

**Desarrollo de una metodología aplicada,
para la caracterización física de la zona
no saturada como almacén y transmisor
de agua y contaminantes hacia las
aguas subterráneas**

INFORME	Identificación: 43011
	Fecha: Mayo 2008
TÍTULO	
DISEÑO, EJECUCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y MÉTODOS DE CAMPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA ZONA NO SATURADA.	
PROYECTO	
DESARROLLO DE UNA METODOLOGÍA APLICADA, PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA DE LA ZONA NO SATURADA COMO ALMACÉN Y TRANSMISOR DE AGUA Y CONTAMINANTES HACIA LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS.	
RESUMEN	
<p>La definición de las funciones que describen el flujo de agua en medio poroso, de aplicación en la modelación del flujo y transporte de agua y contaminantes, requiere conocer parámetros (α, n, L), que no pueden ser medidos directamente y deben ser estimados o deducidos de forma indirecta. Los parámetros deducidos proporcionan funciones muy exactas en medios homogéneos, isótropos, con una distribución de poro ideal, pero no cuando la presencia de discontinuidades naturales en el terreno (grietas, fracturas, estructuras debidas a la acción biológica, estructura edáfica) perturba el flujo ideal del agua. Este proyecto ha permitido la puesta a punto de las técnicas, materiales, equipo humano y procedimientos necesarios para la caracterización física de la zona no saturada y para la aplicación de modelos matemáticos de flujo en zona no saturada posibilitando su calibración mediante un ensayo de infiltración a carga constante o variable.</p>	
Revisión Nombre: José Manuel Murillo Unidad: Area Inv. en Procesos Activos y Calidad Ambiental Fecha: 29-febrero 2008	Autores: Luis Moreno Merino Silvino Castaño Castaño M ^a Emilia Jimenez Hernández Almudena de la Losa Román Responsable: Luis Moreno Merino

Informe final de proyecto

DISEÑO, EJECUCIÓN Y PUESTA A PUNTO DE PROCEDIMIENTOS DE LABORATORIO Y MÉTODOS DE CAMPO PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO DE LA ZONA NO SATURADA

PROYECTO

Desarrollo de una metodología aplicada, para la caracterización física de la zona no saturada como almacén y transmisor de agua y contaminantes hacia las aguas subterráneas

Luis Moreno Merino
Silvino Castaño Castaño
M^a Emilia Jiménez Hernández
Almudena de la Losa Román

Febrero de 2008

INDICE

Introducción y justificación del proyecto	9
Breve introducción teórica	10
El problema del flujo en zona no saturada	13
El problema de la caracterización de la matriz sólida para la modelización del flujo de agua en zona no saturada	
Descripción de los métodos y procedimientos puestos a punto	15
Infiltrómetro de membrana	15
Infiltrometría de doble anillo	16
Permeámetro de laboratorio	17
Toma de muestras inalteradas mediante cilindros	18
Ensayos mediante simulador de lluvia	18
Determinación de la humedad in-situ mediante TDR (HSM9000)	20
Elaboración curvas características de retención de agua (curvas pF)	20
Ensayo de Infiltración Controlada	21
PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA LA REALIZACIÓN DE UN EIC (Ensayo de Infiltración Controlada)	23
Paso 1º.- Comprobación del equipo de campo.	23
Paso 2º.- Preparación de las soluciones de trazado/inyección	24
Paso 3º.- Localización y selección del punto de ensayo	27
Paso 4º Montaje del cilindro de inyección	28
Paso 5º Montaje del cilindro de carga constante	29
Paso 6º Montaje del TDR	31
Paso 7º Desarrollo de la inyección	31
Paso 8º Toma de muestras, preparación y envío al laboratorio	32
ANEXO I. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL, DEL EQUIPO Y DE SUS PARTES	35
ANEXO II ENSAYO DE CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO DE INFILTRACIÓN	38
Curva de llenado del depósito	
Curvas de vaciado del depósito	
ANEXO III EJEMPLOS DE CURVAS DE INFILTRACIÓN OBTENIDAS MEDIANTE DIVERSOS MÉTODOS	48
ANEXO IV EJEMPLOS DE CURVAS DE TRAZADO	50
ANEXO V EJEMPLOS DE RESULTADOS DE MODELOS	51

