

DEFINICIÓN DEL VOLUMEN DE SUELO HÚMEDO (VSH) EN MICROIRRIGACIÓN, MEDIANTE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA: APLICACIÓN AL ESTUDIO DEL PORCENTAJE DE VSH EN EL COMPORTAMIENTO DEL MANZANO (*MALUS DOMESTICA* BORKH)

J.R. Gispert-Folch

Departamento de Arboricultura Mediterránea. Centro de Mas Bové. Apdo. Correos 415, 43280 REUS (Tarragona). Institut de Recerca i Tecnologia Agroalimentàries (IRTA); joanramon.gispert@irta.es

RESUMEN. El trabajo presenta una modificación de la metodología de Wenner, usada para el cálculo de la resistividad eléctrica (ρ) en estudios geoelectrónicos, y define el desarrollo del volumen de suelo húmedo (VSH) generado en la ZNS a partir de un punto de emisión en un sistema de microirrigación.

Algunos factores esenciales que definen el parámetro de resistividad eléctrica aparente (ρ_a) de un suelo tales como la resistencia eléctrica (Ω), la temperatura ($^{\circ}$ C) y el nivel de saturación de agua (%) son estudiados de forma individual y conjunta. Se presenta la correlación negativa existente entre la resistividad aparente del suelo respecto a la temperatura y el nivel de saturación. Asimismo a partir de un suelo caracterizado edafológicamente se hace una aplicación de esta metodología y se define la forma y tamaño del VSH generado.

En una experiencia aplicativa de campo que introduce el concepto de VSH respecto al Volumen de Exploración Potencial Radicular (VEPR) se estudia la influencia de 3 porcentajes (VSH / VEPR x 100) sobre el comportamiento agronómico del manzano (*Malus domestica* BORKH). Para ello, en una parcela de cultivo intensivo (3.5 x 1) de manzano Golden Delicious sobre pie enanizante (EM-IX), se establece una dotación muy similar de riego para cada uno de los 3 diferentes porcentajes VSH/VEPR x 100 y se observa y contrasta la respuesta productiva y de calidad del fruto obtenido.

ABSTRACT. The work shows a modified Wenner's methodology used to calculate the electric resistivity (ρ) in geoelectric studies, and that defines the development of the Wet Soil Volume (WSV) generated in the vadose zone in an emission point of a drip irrigation system.

Several important factors in the soil that define the Apparent Electric Resistivity (ρ_a) such as the Electric Resistance (Ω), temperature ($^{\circ}$ C) and water saturation level (%) are studied individually and in combination. The negative correlation between apparent electric resistivity of the soil and temperature and level of saturation is presented. Also, this methodology is applied in a pedologic characterized soil to define the shape and the size of the WSV generated.

In an applied field experiment that introduces the concept of WSV with regard to the Root Potential Explored Volume (RPEV), the influence of three percentages (WSV / RPEV x 100) on the agronomic behaviour of the apple tree (*Malus domestica* BORKH) is studied. In a plot of Golden Delicious intensive crop (3.5 x 1) with dwarf trunk (EM-IX), the productivity and fruit quality are observed and contrasted for the different percentages of WSV / RPEV x 100, under similar quantity of irrigation applied.

1. Introducción

El proceso de diseño en un sistema de microirrigación o riego localizado de alta frecuencia, contempla dos fases claramente diferenciadas y a su vez complementarias: diseño agronómico y diseño hidráulico.

La primera fase ha de garantizar que la instalación suministre, con una eficiencia de aplicación óptima, las necesidades hídricas del cultivo durante el período de mayor consumo. Todo ello, además, mojando un volumen de suelo suficiente, para alcanzar un adecuado desarrollo del cultivo con las mínimas pérdidas de agua por percolación profunda.

La segunda fase ha de evaluar el dimensionado óptimo de las conducciones que han de satisfacer las exigencias establecidas en la fase anterior.

El diseño agronómico proporciona, por tanto, la base fundamental para efectuar los cálculos y decisiones posteriores, donde el mejor aprovechamiento del agua pasa por el conocimiento del movimiento y distribución de la misma en la zona no saturada del suelo (ZNS). Ello comporta, por tanto, hacer una buena estimación de la forma y dimensiones que adopta ese desplazamiento tridimensional o volumétrico en esa ZNS del suelo regado.

