espacio poroso existente entre las partículas sólidas.

$$DA = \frac{\text{masa de sólidos}}{\text{volumen total}} = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Para la determinación de la DA se utiliza la metodología de cilindro de volumen conocido. En el cuadro 3 se expresan algunos valores de DA del suelo a diferentes texturas.

Cuadro 3. Densidad aparente (DA) según clase textural del suelo.

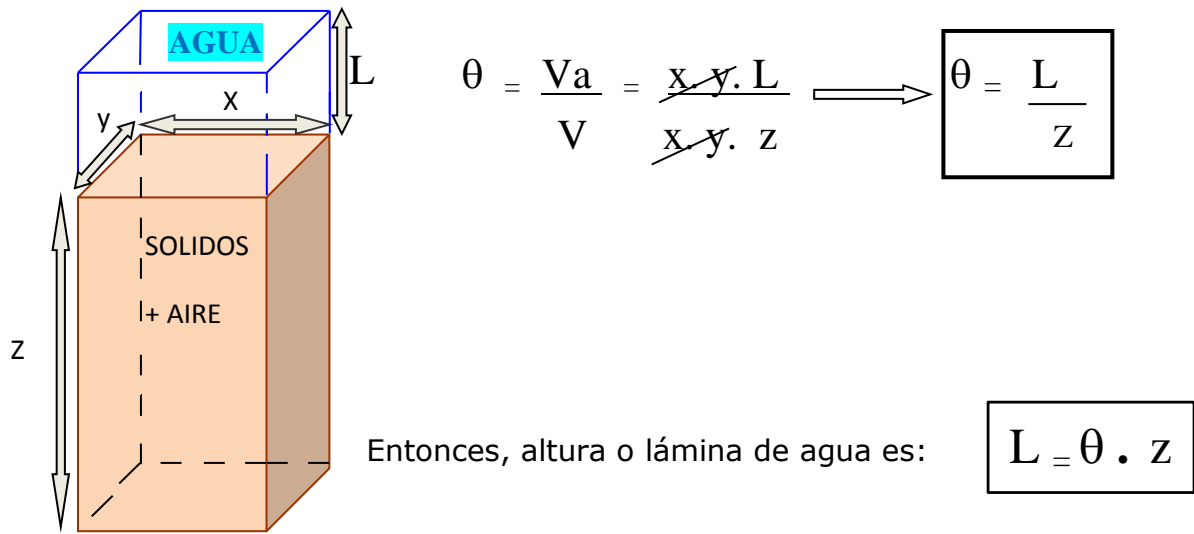
Clase Textural	DA ($\text{g}.\text{cm}^{-3}$)
Arenosa	1,50-1,80
Franco Arenoso	1,30-1,50
Franco Limoso	1,15-1,40
Franco arcillo limosa	1,15-1,30
Arcilla	1,05-1,20
Suelo orgánico	0,80-1,00

Fuente: Farias, E.N. 1994

Lámina de agua almacenada en el suelo

La humedad volumétrica se puede considerar también como la lámina de agua contenida en una unidad de profundidad de suelo. La unidad de medida más frecuente para expresar la lámina es el milímetro (mm), que equivale al volumen de 1 litro de agua distribuido en una superficie de 1 m^2 . Con el dato de lámina de agua se puede relacionar los milímetros de agua de lluvia caídos con los milímetros de agua consumidos en un período dado. En la figura 2 se describe la separación de la fracción líquida de un volumen de suelo de dimensiones xyz.

Figura 2. Esquema separación de la fracción líquida de un volumen de suelo de dimensiones x,y,z (Libardi, 1995).