Introducción y justificación del proyecto

Uno de los objetivos principales del Área de Procesos Activos y Calidad Ambiental del Departamento de Investigación y Prospectiva Geocientífica es la caracterización e investigación de procesos en zona no saturada. El desarrollo eficaz de este tipo de trabajos requiere equipos materiales y humanos muy especializados, de cuya labor dependerá la precisa toma de datos, análisis de muestras y correcta interpretación de resultados. El IGME no disponía hasta la propuesta de este proyecto de ese tipo de material, en especial el necesario para la caracterización hidráulica del suelo, ni del personal capacitado para su uso, por lo que el desarrollo de futuros proyectos dependía de terceros con el perjuicio económico y operacional que ello supone.

En este proyecto, mediante la puesta a punto de una técnica aplicada concreta, encaminada a la caracterización física de la zona no saturada como almacén y transmisor de agua y contaminantes hacia las aguas subterráneas se ha tenido la oportunidad de obtener el equipamiento y de formar un equipo humano capaz de abordar la tarea de caracterizar un suelo diseñando una campaña de muestreo, ejecutando el muestreo, tratando las muestras en laboratorio y analizando los resultados obtenidos para proporcionar resultados fiables.

Buena del trabajo de laboratorio se ha desarrollado en el Departamento de Edafología de la Universidad Complutense de Madrid gracias al Convenio de Cooperación establecido ente el IGME y la UCM "para el apoyo en la investigación en zona no saturada".

Los ensayos de campo se han llevado a cabo en Las Tablas de Daimiel, Burgos, Montanchez (Cáceres) y Arganda (Madrid).

La ejecución material del proyecto ha corrido a cargo de cuatro personas, Luis Moreno Merino, Silvino Castaño Castaño, M^a Emilia Jiménez Hernández y Almudena de la Losa Román; con el asesoramiento de: Javier G. Heredia Díaz, Juan José Durán Valsero, Rosa Mediavilla López, Inés Iribarren Campaña, Luis Antonio Marcos Naviera y Miguel Angel Casermeiro Martínez

En este documento se describe el procedimiento operativo y de manejo de la instrumentación necesaria para la realización de los Ensayos de Infiltración Controlada (EIC) según la metodología propuesta por Moreno et al (2006). Además contiene una breve introducción teórica a los principios físicos que regulan el transporte de masa y solutos en zona no saturada. El EIC permiten determinar los parámetros necesarios para la implementación de los modelos habituales de transporte de masa y solutos en zona no saturada.

Breve introducción teórica

Se presenta en este apartado una breve introducción teórica que permite comprender la dificultad que presenta la caracterización hidráulica de la zona no saturada, las razones que han llevado a la solución propuesta y las técnicas y métodos que ha habido que poner en funcionamiento.

El problema del flujo en zona no saturada

Las expresiones que describen matemáticamente el flujo de agua a través de un material poroso fueron descritas por Darcy en 1856, Darcy descubrió que el volumen de agua que atraviesa un lecho de arena por unidad de tiempo depende de cuatro variables:

- (1) el área del lecho filtrante
- (2) su espesor
- (3) el espesor de la capa de agua almacenada sobre el lecho
- (4) K, la conductividad hidráulica

La expresión que propuso Darcy es la siguiente

$$Q = K \frac{(A \Delta H)}{L}$$

- Q = volumen de agua que atraviesa la columna por unidad de tiempo
K = conductividad hidráulica (constante de proporcionalidad, depende tanto del fluido como del medio)
A = sección del lecho filtrante
 ΔH = Diferencia de carga

puesto que $q = Q/A = V/At$ (V = volumen de agua y t = tiempo)

$$q = \frac{V}{At} = K \frac{(\Delta H)}{L} \qquad K = \frac{VL}{At \Delta H}$$

Veamos otra forma de expresar la ecuación de Darcy:

$$q = -K(\theta)i$$

donde:

- q = densidad de flujo (volumen de agua por unidad de sección y tiempo)
K(θ) = conductividad capilar
I = gradiente hidráulico

Cuando se aplica un gradiente, por pequeño que sea, a un fluido que está contenido en un medio poroso no saturado y no se mueve, o cuando la velocidad de movimiento del fluido no es una función lineal del gradiente hidráulico, o K no varía como lo hace θ , entonces la ley de Darcy no es aplicable y el fluido recibe el nombre de "fluido no Newtoniano". A menudo lo que sucede es que el flujo no comienza hasta que no se alcanza un cierto valor de gradiente, en este caso se habla de umbral de gradiente.

