

CARACTERIZACIÓN HÍDRICA DE UN SUELO DE LA ZONA CENTRO DE PORTUGAL PARA USO FORESTAL

C. VIDAL CALVO¹; E. ALVAREZ RODRÍGUEZ¹ y C. M. ARRUDA PACHECO².

¹ Departamento de Edafología y Química Agrícola. E.P.S. Universidad de Santiago de Compostela. Campus de Lugo. 27002-Lugo.(España)

² Departamento de Ciências do Ambiente. Instituto Superior de Agronomia. Universidad Técnica de Lisboa. 1399-Lisboa Codex. (Portugal)

Abstract: The methodologies used for determining the hydrodynamic characters of a soil with direct measures "in situ". It's a not saturated soil placed in the zone center-south of Portugal with a sand texture, with a low enclosure of organic materials and high density. It's speed of infiltration is about 20 mm/h, calculated with the double ring method and infiltrometer of flooding by aspersion. After that we follow the distribution of water of soil with hydric profiles with neutrons sonder and TDR. It was aplicated for calculating of drainage the method of internal drainage obtained a speed of 13 mm/day in the first phase and 0,2 in the last one. The evaporation was calculated by the method of balance of plain of null flux get speeds of 2-0,8 mm/day. The capacity of retention of water for plants it will be 197,35 mm.

Key words: Relations water-soil, Hydric profile, Evaporation, Drainage, Infiltration, Capacity of camp.

Resumen: Se presentan las metodologías empleadas para determinar las características hidrodinámicas de un suelo con medidas directas "in situ". Se trata de un suelo no saturado situado en la zona centro-sur de Portugal de textura arenosa, bajo contenido en materia orgánica y densidad aparente elevada. Su velocidad de infiltración es de 20 mm/h, calculada con el método del doble anillo e infiltómetro de inundación por aspersion. Posteriormente se siguió la distribución del agua del suelo con levantamiento de perfiles hídricos con sonda de neutrones y TDR. Se aplicó para el calculo del drenaje el método del drenaje interno obteniéndose una velocidad de 13 mm/día en la primera fase y 0.2 en la última. La evaporación se calculó con el método del balance del plano de flujo nulo generando velocidades de 2-0.8 mm/día. La capacidad de retención de agua disponible para las plantas será de 197.35 mm.

Palabras clave: Relaciones suelo-agua, Perfil hídrico, Evaporación, Drenaje, Infiltración, Capacidad de campo

INTRODUCCIÓN

Los movimientos de transferencia de agua, de sustancias, de aire o de calor en un suelo, así

como los intercambios con la atmósfera y las plantas juegan un papel primordial en el estudio de los medios naturales. El suelo, la planta y la atmósfera forman un sistema dinámico

físicamente integrado en el que los diversos procesos que afectan al flujo del agua están interrelacionados (Hillel, 1984). El estudio del agua y sus movimientos es esencial para la producción agrícola y forestal, ya que las variaciones locales debidas al tipo de suelo, especialmente las relacionadas con la retención de agua, causan variaciones de productividad casi tan acentuadas como las debidas a variaciones climáticas (Pereira et al, 1989). Esta información sobre disponibilidad y movimiento de agua es de gran utilidad para disponer de una base que permita un criterio técnico a la hora de seleccionar el uso del suelo más adecuado, o para prever los efectos de una disminución de las precipitaciones sobre plantas ya establecidas.

En este trabajo se presenta una metodología para poder cuantificar y modelizar los procesos de circulación, flujo y acumulación de agua en un suelo desnudo (infiltración, drenaje, evaporación, conductividad hidráulica, capacidad de campo y punto de marchitamiento). Estos parámetros permitirán calcular posteriormente en un eucaliptal experimental, mediante el modelo del balance hídrico, el efecto de las precipitaciones sobre la alimentación hídrica del eucalipto, así como su productividad, integrando la hidrología del suelo con las relaciones hídricas suelo-planta.

MATERIAL Y MÉTODOS

La parcela experimental para la caracterización hídrica se sitúa en una zona sin repoblar dentro de un eucaliptal de 2 has. denominado Agolada, en la región del Ribatejo en la zona centro-sur de Portugal. Los suelos de la parcela están desarrollados sobre areniscas consolidadas dentro de la mancha Miopliocénica del complejo arcillo-arenoso que existe en la región. Utilizando la clasificación climática de Köppen presenta un clima mesodérmico húmedo, con una estación seca en el verano y con un superávit muy grande de agua en el invierno, es decir clima Csa.

Se trata de suelos profundos (más de 2 m.), de textura ligera, con un predominio de arena en todos sus horizontes, y un bajo contenido de arcilla y materia orgánica (Tabla 1). La densidad aparente es elevada, con valores superiores a 1.6 g/cm³, alcanzando un máximo (1.8 g/cm³) en los horizontes más profundos (Tabla 1). A ésta granulometría le corresponderá una elevada macroporosidad, permeabilidad y una baja capacidad de retención de agua disponible para las plantas.