Mientras en los sistemas de riego convencionales por inundación o gravedad predomina el movimiento vertical hacia abajo, debido a la acción gravitatoria, cuando el agua es aplicada desde un origen puntual (gotero) entran en juego, además, los mecanismos que gobiernan el flujo horizontal, por los cuales los volúmenes húmedos del suelo

tenderán a adoptar formas diversas según las características del entorno.

A la variada disposición tridimensional que puede ocupar el agua en el desplazamiento de su frente de humedad, tanto en sentido horizontal como vertical, en un determinado suelo y a partir de un punto de emisión recibe el nombre de volumen de suelo húmedo (VSH) (Roth, 1974; Esteve, 1986; Hernandez et al. 1987; Rodrigo et al. 1992; Gispert y García, 1994; Zur, 1996).

La geofísica aplicada mediante métodos en el campo de la electricidad permite medir determinadas propiedades físicas del subsuelo.

En este sentido, diversos han sido los trabajos desarrollados en los que se usan métodos de prospección geoelectrónica para el estudio del comportamiento del suelo en relación a los recursos hídricos (Rhoades, 1979; Griffiths y Turnbull, 1985; Barker, 1989; Frohlich y Parke, 1989).

Los equipos para aplicar esos métodos funcionan mediante dos electrodos- o tomas de tierra- (A y B), que introducen una corriente eléctrica en el terreno y con otros dos (M y N), intercalados, se investiga el campo eléctrico por aquellos creado.

El método geoelectrónico de Wenner permite investigar cambios de resistividad de un suelo a profundidad constante según la fórmula para dispositivos tetraelectrónicos:

$$\rho_1 = K \cdot R ; K = 2 \pi MN \quad (1)$$

donde:

R = Resistencia (Ω)

MN = Ecuidistancia de espaciado entre electrodos (m)

ρ = Resistividad ($\Omega \cdot m$)

Si el suelo no es homogéneo, el valor de la resistividad corresponderá a la 'Resistividad Aparente', la cual será aproximadamente el valor medio de la resistividad del suelo a una profundidad igual a la equidistancia de separación de electrodos MN.

Algunos trabajos relacionados con este tema (Archie, 1942; Dunlap et al. 1949; Rhoades et al. 1976; Urish, 1981; Po-zen Wong et al. 1984; Huntley, 1986; Johnson et al. 1986) indican, por una parte, la gran influencia que ejerce sobre el valor global de la resistividad aparente de un suelo, la propia resistividad del agua presente en los poros del mismo. Esa resistividad hídrica porosa es debida, en primer lugar, al contenido de agua presente (nivel de porosidad) y, en segundo lugar, a los electrolitos en disolución que esta contiene.

También los trabajos desarrollados por Kean y Rogers (1981) indican que la resistividad eléctrica aparente del suelo es debida, principalmente, a la conducción iónica en el flujo poroso (la resistencia decrece con el incremento de la salinidad), también por el incremento de la temperatura y de la saturación. Estos trabajos determinan las relaciones entre resistividad, saturación y temperatura, utilizando distintos tipos de suelos (arena, arena y grava, materiales gruesos), distintas calidades de agua (0.4 dS / m a 1.6 dS / m) y distintas temperaturas (1 a 20° C)..

El ajuste de la resistividad en función de la temperatura del suelo se obtiene según la siguiente fórmula:

$$\rho_2 = (T_2 - T_1) \cdot B + \rho_1 \quad (2)$$

Siendo:

ρ_2 = Resistividad ajustada a una temperatura T_2 de referencia y valor constante ($\Omega \cdot m$).

ρ_1 = Resistividad correspondiente a la temperatura T_1 real según fórmula (1).

B = Pendiente de la función de resistividad versus temperatura.

Los trabajos anteriores indican que la resistividad decrece con el aumento de la salinidad, aumento de la temperatura y reducción del nivel de saturación.