Las fuerzas que causan el comportamiento no Newtoniano del agua en el suelo son muy variadas: puentes de hidrógeno entre el agua y el borde de las arcillas, fuerzas covalentes, adsorción, espesor de la capa, cuestiones estructurales del material, etc.

La ecuación de continuidad empleada para simular el flujo y transporte no saturados no tiene en consideración la validez del flujo Darciano:

$$-\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z}\right) = \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

y por ello no da resultados aceptable en condiciones reales de flujo no saturado.

La forma convencional de la ecuación de Darcy no describe adecuadamente el flujo en zona no saturada debido a lo rápido que disminuye la conductividad hidráulica al disminuir el contenido en agua y el área seccional disponible para el flujo del agua.

Consecuentemente se describe K como una función del potencial métrico o del contenido volúmico de agua, sin embargo esto ha dado lugar a numerosas controversias pues es muy difícil obtener un valor para θ para un valor determinado de Ψ_m , además está el problema de la histéresis.

Escribir la ley de Darcy expresando K como función de θ , permite abordar el problema de la histéresis, entre otras cuestiones porque $K(\theta)$ presenta mucha menos histéresis que $K(\Psi_m)$. La forma tensorial de la ley de Darcy queda entonces como:

$$q = -K(\theta) \nabla H$$

donde $H = h + z$, h puede ser expresado como succión o potencial métrico y entonces escribir la ecuación:

$$q = -K(\theta) \nabla(h + z)$$

lo que para una dimensión, en la coordenada vertical se expresaría como:

empleando el potencial $q = -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$ mátrico en lugar de theta:

$$q = -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial \psi_m}{\partial z} \right)$$

Si en la ecuación anterior se asume que ψ_m es una función de theta, entonces puede describirse siguiendo las reglas del cálculo como:

$$\frac{\partial \psi_m}{\partial z} = \frac{d\psi_m}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

El primer término de la derecha de la anterior ecuación es la inversa de la capacidad específica del agua, esto es el recíproco del cambio en el contenido en agua por unidad de cambio en el potencial mátrico.

El segundo término es el gradiente en el contenido en agua con respecto a la profundidad.

Sustituyendo en la ecuación anterior la que le precede:

$$q = -K(\theta) \left(1 - \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)$$

Lo que escrito de la siguiente manera:

$$q = -K(\theta) - K(\theta) \left(- \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} \right) \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Es la ecuación de Richards, ecuación que describe el movimiento del agua en medio no saturado en función de la humedad el potencial mátrico y el potencial gravitacional.

En resumen, puesto que la conductividad hidráulica depende del contenido volúmico de agua y del potencial mátrico, se ha modificado la ecuación de Darcy empleando expresiones mucho más generales en las que se escribe K en función de θ , sin embargo no existe una relación universal que relacione la conductividad capilar con el potencial de succión o el contenido en agua, muchos autores han propuesto expresiones que relacionan dichos parámetros.

Nosotros hemos elegido la expresión propuesta por Van Genuchten:

$$K(\theta) = K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\phi - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^m \right]^2}$$

donde:

$m = 1 - 1/n$ (m y n = constantes empíricas)

$K(\theta)$ = es la conductividad hidráulica no saturada

K_s = conductividad hidráulica saturada

θ_r = saturación residual

El problema de la caracterización de la matriz sólida para la modelización del flujo de agua en zona no saturada

De lo anteriormente expuesto se deduce que prever el comportamiento del agua en la zona no saturada, generalmente mediante un modelo matemático que se apoya en las ecuaciones descritas, requiere de un profundo conocimiento de las variables implicadas en dichas ecuaciones. Esa modelización se topa con dos dificultades mayores:

- a) La heterogeneidad del medio subterráneo. Este problema puede abordar desde dos perspectivas, por un lado la estadística permite, primero determinar y luego optimizar el número de muestras necesarias para obtener datos suficientemente fiables. Por otro lado las técnicas analíticas deben ser adecuadas a la escala de trabajo y a la escala de las heterogeneidades, en especial en las determinaciones que como la permeabilidad, se realizan sobre muestras inalterada en cilindros de muy pequeño diámetro
- b) La dificultad para caracterizar físicamente la matriz porosa por el elevado requerimiento de recursos económicos y humanos. Lo que lleva con frecuencia a que parámetros "medibles" como la porosidad, la capacidad de campo, la humedad en el punto de marchitez permanente, la humedad en condiciones de saturación, la reserva hídrica etc etc, se empleen como parámetros de ajuste o calibración cuando en realidad deberían ser medidos y su valor considerarse "inmutable" pues son características físicas del material estudiado.

El proyecto desarrollado, pretende pues, equipar al IGME con una metodología, equipo y material que permitan caracterizar la zona no saturada con vistas a su posterior modelización matemática.

Una vez centrado el problema y atisbada la solución queda por determinar los parámetros que son necesarios para poder caracterizar una matriz porosa como almacén y transmisor de agua.

En esencia es necesario conocer:

θ_r	Densidad real
θ_a	Densidad aparente
δ_e	Porosidad eficaz
%Arc, %Are, %L	Clasificación textural según la norma ASTM
%MO	Porcentaje de materia orgánica
%CO ₃	Porcentaje de carbonatos
H1500 kPa)	Humedad en el punto de marchitez permanente (1500 kPa)
H33	Humedad a capacidad de campo (33 kPa)
H/t	Curva humedad/tiempo
Q/t	Curva caudal/tiempo
$\Theta_{x,y}$	Diagrama de distribución de humedad plano XY
$\Theta_{x,y'}$	Diagrama de distribución de humedad plano XY'

En este documento se describe tanto la parte operativa del ensayo propuesto para obtener estos parámetros, como los procedimientos de calibración de los instrumentos, además se dan recomendaciones de buenas prácticas para asegurar en la medida de lo posible la correcta realización del trabajo.

Descripción de los métodos y procedimientos puestos a punto

Infiltrómetro de membrana

El infiltrómetro de membrana es un dispositivo que permite medir flujos de agua en suelos no saturados de forma muy precisa. Las aplicaciones de este dispositivo se centran en la determinación de la macroporosidad y de los flujos preferenciales, la estimación de la estructura de los suelos, la caracterización de la conductividad hidráulica de los mismos así como su relación con el potencial del agua. El tiempo necesario para la realización de un ensayo es de 60 minutos aproximadamente y el equipo puede emplearse en espacios muy reducidos.

El principio de funcionamiento del aparato se basa en la medida del caudal de agua, transmitido al suelo desde un reservorio que impone un potencial constante, fijado por el operador, a través de un disco.

Se ha puesto a punto un infiltrómetro tipo SW 080 B (Sdec, Francia), en la foto se puede ver en funcionamiento en un ensayo realizado en las proximidades de Las Tablas de Daimiel.



FIGURA 1. El Infiltrómetro de membrana en funcionamiento, a la derecha se puede observar el depósito del agua y el sistema para mantener la carga hidráulica constante en la membrana.

Infiltrometría de doble anillo

La infiltrometría de doble anillo es una técnica sencilla que permite determinar la capacidad de infiltración del agua en un suelo. Esta técnica da valores de "tasa de infiltración" en unidades de volumen de agua por unidad de tiempo y superficie de suelo. Es aplicable en casi todo tipo de terreno, sin exceso de pedregosidad o de raíces grandes próximas a la superficie. La capacidad de infiltración disminuye con el tiempo según el suelo se va saturando de agua, de forma que después de un tiempo suficiente, se aproxima a un valor constante próximo a la conductividad hidráulica saturada.

El método se basa en la medida de la velocidad de infiltración del agua en un anillo metálico clavado en el suelo, rodeado de un anillo exterior, también lleno de agua, con el fin de impedir la expansión lateral del bulbo de humectación creado por el anillo de medida.