La caracterización hidrodinámica del suelo se basó en el levantamiento de perfiles hídricos en todos los experimentos con sonda neutrónica (TROXLER 4300 y SOLO 40) en intervalos de

Tabla 1. Composición granulométrica, porcentaje de carbono y densidad aparente del perfil del suelo.

| Profund (cm) | E.G. (%) | A.G. (%) | A.F. (%) | L (%) | A (%) | Textura | m.o. (%) | D.a (g/cm ³) |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------------|-------------|-----------------------------|
| 0-30 | 12,4 | 82,1 | 12,3 | 3,8 | 1,8 | arenosa | 2,3 | 1,63 |
| 30-70 | 19,3 | 70,6 | 10,7 | 4,1 | 14,6 | franca-arenosa | 0,2 | 1,76 |
| 70-130 | 27,6 | 80,0 | 15,0 | 3,4 | 1,6 | arenosa | 0,1 | 1,74 |
| 130-170 | 11,8 | 56,1 | 27,0 | 10,8 | 6,1 | franca-arenosa | 0,1 | 1,64 |
| 170-200 | 28,8 | 62,9 | 24,0 | 10,2 | 2,9 | arenosa-franca | 0,3 | 1,81 |

(E.G.= elementos gruesos; A.G.= arena gruesa; A.F.= arena fina; L= limo; A= arcilla; m.o.= materia orgánica; D.a.= densidad aparente)

20 cm. (radio de la esfera de influencia) hasta una profundidad aproximada de 2 m. Se eligieron los métodos neutrónicos por tratarse de aparatos de elevada exactitud, no destructivos del parámetro medido (lo que permite realizar varias lecturas en el mismo punto observando las variaciones en el tiempo) y que generan una perturbación mínima del suelo. Sólomente en el estudio de la variación de agua en el horizonte superficial se recurrió a la metodología del Time Domain Reflectometrie-TDR (TRASE SYSTEM 1), debido a la inexactitud de la sonda de neutrones en ese horizonte. Las curvas de calibración de las sondas y la normalización de las medidas fueron determinadas en el campo por el método gravimétrico con apertura de perfil (Salgado *et al.*, 1990). Con los perfiles levantados se obtuvo el volumen de agua acumulada en todo el perfil así como la variación entre dos consecutivos mediante la ecuación:

$$S_{\text{total}} = \theta_{20} * 30 + \sum (\theta_x * e)$$

donde θ representa el contenido de humedad volumétrica en un determinado punto de medida y e es el radio de la esfera de influencia de donde provienen aproximadamente el 95% de los registros.

Para el cálculo de la velocidad de infiltración se instalaron 2 infiltrómetros de doble anillo (Musgrave, 1953) y 4 infiltrómetros de inundación por aspersión (Arruda), levantándose en todos perfiles hídricos con la sonda neutrónica. Los infiltrómetros de doble anillo se instalaron durante el período húmedo (con lo que la evaporación será despreciable), los cuales se controlaron durante 6 horas, al cabo de las cuales la velocidad corresponde a un régimen relativamente estabilizado. Los infiltrómetros de inundación por aspersión se mantuvieron en funcionamiento durante 5 horas dos días consecutivos, con el fin de observar la estabilización de la velocidad. En todos ellos se realizaron lecturas con la sonda neutrónica en el centro del infiltrómetro al efecto de obtener los perfiles de distribución.

La información obtenida se complementó con la medición de la conductividad hidráulica "in situ" con el permeámetro de Guelp, méto-

do estandarizado para la determinación de la conductividad hidráulica del suelo saturado a carga constante. Se basa en el método Porchet consistente en crear unas condiciones de saturación en el espesor objeto de medida, aportando agua.

La medida del drenaje interno se efectuó en el infiltrómetro de doble anillo una vez que en el suelo desaparece la lámina de agua. Comienza un flujo de escurrimiento vertical, que consta de un movimiento ascendente (evaporación) y otro descendente (drenaje), el plano de intersección de las dos secciones corresponde a un plano de flujo nulo (Vachaud *et al.*, 1978). Si se aísla la superficie con un mulch de paja y plástico para evitar las transferencias ascendentes queda un único movimiento descendente (drenaje interno) que impone la situación de flujo nulo en superficie, que según la ley de Darcy será cuando $\delta H / \delta z = 0$ siendo δH el gradiente de carga hidráulica y δz la profundidad. Basándonos en estas directrices -método del drenaje interno-, se controló el drenaje mediante levantamiento de perfiles con sonda de neutrones durante 5 meses. Los intervalos de medida fueron de 2 horas los primeros días para captar el drenaje rápido, y de 7-15 días en los siguientes meses para captar el drenaje lento.

La medida de la evaporación se realizó en el infiltrómetro por aspersión. En este caso el aislamiento sólo se produce durante 3 ó 4 días. Se puede suponer que tras este tiempo, el plano de flujo nulo se encuentra por debajo de los 50 cm, y en esta profundidad sólo hay un movimiento ascendente, pudiendo despreciar el drenaje (método del balance del plano de flujo nulo). Las variaciones de agua en los 4 primeros días se obtuvieron con sonda de neutrones (drenaje), y posteriormente con TDR en superficie (evaporación) a intervalos de 10 cm hasta una profundidad de 50 cm. durante 1 mes.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las velocidades de infiltración obtenidas

en las dos réplicas de los infiltrómetros de doble anillo muestran una variabilidad importante (Tabla 2), oscilando la velocidad básica o final entre 65 y 15 mm/h. Esta diferencia podría atribuirse bien a la heterogeneidad de los pediones debida a la quema de troncos del eucaliptal precedente, que puede originar en algunos casos cenizas que dificultan la mojabilidad del suelo y como tal afectan a su capacidad de infiltración, bien a grietas producidas por las raíces en el proceso de levantamiento de tocones.

