
Métodos para medir el contenido de agua en el suelo

Methods for soil water content measurement

Adriana Florentino¹

Instituto de Edafología, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela, Maracay, estado Aragua, Venezuela. florentinoa@agr.ucv.ve

RESUMEN

A nivel mundial, el futuro de la producción de alimentos depende de la disponibilidad de recursos hídricos. Conocer el agua que fluye y es almacenada en el suelo es fundamental, por lo que se hace necesario cuantificarla en forma precisa y confiable. La medición del contenido de agua en el suelo ha sido un desafío tecnológico importante en las últimas décadas, lo que ha dado origen a una gran variedad de métodos y técnicas. Sobre todo, se han desarrollado nuevos equipos y sensores que permiten medir, en el espacio y el tiempo, el contenido de agua sin alterar en forma significativa las condiciones hidrodinámicas del suelo. Los métodos para medir la humedad del suelo son numerosos y ninguno de ellos es universalmente aceptado, de manera tal que pueda ser recomendado para todas las condiciones de suelo y para diferentes propósitos. El método más utilizado y que sirve de referencia para la calibración de otros

ABSTRACT

The future of food production in the World depends on the availability of water resources. Knowing the quantity of soil water is fundamental for this goal. Hence, it is necessary to measure it in a precise and reliable way. The measurement of soil water content has been a relevant topic of research during a long time and an important technological challenge in the last decades, resulting in the development of a great quantity of methods and techniques. In particular, there have been developed new sensors and equipments that allow measuring the soil water content, in the time and space, without changing the soil hydrodynamics conditions, in a significant way. The methods for measurement the soil water content are many and no one of them is of universal use, so that it could be recommended for all soil conditions and different purposes. Among them, the gravimetric method is the most commonly used, although it presents some limitations. Others methods frequently used are the

métodos es el termogravimétrico o termovolumétrico; sin embargo, tiene también múltiples limitaciones. Otros métodos muy utilizados son los nucleares y los basados en la determinación de constante dieléctrica del sistema suelo-agua-aire. Este trabajo revisa los métodos más utilizados para medir el contenido de agua en el suelo, destacando sus principios y procedimientos, rangos de lectura, confiabilidad de los resultados, sencillez, costo relativo y riesgos de uso. Estos métodos son: el termogravimétrico o termovolumétrico, la sonda de neutrones, la atenuación de rayos gamma, el eléctrico de los cuatro electrodos; los métodos de resistencia eléctrica y los métodos dieléctricos.

Palabras claves: humedad del suelo, Método gravimétrico; Sonda de neutrones, Atenuación de rayos gamma; Reflectometría de dominio del tiempo (TDR); Cuatro electrodos; Resistencia eléctrica.

radioactive methods and those based on permittivity determination or the dielectric constant of the soil-water-air system. This work presents a review on the methods more frequently used for measuring the soil water content, emphasizing their principles and procedures, measuring range, results accuracy, relative cost and safety hazard. These methods are: the gravimetric, the neutron gauges, and the gamma radiation attenuation, the electric of four electrodes, the electrical resistance and the dielectric methods.

Key words: Soil water; Neutron gauges; Gamma Radiation Attenuation; Dielectric methods; Time Domain Reflectometry (TDR); Four electrodes; Electrical resistance.

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el futuro de la producción de alimentos depende de la disponibilidad suficiente y sostenible de recursos hídricos. El déficit o exceso de agua disponible en el suelo reduce el crecimiento de las plantas y el rendimiento de los cultivos. Para conocer la disponibilidad de agua en el suelo para las plantas es necesario medir tanto el contenido de agua en el suelo como la energía a la cual está retenida (potencial mátrico o matricial). El contenido de agua en el suelo (CAS) es un parámetro básico que caracteriza el estatus hidrológico y transporte de agua en la zona no saturada; es un componente muy dinámico que cambia permanentemente y a veces drásticamente en el tiempo y en el espacio y ejerce gran influencia sobre otras propiedades y procesos físicos (Dirksen, 1999).

La naturaleza dinámica del agua en el suelo hace que su medición se considere de vital interés tanto en investigación sobre agricultura y recursos hídricos, en general, como en modelos meteorológicos en particular. Sin embargo, las medidas de humedad en el suelo se realizan de forma generalizada en campos muy diversos tales como: prácticas agrícolas, evaluaciones biológicas de ecosistemas naturales, numerosas aplicaciones medioambientales y obras civiles así como, en investigaciones afines a estas actividades como la edafología, climatología, hidrogeología, geotecnia, ciencias biológicas, ciencias ambientales, entre otros.

El contenido de agua en el suelo, definido como la cantidad de agua removida por secado en estufa a 105° C hasta alcanzar peso constante, es un parámetro básico que permite caracterizar el estatus hidrológico y la capacidad de flujo de agua en el perfil e influye en otras propiedades y procesos físicos del mismo.

Existen distintos métodos para estimar la humedad del suelo tanto en campo como en laboratorio e invernadero (gravimétrico, sonda de neutrones, TDR, bloques de yeso, etc.) (Ponizovsky et al., 1999; Seyfried y Murdock, 2004). Desafortunadamente, cada uno de estos métodos tiene dificultades que lo

alejados de lo ideal. Por ejemplo, el método gravimétrico no puede ser automatizado, es destructivo, su ejecución consume mucho tiempo y su precisión no supera el 3% a pesar de ser un método directo; por otro lado, la sonda de neutrones, aunque más precisa y no destructiva, tiene la limitación que es costosa y requiere de operadores especializados ya que contiene una fuente radiactiva, habiéndose desarrollado, en las últimas décadas, una serie de técnicas basadas en el método dieléctrico (reflectometría de dominio del tiempo, TDR; de dominio de la frecuencia, FDR; de dominio de la amplitud, ADR y otras variantes), que se han hecho muy populares ya que proveen mayor precisión, facilidad de uso y seguridad que otros, a pesar de ser de medición indirecta, pues se basan en la permitividad extremadamente alta de las moléculas de agua (Topp y Davis, 1985; Topp et al., 2000; Morell y Tuñón, 2003).

Medida del contenido de agua en el suelo

Existen hoy día muchos métodos y procedimientos para medir el contenido de agua en el suelo, unos son directos y otros indirectos; unos son destructivos y otros no destructivos. Aquí se hará referencia principalmente a los más utilizados, útiles y con mayor potencial de uso.

Los métodos se pueden clasificar según la naturaleza y principios utilizados en métodos directos, que permiten medir directamente el contenido de agua en el suelo, y métodos indirectos, que se basan en la medida de alguna propiedad física del suelo dependiente del contenido de agua; calculan la humedad mediante una calibración entre ésta y una propiedad del suelo que es más fácil de medir (por ejemplo, la permitividad o constante dieléctrica relativa del suelo).

También se pueden clasificar según el grado de perturbación del suelo en: métodos destructivos, que alteran totalmente el suelo, cambiando así las condiciones hidrodinámicas del mismo; y no destructivos, donde las mediciones repetidas por largos períodos de tiempo no disturban el suelo y los valores de contenido de agua pueden ser obtenidos inmediatamente, en el mismo sitio y a la misma profundidad. Normalmente utilizan sensores que son colocados permanentemente en el suelo, con una unidad de evaluación conectada a sus cables al momento de medir, o aquellos donde se conecta el sensor cada vez que se realiza la medición (a través de un tubo de acceso o de un hueco vertical).

La gran mayoría de los métodos que son indirectos son también no destructivos. La dependencia de un parámetro físico del suelo del contenido de agua está teóricamente relacionada a los parámetros físicos de cada constituyente en la mezcla y de acuerdo a la relación entre ellos, siendo muy importante la calidad, estabilidad y consistencia de la calibración.

Métodos para medir el contenido de agua en el suelo.

1. Método termogravimétrico/termovolumétrico:

Es un método directo. Se toman muestras de suelo en el campo, se colocan en envases herméticamente cerrados y se trasladan al laboratorio; se pesan en húmedo, se colocan en estufa a 105 ° C, mínimo por 24 h, hasta peso constante. Con esto se calcula el contenido de humedad (%H). Es el método más utilizado para medir agua en el suelo y es una técnica estándar usada comúnmente para obtener datos referenciales de contenido de agua en el suelo, y para la construcción de las curvas de calibración, cuando se utilizan otros métodos y equipos. El método es apropiado cuando no se tiene que medir consecutivamente muchas veces.

Entonces, el contenido de agua en el suelo por este método es la cantidad de agua que es removida del suelo al colocarlo en estufa a una temperatura de 105 ° C hasta obtener peso constante. Los resultados de esta determinación gravimétrica se expresan como la masa de agua en relación a la masa de suelo (contenido gravimétrico de agua, w) o también como el volumen de agua en relación al volumen de suelo (contenido volumétrico de agua, θ). Se pueden establecer relaciones entre ambas formas de expresión a través de la densidad aparente del suelo y la densidad del agua.