Shea y Luthin (1961) estudiaron la evolución de la resistividad del suelo en función de la disminución del contenido de humedad en el mismo. El trabajo demuestra que la reducción no es lineal, ya que la resistividad eléctrica va aumentando a medida que el suelo se va secando, hasta que la película de agua sobre las partículas se hace muy delgada produciéndose una discontinuidad eléctrica y, entonces, la resistividad aumenta marcadamente.

Una modificación en la metodología de WENNER, antes mencionada, y un nuevo prototipo o Equipo Medidor del Volumen de Suelo Húmedo (EMVSH), adaptado para poder medir la forma y tamaño del VSH, fue presentado en trabajos anteriores de la ZNS (Gispert y García, 1999; Gispert, 2003).

Partiendo de aquel precedente, el trabajo actual introduce el concepto, más universal, de Resistividad Eléctrica Aparente (ρ) y hace un estudio de algunos aspectos importantes relacionados con el comportamiento de la resistividad aparente del suelo como son la temperatura (°C) del mismo y el nivel de saturación de agua (%) presente.

Al aplicar la metodología modificada de WENNER y al considerar el efecto térmico, además del hídrico del suelo, se alcanzan valores más ajustados de resistividad eléctrica aparente y, a su vez, una mejor definición del contorno del VSH.

Se presenta, a su vez, un estudio aplicativo de la metodología que permite comparar la influencia de 3 porcentajes de VSH sobre el comportamiento productivo y de calidad del fruto en el cultivo del manzano.

El trabajo se ratifica de nuevo, al igual que en el precedente (Gispert, 2003), en los conceptos de 'Volumen de Exploración Potencial Radicular' (VEPR) y VSH, a diferencia de otros trabajos que utilizan parámetros de superficie (Área mojada, Área sombreada).

2. Material y métodos

2.1. Evaluación de la forma y tamaño del volumen de suelo húmedo (VSH).

Mediante el empleo de un equipo para muestreo de suelos Eijkelkamp se recogieron diversas muestras aleatorias de suelo y subsuelo (0-30 y 30-60 cm) de la parcela experimental. Las muestras correspondientes a cada profundidad fueron mezcladas entre sí para obtener una media representativa de cada nivel.

En cada muestra media representativa se determinó su textura y densidad aparente (g/cm^3) lo cual permitió, posteriormente, calcular el contenido volumétrico de agua en el suelo. Para ello fueron sometidas a un tamizado (tamiz luz 2 mm) y a un proceso de saturación (24 h). Para determinar su capacidad de retención de agua disponible (CRAD), las muestras fueron introducidas en un equipo de placas porosas Richard's (Soil Moisture Equipment) donde se determinó a 0.2 y 15 bares de presión el contenido volumétrico de agua.

Antes de iniciar la aplicación del riego se hizo una evaluación del nivel de humedad presente (%) en el suelo y subsuelo y una valoración del nivel de resistividad eléctrica ($\Omega\cdot\text{m}$) mediante el EMVSH, para así disponer de valores patrón o de referencia.

Para ello se introdujo, verticalmente, un conjunto de electrodos dispuestos en posición transversal al suelo, separados 10 cm entre sí y unidos mediante conducto bifilar a un multímetro. Ello permitió valorar la resistividad eléctrica a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm) mediante la fórmula de WENNER (1) a la temperatura del suelo en aquel momento (22°C). En esos mismos puntos y profundidades se recogieron muestras de suelo, mediante equipo Eijkelkamp y se determinó, por gravimetría, su contenido volumétrico de agua.

Para determinar el posible efecto de la temperatura del suelo sobre la lectura el valor de la resistividad eléctrica, las muestras de suelo fueron recogidas antes del inicio del riego, a dos profundidades (0-30 y 30-60 cm) y se aplicó, en laboratorio, un gradiente térmico.

Cada muestra se sometió a una temperatura máxima de 40°C y con los electrodos del EMVSH, situados a 10 cm de separación y 0.5 cm de profundidad, se hicieron lecturas consecutivas de resistividad eléctrica ($\Omega\cdot\text{m}$) cada 10°C de descenso ($40^\circ, 30^\circ, 20^\circ, 10^\circ$ y 0°C).