El movimiento seguido por el agua aportada genera un perfil hídrico en el suelo (Figura 1). Comienza con una zona saturada en la parte superior que alcanza una profundidad de 50 cm y una zona inferior que conserva la humedad inicial (a partir de 1.60 m.). Ambas están separadas por una zona de transmisión con régimen no saturado, pero cercano a la saturación.

La comparación de las velocidades de infiltración y la variación de agua acumulada en dos

perfiles consecutivos, medidos en el centro del infiltrómetro, indica las pérdidas obtenidas por flujos laterales, ya que la sonda sólo capta el volumen de agua existente en la vertical de su esfera de influencia (20 cm). Aunque el doble anillo cuenta con un sistema para evitar pérdidas de agua por flujos laterales y favorecer la verticalidad, existen pérdidas de hasta 50 mm.

Los resultados de las réplicas del infiltrómetro por aspersión fueron más homogéneos. Haciendo un tratamiento conjunto de los datos obtenemos una tasa de infiltración del orden de 20 mm/h (Tabla 3), comparable a la obtenida en uno de los infiltrómetros de doble anillo (15 mm/h). La Figura 2 corresponde al doble anillo que generó una infiltración de 65 mm/h, más concordante con la textura del suelo, dando lugar a un perfil completamente irregular, frente a las Figuras 1 y 3 que representan la otra replica del doble anillo y el infiltrómetro por aspersión respectivamente y cuyos perfiles representan nítidamente el avance del frente de

Tabla 2. Velocidades de infiltración (mm/h) y perfiles hídricos obtenidos en las dos repeticiones del infiltrómetro de doble anillo.

| POSICIÓN 1 | Tiempo acumulado (horas) | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| Profundidad. (cm) | | | | | | | |
| 0-30 | 35 | 74 | 77 | 76 | 76 | 76 | 76 |
| 30-70 | 65 | 71 | 82 | 88 | 91 | 90 | 92 |
| 70-130 | 92 | 132 | 136 | 133 | 143 | 143 | 143 |
| 130-190 | 93 | 104 | 109 | 114 | 111 | 110 | 113 |
| 190-240 | 142 | 144 | 143 | 144 | 143 | 143 | 143 |
| A. acumu. (mm) | 427 | 525 | 547 | 555 | 564 | 565 | 566 |
| Diferencia (mm) | | 98 | 22 | 8 | 9 | 1 | 1 |
| Vel infilt (mm/h) | | 109 | 87 | 60 | 63 | 65 | 65 |
| POSICIÓN 2 | | | | | | | |
| 0-30 | 37 | 44 | 55 | 61 | 63 | 60 | 61 |
| 30-70 | 49 | 50 | 52 | 60 | 67 | 67 | 68 |
| 70-130 | 55 | 55 | 55 | 54 | 58 | 66 | 77 |
| 130-190 | 154 | 155 | 153 | 153 | 153 | 153 | 155 |
| 190-240 | 153 | 153 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 |
| A. acumu. (mm) | 448 | 456 | 471 | 483 | 496 | 501 | 516 |
| Diferencia (mm) | | 8 | 15 | 13 | 13 | 5 | 15 |
| Vel infilt (mm/h) | | 19 | 15 | 15 | 23 | 19 | 15 |

(0= perfil inicial seco)

Tabla 3. Diferencias entre perfiles hídricos consecutivos y velocidades de infiltración (mm/h) en los infiltrómetros de inundación por aspersión.

| PRIMER DÍA | Tiempo acumul (horas) | | | | | |
|-------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A. acumu. (mm) | 267,69 | 279,94 | 299,18 | 315,07 | 337,73 | 353,52 |
| Diferencia (mm) | | 12,24 | 19,25 | 15,89 | 22,66 | 15,79 |
| Vel infilt (mm/h) | | 29,03 | 26,64 | 21,35 | 20,85 | 20,69 |
| SEGUNDO DÍA | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| A. acumu. (mm) | 328,0 | 341,64 | 348,25 | 367,14 | 375,81 | 381,7 |
| Diferencia (mm) | | 13,64 | 6,61 | 18,89 | 8,66 | 5,96 |
| Vel infilt (mm/h) | | 25,84 | 21,99 | 22,24 | 21,18 | 20,51 |