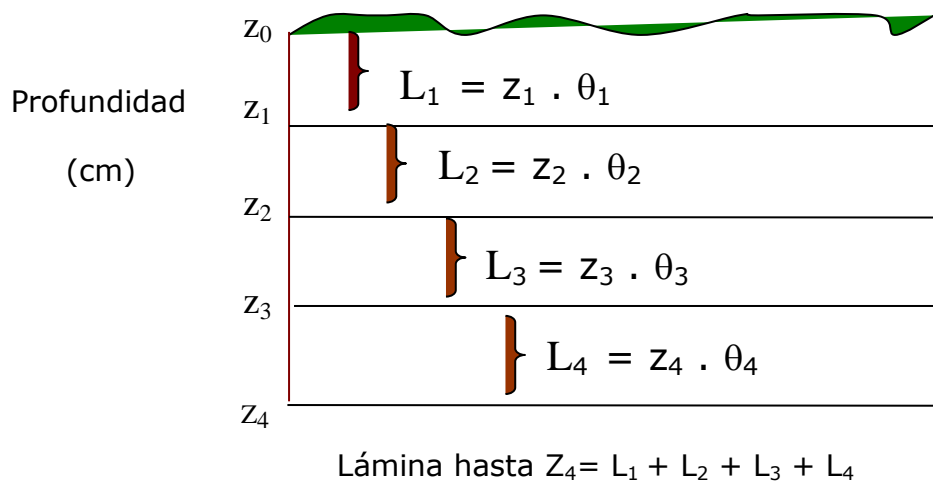


Ejemplo: si la profundidad de suelo considerada es 20 cm = 200 mm y la humedad volumétrica θ es 0,25 $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$

$$L = 0,25 \frac{\text{cm}^3}{\text{cm}^3} \cdot 200 \text{ mm} \quad L = 50 \text{ mm}$$

Para conocer la lámina total de agua de un suelo hasta z cm se divide el perfil del suelo en estratos (z_1, z_2, z_3) y se calculan las láminas de agua parciales. Luego, la lámina total es igual a la sumatoria de las láminas de agua en cada estrato o espesor (Figura 3).

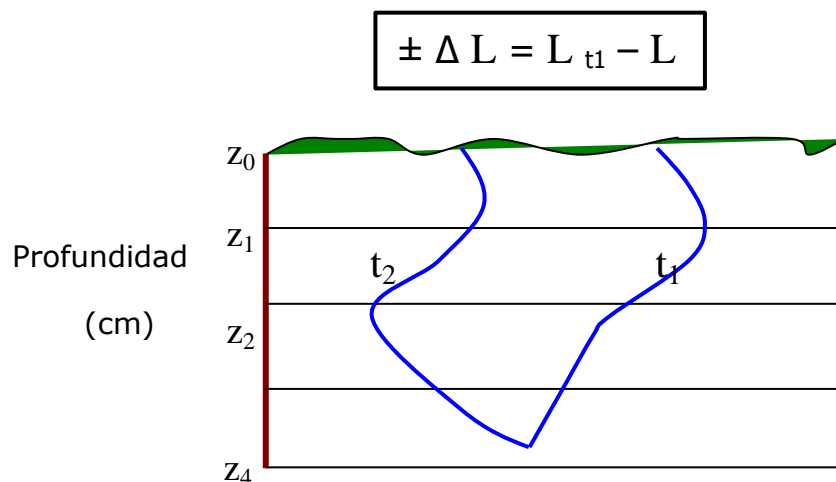
Figura 3. Lámina de agua según capas del perfil de suelo y lámina de agua total hasta la profundidad Z_4



Variación del almacenaje de agua

Se calcula la lámina total de agua en el perfil en dos momentos (t_1 y t_2). La variación del almacenaje es igual a la diferencia entre la lámina en t_1 y la lámina en t_2

Figura 4. Esquema que muestra la variación de almacenaje de agua entre dos momentos.



Balance hídrico

Si se consideran las entradas y salidas de agua durante un periodo de tiempo, se puede calcular el balance hídrico. Según Gil (2015), ese balance resulta de las diferencias entre a) ingresos: precipitaciones, riego, capa freática y los aportes por escurrimiento desde las áreas más elevadas; y b) egresos: transpiración de los cultivos y evaporación desde la superficie del suelo (evapotranspiración), el escurrimiento hacia zonas más bajas y la percolación por debajo de la zona explorada por las raíces. El autor aclara que en ese balance la transpiración es el componente que está directamente ligado con la fotosíntesis y por consiguiente con el crecimiento del cultivo y los rendimientos.