FIGURA 2. Infiltrómetro de doble anillo en funcionamiento. Se observa claramente la disposición de la regla de medida del nivel del agua y el nivel del agua en ambos anillos.

Se dispone de un infiltrómetro de doble anillo marca Eijkelkamp modelo 09.04 y de los accesorios necesarios para su instalación y toma de medidas, además se dispone de un infiltrómetro miniatura modelo XXX.XXX que permite realizar ensayos rápidos aunque con menor precisión que con los cilindros de tamaño estándar.

Permeametro de laboratorio

El permeametro de laboratorio permite la medida de la permeabilidad hidráulica saturada sobre muestras inalteradas tomada mediante cilindros estandarizados de 100 ml de capacidad y 53 mm de diámetro. Una ventaja de este método es que según esté tomada la muestra permite determinar permeabilidades verticales y horizontales.

El método consiste en colocar un cilindro con la muestra en un soporte que permite mantener constante el nivel de agua (botella Mariotte), o medir su variación si el ensayo es a caudal variable, y medir el flujo que atraviesa el cilindro por unidad de tiempo.



FIGURA 3. Vista general del Infiltrómetro de laboratorio instalado y de la caja que contiene la bomba del agua en circuito cerrado.

El sistema instalado permite hacer medidas a carga constante (permeabilidades entre 10^0 y 10^5 m/día), y en el caso de materiales poco permeables (con permeabilidades entre 10^2 y 10^{-4} m/día) a carga variable.

Se dispone de un permeámetro de laboratorio Eijkelkamp modelo 09.02 apto para realizar cinco ensayos en paralelo con sistema de recirculación de agua.

Toma de muestras inalteradas mediante cilindros

Se ha puesto a punto el instrumental necesario para la toma de muestras inalteradas mediante cilindros calibrados, Eijkelkamp modelo P1.31. A partir de las muestras tomadas de esta forma se puede medir:

- Densidad aparente
- Contenido en humedad volúmico
- Porosidad
- Capacidad de campo
- Estudios de estructura

Además estos cilindros son los que se emplean en otros instrumentos (caja de arena, caja de arena/caolín, permeámetro de laboratorio) para hacer las correspondientes determinaciones.



FIGURA 4. En la imagen de la izquierda se ve el equipo de muestreo y en la imagen de la derecha un momento de la preparación de una muestra ya extraída del suelo

Ensayos mediante simulador de lluvia

El simulador de lluvia (Eijkelkamp modelo 09.06), es un instrumento que permite generar una lluvia artificial, en la cual, el caudal de agua aplicado, el tiempo de duración de la lluvia y la energía cinética de las gotas de agua están calibrados. El uso primario de este aparato es el análisis de las tasas de escorrentía superficial

y de erosión. Se aplica tanto en ensayos de campo como en ensayos de laboratorio.



FIGURA 5. En la imagen se observa la disposición del simulador de lluvia y de la bandeja de toma de muestra de agua y del sedimento arrastrado por la precipitación.

El principio de funcionamiento es sencillo, un depósito de agua con un sistema de regulación de presión se sitúa sobre una parrilla en la que se han taladrado una serie de agujeros capilares (49) de diámetro conocido, el tamaño de los capilares y la presión del agua determinan el caudal de agua (375 ml/min) y si a estos factores le sumamos la altura a la que se sitúa el depósito es fácil determinar la

energía cinética de las gotas,

El dispositivo se pone en funcionamiento durante un tiempo estandarizado (3') y mediante un marco y una vertedera adecuadamente colocados se recoge en un contenedor el agua al no infiltrarse en el terreno escurre, así como los



FIGURA 6. Ejemplo de disposición en el campo de los medidores de humedad mediante TDR

sedimentos por ella transportados.

Este instrumento se emplea principalmente para comparar el comportamiento de diferentes materiales, usos del suelo, cubiertas vegetales, etc. teniendo en consideración que los valores aislados son de muy difícil interpretación debido a la pequeña superficie ensayada.

Determinación de la humedad in-situ mediante TDR (HSM9000)

Para la determinación de la humedad in situ se han adquirido y puesto a punto cuatro sondas de humedad/temperatura modelo HSM 9000 - MICROTERM 4800 de la casa francesa SCEC. El aparato mide la humedad según el principio de medida capacitivo (permitividad eléctrica del medio que guarda muy buena correlación con la humedad). Permite realizar medidas desde 25 mm a cuatro metros de profundidad.