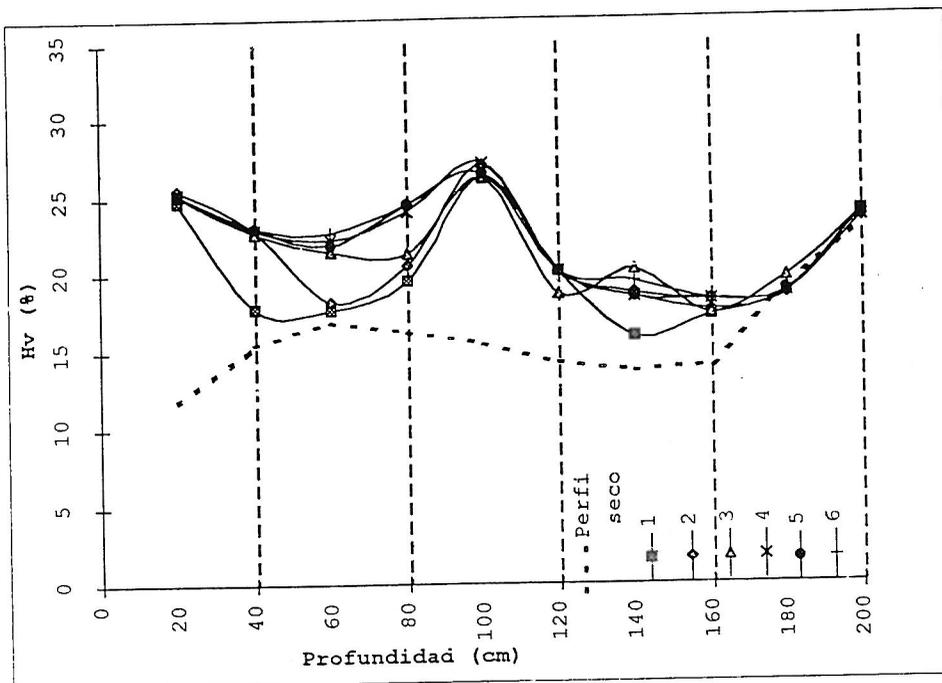


Figura 1. Perfiles hídricos levantados con sonda de neutrones durante el ensayo de infiltración en la posición 1 del doble anillo.

humedad, confirmando una velocidad de 20 mm/h para este suelo. Esta velocidad es moderada según el criterio de London (1984). Esta velocidad, relativamente baja contrasta con la granulometría arenosa del perfil del suelo (Tabla 1) a la que le correspondería mayor permeabilidad. La infiltración vendrá condicionada por la conductividad hidráulica de los distintos horizontes del suelo. La conductividad media oscila entre 25 y 105 mm/h en los horizontes arenosos de baja compactación, entrando dentro del intervalo orientativo para su textura arenosa (Youngs, 1991). Sin embargo la existencia de un horizonte inferior de areniscas compactas con una conductividad inferior a 1 mm/h y una densidad aparente más elevada (Tabla 1) explica la ineficacia en este tramo para la transferencia de agua. Este horizonte que funciona como una "costra" dificulta el movimiento vertical del agua y favorece su transferencia lateral,

cambiando el comportamiento hidrológico del suelo de forma importante. (Figura 2).

En el posterior seguimiento de la redistribución del agua aportada en el infiltrómetro de doble anillo, para el cálculo del drenaje interno, se observó una fase de drenaje rápido con una duración de 2-3 días con una velocidad de drenaje de 13 mm/día. Esta velocidad descendió entre el tercer y el quinto día a valores de 1 a 3 mm/h. A partir del quinto día el proceso de drenaje se mantiene sin cesar hasta el fin del periodo observado, aunque ya con valores de 0.2-0.4 mm/día. Esta fase considerada de drenaje lento genera un flujo que se consideró despreciable a efectos prácticos debido a que al no existir una capa freática en este suelo, nunca se alcanzará un estado de equilibrio (Koorevaar *et al.*, 1983). En la Tabla 4 aparecen los distintos perfiles levantados con las sondas generado por el efecto de la gravedad.

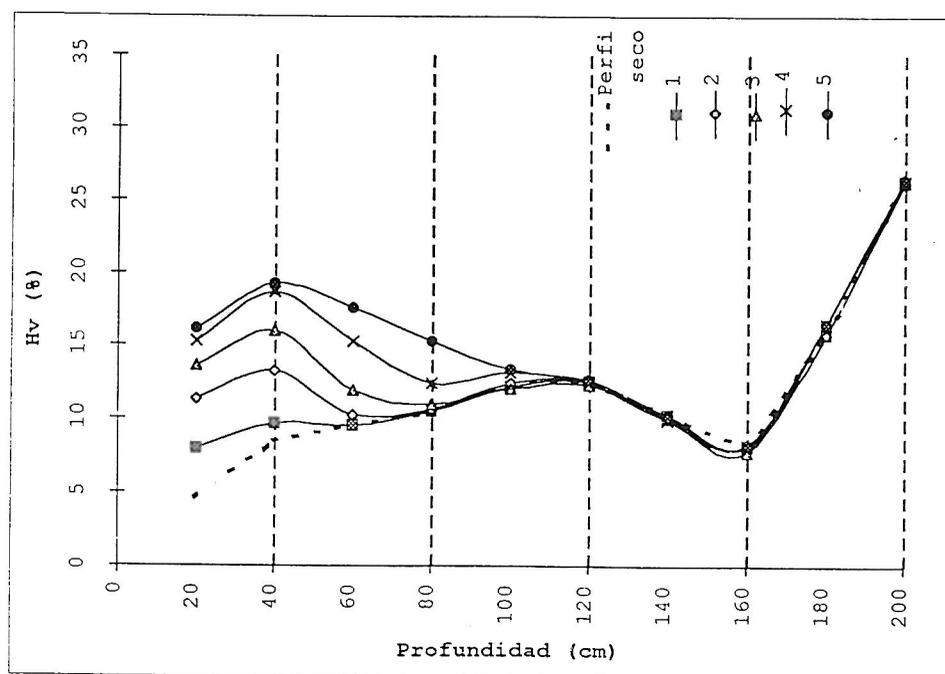


Figura 2. Perfiles hídricos levantados con sonda de neutrones durante el ensayo de infiltración en la posición 2 del doble anillo.