Rangos aceptables de lectura del contenido de agua:

- Con el método termogravimétrico se puede medir cualquier rango de humedad en el suelo, desde suelo saturado hasta suelo seco al aire.

Recomendaciones de instalación y uso:

- No requiere de la instalación directa de algún equipo; solo se necesitan barrenos o tomamuestras adecuados al tipo de suelo y a la profundidad de muestreo.

Cálculos:

El contenido de humedad por este método se puede expresar en base a peso o en base a volumen de suelo.

Con base a peso (%H, w.w⁻¹):

$$\%H (w.w^{-1}) = \left(\frac{P_{sh} - P_{ss}}{P_{ss}} \right) \times 100 = \frac{P_a}{P_{ss}} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Con base a volumen (%H, v.v⁻¹):

$$\%H (v.v^{-1}) = \left(\frac{V_a}{V_t} \right) \times 100$$

Donde: Psh es el peso (w) de suelo húmedo (en g ó kg); Pss es el peso de suelo seco (en g ó kg) en estufa a 105 °C; Pa es el peso de agua correspondiente a la diferencia entre el Psh y el Pss; Va es el volumen (v) de agua (en cm³ o m³), asumiendo una densidad del agua (Daa) igual a 1 Mg m⁻³ ó g cm⁻³ ó kg m⁻³; Vt es el volumen total de suelo (en cm³ o m³); Das es la densidad aparente del suelo (Mg m⁻³ ó g cm⁻³ ó kg m⁻³).

La transformación de la humedad gravimétrica en humedad volumétrica se hace con la siguiente fórmula:

$$\theta (cm^3.cm^{-3}) = W (g.g^{-1}) \times \frac{D_{as}}{D_{aa}} \quad \text{Ecuación 2}$$

El contenido de humedad del suelo también se puede expresar como grado de saturación (Φ) o como lámina de agua almacenada en el suelo (La, cm) en una profundidad determinada (Ls, cm), y éstas se pueden obtener a través de las relaciones:

$$\phi = \frac{\theta}{\theta_s} \quad \theta (cm^3.cm^{-3}) = \frac{L_a}{L_s} \quad L_a(cm) = \theta.L_s(cm)$$

Donde θ es el contenido de humedad volumétrica del suelo en un momento determinado y θ_s es el contenido de humedad volumétrica del suelo a saturación (que es equivalente al espacio poroso total).

Ventajas y limitaciones del método **termogravimétrico/termovolumétrico:**

Ventajas:

- Es económico.
- Es sencillo.
- Requiere de equipos comunes y poco costosos.
- No necesita calibración.
- No implica riesgos.
- Es el método de referencia para la calibración de otros métodos y equipos.

Limitaciones:

- Es un procedimiento destructivo y extractivo, las muestras de suelo se llevan al laboratorio y se disturba permanentemente el perfil de suelo.
- No se puede repetir la misma observación en el mismo punto; cada vez que se necesita muestrear hay que hacerlo en sitios diferentes aunque cercanos al anterior.
- El cambio en el contenido de agua, medido en dos épocas diferentes, se puede deber tanto a un cambio real en el contenido de agua entre las fechas de muestreo como a la variabilidad espacial existente en el suelo o a la pérdida de agua en su traslado al laboratorio.
- En general, las muestras son de poco tamaño con la intención de alterar lo menos posible el sitio de muestreo.
- Las medidas repetitivas en pequeñas áreas o ensayos de investigación a largo plazo, alteran las condiciones reales del suelo, la estructura del suelo, su sistema poroso y por lo tanto el régimen de humedad.
- Implica mucho trabajo, sobre todo a gran profundidad en el perfil.
- Requiere relativamente de mucho tiempo para obtener los resultados, mínimo 24 horas.
- El procedimiento no es adecuado para suelos con alto contenido de MO.
- Si se quiere expresar en fracción volumétrica, se requiere la determinación de la densidad aparente.

2. Métodos radiactivos:**Sonda de neutrones o termalización de neutrones.**

La sonda de neutrones es un método indirecto y no destructivo. Es un instrumento que ha sido ampliamente utilizado, desde la década de 1950, primero para estudios de balances hídricos en agronomía e hidrología y luego se extendió su uso para la medida del contenido volumétrico del agua en el suelo (θ , $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), en estudios de campo sobre las relaciones suelo-agua-planta, donde se requieren, repetidamente, mediciones no destructivas del θ . El equipo consta de una sonda que contiene una fuente radiactiva que emite neutrones rápidos, un detector de neutrones lentos, un sistema de conteo electrónico y un tubo de acceso a través del cual la sonda se introduce en el suelo (International Atomic Energy Agency –IAEA, 1970; Florentino, 1985; Kutlíek y Nielsen, 1994).

Principio:

Contiene una fuente radiactiva (Am-241/Be-9) que emite neutrones rápidos (de alta energía cinética), los cuales, al colisionar con partículas del suelo que tienen la misma masa del neutrón (Ej. protones de H^+), pierden energía y se transforman en neutrones lentos (termalizados, de baja energía) que son registrados por un detector (Figura 1), cuya señal pasa a través de un cable al sistema de conteo electrónico. Como el agua es la principal fuente de H^+ , en la mayoría de los suelos, la densidad de neutrones lentos alrededor de la sonda, y que son medidos por el equipo, es proporcional al contenido de agua presente en el suelo.

El H^+ , que es un constituyente del agua (H_2O), es el elemento más eficiente para reducir la energía de los neutrones (es un buen moderador de neutrones). Los neutrones cuando son libres son inestables y se desintegran con una vida media de 13 segundos. Si el neutrón emitido por la fuente radiactiva no es capturado después de algún tiempo éste se desintegra. Debido a estos procesos, después de escasas fracciones de segundo, una nube de "neutrones lentos" se desarrolla alrededor de la sonda, siendo registrado este valor en unidades de conteo por unidad de tiempo, siendo los más utilizados conteo por minuto, cpm, o conteo por segundo, cps.

Las fuentes de neutrones son la mezcla de un emisor de partículas alfa, α , (Americio y Radio) y un polvo fino de Berilio. Las partículas " α " bombardean el núcleo de "Be" y ocurre la reacción. Los neutrones emitidos (h) tienen energías del orden de 2 MeV.

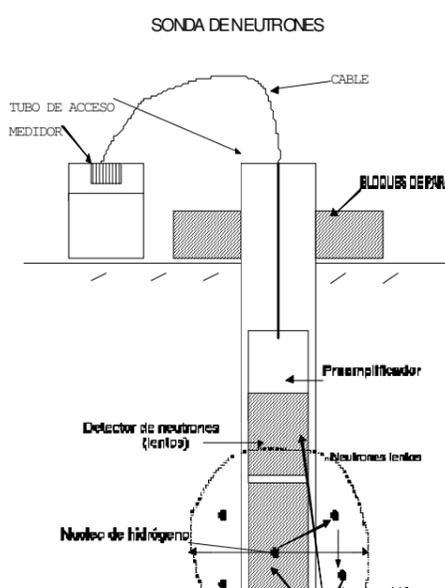
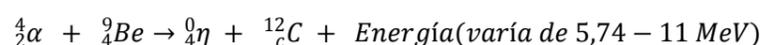


Figura 1. Esquema de funcionamiento de una sonda de neutrones de profundidad.

Reacción:



Los principales procesos que ocurren durante la medición con la sonda de neutrones son tres: 1) Absorción de neutrones por el núcleo de los constituyentes del suelo (solo ocurre con pocos elementos H⁺, Cd, B, Cl, Fe, Al, Mn, Ag, Au); 2) Dispersión de neutrones por colisión: este es el más importante ya que a través de las colisiones los neutrones rápidos pierden energía cinética y pasan a ser neutrones lentos de baja energía) y 3). Desintegración de neutrones, que ocurre a los pocos segundos de ser emitidos (International Atomic Energy Agency –IAEA, 1970; Florentino, 1985; Murakoa y Tzi Tziboy, 2000; Muñoz-Carpena, 2004).

En relación a las posibles interferencias que pueden tener otros constituyentes del suelo, se parte de la premisa que estos se consideran constantes, mientras que el contenido de agua es variable, por lo que, relativamente, cualquier cambio en la lectura (cpm, cps) se asocia principalmente a cambios en el contenido de agua en el suelo, siendo proporcional a la fracción de volumen de agua presente en el mismo. El método necesita calibración, relacionando las lecturas obtenidas con la sonda y el contenido volumétrico de agua (θ , cm³.cm⁻³).

Este método tiene amplia aplicación en investigaciones y manejo del agua en el campo, donde se requieren, repetidamente, mediciones no destructivas del θ en el suelo.