Se han empleado principalmente para el seguimiento de la extensión del bulbo de humectación en los ensayos de infiltración.

Elaboración curvas características de retención de agua (curvas pF)

Las curvas características de humedad relacionan, en un material determinado, el contenido en agua del suelo y su potencial. La elaboración de este tipo de curvas es imprescindible para poder describir la forma en la que el agua se mueve en el suelo. La construcción de las curvas características de humedad se hace a partir de medidas experimentales mediante equipos que permiten llevar una muestra del material ensayado a un determinado potencial hídrico para posteriormente medir su humedad, generalmente por métodos gravimétricos.

Las curvas características se emplean para determinar:

- Contenido de humedad a una determinada presión, y viceversa.
- Capacidad de campo (humedad a pF 2-2,5)
- Punto de marchitez permanente (humedad a pF 4.2)
- Porosidad (en suelos arenosos)
- Fracción sólida
- Estado de aireación
- Distribución de poro
- Conductividad capilar
- Capacidad de almacenamiento de agua
- Porcentaje de agua disponible para las plantas

El desarrollo de este proyecto ha permitido poner a punto las técnicas adecuadas para elaborar estas curvas, los aparatos que se han instalado y calibrado han sido:

Caja de arena y caja de arena/caolin

La caja de arena es adecuada para medir en el rango entre pF 0 - pF 2 (-100 hPa, -0,1 bar). La caja de arena/caolin se emplea en el rango de pF que va entre 2.0 (-100 hPa, -0,1 bar) y pF 2.7 (-500 hPa, -0,5 bar).



FIGURA 7. En la caja de arena o la caja de arena/caolín se introducen los anillos de muestra inalterada después de haber sido convenientemente saturados de agua.

Cámara de Richards

La cámara de Richards permite establecer los puntos de la curva características en la zona de tensiones de succión más elevadas, en rango de pF entre 3.0 y 4.2.



FIGURA 8. Cámara de Richards y el compresor

Este equipo se ha puesto a punto completando el equipo existente en el laboratorio del departamento de Edafología de la Universidad Complutense dentro del marco del convenio de colaboración establecido entre el IGME y dicho departamento universitario.

Ensayo de Infiltración Controlada

La última técnica puesta a punto permite la caracterización de suelos mediante ensayos hidráulicos de infiltración controlada, a carga variable y a carga constante, con o sin inyección de trazador. Tiene su principal aplicación en la elaboración de modelos matemáticos de flujo y transporte en el suelo y el resto

de la zona no saturada proporcionando datos básicos como son las permeabilidades, una visión de la heterogeneidad del punto de ensayo etc. Este tipo de ensayo sirven además como puntos de referencia en la calibración de dichos modelos.

En esencia la técnica consiste en la inyección de agua, a carga constante o variable, en el suelo en estudio, su posterior muestreo, análisis e interpretación de resultados.

Para la realización de los ensayos a carga constante se ha diseñado, construido, calibrado y empleado un sistema de regulación de carga con depósito almacén de agua.

En el siguiente apartado se detalla el procedimiento a seguir para la realización de un EIC.

PROCEDIMIENTO OPERATIVO PARA LA REALIZACIÓN DE UN EIC (Ensayo de Infiltración Controlada)

A continuación se describe, paso a paso, el procedimiento para la realización de los ensayos propuestos. Como cualquier trabajo realizado en campo en condiciones reales, está sujeto a numerosos imprevistos que pueden alterar su desarrollo e incluso impedir su realización, sin embargo, una correcta planificación evitará la mayor parte de los posibles inconvenientes.

Este documento es una guía que se verá modificada según la práctica de los ensayos haga necesario pero en la medida de lo posible debe ser seguida con el fin de mantener el procedimiento dentro de unas normas lo más homogéneas posibles.