| POSICIÓN 1 | | Tiempo acumulado (días) | | | | | | | | | | |
|---------------|--------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Profund (cm) | 0,85 | 2,70 | 5,75 | 13,75 | 26,75 | 45,15 | 61,55 | 76,45 | 90,35 | 109,55 | 129,45 | 143,55 |
| 20 | 17,65 | 16,16 | 14,29 | 13,90 | 12,99 | 10,85 | 9,70 | 9,17 | 6,95 | 5,76 | 5,00 | 4,58 |
| 40 | 21,73 | 20,20 | 18,98 | 18,20 | 17,06 | 14,32 | 13,71 | 13,14 | 9,91 | 6,51 | 5,20 | 5,07 |
| 60 | 21,12 | 20,42 | 19,50 | 18,85 | 18,15 | 15,89 | 14,84 | 14,66 | 11,22 | 8,52 | 6,86 | 6,56 |
| 80 | 20,24 | 19,68 | 18,41 | 17,45 | 17,11 | 14,80 | 13,97 | 13,49 | 11,35 | 9,74 | 8,12 | 7,25 |
| 100 | 20,38 | 19,02 | 18,11 | 17,15 | 16,06 | 14,23 | 13,40 | 14,18 | 11,96 | 10,78 | 10,00 | 9,17 |
| 120 | 17,32 | 16,76 | 15,39 | 15,32 | 14,71 | 13,09 | 12,18 | 13,23 | 11,79 | 11,09 | 9,87 | 9,83 |
| 140 | 16,36 | 15,58 | 14,45 | 14,66 | 13,40 | 12,44 | 11,66 | 13,83 | 11,44 | 10,91 | 10,00 | 9,69 |
| 160 | 16,23 | 15,32 | 14,53 | 14,18 | 13,23 | 12,14 | 11,74 | 12,35 | 11,61 | 11,35 | 9,96 | 10,04 |
| 180 | 19,85 | 18,02 | 17,63 | 17,11 | 16,23 | 13,36 | 12,14 | 12,09 | 12,57 | 11,70 | 10,39 | 9,56 |
| 200 | 23,43 | 23,25 | 23,65 | 24,04 | 23,43 | 19,33 | 15,32 | 13,88 | 18,98 | 15,45 | 11,66 | 10,87 |
| 220 | 23,60 | 23,43 | 23,43 | 23,34 | 23,51 | 22,95 | 21,68 | 23,25 | 22,95 | 21,99 | 20,86 | 20,20 |
| 240 | 23,99 | 23,69 | 24,65 | 24,43 | 24,69 | 24,65 | 23,21 | 24,39 | 25,08 | 23,04 | 23,17 | 22,51 |
| A. acum (mm) | 501,47 | 479,22 | 461,30 | 451,18 | 434,12 | 386,90 | 356,77 | 360,49 | 338,58 | 299,45 | 267,16 | 255,26 |
| Diferenc (mm) | 19,00 | 22,26 | 17,91 | 10,13 | 17,05 | 47,23 | 30,12 | 13,71 | 21,91 | 39,13 | 32,29 | 11,90 |
| Drenaj (mm/d) | 22,35 | 8,24 | 3,12 | 0,74 | 0,64 | 1,05 | 0,49 | 0,05 | 0,24 | 0,36 | 0,25 | 0,08 |
| POSICIÓN 2 | | Tiempo acumulado (días) | | | | | | | | | | |
| Profund (cm) | 0,30 | 2,05 | 5,10 | 13,10 | 26,10 | 44,50 | 60,90 | 75,80 | 89,70 | 108,90 | 128,80 | 142,90 |
| 20 | 16,96 | 16,31 | 14,94 | 13,71 | 13,64 | 13,45 | 13,79 | 12,68 | 10,81 | 7,79 | 6,99 | 5,69 |
| 40 | 16,28 | 13,53 | 14,49 | 14,10 | 14,05 | 13,71 | 13,88 | 13,44 | 11,74 | 9,26 | 5,55 | 5,55 |
| 60 | 13,84 | 13,01 | 12,62 | 11,96 | 11,92 | 10,74 | 12,09 | 11,31 | 9,78 | 8,47 | 5,07 | 5,07 |
| 80 | 11,70 | 11,22 | 10,35 | 9,69 | 9,48 | 8,78 | 10,00 | 8,74 | 8,04 | 6,86 | 5,86 | 4,72 |
| 100 | 12,00 | 10,13 | 9,69 | 9,43 | 8,82 | 8,08 | 8,78 | 8,39 | 7,60 | 6,69 | 6,03 | 5,16 |
| 120 | 13,18 | 10,78 | 9,96 | 10,65 | 9,26 | 8,30 | 8,21 | 10,22 | 7,82 | 7,47 | 6,25 | 6,29 |
| 140 | 24,43 | 21,38 | 21,03 | 22,56 | 20,24 | 16,84 | 16,15 | 21,95 | 17,15 | 16,10 | 13,79 | 14,14 |
| 160 | 30,36 | 30,10 | 30,71 | 31,01 | 30,62 | 29,53 | 29,05 | 30,45 | 29,57* | 30,19 | 28,05 | 28,70 |
| 180 | 26,52 | 25,78 | 26,04 | 26,13 | 26,22 | 25,65 | 25,69 | 25,74 | 25,48 | 25,43 | 25,91 | 25,00 |
| 200 | 23,65 | 23,78 | 23,86 | 23,73 | 23,95 | 23,34 | 23,04 | 23,17 | 22,73 | 22,64 | 22,60 | 21,99 |
| 220 | 27,09 | 27,00 | 27,13 | 27,26 | 27,26 | 27,18 | 26,17 | 26,17 | 27,48 | 26,17 | 25,74 | 26,04 |
| 240 | 25,52 | 25,13 | 26,61 | 25,83 | 25,56 | 24,60 | 24,82 | 25,22 | 25,04 | 25,13 | 24,39 | 24,52 |
| A. acum (mm) | 500,02 | 472,61 | 469,75 | 465,86 | 455,69 | 433,84 | 437,14 | 447,59 | 417,30 | 392,20 | 359,45 | 351,45 |
| Diferenc (mm) | 29,00 | 27,41 | 2,82 | 3,93 | 10,17 | 21,85 | 13,30 | 20,45 | 30,29 | 25,10 | 32,75 | 8,00 |
| Drenaj (mm/h) | 96,67 | 13,37 | 0,55 | 0,30 | 0,39 | 0,49 | 0,22 | 0,27 | 0,34 | 0,23 | 0,25 | 0,06 |