Los gráficos de correlación entre la temperatura y la resistividad permiten un mejor ajuste de los valores de resistividad aparente para las distintas capas del suelo en que las temperaturas del mismo pueden tener ciertas variaciones. El valor de la pendiente (B) de la función de resistividad versus temperatura indica, para cada tipo de suelo, la variación de la resistividad ($\Omega\cdot\text{m}$) por cada grado ($^\circ\text{C}$) de oscilación de la temperatura en el suelo. Ello facilita el ajuste de los valores de resistividad para una temperatura de referencia constante en el suelo.

Una vez finalizada la aplicación del riego se procedió a realizar las lecturas de resistividad eléctrica con ajuste para una temperatura constante del suelo a 22°C . Para ello en las diferentes profundidades del VSH se fue considerando la fórmula (2) para el cálculo de la resistividad. Asimismo se recogieron diversas muestras húmedas de suelo en varios puntos y profundidades para poder llevar a cabo un estudio de su correlación entre el contenido de humedad y la resistividad eléctrica.

Para el contenido de humedad final alcanzado por el VSH se tomó como referencia una muestra mojada del suelo dentro el núcleo central del mismo, ubicada en la vertical del punto de irrigación a unos 30 cm de profundidad, mediante muestreo con barrena de media

caña, a las 24 horas de aplicar el riego y evaluación por gravimetría.

2.2. Influencia del porcentaje de volumen de suelo húmedo sobre el comportamiento del manzano.

Se estableció y se hizo el seguimiento de una experiencia de riego en manzano, en una parcela de tipo intensivo, ubicada en un medio edafo-climático y en unas condiciones de cultivo típicas de la zona.

Las características de la experiencia fueron las siguientes:

Lugar: Fundación Mas Badía (IRTA).

Comarca: Baix Empordà (Girona).

Cultivo: Manzano.

Variedad: Golden Delicious.

Marco de plantación: 3.5 x 1

Año de plantación: 1988

Superficie experimental: 650 m^2

Sistema de riego: Microirrigación (goteo).

Gotero: Netafim 8 l/h; 3 horas / riego

Período experimental: 1998 a 2000 (3)

Área sombreada / árbol: 5 m^2

Suelo: Muy homogéneo. Textura franco arenosa (0-30) y Arenosa franca (30-60). No salino ($\text{CE} = 0.22\text{ dS}/\text{m}$)

El porcentaje de VSH se estableció en base a un volumen de exploración potencial radicular (VEPR) considerando como tal aquel constituido por un cilindro de suelo, debajo del cultivo, cuya base era la proyección de la copa (πR^2) y cuya altura (H) la profundidad máxima estimada para las raíces.

Tratamientos por árbol:

T_1 : 1 gotero / árbol

T_2 : 2 goteros / árbol

T_3 : 3 goteros / árbol

Diseño estadístico:

Bloques al azar, con 3 repeticiones, 3 tratamientos y 5 observaciones por repetición y tratamiento.

3. Resultados y discusión

3.1. Definición del volumen de suelo húmedo en base a la resistividad eléctrica del suelo.

La forma y tamaño del VSH, como factor esencial del diseño de un sistema de riego y uso eficiente del agua, dependerá en gran medida del contenido inicial de agua en el suelo.

Por este motivo se efectuó en la parcela una caracterización hidrológica, a nivel de suelo y subsuelo (0-30 y 30-60 cm), para valorar el contenido volumétrico de agua a capacidad de campo (CC) y en punto de marchitamiento permanente (PM). Los contenidos

respectivos fueron del 19% (CC) y 5% (PM) hasta 30 cm y del 16% (CC) y 5% (PM) de 30 a 60 cm.

Asimismo se evaluó de forma aleatoria, dentro de la parcela, el contenido hídrico inicial del suelo a 2 profundidades haciéndose, paralelamente, lecturas de la resistividad (Tabla1).

Tabla 1. Contenido volumétrico (%) de agua en el suelo, antes del inicio de la prueba de campo, y valor de su correspondiente resistividad eléctrica ($\Omega.m$) a una temperatura de 22° C .