En esencia la secuencia de operaciones se resume los siguientes pasos:

- 1) Comprobación del equipo de campo
- 2) Preparación de las soluciones de trazado/inyección
- 3) Localización y selección del punto de ensayo
- 4) Montaje de los cilindros de inyección
- 5) Montaje del cilindro de carga constante
- 6) Montaje del TDR
- 7) Desarrollo de la inyección
- 8) Toma de muestras
- 9) Preparación y envío al laboratorio

Paso 1º.- Comprobación del equipo de campo.

Antes de nada es necesario comprobar que se dispone de todo el material necesario, que se encuentra en condiciones operativas y que disponemos de los repuestos necesarios para solucionar in situ cualquier contingencia que pudiera surgir.

En la tabla 2 se presenta una lista de comprobación del material necesario para la realización de un ensayo estándar (una inyección a carga constante y una inyección a carga variable).

Tabla 2. Material necesario para el ensayo de inyección				
Item	Descripción	Nº de unidades		OK
		1 cilindro	2 cilindros	
1	Depósito (cilindro) principal de inyección de agua	1	2	
2	Tapa superior ciega	2	4	
3	Tapa superior c/conexión	2	4	
4	Soporte depósito con apoyos y tornillos	1	2	
5	Tubos silicona conexión nivel, con abrazaderas de 12 mm ⁽¹⁾	1(4)	2(8)	
6	Vientos y piquetas	4(6)	8(12)	
7	Regleta medida nivel	1	1	
8	Embudo relleno agua	1	1	
9	Bolsas trazador polivalente (para 5 L, 8x)	8	8	
10	Bidón de plástico de 10 L, preparación 5x	8	8	
11	Bidón de plástico de 50 L, premezcla	1	1	
12	Manguera para trasvase	1	1	
13	Conexión tapa inferior	1	1	
14	Tubos prolongación conexión tapa inferior (corto y largo)	1 de cada	2 de cada	
15	Tapones de los tubos de prolongación	2	3	
16	Cilindro metálico infiltración	1	2	
17	Equipo montaje cilindro infiltración (tapa y mazo)	1	1	
18	Cinta métrica	1	1	
19	Cronometro	1	1	
20	Sonda perforación 2 metros	1	1	
21	Cilindros metálicos (50 mmΦ)	1	1	
22	Kit de pala, piqueta y espátula	1	1	
23	Bolsas muestra suelo	1	1	
24	Botellas de plástico 0,5 L	250	300	
25	Rollo de cinta americana	6	6	
27	Lámina de plástico de 2 x 2 m	2	3	
28	Termómetro	1	1	
29	Evaporímetro	1	1	

(1) en general no son necesarias pero es conveniente llevarlas por si no cierra bien el tubo

En la tabla 3 se muestra la lista de material general de campo.

Tabla 3. Material general de campo			
Item nº	Descripción	Nº de unidades	OK
1	Mapa	1	
2	GPS	1	
3	Cuaderno de campo	1	
4	Bolígrafo	2	
5	Rotulador indeleble	2	

Paso 2º.- Preparación de las soluciones de trazado/inyección

Para preparar la solución de inyección/trazado es necesario asegurarse del aprovisionamiento de agua en la zona en estudio. Si no se dispone de agua cerca del punto de ensayo, habrá que llevarla desde la base, en cualquier caso no se

debe emplear agua destilada, sirve cualquier agua de baja mineralización, o si se trata de una zona de regadío de fuerza iónica similar a la usada para el riego, pero nunca destilada.

Es importante evitar el empleo de aguas ricas en sodio pues dada la prolongada duración del ensayo podrían producirse problemas de impermeabilización por desestructuración de las arcillas. Si se dispone de un análisis químico de mayoritarios conviene calcular el SAR y procurar que el agua tenga un SAR inferior a 10 unidades.



FIGURA 9. Trasvase de la solución de inyección a bidones que permiten rellenar de forma más cómoda los cilindros de

La disolución trazadora se prepara inicialmente en forma de disolución madre concentrada, añadiendo una bolsita de los productos ya pesados en un bidón con 5 L, es importante asegurar la perfecta dilución de todo el contenido de la bolsa. Esta operación puede llevarse a cabo el día previo al ensayo. El día del ensayo, verter la disolución concentrada en un

bidón de 50 L, añadir 45 L de agua para diluir hasta la concentración final deseada y mezclar bien. Es importante respetar escrupulosamente las cantidades de agua y de productos químicos.