Agua útil total (AUT)

El AUT se obtiene de la diferencia entre la lámina de agua en CC, considerada límite máximo, y la lámina en PMP, considerada límite mínimo.

$$AUT = L_{\text{máxima}} - L_{\text{mínima}}$$

Para conocer el AUT del perfil de suelo se suman los valores obtenidos por capa u horizonte. En el cuadro 4 se presentan datos de AUT hasta 1,5 m de profundidad registrados en Marcos Juárez, en suelo con textura franco limosa.

Cuadro 4. Lámina mínima, lámina máxima y agua útil total hasta 1,5m de profundidad. Serie de Suelo Marcos Juárez.

Prof.(cm)	Lámina mínima (mm)	Lámina máxima (mm)	AUT(mm)
0- 20	33.80	80.60	46.80
20- 60	95.20	156.80	61.60
60-100	72.00	120.00	48.00
100-150	72.00	144.00	72.00
TOTAL	273.00	501.40	228.40

Fórmula práctica para cálculo de agua útil (AU)

Conociendo el PMP (%), el porcentaje de humedad, la DA y el espesor en centímetros analizado, se puede también emplear la siguiente fórmula para obtener el valor de agua útil expresada en milímetros.

$$AU \text{ (mm)} = \frac{[(\text{Humedad-PMP}) \%] \cdot DA \text{ (g.cm}^{-3}) \cdot \text{Espesor (cm)}}{10}$$

En el Anexo se presenta un ejemplo de cálculo de AU empleando esta fórmula para un suelo Argiudol típico de la Serie de Suelo Marcos Juárez, y se puede acceder a la planilla Excel de cálculo.

Al momento de tomar decisiones respecto de la realización de ciertas prácticas en los sistemas productivos, es preciso conocer la relación entre el contenido de AU actual y el AUT de un suelo, es decir, calcular la disponibilidad de agua útil para el cultivo en un momento dado. Esa disponibilidad de agua útil (DAU) o capacidad de agua disponible (CAD), se obtiene empleando la siguiente fórmula:

$$DAU \text{ o CAD (\%)} = \frac{AU_{\text{actual}}}{AUT} * 100$$

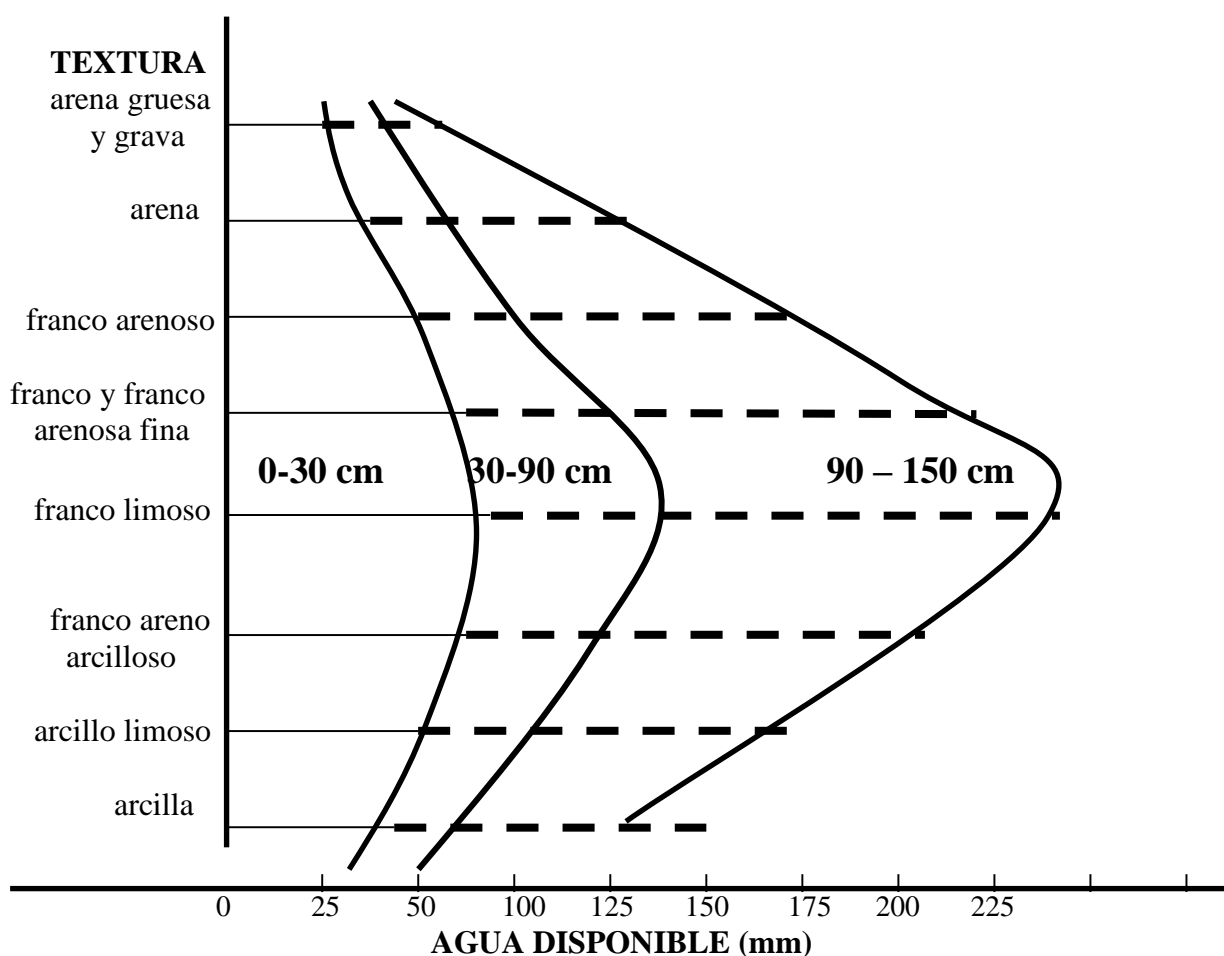
En el Anexo se dispone de una planilla tipo de cálculos de las distintas formas de agua en el suelo desarrolladas en este trabajo.