Tipos de sondas de neutrones:

Las sondas de neutrones son básicamente de dos tipos: las de profundidad y las superficiales. Con las de profundidad se introduce la sonda en el suelo a través de un tubo de acceso (normalmente de aluminio o acero inoxidable), cerrado en el extremo inferior, que se instala en el suelo en el sitio de medición y con la sonda se puede medir la humedad a partir de los 15 cm de profundidad, ya que si se mide más superficialmente existe el riesgo que parte de los neutrones salgan al aire y se pierdan, causando errores en las lecturas y mayor riesgo de contaminación al técnico que está midiendo; aún

cuando este riesgo es mínimo si se utilizan los bloques protectores de parafina recomendados, que se colocan en superficie alrededor del tubo de acceso.

Las sondas superficiales son también de dos tipos: una que mide la humedad de las capas superficiales del suelo, colocando el equipo sobre la superficie, y otra donde se introduce en el suelo tanto la sonda emisora como la receptora de neutrones, a través de un hueco realizado con una barrena especial que facilita su inserción (esta última permite medir también densidad aparente del suelo cuando se usa también radiación gamma).

Calibración:

El instrumento debe ser calibrado con muestras de suelo bajo un amplio rango de humedad, en cuyas condiciones se inserta en el suelo los tubos de acceso a través del cual se introduce la sonda y se toman las lecturas a las profundidades determinadas. Al finalizar, se toman muestras de suelo no disturbadas a las mismas profundidades y se determina la humedad volumétrica según la ecuación 2.

Con la calibración se genera una ecuación de regresión lineal entre el contenido volumétrico de agua (θ , $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) y la relación de conteo (RC).

Usualmente, la ecuación de calibración toma la forma de:

$$\theta(\text{cm}^3\text{cm}^{-3}) = a + b(\text{RC})$$

Donde θ es el contenido de agua en el suelo (en base a volumen); "a" es la constante de intercepto y "b" es la pendiente de la curva.

$$\text{RC} = \frac{\text{Lectura de la sonda a la profundidad de medición (cpm)}}{\text{Lectura estándar de la sonda (cpm)}}$$

Con esta ecuación se puede generar un gráfico que relaciona θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) medida con la RC correspondiente, en el cual, posteriormente, todas las lecturas que se hagan en ese suelo son interpoladas y se determina la humedad volumétrica correspondiente; la otra es generando una ecuación de regresión, con la cual se puede también crear un gráfico con la recta correspondiente a dicha ecuación e interpolar o, mucho más práctico, mediante una hoja de cálculo generar los valores de θ correspondientes estimados a través de dicha ecuación.

Debe asegurarse que en la curva de calibración se cubre un amplio rango de humedad del suelo, desde saturado hasta seco. Normalmente la ecuación de regresión tiene un buen ajuste, es decir R^2 cercanos a 1. Como ejemplo se presenta la figura 2, donde "y" es θ ($\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$) y "x" es RC.

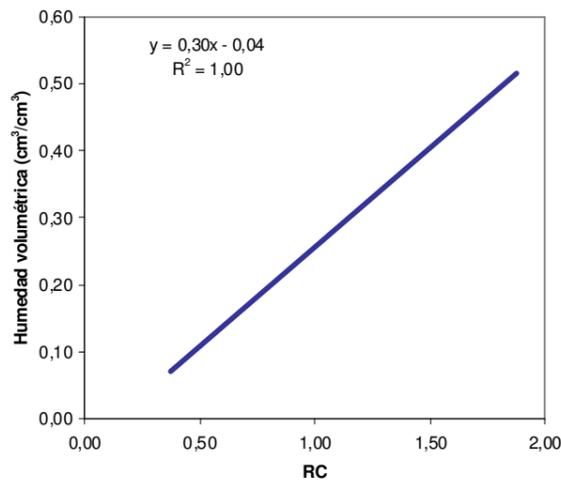


Figura 2. Curva de calibración correspondiente a la ecuación indicada.

Cada equipo tiene su forma específica para tomar las lecturas estándar; por ejemplo, unos lo hacen en laboratorio y otros en campo directamente en el sitio de medición (Evet y Steiner, 1995); unos lo hacen en agua y otros al aire, dejando la sonda emisora de neutrones dentro de su protector. Esta última se hace con la finalidad de eliminar el posible efecto ambiental (temperatura, humedad relativa) del sitio sobre las lecturas con la sonda (Figura 3).

Las lecturas con la sonda pueden ser afectadas por la densidad aparente del suelo, por la presencia de hidrógeno constitucional en los minerales de arcillas y en la materia orgánica y por otros componentes químicos del suelo que son fuertes moderadores de neutrones térmicos.



Figura 3. Registro del contenido de agua en el suelo en campo con sondas de neutrones, donde se observa el tubo de acceso. a) Calibrando el equipo; b) Midiendo humedad en ensayos con prácticas de conservación de suelo y agua en Turén, estado Portuguesa.

Cabe destacar que este se considera un método no destructivo pues la única alteración es al momento de instalar el tubo de acceso, que si se hace adecuadamente la disturbación del suelo es mínima; posteriormente todas las lecturas se realizan exactamente en el mismo sitio y profundidad, lo cual elimina el problema que se tiene con el método gravimétrico cuando las mediciones se hacen con frecuencia y a largo plazo.

Con la sonda de neutrones se mide el $\theta_{(z, t)}$, que es el contenido de agua a diferentes profundidades (z) en el perfil del suelo y a través del tiempo (t), por lo que el agua almacenada en el suelo (AAS) en un momento dado y hasta una profundidad determinada viene dada por la integración del contenido de agua en cada una de las capas medidas en el perfil de suelo.

$$AAS = \int_0^z \theta_z dz$$

De esta manera se pueden elaborar los perfiles de humedad del suelo (Figura 4), así como su variación a través del tiempo, siendo muy importante para la toma de decisiones en cuanto a la disponibilidad de agua para las plantas y, en especial, para establecer el calendario de riego necesario para cada cultivo.

Riesgos: Implica relativamente alto riesgo ya que se utiliza fuente radiactiva, aunque, si es manejado adecuadamente y por técnicos o investigadores que cumplen estrictamente con las normas nacionales e internacionales establecidas para ello, el riesgo es muy bajo.

Precauciones: La mejor protección contra la radiación es la distancia, por lo que se recomienda mantenerse a una distancia de la sonda de 100 cm, sobre todo cuando se está midiendo (Dirksen, 1999). No traslade la sonda fuera de su caja protectora y nunca cerca del cuerpo. Guárdela en sitios seguros tal como lo establecen las normas internacionales. Si es posible utilice un dosímetro cuando la esté usando. Con estas simples normas el riesgo es mínimo.

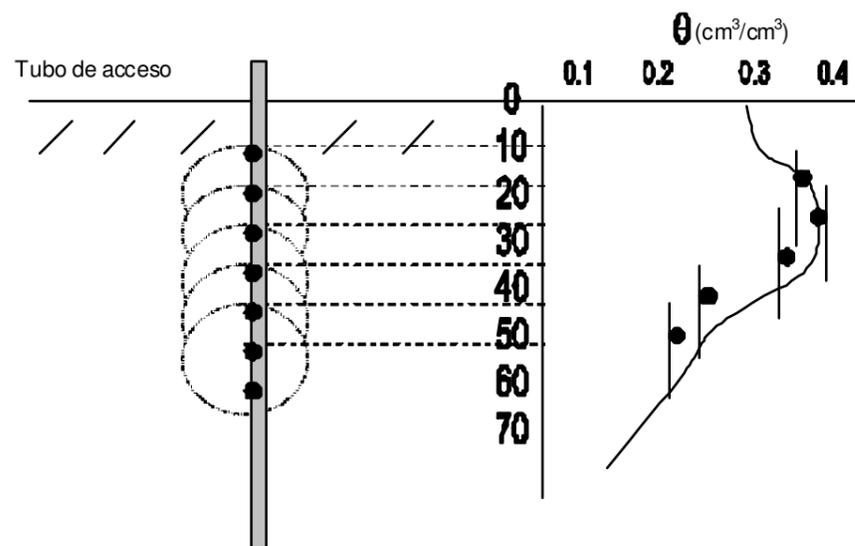


Figura 4. Perfil de humedad realizado con la sonda de neutrones.

Rangos aceptables de lectura del contenido de agua: Con el método de la sonda de neutrones se puede medir cualquier rango de humedad en el suelo, desde suelo saturado hasta suelo seco al aire.

Recomendaciones de instalación y uso: Este método se recomienda utilizar sobre todo en ensayos que necesitan evaluaciones durante largo tiempo, ya que la instalación de los tubos de acceso en campo es laborioso y no merece la pena tanto trabajo para medir solamente en un ciclo de cultivo anual, por ejemplo. Sin embargo, la decisión final dependerá tanto de la disponibilidad del equipo, como del objetivo de la investigación o trabajo a realizar.