Profundidad (cm)	D _{ap} (g/cm ³)	Agua (%)	Resistividad ($\Omega.m$)
0-30	1.45	9	18840
30-60	1.50	11	15700

Puede observarse en la Tabla 1 el parecido contenido de agua presente en el suelo, antes del inicio del riego, y su ligera diferencia en el valor de la resistividad eléctrica.

El efecto que ejerce la temperatura del suelo sobre el valor de su resistividad eléctrica fue estudiado, a nivel de laboratorio, para 2 profundidades del mismo (Fig. 1).

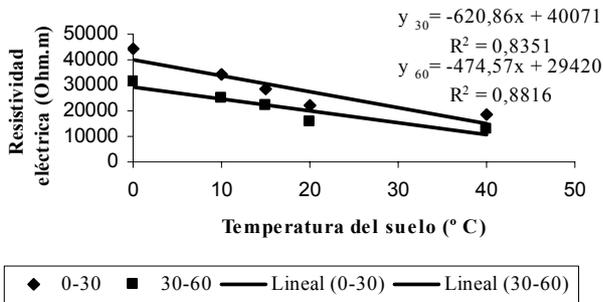


Fig. 1. Correlación entre la temperatura (°C) del suelo y su resistividad eléctrica ($\Omega.m$) a 2 profundidades (0-30 y 30-60 cm), antes del inicio de la prueba de campo.

El estudio de la Fig. 1 indica una alta correlación ($R^2 > 0.83$) negativa entre el incremento de la temperatura del suelo y el descenso de su resistividad eléctrica, aspecto que coincide con las conclusiones obtenidas por otros autores (Kean y Rogers, 1981).

En el caso concreto del suelo objeto del presente estudio se observa, también, una gran similitud de comportamiento, respecto a la temperatura en ambas profundidades de muestreo. Un ligero incremento en el contenido de arena y humedad a una mayor profundidad del suelo da lugar a una ligera disminución en los valores de la resistividad eléctrica.

La disminución de esa resistividad, por cada grado de incremento de temperatura en el suelo, se corresponde con 620.86 $\Omega.m$ hasta 30 cm de profundidad y 474.57 $\Omega.m$ de 30 a 60 cm.

El estudio del efecto del nivel de saturación del suelo (%) respecto al valor de la resistividad eléctrica ($\Omega.m$), una vez finalizada la prueba de campo y constituido el VSH, se indica en la Fig. 2.

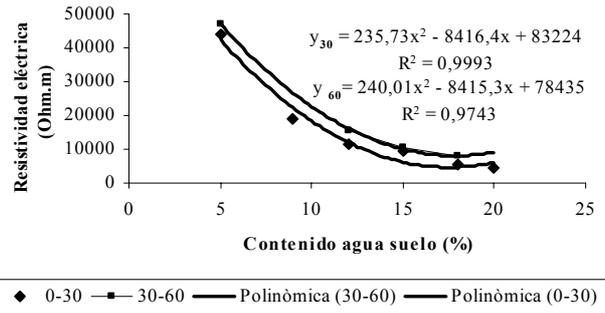


Fig. 2. Correlación entre el contenido de humedad en el suelo (%) y su resistividad eléctrica ($\Omega.m$) a 2 profundidades (0-30 y 30-60 cm) a una temperatura del suelo de 22° C.

Los gráficos correspondientes a la a la Fig.2 indican una muy alta correlación entre el nivel de saturación del suelo y la resistividad eléctrica que aquel genera ($R^2 > 0.97$). Se observa que a mayor saturación del medio existe menor resistividad al paso eléctrico y viceversa.

La forma no lineal de la función indica, también, un aumento de la resistividad eléctrica del suelo a medida que este se va secando, hasta que crece bruscamente por una discontinuidad en la película de agua sobre la partícula mineral. Ese comportamiento ratifica las conclusiones de Shea y Luthin (1961) en el mismo sentido.

A partir de una prueba de campo, con goteros de 4 y 8 l/h, se hizo la evaluación de la forma y tamaño del VSH a las 24 horas de finalizar el riego, para favorecer la redistribución del agua a lo largo del perfil del suelo.