¿Cuánta AU puede almacenar un suelo?

La capacidad de almacenaje de agua del suelo depende de la textura, porcentaje de materia orgánica y de la profundidad efectiva.

En la figura 5 se puede apreciar la relación entre textura y agua disponible en milímetros hasta 150 cm de profundidad.

Figura 5: relación entre textura y agua disponible según profundidad. Fuente: Servicio de Extensión de Nebraska State University, citado por Darwich, 1989.



En el cuadro 5 se muestran valores máximos de CC y CAD expresados en unidades de volumen, informados por Burgos y Forte Lay (1983), para suelos pampeanos, según tipos de suelos y texturas. En el cuadro 6 se presentan datos de capacidad de AU almacenada para diferentes texturas de suelo en distintas localidades (extractado de Gil, 2015).

Cuadro 5. Valores de CC y CAD según tipo de suelo y textura

Tipo de suelo	Textura	Θ CC ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	Θ CAD ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)
Argiudol típico	Franco limoso a arcillo limoso	0.407	0.171
Hapludol típico	Franco a franco arenoso	0.224	0.128
Haplustol éntico	Arenoso franco	0.154	0.083

Fuente: Burgos y Forte Lay (1983)

Cuadro 6. Capacidad de almacenaje de agua de suelos de distintas texturas, a 1 y 2 m de profundidad

Localidad	Textura	Almacenaje agua útil (mm)		
		1 ^{er} m	2 ^{do} m	Total 2 m
Anguil	Franco	157	161	318
Balcarce	fr a fr arc.	139	130	269
Manfredi	Fr lim	161	145	306
Oliveros	fr arc-lim	156	148	304
Villegas	fr a fr ar.	141	133	274
Gancedo	fr lim	157	145	302

Fuente: Gil, 2015.

¿Cómo se logra disponer la mayor cantidad de agua útil?