Tabla 4. Perfiles hídricos y velocidades de drenaje (mm/día) obtenidos en las dos posiciones durante 5 meses.

Las pérdidas registradas por evaporación (Tabla 5) totalizaron de 26-32 mm/día en un intervalo de 25 días, lo que implica una tasa de decreciente de infiltración de 2-0.8 mm/día. Estos movimientos de agua en superficie apare-

cen en la Figura 4 donde los perfiles a, b, c, representan el drenaje de los primeros días y los siguientes la evaporación. Se puede calcular que las pérdidas por drenaje, observadas en apenas cuatro días, representan 1.5 veces más

Tabla 5. Diferencias entre perfiles hídricos consecutivos y velocidades de drenaje y evaporación (mm/día)

| Profundidad. (cm) | Tiempo acumul (horas) | | | | | | | |
|-------------------|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 0 | 22 | 95 | 190 | 334 | 380 | 503 | 694 |
| 10 | 26,98 | 16,85 | 14,9 | 12,25 | 10,12 | 9,30 | 8,47 | 7,60 |
| 20 | 27,73 | 19,10 | 16,47 | 15,07 | 13,00 | 12,07 | 11,97 | 10,77 |
| 30 | 25,65 | 19,87 | 17,77 | 16,87 | 14,30 | 13,97 | 13,92 | 12,47 |
| 40 | 22,40 | 17,62 | 15,85 | 16,05 | 14,15 | 13,17 | 13,62 | 12,37 |
| 50 | 24,60 | 17,65 | 16,55 | 15,95 | 14,45 | 13,55 | 13,70 | 12,37 |
| A.acumu. (mm) | 127,36 | 91,09 | 81,54 | 76,19 | 66,02 | 62,06 | 61,68 | 55,58 |
| Diferencia (mm) | | 36,27 | 9,54 | 5,35 | 10,17 | 3,96 | 0,38 | 6,1 |
| Velocida (mm/día) | | 36,27 | 3,18 | 1,34 | 1,69 | 1,98 | 0,08 | 0,76 |

(Desde t=0 hasta t=95 perfiles de drenaje; De t=190 hasta t= 694 perfiles de evaporación)