Los valores de resistividad y contenido de humedad dentro el VSH, comparados con los valores de esos mismos parámetros para el suelo circundante, que se hallaba más seco, permitió ir definiendo el contorno del frente de humedad. En el eje vertical, por debajo del gotero, es donde se alcanzaron los mayores valores de saturación del suelo, iguales o superiores al punto de capacidad de campo.

Las Fig(s). 3 y 4 indican los desplazamientos verticales y horizontales alcanzados por los VSH en la prueba de campo realizada con goteros de 8 y 4 l/h en una parcela experimental de la Fundación Mas Badía (IRTA).

La prueba, efectuada con un contenido inicial de agua en el suelo próxima al 50% de su agua útil, finalizó con un contenido variable alrededor del punto de capacidad de campo (16-19%).

La forma más regular y vertical en el desarrollo del VSH del gotero de 4 l/h indica un comportamiento típico de un suelo de textura gruesa que, al poseer buena permeabilidad y velocidad de infiltración, facilita el desplazamiento gravitacional del agua cuando esta es aplicada con un bajo caudal.

Las características de los VSH desarrollados por el gotero de 8 l/h, a medida que se incrementa la cantidad total de agua aportada y aumenta la saturación del suelo, van aumentando en sentido horizontal.

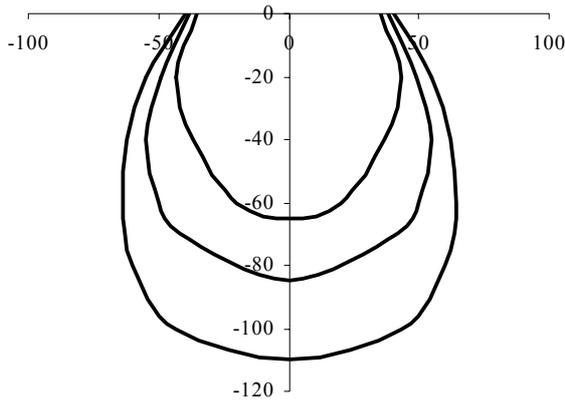


Fig. 3. Sección y desarrollo del VSH generado con un gotero de 8 l/h durante un período creciente de riego (1, 2 y 3 horas) en una parcela con textura franco-arenosa a nivel de suelo y arenosa en el subsuelo.

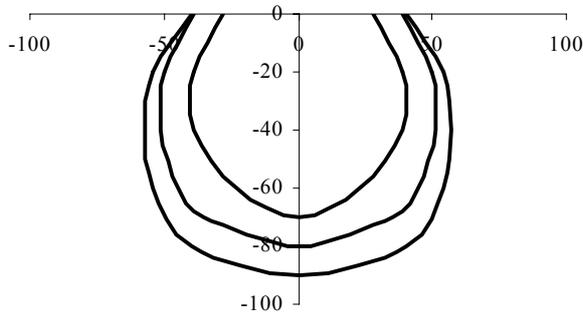


Fig. 4. Sección y desarrollo del VSH generado con un gotero de 4 l/h durante un período creciente de riego (1, 2 y 3 horas) en una parcela con textura franco-arenosa a nivel de suelo y arenosa en el subsuelo.

3.2. Estudio del porcentaje de VSH en el comportamiento del manzano.

En base a los datos precedentes de la prueba de campo realizada en la propia parcela se consideró oportuno establecer en la experiencia un gotero de 8 l/h que durante un tiempo de riego de 3 horas genera un VSH de 0.92 m³. Los valores porcentuales de ocupación volumétrica de suelo húmedo, por árbol y tratamiento fueron los siguientes:

$$VEPR = \pi r^2 h = 5 \text{ m}^2 \times 1.00 \text{ m} = 5 \text{ m}^3$$

- T₁: 0.92 m³ (18.5 % de VEPR)
- T₂: 1.84 m³ (37.0 % de VEPR)
- T₃: 2.76 m³ (55.5 % de VEPR)

En base al anterior planteamiento experimental y en función de las necesidades evapotranspirativas semanales del cultivo, corregidas con las aportaciones pluviométricas correspondientes; se hizo la programación del riego para cada campaña durante un periodo de 3 años. La dosis media de riego aportada durante el período experimental fue de 1456 l/ árbol y campaña (4160000 l/ha), para todos los tratamientos.