La formación de los poros de almacenaje (microporos) depende de la textura del suelo, en tanto los restantes poros no texturales (macroporos) están relacionados con la estructura del suelo. Para aumentar la cantidad de agua almacenada es necesario aumentar la proporción de agua de lluvia que infiltra respecto de la que escurre. La infiltración es un proceso que depende fundamentalmente de la condición estructural de la superficie del suelo, de su contenido de humedad y del nivel de cobertura que protege la superficie del impacto de la gota de lluvia, y que regula los tiempos de permanencia del agua de lluvia donde cae, aumentándolos (Gil, 2015). Por ello se sugiere la realización de prácticas agrícolas que conserven y/o mejoren la estructura del suelo, lo cual se puede lograr con:

- El control del tránsito de maquinarias y animales para evitar densificaciones, ya que si el suelo está compactado, disminuye el espacio poroso, y en consecuencia la infiltración del agua de las precipitaciones.
- La práctica de siembra directa que permita mantener la cobertura del suelo, rotando con cultivos que aporten alto volumen de rastrojo, incluyendo cultivos gramíneos y cultivos de cobertura en la secuencia, considerando la protección vegetal y la fertilización de reposición. De esta forma se propende a un sistema con diversidad, actividad biológica, desarrollo de raíces y aporte de material orgánico, generándose una estructura del suelo con distribución de diámetros de poros estables que facilitarán la captación, retención y disponibilidad de agua útil.

Al aumentar la proporción de agua que pasa por las plantas, aumenta la cantidad de biomasa y se contribuye así a la sustentabilidad del sistema de producción.

Bibliografía

- Andrade, Fernando H. 2016. Los desafíos de la agricultura. 1^a ed. –Acassuso: international Plant Nutrition Institute. 136p.
- Andriani, J.M. 2000. Crecimiento de las raíces de los principales cultivos extensivos en suelos Hapludoles de la provincia de Santa Fe. Para mejorar la producción 13". El agua en los sistemas productivos. INTA EEA Oliveros, Santa Fe, Argentina. Pp. 35-39.
- Borg, H. and Grimes, 1996. Depth development of roots with time: an empirical description. Trans. Of the ASAE 29 (1): 194-196.
- Burgos, J.J. y Forte Lay, J.A. 1983. Capacidad de almacenaje de agua en suelos de la Región pampeana. En: J.J. Burgos (ed.), La sequía y el hombre. Proceeding of a CONICET-SNF Workshop. CIBIOM,
- Casas, R.R.; Irurtia, C.B. 1995. Lo que la erosión se llevó. Campo y Tecnología. INTA. Año IV, N° 18, Enero Febrero: 35-37.
- Ghagas, C.I.; Santanatoglia, O.J.; Gutierrez, R. 1993. Propiedades físicas y biológicas de un Argiudol vértico erosionado bajo pradera. Invest. Agra.: Prod. y Prot. Veg. Vol. 8 (1).
- Darwich, N. 1989. Manual de fertilidad de suelos. Cap. 3. Pp. 20-33. INTA-Enichem Agricultura.
- Farias, E.N. 1994. Física de suelos con enfoque agrícola. Cap. 3. México – Trillas. Pp. 50.
- Forsythe, W.M. 1980. La Humedad del suelo. Manual de Laboratorio: Física de Suelos. Pp. 17-27.