Ventajas:

- Es rápido. Se pueden obtener rápidamente los resultados cuando ya se dispone de la curva de calibración.
- Es no destructivo; las mediciones se hacen directamente en campo en el mismo sitio y a la misma profundidad, lo cual permite determinar con mayor precisión los cambios de humedad en el suelo a través del tiempo y espacio.
- Es muy sensible a cambios de humedad en el suelo.
- Considera un mayor volumen de suelo.
- Permite obtener información para la determinación de la conductividad hidráulica no saturada del suelo directamente en campo, junto con la información generada con tensiómetros. Esto mejora los resultados de los balances hídricos de los suelos.

Limitaciones:

- El equipo es costoso; requiere de una inversión inicial importante en la compra de la sonda y sus accesorios (tubos de acceso, bloques de parafina, barrenos, etc.).
- El operador está en contacto con una fuente radiactiva. Requiere de un técnico entrenado especialmente para su uso.

- El equipo requiere supervisión y mantenimiento permanente por entes oficiales responsables del control de técnicas nucleares.
- Necesita calibración para cada suelo en particular, para lo cual se toma, generalmente, como referencia el método termovolumétrico. Esto implica mucho trabajo sobre todo a gran profundidad en el perfil.
- Puede ser afectado por la densidad aparente del suelo, por altos contenidos de H⁺ en otros constituyentes del suelo (arcillas y otros minerales) o por la presencia en altas concentraciones de otros elementos en el suelo que son moderadores de neutrones.
- El procedimiento no es adecuado para suelos orgánicos o suelos con alto contenido de fragmentos gruesos.
- No se puede medir en los primeros 10-15 cm de suelo (con la sonda de profundidad).

Método de Atenuación de Rayos Gamma:

Este método se usa tanto en campo como en laboratorio y es otra técnica radioactiva usada para medir contenido de agua en el suelo, principalmente en columnas de suelo en el laboratorio, y en las últimas décadas se ha extendido su uso a mediciones de contenido de agua y de densidad aparente del suelo directamente en campo.

Principios:

Consiste en una sonda que contiene una fuente de rayos gamma, generalmente de Cs¹³⁷ que tiene una vida media de 30 años. Los rayos gamma son absorbidos por el suelo como una función de su energía, del número atómico de los elementos constituyentes y de la densidad del suelo.

El haz de rayos gamma es emitido y pasa a través del suelo, encontrándose en el otro extremo un detector para determinar los rayos gamma que consiguieron atravesarlo. La radiación es atenuada por los materiales del suelo de acuerdo a la ley de Lambert-Beer (Aragüez et al., 1986). Esta técnica se basa en que el coeficiente de absorción de los elementos, con un número atómico entre 2 y 20, es idéntico cuando se usa una misma energía de radiación. Como dichos elementos son predominantes en el suelo, un cambio en la absorción se deberá a una variación en el contenido de humedad del suelo.

Como el suelo tiene una densidad y espesor determinada, y el agua actúa también como atenuador, si la densidad y espesor del suelo permanecen constantes, las variaciones de la intensidad irradiada y detectada dependerá

Cálculos:

Para un haz de luz de intensidad I, el cambio de intensidad por unidad de peso $dI \cdot d^{-x}$ es igual a $-\mu_x I$; siendo μ_x el coeficiente de atenuación de la energía del fotón y la materia.

La intensidad I del rayo de luz que pasa a través del suelo se calcula como: n de la variación de la humedad del suelo.

$$I = I_0 \exp(-\mu_x * \rho_b * X)$$

Donde I es la tasa de conteo de rayos gamma no disipados al pasar a través del suelo; I₀ es la tasa de conteo al aire (sin suelo); ρ_b es la densidad aparente del suelo (Mg.m⁻³ o g.cm⁻³) y X es el espesor de la columna de suelo (m ó cm). En este caso se considera que los constituyentes del suelo y la densidad aparente no varían, solo varía el contenido de agua. Si el contenido de agua se considera constante, se pueden determinar cambios en la densidad aparente del suelo, reflejados por los cambios en I.

Determinación de los diferentes parámetros:

Coeficiente de absorción de masa del agua:

$$\mu_w = \frac{1}{\rho_w \cdot x}$$

Coeficiente de absorción de masa del suelo:

$$\rho_w \cdot \theta = \mu_s \cdot w_i \quad \mu_s = \frac{1}{\rho_w \cdot x} \ln \frac{N_0}{N} - \mu_w \cdot w_i$$

Densidad aparente del suelo:

$$\rho_s = \frac{1}{(\mu_w \cdot w_i + \mu_s) \cdot x} \ln \frac{N_0}{N}$$

Contenido de humedad del suelo:

$$\theta = \frac{1}{(\mu_w \cdot \rho_w \cdot x)} \ln \frac{N_0}{N} - \frac{\mu_s}{\mu_w \cdot \rho_w} \cdot \rho_s$$

Donde N es el número de rayos gamma por unidad de tiempo registrado por un contador después de pasar el rayo de luz a través de la muestra de suelo y N_0 es el número de rayos gamma por unidad de tiempo a través del aire (Verplancke, 1984; Florentino, 1985; Kutileck y Nielsen, 1994).

Existen también equipos para medir en campo tanto el θ como la densidad aparente del suelo, con dos sondas introducidas al suelo a través de dos tubos de acceso colocados a una distancia determinada. Una de las sondas contiene la fuente radiactiva y la otra el detector Geiger-Müller. Para la calibración se necesitan medidas de θ y de densidad aparente. Con esta sonda se puede medir hasta 60 cm de profundidad.

Ventajas:

- Es no destructivo.
- Es preciso.
- Es rápido y se pueden hacer mediciones continuas en el mismo sitio.
- Es sensible a cambios rápidos de humedad y de densidad aparente del suelo.

Limitaciones:

- Utiliza fuente radiactiva de alta peligrosidad.
- Es costoso.
- Requiere de técnicos especializados.
- Requiere de supervisión por parte de entes oficiales.
- Su adquisición debe ser especialmente autorizada.
- Es muy sensible a variaciones de densidad aparente del suelo.
- Necesita calibración.

3. Métodos de resistencia eléctrica:

Principio:

Se basan en la propiedad que tienen algunos materiales porosos como el yeso, el nylon o la fibra de vidrio, de conducir la corriente eléctrica, cuya resistencia está relacionada con el contenido de humedad. Si se introducen pequeños bloques de estos materiales en el suelo, con dos electrodos insertados en su interior, absorben agua en función del contenido de humedad del suelo, lo que da lugar a variaciones de la resistencia eléctrica. Si se mide esta resistencia eléctrica se puede determinar el contenido de humedad del suelo (Morell y Tuñón, 2003), así como, previa calibración, el potencial mátrico del agua en el suelo. La resistencia eléctrica de un suelo aumenta en la medida que

la humedad disminuye. Estos instrumentos han sido muy utilizados y útiles en la planificación del riego, ya que permiten cuantificar la cantidad de agua a aplicar y el momento más adecuado.

Bloques de yeso (Bouyoucos):

Descripción:

El bloque instalado en el suelo establece un equilibrio entre la humedad del suelo y su propia humedad, reflejado en el valor de resistencia. Un sensor de bloque de yeso constituye una célula electroquímica con una solución saturada de sulfato de calcio como electrolito. La resistencia eléctrica se mide aplicando un pequeño voltaje con un puente Wheatstone. Su rango de medida es de 30 a 200 kPa.

La calibración se hace en el laboratorio, relacionando el θ y el potencial mátrico con la resistencia eléctrica correspondiente, en un amplio rango de humedad.

Ventajas:

- Simple y barato.
- Provee lecturas directas de humedad del suelo.
- Efecto buffer sobre la salinidad del suelo hasta 6 dS/m.
- Muy utilizados para la planificación del riego.

Limitaciones:

- Baja resolución.
- No sirven para suelos arenosos o con fuerte agrietamiento.
- Las propiedades del bloque cambian con el tiempo debido a la disolución del yeso.
- Dependiente de la temperatura y afectado por el fenómeno de histéresis.
- Necesita calibración.

Sensores de matriz granular:

Descripción:

El sensor consiste de electrodos insertados en un material granular de cuarzo, rodeado por una membrana sintética y una malla protectora de acero inoxidable. Contiene yeso como buffer para la salinidad. Permite medir la humedad del suelo por períodos más largos que los bloques de yeso. Presenta problemas de rehumedecimiento si se seca a niveles muy bajos de humedad. Mide en un rango de -10 a -200 kPa (Muñoz-Carpena, 2004).

Ventajas:

- Reduce los problemas inherentes a los bloques de yeso.
- Simple y barato.
- Efectos de salinidad controlados hasta los 6 dS m⁻¹.

Limitaciones:

- Baja resolución.
- Tiempo de reacción lento.
- Es afectado por la temperatura.