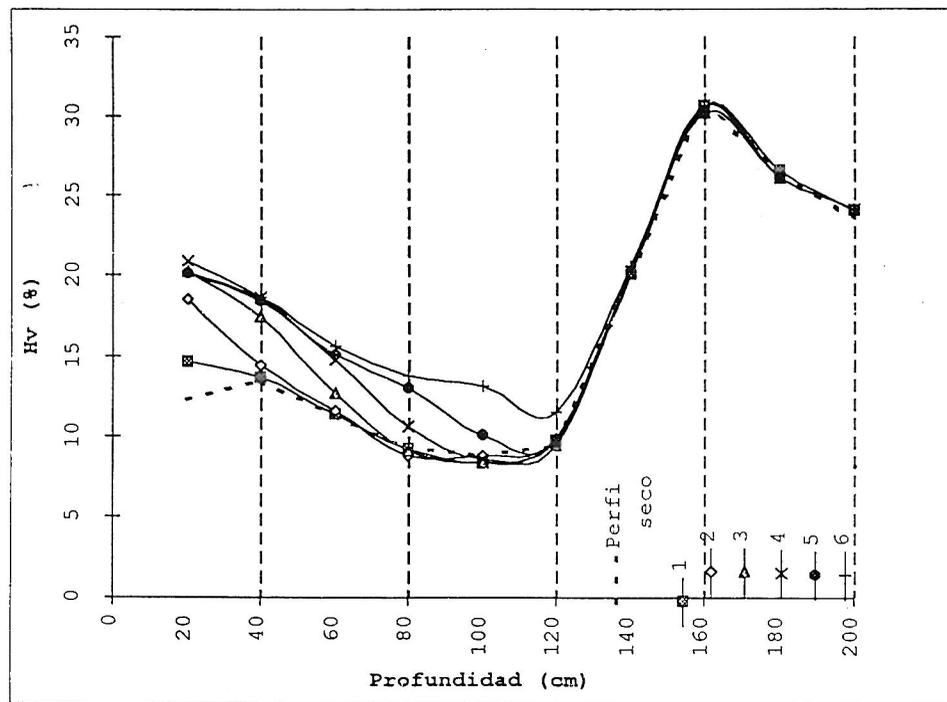


Figura 3. Perfiles hídricos levantados con sonda de neutrones durante el ensayo de infiltración en una de las posiciones del infiltrómetro de inundación por aspersión.

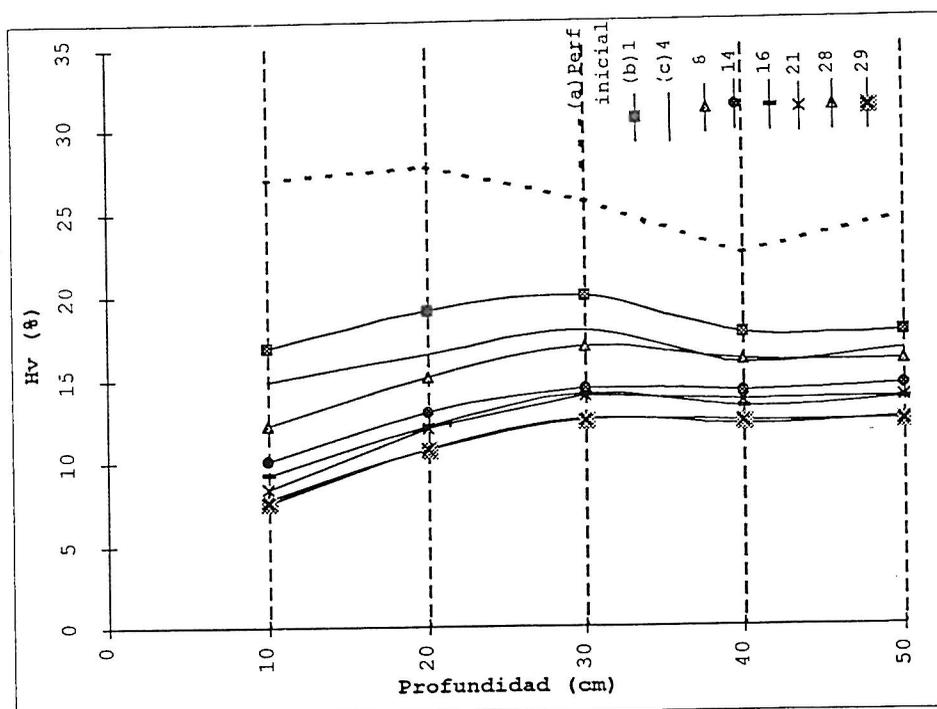


Figura 4. Perfiles de drenaje y evaporación levantados con TDR.
(a, b, c = perfiles de drenaje)

que las pérdidas por evaporación en un periodo seis veces mayor.

La intensidad y duración del drenaje generado determinará la capacidad de almacenamiento del suelo. El cálculo de este parámetro se complica con la integración de la evaporación que provoca un movimiento del agua del suelo en fase líquida (Nielsen *et al.*, 1972). A la vista de los resultados obtenidos en la medida de la evaporación, no representativa frente a las pérdidas por drenaje, se desprecian para el cálculo del perfil de capacidad de campo.

Por las razones antes expuestas, el perfil de capacidad de campo no tiene una base teórica firme (Koorevaar *et al.*, 1983), por ello se consideró este perfil el obtenido en el 5 día después de la saturación del suelo y coincidente con el comienzo del drenaje lento. El perfil de capacidad de campo para este suelo aparece en la Tabla 6. Para calcular la capacidad de reten-

ción de agua disponible se buscó el punto de marchitamiento. Este punto varía en función de las plantas establecidas en el suelo, y del poder evaporante de la atmósfera (Porta *et al.*, 1994). Como perfil de marchitamiento permanente "in situ" tomamos aquel más desfavorable y más estresante para las plantas establecidas. La situación de máxima desecación registrada se obtuvo en una parcela experimental de eucalptos establecida con marco de plantación 2x1 m. y con fecha de 30 de Julio (máximo poder de evaporación de la atmósfera), donde la planta estaba en condiciones muy desfavorables. Los dos perfiles de "equilibrio" suelo-agua se compararon con los obtenidos en laboratorio con la placa de presión de Richards a 0,33 y 15 bares para punto de marchitamiento y capacidad de campo respectivamente (Tabla 6). Se obtuvo una reserva utilizable por las plantas superior "in situ" (197.35 mm.) que en condiciones