- Gaucher, G. 1971. Tratado de pedología agrícola, el suelo y sus características agronómicas. Ediciones Omega. Barcelona. 647p.
- Gil, R.C. y Martelotto, E.E. 1993. El agua edáfica. Guía práctica para su determinación. INTA Manfredi.
- Gil, R. 1997. Efecto de no-tillage on chemical and physical characteristics on soil in Argentina. The 1st. JIRCAS Seminar on Soybean Research. No-tillage Cultivation and Future Research Needs. Iguassu Falls.
- Gil, R.C. 2015. El uso del agua en una agricultura sustentable. En: El deterioro del suelo y del ambiente en la Argentina. Tomo1. Capítulo 3. Roberto de Ruyver...[et al.]; compilado por Roberto Raúl Casas; Gabriela Fabiana Albarracín. 1ª ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. FECIC. Pp. 249-285.
- Libardi, P.L. 1995. Dinâmica Da Água No Solo. 1ª Edição. Impreso no Brasil. 497 p.
- INTA. 2003. Manual IV Curso Física de Suelos para profesionales y estudiantes. EEA Marcos Juárez.
- INTA. 2017. Metodología de muestreo de suelo y ensayos a campo. Protocolos básicos comunes. Editores: Diego J. Santos, Marcelo G. Wilson, Miriam M. Ostinelli. 2ª ed. Entre Ríos: Ediciones INTA. Libro digital, PDF. [inta_metod_muestreo_suelo_y_ensayo_a_campo.pdf](#)
- Marelli, H.J. y Arce, J.M. 1989. Siembra directa de soja sobre trigo. Actas IV Conferencia Mundial de Investigación en Soja. Tomo II. Pp. 604-614.
- Micucci, F.G.; Taboada, M.A.; Gil R. 2003. El agua en la producción de cultivos: I. El suelo como un gran reservorio eficiente. IMPOFOS Cono Sur-FAUBA-INTA. Versión digital, PDF. **AA 6 Completo.**
- Novello, P.; Ayub, G.; Gudelj, O. 1994. Guía para determinar el agua útil en el perfil de suelo. INTA EEA Marcos Juárez. Información para Extensión N° 8. 11 p.
- Ratto, S. Agua del Suelo. 2000. En principios de Edafología con énfasis en suelos argentinos. Coordinación Marta Conti. Editorial Facultad de Agronomía. 2da Edición. Pp. 233-268.
- Taboada M.A. & Micucci, F.G. 2004. Fertilidad Física de los Suelos. II. Disponibilidad y absorción de agua por los cultivos. Editorial Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Pp. 11-25.
- UNC. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 2005. Cuadernillo para productores, La condición de los sistemas agrícolas. Grupo Agrodiversidad. 39 p.

ANEXO

Punto de Marchitez Permanente (PMP) en %, para suelos del área de La EEA Marcos Juárez

Establecimiento y/o Área Rural	Serie de suelo	Profundidad (cm)			
		0-20	20-60	60-100	100-150
INTA	Marcos Juárez	13.0	17.0	15.0	12.0
M. GILARDONI	Marcos Juárez	13.0	18.0	15.6	11.8
LA LUCILA	Marcos Juárez	13.0	17.5	13.7	-
BONCI HNOS.	Marcos Juárez	14.5	18.0	22.0	14.0
LATTANZI E HIJOS	Hansen	13.5	17.0	15.0	11.5
A. LATTANZI	Monte Buey	11.3	12.0	9.8	8.7
EL DORMILÓN	G. Baldissera	13.0	12.4	9.3	8.9
TOMBETA HNOS.	G. Baldissera	11.3	12.0	9.8	8.7
VILLA LOS PATOS	Ordóñez	11.8	10.9	9.0	8.7
F. GILLI	Ordóñez	11.3	12.8	10.8	9.8
MONTE MAÍZ	Laborde	11.5	11.0	8.0	8.5
ARIAS	Cavanagh	10.0	9.3	7.7	7.0
CORONATO	Noetinger	14.8	17.0	16.0	14.0
BONADEO	La Bélgica	13.3	11.5	10.0	10.0
EL CABALLITO	-	8.5	8.0	7.0	6.0
SANTA LUCÍA	Monte Buey	12.0	13.0	10.0	9.0
VELA	La Carlota	8.5	7.7	6.7	5.9
LOS TRECE	Olaeta	7.0	6.6	6.5	5.0
EL CAMOATI	-	8.0	7.0	7.7	-
LA BEATRIZ	El 23	6.4	5.7	5.3	5.0

Extractado de Novello, et al (1994).