4. Métodos eléctricos: método de electroresistividad de los 4 electrodos:

Se basan en el uso de una corriente eléctrica artificial que es introducida al suelo a través de dos electrodos con el objetivo de medir el potencial generado en otros dos electrodos cercanos al flujo de la corriente. Las relaciones entre corriente eléctrica, potencial eléctrico y disposición geométrica de los electrodos en la superficie del suelo, permiten calcular la resistividad real o aparente en el subsuelo.

El parámetro de la resistividad es el inverso de la conductividad eléctrica y puede ser considerado como la resistencia de los materiales a conducir la corriente eléctrica. La resistividad de suelos y rocas es afectada por los siguientes factores: Composición mineralógica, porosidad, contenido de agua, cantidad y naturaleza de las sales disueltas, siendo los más importantes el tenor de agua y las sales disueltas, que al aumentar llevan a una disminución de la resistividad. En esto se basa este método, el cual puede ser utilizado en estudios ambientales e hidrogeológicos (Aragües et al., 1986; Zúñiga et al., 2002).

Sensor de cuatro electrodos

Descripción general del método:

Con base en métodos utilizados por geólogos para la prospección geofísica, conocidos desde hace muchos años, Rhoades e Ingvalson (1971) desarrollaron un nuevo método en el cual se mide "in situ" la conductividad eléctrica de una masa o volumen de suelo por medio de cuatro electrodos.

El método de los 4 electrodos está basado en la medida, por medio de dos electrodos, de la resistencia eléctrica de un volumen determinado de suelo mientras se pasa una corriente eléctrica alterna por medio de otro par de electrodos situados externamente a los anteriores. De acuerdo a la configuración de los electrodos, con la medida de resistividad se puede determinar la humedad del suelo y la CE.

La CE aparente del suelo depende de una serie de factores: la CE del agua del suelo, del contenido volumétrico de agua en el suelo; de un factor de tortuosidad ligado a la geometría del espacio poroso atravesado por la corriente eléctrica y por la CE asociada a la matriz del suelo.

Diseño y propiedades del sensor de cuatro electrodos

Dentro de esta técnica se han diseñado básicamente tres sensores que difieren en la geometría y disposición de los cuatro electrodos:

- a. Configuración lineal horizontal
- b. Configuración vertical o sonda de cuatro electrodos
- c. Configuración circular o célula de cuatro electrodos

En los tres tipos de sensores se induce un flujo de corriente entre los dos electrodos internos en respuesta a la aplicación de una corriente eléctrica alterna entre los dos electrodos externos. Este flujo de corriente, que es debido al proceso de carga y descarga de las dobles capas eléctricas que rodean a los electrodos, está directamente relacionado con la concentración electrolítica de la solución, aunque hay otras variables que la afectan.

Un aspecto importante es que el voltaje a aplicar no debe exceder a unas décimas de voltio para evitar la hidrólisis del agua que requiere de al menos un voltaje de 1,23 V (Bohn et al., 1982).

Configuración lineal horizontal:

- En esta configuración se implantan en línea recta en la superficie del suelo, cuatro electrodos y se mide, por medio de un resistímetro, la resistencia eléctrica entre los dos interiores, mientras se hace pasar una corriente alterna constante entre los dos exteriores. Los electrodos deben ser metálicos y químicamente inertes, como de acero inoxidable, cobre o latón. El tamaño de los mismos no es crítico, aunque unas dimensiones de 45 x 1 cm son adecuadas en la mayor parte de los casos, excepto para lecturas muy superficiales en las que es preferible utilizar electrodos más pequeños. Se pueden tomar lecturas confiables hasta gran profundidad, dependiendo de la distancia entre los electrodos.
- La inserción de los electrodos en el suelo suele hacerse hasta unos 4 ó 5 cm de profundidad. La configuración horizontal es muy apropiada para medidas de salinidad y humedad a gran escala, dado que la misma mide de forma integrada desde la superficie del suelo hasta una profundidad que depende de la distancia entre los electrodos. Así, en la configuración horizontal Wenner (en la que todos los electrodos están separados por una distancia equidistante "a" cm), la profundidad y el volumen medido de suelo con aproximadamente "a" y "πa³" respectivamente, y la Cea (dS/m a 25 °C). A través de la configuración Wenner es posible asimismo obtener valores de humedad y CE a intervalos discretos de suelo realizando lecturas con distancias interelectrodos sucesivamente mayores (Aragües et al., 1986; Agodzo et al., 2000).

- Esta ecuación está basada en la hipótesis que la profundidad de medida es igual a la distancia interelectrodos y que los diferentes horizontes de suelo se comportan como un conjunto de resistencias en paralelo. Aún cuando ambas premisas no son rigurosamente ciertas (Nadler *et al.*, 1982; Aragüez *et al.*, 1986), esta ecuación es razonablemente precisa si se aplica a suelos relativamente uniformes.
- En la configuración horizontal (modificado por Rhoades, 1978), los electrodos internos se colocan a una distancia de los externos igual al 10 % de la distancia "y" entre los electrodos externos. En este caso la profundidad de la medida es aproximadamente igual a la tercera parte de "y" si el suelo está poco estratificado y el volumen de suelo medido es aproximadamente igual a $\pi(y \cdot 1/3)^3$.

Configuración vertical o sonda de cuatro electrodos

Es una sonda en la cual están insertados los cuatro electrodos como anillos circulares a diferentes alturas. Ésta se inserta a través de un agujero en el suelo a la profundidad deseada.

De forma análoga a la configuración horizontal, los dos anillos exteriores actúan como electrodos de corriente y los dos interiores como electrodos de medida del potencial, y el volumen medido de suelo varía con la distancia entre los electrodos.

Algunas sondas comercializadas tienen los electrodos exteriores a una distancia de 6,5 cm de los interiores y mide un volumen de suelo aproximado de 2.350 cm³. Puede también hacer corrección por temperatura hasta los 25 °C.

Nadler *et al.* (1982) desarrollaron una sonda vertical multielectrodos que permite leer la CE a diferentes profundidades de suelo con una sola unidad, lo cual supone un ahorro de dinero y trabajo muy sustancial.

Configuración circular o célula de cuatro electrodos

En esta configuración se insertan, a una determinada altura, cuatro o más electrodos en las paredes de un cilindro de plástico de dimensiones variables y se opera como en las otras dos configuraciones, es decir, de una serie de 4 electrodos los dos extremos actúan como electrodos de corriente y los dos interiores como electrodos de medida del potencial eléctrico.

A partir de la medida de la resistencia (Ohm) se calcula la CE y la humedad.

Esta célula se usa más en laboratorio, en columnas de suelo y para la calibración, dada la elevada precisión y reproducibilidad de este método.

Así se insertan varios electrodos a una determinada altura "y" a lo largo de todo el perímetro del cilindro; pueden tomarse tantas medidas independientes como electrodos implantados, con lo que el promedio es mucho más representativa que en otras configuraciones (Aragüez *et al.*, 1986). En el cuadro 1 se presentan las Ventajas y limitaciones de los sensores de cuatro electrodos .

Recomendaciones de instalación y uso

- En la configuración horizontal es importante mantener los electrodos limpios e insertarlos en el suelo, midiendo con precisión la distancia entre los electrodos con el fin de que las lecturas repetitivas sean siempre representativas del mismo volumen de suelo.
- En suelos con pendiente los electrodos deben colocarse siguiendo las curvas de nivel.
- Debe asegurarse que en las cercanías de los electrodos instalados no existan discontinuidades en el terreno o cambios importantes en las propiedades del suelo.
- Con la sonda vertical la medida superficial no debe ser menor a 15 cm para evitar flujo de energía a la atmósfera.

Otras aplicaciones importantes del método de los cuatro electrodos

- Identificación de áreas afectadas por sales.
- Realización de mapas de suelos afectados por sales, ya sea a nivel superficial como profundo, según la distancia de los electrodos.
- Monitoreo de la profundidad de la capa freática y de la salinidad del suelo.