La Fig. 5 indica la tendencia de la producción media de manzana (Kg/ ha) obtenida durante el período experimental (1998 a 2000) en función del porcentaje de VSH respecto al de exploración potencial radicular (VEPR).

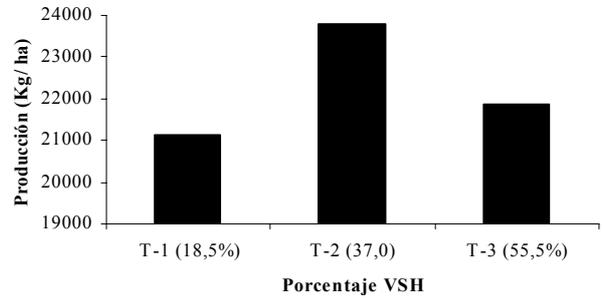


Fig. 5. Producción media (kg/ha) de manzana en función del porcentaje de VSH respecto al VEPR.

La mayor producción se obtuvo cuando ese porcentaje fue del 37% con 23783 kg/ha, el cual destacó de manera significativa ($\alpha = 0.05$) respecto al porcentaje del 18.5% con 21120 kg/ha.

No se observó, en cambio, incidencia sobre el calibre del fruto (80 mm), como consecuencia de variar el porcentaje de VSH.

La evolución del crecimiento en relación al porcentaje de VSH se presenta en la Fig. 6.

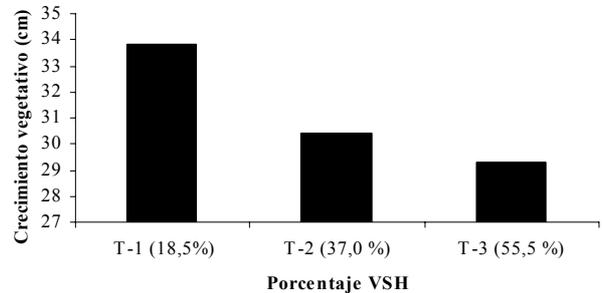


Fig. 6. Crecimiento vegetativo medio (cm/brote) en manzano en función del porcentaje de VSH respecto al VEPR.

La mayoría de años durante el período experimental (98/00) se observó un mayor crecimiento vegetativo en aquellos árboles con menor cosecha (T-1, 18.5%). Ello es, hasta cierto punto, lógico ya que una menor carga del árbol suele estimular como respuesta una mayor producción de biomasa. Sin embargo, las diferencias entre tratamientos no fueron significativas (33.82 cm T-1 y 29.32 cm T-3).

4. Conclusiones

A partir de la metodología de Wenner, básicamente utilizada para estudios geoelectrónicos, se ha modificado en su aplicación con el uso de un 'Equipo Medidor Volumen

Suelo Húmedo' (EMVSH). El cálculo de la resistividad eléctrica ($\Omega.m$) con ese equipo, corregida en función de la temperatura del suelo ha permitido definir, de manera más exacta, el desarrollo del volumen de suelo húmedo (VSH). Tanto la temperatura como el grado de saturación del suelo son factores altamente correlacionados con la resistividad eléctrica.

La experiencia de campo indica una mejor respuesta productiva (kg/ha) para un porcentaje de suelo mojado del 37%, ya que un mayor porcentaje (55.5%) no incrementa de forma significativa la producción. En cambio, un menor porcentaje (18.5%) sí que afecta significativamente esa producción.

La menor carga productiva del árbol favorece, en cambio, un mayor crecimiento vegetativo en el tratamiento con menor porcentaje de suelo mojado (18.5%).

Agradecimientos. El autor quiere hacer llegar su agradecimiento al ingeniero técnico, especialista en riego y compañero del IRTA, José García Fábrega, por su colaboración en todos los trabajos y controles de campo en la parcela experimental. También al ingeniero agrónomo Joan Bonany Rocas de la Fundación 'Mas Badia' (IRTA), por la cesión y disponibilidad de la parcela experimental y todo su soporte en la programación semanal del riego y a todos los estudiantes en prácticas que han colaborado en la toma de datos.