**Punto de Marchitez Permanente (PMP) en %, para suelos del
Centro-Sur de la Provincia de Santa Fe**

Establecimiento y/o Área Rural	Serie de suelo	Profundidad (cm)			
		0-20	20-60	60-100	100-150
BOUQUET	Arroyo Tortugas	12.0	16.8	16.5	12.0
MONTE DE OCA	Marcos Juárez	14.9	19.0	16.0	11.5
LAS ROSAS	Los Cardos	13.0	20.0	19.4	14.4
LAS ROSAS	Los Cardos	14.9	21.5	20.0	16.7
MONTE DE OCA	Marcos Juárez	12.0	15.0	17.0	--
LAS PAREJAS	Armstrong	13.6	19.6	19.4	12.4
ARMSTRONG	Armstrong	13.0	21.7	20.3	--
TOTORAS	Clason	12.4	19.55	20.4	15.8
CAÑADA DE GOMEZ	Bustinza	12.2	19.6	22.0	15.7
CAÑADA DE GOMEZ	Correa	12.5	14.6	19.0	15.0
CARCARAÑÁ	Casilda	14.5	19.1	18.5	12.5
CASILDA	Casilda	12.3	20.0	21.85	15.70
LOS MOLINOS	Casilda	11.5	20.0	19.0	15.6
LOS MOLINOS	Casilda	12.0	21.0	20.0	--
CASILDA	Casilda	13.0	22.75	21.10	--
LOS NOGALES	Villa Eloísa	12.3	16.3	13.0	--
LOS NOGALES	Hansen	12.6	17.0	15.6	--
SAN JOSÉ DE LA ESQUINA	Hansen	11.45	17.0	14.2	10.5
ARTEAGA	Hansen	13.4	17.0	14.0	--
BERABEVÚ	Hansen	11.75	16.6	14.6	--
COLONIA LA FLOR	Hansen	12.85	15.5	12.3	--
AREQUITO	Hansen	11.5	15.6	18.5	13.0
BIGAND	Pergamino	12.0	14.5	19.8	--
BOMBAL	Chabas	11.6	13.8	19.6	--
ALCORTA	Bigand	13.6	20.40	20.80	--
PUJATO	Peyrano	11.4	19.2	15.4	13.4
FUENTES	Peyrano	12.5	19.8	19.8	14.5
URANGA	Peyrano	12.7	21.7	20.2	17.0
SARGENTO CABRAL	Peyrano	12.7	23.10	23.40	--
SANTA TERESA	Peyrano	12.25	19.85	21.10	--

Punto de Marchitez Permanente (PMP) en %, para suelos del Centro-Sur de la Provincia de Santa Fe (cont.)

Establecimiento y/o Área Rural	Serie de suelo	Profundidad (cm)			
		0-20	20-60	60-100	100-150
COLON	Hughes	10.8	13.0	17.0	--
LA CHISPA	El Cantor	11.8	13.0	13.2	--
GODEKEN	Hansen	11.75	16.60	14.6	--
CHABÁS	Chabás	13.0	17.5	18.5	--
SANFORD	Casilda	12.0	22.0	19.0	14.0
CASILDA	Casilda	13.3	19.5	20.0	--
CARRERAS	Mugueta	11.50	16.0	14.0	--
ALCORTA	Pergamino	10.35	13.55	18.5	--
SANFORD	Casilda	11.5	16.6	20.8	-

Extractado de Novello, et al (1994).

Ejemplo Planilla de Calculo Humedad del suelo y Agua útil

Fecha de muestreo: 05/10/2018

Localidad: Marcos Juárez

Establecimiento: EEA Marcos Juárez

Lote: 2

Sin pendiente: X

Con pendiente: loma: media loma: bajo:

Serie de Suelo: Marcos Juárez

Cultivo antecesor: Soja

Al momento de muestreo

Barbecho X

Cultivo --

Estado fenológico --

Muestra	Tarro (n°)	Tara (g)	PH (g)	PS (g)	Prof. (cm)	PMP (%)	Humedad (%)	Agua útil (mm)
I	37	64.89	225.69	195.23	20	13.00	23.37	26.96
	95	74.92	391.38	330.09	40	17.00	24.02	36.50
	168	68.40	341.52	288.31	40	15.00	24.20	47.82
	220	72.29	192.03	167.01	50	12.00	26.41	93.70
SUMA							1.5 m	204.98
II	21	68.78	227.98	201.33	20	13.00	20.11	18.47
	38	79.00	418.28	353.01	40	17.00	23.82	35.47
	79	73.57	272.01	232.82	40	15.00	24.61	49.97
	212	76.47	178.61	156.77	50	12.00	27.20	98.79
SUMA							1.5 m	202.69
III	10	70.35	223.73	196.46	20	13.00	21.62	22.42
	149	54.42	377.04	313.95	40	17.00	24.31	38.01
	231	75.10	324.36	276.86	40	15.00	23.54	44.42
	322	58.45	152.42	134.32	50	12.00	23.86	77.07
SUMA							1.5 m	181.92
Promedio muestras I, II y III, por prof. (cm)						0-20	21.70	22.62
						20-60	24.05	36.66
						60-100	24.12	47.40
						100-150	25.82	89.85
Agua útil a 1.5 m							196.53	

Ejemplo de cálculo de agua en todas sus formas hasta 1.5 m de profundidad, en un momento dado para un suelo de la serie de suelo Marcos Juárez.