Cuadro 1. Ventajas y limitaciones de los sensores de cuatro electrodos:

Configuración	Ventajas	Limitaciones
Horizontal	Es un método sencillo y rápido. No altera el suelo donde se mide. El volumen de suelo medido es relativamente muy alto (depende de la distancia de los electrodos) Posibilidad de realizar lecturas repetidas en un mismo punto Los electrodos permiten ser transportables cada vez que se va a medir; no hay que dejarlos permanentemente instalados en el campo. Es relativamente más económico (Rhoades, J. D. 1979)	Es afectado por la compleja geometría del medio poroso, las fuerzas de interacción de Coulomb, los fenómenos de polarización y la disposición estructural de las moléculas de agua. La estratificación del suelo puede ser un factor limitante que altera los resultados; funciona mejor en suelos homogéneos. Puede ser sensible a pequeñas variaciones en la distancia de los electrodos.
Vertical	Es un método sencillo y rápido. Permite medir en forma más precisa la distribución del agua en las diferentes profundidades del suelo, comparado con la configuración horizontal. Puede medir en forma independiente la temperatura del suelo.	Requiere de un agujero en el suelo para introducir la sonda. Menor volumen de suelo que la configuración horizontal. Debe existir un buen contacto suelo-equipo, lo cual es más crítico a bajos contenidos de humedad.
Circular	Es más precisa que las dos configuraciones anteriores. Permite medir en forma más precisa la distribución del agua en las diferentes profundidades del suelo, comparado con la configuración horizontal. Puede medir en forma independiente la temperatura del suelo.	Exige la toma de muestras de suelo sin alterar, que es un procedimiento engorroso y no práctico en trabajos rutinarios de control y diagnóstico. Requiere de un agujero en el suelo para introducir la sonda. Menor volumen de suelo que la configuración horizontal. Debe existir un buen contacto suelo-equipo, lo cual es más crítico a bajos contenidos de humedad.

5. Métodos dieléctricos

El contenido de agua en el suelo puede ser medido utilizando las propiedades de las ondas electromagnéticas. La velocidad de propagación de un pulso electromagnético es una función de la "constante dieléctrica" del medio en el cual éste se propaga (Dalton *et al.*, 1984; Dalton y van Genuchten, 1986; Florentino, 1990).

Los métodos dieléctricos consisten en una serie de métodos para medir el contenido de agua en el suelo a través de la medida de la permitividad o constante dieléctrica del mismo, K_a (Muñoz-Carpena, 2004). Son métodos basados en principios de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR), en el dominio de la frecuencia (FDR) ó en el dominio de la amplitud (ADR), que determina la velocidad de un pulso u onda electromagnética a través del suelo. Tanto el TDR, FDR, ADR como las sondas de capacitancia hacen uso de la marcada diferencia en permitividad que existe entre el agua (con una constante dieléctrica de 81), la fase mineral (entre 2-5) y gaseosa (1) del suelo, para estimar el grado de saturación del mismo, donde la permitividad total del suelo es gobernada principalmente por la presencia de agua líquida (Topp y Davis, 1985; Muñoz-Carpena, 2004; Inoue *et al.*, 2008).

Estos métodos, al igual que los otros métodos indirectos, necesitan de una curva de calibración que relaciona el contenido volumétrico de agua en el suelo (θ) y la permitividad (K_a), siendo desarrollada por Topp *et al.* (1980) una ecuación universal de calibración, adaptada para la mayoría de los suelos minerales (independiente de su composición y textura) y para contenidos de humedad inferiores a 50 %.

$$K_{ab} = 3,03 + 9,3\theta + 146 \theta^2 - 76,7 \theta^3.$$

También se puede expresar como:

$$\theta = (-530 + 292 K_{ab} - 5,5 K_{ab}^2 + 0,043 K_{ab}^3) \cdot 10^{-4}$$

Para suelos orgánicos, suelos volcánicos o bajo condiciones particulares y contenidos de agua superiores a 50 % esta ecuación no presenta buen ajuste, por lo que se necesita calibración específica. Por otro lado, una de las particularidades encontradas con estos métodos es que la relación θ (cm³/cm³) vs K_{ab} depende de la frecuencia de la onda electromagnética, lo cual limita el uso de esta ecuación universal. Otros factores que pueden afectar la permitividad efectiva del suelo (además de la humedad y frecuencia) son la temperatura, la salinidad, el contenido de materia orgánica, la mineralogía y el tamaño y forma de las partículas y los poros del suelo (Topp *et al.*, 1980; Campbell, 1990; Weitz *et al.*, 1997; Wraith y Or, 1999; Inoue *et al.*, 2004; Kelleners *et al.*, 2005).

Los métodos dieléctricos que se describen a continuación usan relaciones de calibración empíricas entre el θ (cm³/cm³) y la señal de salida del sensor (tiempo, frecuencia, impedancia, fase de onda, entre otros). Estas técnicas han sido muy bien adoptadas por los usuarios debido a que tienen una buena respuesta al tiempo, es decir, se obtienen medidas instantáneas, no requieren mantenimiento especial y se pueden obtener lecturas continuas mediante la automatización (Muñoz-Carpena, 2004).

Los principales tipos de equipos, basados en principios dieléctricos, que se describirán a continuación son: TDR (Reflectometría de dominio del tiempo), FDR (Reflectometría de dominio de la frecuencia) y ADR (Reflectometría de dominio de la Amplitud).

Reflectometría de dominio del tiempo (TDR):

Principio del TDR:

Básicamente, el contenido volumétrico del agua en el suelo se obtiene determinando la constante dieléctrica aparente del suelo, K_{ab} , al medir el tiempo requerido por una onda electromagnética para recorrer un par de varillas metálicas (electrodos) introducidas en el suelo (Jones *et al.*, 2002). La medición del tiempo se realiza por los cambios más o menos bruscos producidos por las variaciones en la impedancia cuando la onda pasa del cable al suelo al inicio de las varillas, lo que produce una reflexión parcial de la onda que regresa al reflectómetro, y un segundo reflejo que se produce cuando dicha onda alcanza el campo abierto al salir del extremo final de las varillas. En consecuencia, el camino recorrido es dos veces la longitud (L, m) de las líneas o varillas.

$$V = \frac{2L}{t}$$

Donde V es la velocidad de propagación del pulso electromagnético; t es el tiempo total de recorrido (nanosegundo); éste se mide directamente mediante la unidad TDR.

El tiempo de recorrido es solo función de dos constantes del suelo: la constante dieléctrica (K_{ab}) y la permeabilidad magnética (μ).

La velocidad de propagación del pulso electromagnético se relaciona con la "constante dieléctrica o permitividad (K_{ab})" global del medio a través de:

$$V = \frac{C}{(K_{ab} \cdot \mu)^{1/2}}$$

Donde C es la velocidad de propagación de la luz en el vacío (30 cm.ns^{-1}) ó $3 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$).

La μ en suelos es generalmente igual a 1; los únicos materiales con alta permeabilidad magnética son los ricos en hierro (Ej. la magnetita), aunque se ha encontrado que a las frecuencias normalmente usadas en TDR para medir humedad en el suelo, las propiedades magnéticas de estos no tienen ningún efecto importante sobre la calibración.

Los equipos TDR disponibles miden la Ka global del suelo utilizando la relación:

$$Ka_b = \left(\frac{C.t}{2L}\right)^2 \quad \frac{2L}{t} = \frac{C}{(Ka_b)^{1/2}}$$

Despejando Ka_b :

$$(Ka_b)^{1/2} = \frac{C.t}{2L} \quad Ka_b = \left(\frac{C.t}{2L}\right)^2$$

El valor de Ka_b se correlaciona luego con el contenido de humedad volumétrica mediante la ecuación universal o curva de calibración específica.

Es fundamental que la impedancia del cable conductor sea constante para evitar errores, lo cual fue un problema inicial cuando se desarrolló este método pero que ha sido corregido casi en su totalidad en los últimos tiempos.

Descripción: El TDR consiste de un equipo capaz de generar una serie de pulsos eléctricos de duración precisamente limitada, con un amplio rango de altas frecuencias usadas por diferentes equipos (Ej. 0,02 -3GHz), los cuales viajan a través de las varillas conectadas a un cable coaxial y una sonda. Esta alta frecuencia genera una respuesta menos dependiente de las propiedades específicas del suelo tales como textura, salinidad o temperatura.

La sonda TDR usualmente consiste de 2 a 3 electrodos metálicos que se insertan en el suelo y que actúan como guías de la onda. Los electrodos forman una línea de transmisión con una velocidad de propagación que es dependiente de la permitividad dieléctrica del medio alrededor de los electrodos. Al mismo tiempo, el TDR mide y digitaliza el nivel de energía de las varillas metálicas a intervalos alrededor de 100 picosegundos. Cuando el pulso electromagnético encuentra una discontinuidad, parte del pulso es reflejado, lo cual produce un cambio en el nivel de energía de las líneas de transmisión, por lo cual el tiempo de recorrido se determina por el análisis de los niveles de energía digitalizados.

Debido a la posible influencia de la salinidad en las medidas con TDR, muchos equipos hoy día incluyen también la posibilidad de medir simultáneamente el contenido de agua y la salinidad del suelo.

Las varillas pueden tener diferentes tamaños según la profundidad a la cual se quiera medir la humedad. Las dos o tres varillas se juntan mediante una resina sintética y se unen al equipo por medio de un cable coaxial con impedancia constante (50 Ohms) para evitar la reflexión que puede alterar la señal.