Tabla 6. Comparación de las situaciones de capacidad de campo y punto de marchitamiento obtenida "in situ" y en laboratorio.

| Profu. (cm) | θ_v 15 bar (mm) | θ_v 0.33 bar (mm) | Max. desc (mm) | Cap. camp (mm) | R.U. lab (mm) | R.U. "in situ" (mm) |
|----------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|------------------|------------------------|
| 20 | 2,91 | 10,94 | 4,33 | 12,42 | 8,03 | 8,09 |
| 40 | 3,86 | 11,12 | 4,26 | 15,23 | 7,26 | 10,97 |
| 60 | 3,86 | 11,12 | 4,55 | 14,32 | 7,26 | 9,77 |
| 80 | 1,97 | 4,8 | 4,03 | 13,24 | 2,83 | 9,21 |
| 100 | 1,97 | 4,8 | 4,21 | 13,12 | 2,83 | 8,91 |
| 120 | 1,97 | 4,8 | 4,06 | 12,11 | 2,83 | 9,05 |
| 140 | 1,95 | 6,43 | 4,00 | 13,28 | 4,48 | 9,28 |
| 160 | 1,95 | 6,43 | 4,00 | 15,02 | 4,48 | 11,02 |
| 180 | 9,03 | 16,78 | 4,23 | 16,79 | 7,75 | 12,56 |
| 200 | 9,03 | 16,78 | 4,10 | 20,14 | 7,75 | 16,04 |
| | | | | | 111,25 | 197,35 |

(θ_v a 15 y 0,33 bares= Humedad volumétrica (%) obtenida con placas de presión; R.u.= reserva útil para la planta)

controladas (111.25 mm.). Aunque desde un punto de vista teórico esta comparación sea discutible, da una idea de la eficiencia del suelo como retenedor de agua, así como del margen de error cometido al no tener en cuenta, en el laboratorio, la capacidad de las capas y la influencia de la baja conductividad de las capas inferiores.

CONCLUSIONES

Con la metodología utilizada se verifica la sonda de neutrones como el mejor método de seguimientos de perfiles de humedad, ya que presenta excelentes curvas de calibración, obteniéndose resultados muy exactos cuando se trabaja con diferencias entre perfiles.

Se establece la posibilidad de aplicación de un factor mayoramiento en los perfiles de capacidad campo y punto de marchitamiento que se establecen en laboratorio con las placas de

presión de Richards, ante los resultados más elevados que se obtienen con la metodología en la situación real al tener en cuenta la capacidad de los diferentes horizontes del suelo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado dentro del proyecto n° PEAM/C/GRH/572/95 "Análise integrada da utilização da água do solo por plantações de Eucalyptus", financiado por la Junta Nacional de Investigaçao Científica e Tecnológica (JNCIT) del cual es responsable el Dr. D. Carlos Manuel de Arruda Pacheco.

BIBLIOGRAFÍA

HILLEL, D., 1984. *Soil and water. Physical principles and processes*. Ed: Academic Press. New York.

- LONDON, J.R., 1984. *Tropical soil manual*. Ed: International Limited. Londres.
- NIELSEN, D.R.; JACKSON, R.D.; CARY, J.W. & EVANS, D.D., 1972. Soil Water. *Am. Soc. Agron. & Soil Sci. Soc. Am.* Madison.
- PEREIRA, J.S.; LINDER, S.; ARAUJO, M.C.; PEREIRA, H.; ERICSSON, T.; BORRALHO, N. & LEAL, L., 1989. Optimization of biomass production in Eucalyptus globulus plantation. A case study. In: *Biomass production by Fast-Growing Trees*. Ed: J.S. Pereira and J.J. Landsberg. The Netherlands. pp. 481-506.
- PORTA, J.; LOPEZ ACEBEDO, M. & ROQUERO, C., 1994. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed: Mundi-Prensa. Madrid.
- KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; & DIRKSEN, C., 1983. *Elements of soil physics*. Elsevier. Amsterdam.
- SALGADO, J.; ARRUDA, C.M.; OLIVEIRA, P.; OLIVEIRA, I. & OLIVEIRA, C., 1990. Medição do teor em água e massa volúmica aparente de solos por métodos nucleares. *Rev. Pedón*, Jul-1990. Ed: Sociedade Portuguesa da Ciência do Solo, pp. 134-165.
- VACHAUD, G.; DAUDET, C.; SOUKO, S. & THOMY J.L., 1978. Méthodes de caractérisation hydrodynamique "in situ" d'un sol non saturé. Application à deux types de sol du Senegal en vue de la détermination des termes du bilan hydrique. *Annales Agronomiques*. Institut National de la Recherche Agronomique. 29(1), pp. 1-36.
- YOUNGS, E.G., 1991. Hydraulic conductivity of saturated soils. En Smith, K.A. y Mullins, Ch.E. De: *Soil Analysis*. Marcel Dekker, inc. 161-208. New York.