Los valores de **DA**, **PMP** y **CC** son promedios obtenidos de determinaciones realizadas en un perfil de la Serie de suelo Marcos Juárez. Para cada caso en particular se sugiere realizar las mediciones pertinentes y obtener los valores propios de estos parámetros, y/o consultar a un laboratorio de física de suelo de INTA más cercano a su lugar.

HUMEDAD DEL SUELO

DISPONIBILIDAD DE AGUA UTIL

Prof. (mm)	Tarro nº	Tara (g)	PH (g)	PS (g)	Humedad (g.g ⁻¹)	DA (g.cm ⁻³)	Θ (cm ³ .cm ⁻³)	Lám.actual (mm)	PMP (g.g ⁻¹)	Θ PMP (cm ³ .cm ⁻³)	CC (g.g ⁻¹)	Θ CC (cm ³ .cm ⁻³)	Lám.mín. (mm)	AU actual o DAUa (mm)	Lám.máx. (mm)	AUT (mm)	DAU (%)
200	121	70	179.6	157.5	0.25	1.3	0.33	65.83	0.13	0.169	0.31	0.403	33.80	32.03	80.60	46.80	68.45
400	136	68	245.4	207.0	0.28	1.4	0.39	155.01	0.17	0.238	0.28	0.392	95.20	59.81	156.80	61.60	97.09
400	143	69	208.1	182.1	0.23	1.2	0.28	110.23	0.15	0.180	0.25	0.300	72.00	38.23	120.00	48.00	79.64
500	172	72	219.4	192.6	0.22	1.2	0.27	133.12	0.12	0.144	0.24	0.288	72.00	61.12	144.00	72.00	84.89
TOTAL A 1.5 m								464.19					273.00	191.19	501.40	228.40	83.71

Referencias

Prof. (mm) = profundidad en milímetros

Tara (g) = peso del tarro en gramos

PH (g) = peso húmedo en gramos

PS (g) = peso seco en gramos

Humedad (g.g⁻¹) = humedad gravimétrica = gramos de agua en un gramo de suelo
= $\frac{PH-PS}{PS-Tara}$

DA (g.cm⁻³) = densidad aparente = masa suelo seco (g)/volumen conocido (cm³)

Θ (cm³.cm⁻³) = humedad volumétrica = cm³ de agua en un cm³ de suelo =
= $humedad\ gravimétrica * DA$

Lámina actual (mm) = milímetros de agua almacenados en el suelo al momento del muestreo = $Prof. (mm) * \Theta$

PMP (g.g⁻¹) = gramos de agua en un gramo de suelo en el punto de marchitez

Θ PMP (cm³.cm⁻³) = humedad volumétrica en el punto de marchitez del suelo =
= $PMP (g.g^{-1}) * DA$

CC (g.g⁻¹) = gramos de agua en un gramo de suelo a capacidad de campo

Θ CC (cm³.cm⁻³) = humedad volumétrica en capacidad de campo del suelo =
= $CC (g.g^{-1}) * DA$

Lám. mín. (mm) = Lámina mínima = milímetros de agua en el punto de marchitez del suelo = $\Theta PMP * Prof. (mm)$

AU actual (mm) o DAUa (mm) = agua útil al momento del muestreo o disponibilidad de agua útil actual para la planta = $Lám.actual - Lám.mín.$

Lámina máx. (mm) = Lámina máxima = milímetros de agua en capacidad de campo del suelo = $\Theta CC * Prof. (mm)$

AUT (mm) = agua útil total según tipo de suelo = $Lám.máx. - Lám.mín.$

DAU (%) = disponibilidad de agua útil para la planta en relación al AUT del suelo expresada en porcentaje = $(AU\ actual / AUT) * 100$