Ventajas del TDR:

- Es no destructivo.
- Permite medidas continuas y automatizadas *in situ* (Starr *et al.*, 1999).
- Usualmente no se requiere calibración específica; solo en algunos casos.
- Es muy preciso.
- Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas ya que permite también la inserción horizontal en el perfil de suelo.
- Puede medirse también la salinidad del suelo.
- Amplia disponibilidad de tipos de TDR.

- No trabaja con fuente radiactiva.
- Es poco influenciado por otras características del suelo como Da, textura, temperatura, etc.

Limitaciones:

- Relativamente costoso, aunque en los últimos años son más asequibles.
- Aplicabilidad potencialmente limitada en suelos altamente salinos o en suelos arcillosos muy pesados.
- Requiere calibración específica en algunas condiciones (Ej. suelos orgánicos y volcánicos).
- Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas).
- Para cada profundidad de medición se necesita insertar varillas metálicas, ya que por diferencia se va a obtener la humedad correspondiente a cada capa o espesor de suelo.

Reflectometría de dominio de la frecuencia (FDR):

Principio del FDR:

Este método utiliza baja frecuencia y, en general, una sola, a diferencia del TDR. Cuando un capacitor contiene suelo como dieléctrico entre dos electrodos, medidas de la constante dieléctrica del suelo pueden ser usadas para estimar el valor de θ . La capacitancia eléctrica de un capacitor (varillas de metal o electrodos) que usa el suelo como un dieléctrico depende del contenido de agua del suelo.

Al conectarse este capacitor, se forma un circuito eléctrico y se pueden detectar cambios en la humedad del suelo por cambios en la frecuencia de operación del circuito. Esta es la base de la técnica de dominio de la frecuencia usada en sensores de reflectometría de dominio de la frecuencia y capacitancia (Dirksen, 1999; Muñoz-Carpena, 2004). En FDR la frecuencia del oscilador es controlada dentro de un cierto rango de frecuencias hasta encontrar la frecuencia a la cual la amplitud es mayor, lo cual es una medida del contenido de agua en el suelo.

Descripción: La sonda consiste de dos o más electrodos (Ej. platos, varillas, o anillos de metal alrededor de un cilindro) que se insertan en el suelo o a través de un tubo de acceso instalado en el campo. Al aplicar un campo eléctrico, el suelo alrededor de los electrodos (o alrededor del tubo) forma el dieléctrico del capacitor que completa el circuito oscilante. La ventaja del uso de una sonda en vez de varillas es que permite tomar a la vez varias lecturas a diferentes profundidades usando varios sensores (Dean *et al.*, 1987; Dirksen, 1999; Muñoz-Carpena, 2004).

La frecuencia utilizada por estos equipos es de 100 MHz, por lo que se recomienda hacer una calibración específica para cada suelo. A esta baja frecuencia la permitividad aparente del suelo mineral puede cambiar y la estimación puede ser más afectada por la temperatura, salinidad, Da y contenido de arcilla que el TDR (alta frecuencia).

Ventajas del FDR:

- Es no destructivo.
- Permite medidas continuas y automatizadas *in situ*.
- Es preciso, después de hacer una buena calibración.
- Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas ya que permite también la inserción horizontal en el perfil de suelo.
- Puede medirse en suelos con altos niveles de salinidad donde no se puede hacer con TDR.
- Mejor resolución que el TDR.
- Amplia variedad de tipos de sondas.
- Es relativamente barato debido al uso de circuitos estándar de baja frecuencia.

Limitaciones:

- Requiere calibración específica
- Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor de lo largo de las varillas o del tubo de acceso).

- Requiere de una instalación cuidadosa para evitar bolsas de aire entre las varillas o tubo de acceso y el suelo.
- Sensibles a la temperatura, Da, contenido de arcilla y bolsas de aire que el TDR.

Reflectometría de dominio de la amplitud (ADR):

Principio del ADR:

Cuando una onda eléctrica (energía) que viaja a lo largo de una línea de transmisión alcanza una sección con diferente impedancia (la cual tiene dos componentes, la CE y la constante dieléctrica), parte de la energía transmitida es reflejada dentro del transmisor y se produce una onda de voltaje fijo a lo largo de toda la línea. Si la combinación suelo-sonda es la causa de los cambios de impedancia en la línea de transmisión, midiendo la diferencia de amplitud dará la impedancia de la sonda (Muñoz-Carpena, 2004).

Descripción: Los sensores de impedancia usan un oscilador que genera una onda electromagnética a una frecuencia determinada (100 MHz) que es aplicada a una línea de transmisión coaxial; los electrodos paralelos forman un campo eléctrico alrededor de ellos dentro del suelo. Este arreglo de los electrodos actúa como una sección adicional de la línea de transmisión, teniendo impedancias que dependen de la constante dieléctrica del suelo entre los electrodos.

Ventajas del FDR:

- Es no destructivo.
- Permite medidas continuas y automatizadas *in situ*.
- Es preciso, después de hacer una buena calibración.
- Se puede medir a cualquier profundidad en el perfil y en capas de suelo muy delgadas ya que permite también la inserción horizontal en el perfil de suelo.
- Puede medirse en suelos con altos niveles de salinidad donde no se puede hacer con TDR.
- Mejor resolución que el TDR.
- Amplia variedad de tipos de sondas.
- Es relativamente barato debido al uso de circuitos estándar de baja frecuencia.

Limitaciones:

- Requiere calibración específica
- Considera un pequeño volumen de suelo (alrededor del largo de las varillas o del tubo de acceso).
- Requiere de una instalación cuidadosa para evitar bolsas de aire entre las varillas o tubo de acceso y el suelo.
- Sensibles a la temperatura, Da, contenido de arcilla, pedregosidad y bolsas de aire que el TDR.

Existen sensores FDR que permiten simultáneamente medir el contenido volumétrico de iones en el suelo. Además existen muchos otros equipos con pequeñas variaciones en los principios de funcionamiento de los antes descritos que están disponibles en el mercado y que permiten, cada vez más, mayor accesibilidad a ellos debido a la reducción del costo y a su facilidad para ser utilizados. La mayoría permite automatizar la recolección de la información, almacenarla y pasarla directamente a la computadora para su procesamiento. En las figuras 5, 6 y 7 se pueden observar diferentes tipos de TDR, electrodos y sondas y su uso en campo.

Otros Métodos:

Existen muchos otros métodos que se han desarrollado, y que aún están en fase de investigación, para medir el contenido de agua en el suelo, tales como aquellos basados en la disipación de calor asociada a la conductividad térmica del agua, donde el flujo de calor en un medio poroso es proporcional a su contenido de agua, o aquellos basados en el uso del radar de penetración profunda (poco usado en la

actualidad), que se basa en principios similares al TDR pero que no requiere contacto directo entre el sensor y el suelo (aún está en fase de desarrollo) y otros métodos basados en inducción electromagnética o microonda activa y pasiva, sensores remotos, tomografía de rayos X y resonancia magnética nuclear.

Como puede observarse, es un tema de investigación actual de gran interés y prioridad para facilitar la medición del contenido de agua en el suelo, tal que no sea una excusa para seguir desarrollando investigaciones sin medir esta variable, aunque sea fundamental, por desconocimiento de la gran variedad de métodos que existen en la actualidad.

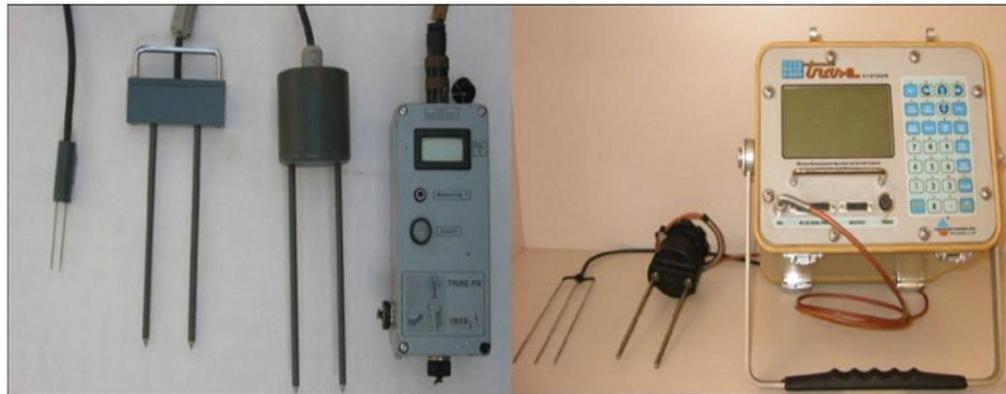


Figura 5. Diferentes tipos de TDR (Muñoz-Carpena, 2004).