Referencias

- Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. Trans., Am. Inst. Mining metallurg. Eng. Vol.146. 54-62 p.
- Barker, R.D. 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. Geophysics, 54. 1031- 1037 p.
- Dunlap, H.F., Bilharz, H.L., Shuler, E. y Bailey, C.R. 1949.-The relation between electric resistivity and brine saturation in reservoir rocks. Trans., Am. Inst. Mining Metallurg.Eng. Vol. 186. 259- 264 p.
- Esteve, J. 1986. Apuntes sobre riego localizado. Capítulo II. Servicio de Extensión Agraria. MAPYA. 29-37 p.
- Frohlich, R.K. y Parke, C.D. 1989. Electrical Resistivity of the Vadose Zone. Ground water. Vol.27. Núm. 4. 524- 530 p.
- Gispert, J.R. 2003. Evaluación del volumen de suelo húmedo en microirrigación. Influencia del porcentaje de este volumen sobre el comportamiento del olivo (*Olea Europaea* L.; Cult. 'Arbequina'). Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol.VI. Eds. J. Alvarez-Benedí, P.Marinero. Valladolid. 51- 57 p.
- Gispert, J.R. y García, J. 1999. El volumen húmedo del suelo en el riego localizado. Importancia y evaluación. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo. Vol. IV. Eds. R.Muñoz-Carpena, A.Ritter, C.Tascón. ICIA.Tenerife. 11-17 p.
- Gispert, J. R. y García, J. 1994. El volumen húmedo del suelo. Aspectos agronómicos relacionados con la microirrigación (I). Riegos y drenajes XXI / 76. 26-33 p.
- Griffiths, D.H. y Turnbull, J. 1985. A multi-electrode array for resistivity surveying. First Break 3. 16-20 p.
- Hernandez, J.M., Rodrigo, J., Perez, A. y Gonzalez, J.F. 1987. El riego localizado. Curso Internacional de Riego Localizado. Tenerife (España). INIA-MAPYA.137-150 p.
- Huntley, D. 1986. Relations between permeability and electrical resistivity in granular aquifers. Ground water. Vol. 24. Núm.4. 466- 474 p.
- Johnson, D.L., Koplik, J. y Schwartz. 1986. New pore size parameter characterizing transport in porous media. Physical Review Letter. Vol. 57. Núm.20. 2564- 2567 p.
- Kean, W.F. y Rogers, R.B. 1981. Monitoring leachate in ground water by corrected resistivity methods. Bull. Assoc. of Engineering Geologists. Vol. XVIII. 101- 107 p.
- Po-zen Wong, Koplik, J. y Tomanic, J.P. 1984). Conductivity and permeability of rocks. Physical Review B. Vol.30. Núm.11. 6606-6614 p.
- Rhoades, J.D. 1979. Inexpensive four-electrode probe for monitoring soil salinity. Soil Sci.Soc.Amer.J.43. 817- 818 p.
- Rhoades, J.D., Raats, P.A.C. y Prather, R.J. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. Soil Science Society of America Journal. Vol 40. 651- 655 p.
- Rodrigo, J., Hernández, J.M., Perez, A. y Gonzalez, J.F. 1992. Riego localizado. Ed.Mundi-Prensa. 159-187 p.
- Roth, R.L. 1974. Soil moisture distribution and wetting pattern from a point source. En II Internat. Drip Irrigation Congress Proceeding. California, USA. 246-251 p.
- Shea, P.F. y Luthin, J.N. 1961. An investigation of the use of the four-electrode probe for measuring soil salinity in situ. Soil Science. Vol. 92. 331- 339 p.
- Urish, D.W. 1981. Electrical Resistivity- Hydraulic Conductivity Relationships in Glacial Outwash Aquifers. Water Resources Research. Vol. 17. Núm.5. 1401- 1408 p.
- Zur, B. 1996. Wetted soil volume as a design objective in trickle irrigation. Irrigation Science 16. 101-105 p.