Figura 6 . Sonda TDR junto con el tubo para la determinación de perfiles de humedad (adaptado de Morell y Tuñón, 2003)



Figura 7. Uso del TDR 200 en campo (Turén, estado Portuguesa)

Conclusiones, Recomendaciones y Perspectivas futuras:

- Existe una gran cantidad de métodos y equipos para medir y monitorear, tanto en campo como en laboratorio, el contenido de agua en el suelo; sin embargo, la selección del método adecuado para un objetivo específico no es simple, ya que ninguno es universal y todos ellos presentan ventajas y limitaciones que hay que considerar al momento de tomar la decisión.
- Una buena selección del método debe tomar en cuenta el objetivo del estudio, las características del suelo, la variabilidad, la precisión y rango de humedad que necesita, nivel técnico requerido para su utilización correcta y segura; necesidad de mantenimiento y supervisión por entes oficiales (métodos radiactivos), el presupuesto disponible, los riesgos de robo o para la salud.
- Los prototipos desarrollados en las últimas décadas, en general, muestran una buena respuesta a cambios en la humedad del suelo, sin embargo, las ecuaciones de calibración universales que traen incorporados ciertos equipos, así como la precisión de los sensores, deberían ser confirmadas mediante calibración en campo.
- Los métodos dieléctricos desarrollados en los últimos años (de alta frecuencia, TDR, sensores de capacitancia, FDR, entre otros) ofrecen una gran gama de equipos, relativamente económicos, con buena precisión a pesar de ser de medición indirecta que necesitan calibración, sin embargo, aún se requieren mejoras que faciliten su uso.
- El método termogravimétrico/termovolumétrico sigue siendo fundamental como método de referencia para la calibración de muchos otros métodos.
- Si requiere alta precisión y mediciones por mucho tiempo, en ensayos a largo plazo, puede considerarse el uso de la sonda de neutrones más que el TDR.

- Las investigaciones futuras deberían estar orientadas al desarrollo de nuevas técnicas o al mejoramiento de las que existen actualmente, sobre todo en cuanto a reducir la necesidad de calibración y disminuir la alteración del sitio, por ejemplo técnicas de sensores remotos; por otro lado, hacia el desarrollo de equipos multifuncionales, que permitan medir, además de la humedad del suelo, otras variables tales como concentración iónica, salinidad, pH, temperatura, potencial mátrico.

LITERATURA CITADA

- Agodzo, S.K.; P.Y. Okyere; K. Kusi-Appiah.** 2000. The use of Wenner configuration to monitor soil water content, European Society of Agricultural Engineers (EurAgEng), Bedford. pp. 1–3.
- Aragües, R.; M. Millán; D. Quilez; M. Fernández.** 1986. Métodos de medida de la salinidad del suelo. Comunicaciones INIA, Serie General N° 18, Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, España, 172 p.
- Bohn, H. L.; J. Ben-Asher; H.S. Tabbara; M. Marwan.** 1982. Theories and tests of electrical conductivity in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 1143-1146.
- Campbell, J.E.** 1990. Dielectric properties and influence of conductivity in soils at one to fifty megahertz. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 54:332-341.
- Dalton, F.N.; M. van Genuchten, M.** 1986. The time-domain reflectometry method for measuring soil water content and salinity. *Geoderma*, 38: 237-250.
- Dalton, F.N., W.N. Herkelrath; D.S. Rawlins; J.D. Rhoades.** 1984. Time-domain reflectometry: simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe. *Science*, 224: 989-990.
- Dean, T.J., J.P. Bell; A.J.B. Baty,** 1987. Soil moisture measurement by an improved capacitance technique: Part I. Sensor design and performance. *J. Hydrol.*, 93: 67-78.
- Dirksen, C.** 1999. Soil Physics Measurements. GeoEcology paperback. Catena Verlag, Reiskirchen, Germany, 154 pp.
- Evelt, S.R.; J.L. Steiner, J.L.** 1995. Precision of neutron scattering and capacitance type soil water content gauges from field calibration. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 961-968.
- Florentino, A.** 1985. Importancia y posibilidad de empleo de técnicas nucleares en estudios de física de suelo en Venezuela. Mimeografiado Curso "Técnicas nucleares aplicadas a la agricultura". UCV-Maracay y LUZ-Maracaibo, 17 p.
- Florentino, A.** 1990. Método TDR (Time Domain Reflectometry) para medir la humedad en el suelo. Mimeografiado. Curso Física de Suelo. Postgrado en Ciencia del Suelo, Universidad Central de Venezuela, 6 p.
- International Atomic Energy Agency (IAEA).** 1970. A guide-book on theory and practice. Technical Reports Series N° 112, IAEA, Vienna, Austria.
- Inoue, M.; Ould Ahmed, B.A.; Irshad, M.** 2008. Comparison of twelve dielectric moisture probes for soil water measurement under saline conditions. *American Journal of Environmental Sciences* 4 (4): 367-372.
- Jones, S.B.; J.M. Wraith; D. Or.** 2002. Time domain reflectometry measurement principle and applications. *Hydrol. Processes*, 16: 141-153.
- Kelleners T.J.; D.A. Robinson; P.J. Shouse; J.E. Ayars; T.H. Skaggs.** 2005. Frequency dependence of the complex permittivity and its impact on dielectric sensor calibration in soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 69: 67-76.
- Kutílek, M.; D. R. Nielsen.** 1994. Soil hydrology. GeoEcology textbook. Catena Verlag, Alemania, 370 p.
- Morell, I.; J. Tuñón, J.** 2003. Algunos problemas instrumentales relacionados con la determinación del balance hídrico del suelo. En "Operatividad de la instrumentación en aguas subterráneas, suelos contaminados y riesgos geológicos", IGME MADRID, España, 44 p.
- Muñoz-Carpena, R.** 2004. Field devices for monitoring soil water content. University of Florida, IFAS Extension Bulletin 343, Florida, USA, 16 p.
- Murakoa, T.; E.A. Tzi Tziboy.** 2000. Mejoramiento del uso del agua en la agricultura: El papel de las técnicas nucleares. Centro de Energía Nuclear Na Agricultura (CENA), Universidade de Sao Paulo, Piracicaba, Brasil, 131 p.

- Nadler, A.; M. Magaritz; Y. Lapid; Y. Levy.** 1982. A simple system for repeated soil resistance measurement at the same spot. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 46: 661-663.
- Ponizovsky A.A.; S.M. Chudinova; Y.A. Pachepsky.** 1999. Performance of TDR calibration models as affected by soil texture. *Journal of Hydrology* 218. pp 35-43.
- Rhoades, J. D.; R.D. Ingvalson.** 1971. Determining salinity in field soils with soil resistance measurements. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 54-60.
- Rhoades, J. D.** 1978. Monitoring soil salinity: a review of methods. En: L.G. Everett y K.D. Schmidt (Eds.) Establishment of water quality monitoring programs, Vol. 2. American Water Resources Association, San Francisco, CA. pp 150-165.
- Rhoades, J. D.** 1979. Inexpensive four-electrode probes for monitoring field salinity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 43: 817-818.
- Seyfried, M.S.; M.D. Murdock.** 2004. Measurement of soil water content with a 50-MHz soil dielectric sensor. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 394-403.
- Starr, C. G., B. Lowery; E.T. Cooley; G.L. Hart.** 1999. Soil water content determination using network analyzer reflectometry methods. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63(2):286-289.
- Topp, G.C.; J.L. Davis,** 1985. Measurement of soil water content using time-domain reflectometry (TDR): A field evaluation, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49: 19-24.
- Topp, G.C., J.L. Davis; A.P. Annan,** 1980. Electromagnetic determination of soil water content: Measurements of coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, 16: 574-582.
- Topp, G.C.; S. Zegelin; I. White.** 2000. Impact of real and imaginary components of relative permittivity on time domain reflectometry measurement in soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1244-1252.
- Verplancke, H.** 1984. Determination of soil moisture content by neutron scattering and gamma-ray attenuation technique. Mimeografiado. Curso "Uso de isótopos y técnicas de radiación en estudios de física de suelo". Dpto. de Física de Suelo, Universidad de Gante, Bélgica, 56 p.
- Weitz, A.M., W.T. Grauel, M. Keller y E. Veldkamp.** 1997. Calibration of time domain reflectometry technique using undisturbed soil samples from humid tropical soils of volcanic origin. *Water Resour. Res.*, 33:1241-1249.
- Wraith, J.M.; Or, D.** 1999. Temperature effects on soil bulk dielectric permittivity measured by time domain reflectometry: Experimental evidence and hypothesis development. *Water Resour. Res.*, 35: 361-369.
- Zúñiga, O.; Gascó, J. M.; Florentino, A.** 2002. Nuevas técnicas no destructivas en el manejo de suelos y plantas como herramientas para una agricultura de precisión: Técnica Geoeléctrica. En: O. Zúñiga y J. Pohlan (Edits), "Agricultura Orgánica en Colombia: Un enfoque analítico y sintético", Universidad del Valle, Cali, Colombia, pp 125-140.