Guardar en una botella 0,5 L de disolución trazadora para su análisis en laboratorio, de esta forma conoceremos con exactitud la composición del agua inyectada y además de eliminar posibles errores de pesada o medida del volumen de agua tendremos en cuenta los solutos presentes en el agua empleada para hacer la solución. El volumen restante de disolución trazadora (34,5 L) se trasvasa al depósito de inyección una vez se haya instalado correctamente el dispositivo. Los agentes empleados como trazadores (tabla 1) se han seleccionado en base a los siguientes criterios:

- a) Aportan los cuatro nutrientes esenciales en el crecimiento vegetal (nitrógeno, fósforo, potasio y boro) en las formas que normalmente se emplean en la agricultura como abono.
- b) Tienen una solubilidad suficientemente elevada para permitir su preparación en soluciones concentradas más fáciles de usar en campo que en forma de polvo.
- c) Se incluye además cloruro sódico que incorpora un trazador ideal (el cloruro) y el catión sodio que permitirá analizar con mayor detalle los fenómenos de cambio catiónico y de competencia por las posiciones de cambio.
- d) Se ha elegido el ácido bórico como fuente de boro pues su efecto bactericida facilita la conservación de las soluciones.

En la tabla 2 se muestran los cálculos realizados para determinar la concentración de inyección y la concentración de cada producto en la solución madre. Los cálculos se han realizado de forma que se garantice, en el punto más alejado del frente de humectación, una concentración suficiente para ser detectadas, una vez extraídas las sales solubles mediante el método propuesto que implica una dilución 1:5.

Nombre	Fórmula química	Solubilidad en agua g/100 g H ₂ O	Pm (uma)	Masa en la solución de inyección (mg/l)
Nitrato potásico	KNO ₃	38	101,1	310,3
Nitrato amónico	NH ₄ NO ₃	208	80,1	26,6
Ácido bórico	H ₃ BO ₃	5,7	61,8	137,3
Fosfato cálcico	Ca(H ₂ PO ₄) ₂ ·H ₂ O	2	252	8,52
Cloruro sódico	NaCl	36	58,4	610,1

Los ensayos realizados demuestran que con los productos seleccionados y las concentraciones calculadas se ha obtenido una muy buena sensibilidad y selectividad, adecuadas para el fin buscado.

Paso 3°.- Localización y selección del punto de ensayo

Una vez en la zona de trabajo habrá que seleccionar el punto en el cual realizar el ensayo, el punto elegido debe reunir los siguientes requisitos:

- Debe ser representativo del proceso y de la zona que queremos estudiar
- Desde un punto de vista operativo:

Debe ser accesible con el equipo



FIGURA 10.
Regla de medida
del nivel del agua
en el cilindro de
inyección.

Debe permitir la instalación del anillo de infiltración, en particular, terrenos pedregosos, o con abundancia de raíces gruesas no son adecuados para este tipo de ensayos.

Debemos intentar que sea un lugar discreto fuera de la acción de desaprensivos que puedan romper o robar el material que queda instalado.

- Debe permitir la instalación del cilindro metálico de carga de forma que no haya escapes de agua por los laterales y penetre lo suficiente en el terreno (unos 5 centímetros). Esta condición, junto con la necesidad de poder tomar las muestras de suelo con una barrena manual, son la mayor limitación de la técnica descrita



FIGURA 11. Al ubicar el dispositivo de inyección debe tenerse en consideración la presencia de discontinuidades en el terreno que puedan perturbar el ensayo, en especial es necesario evitar las

grietas a través de las cuales podría percolar el agua de forma incontrolada y los terrenos excesivamente pedregosos que impiden clavar el cilindro de contención.



FIGURA 12. Incluso en las situaciones aparentemente más difíciles se puede llegar a hacer un ensayo si se cuenta con suficiente espacio para ubicar el cilindro de infiltración. La foto muestra una zona de turbas (en Las Tablas de Daimiel) con enormes grietas de retracción surgidas tras un periodo de mas de de un año de sequía.

Paso 4º Montaje del cilindro de inyección

En un apartado posterior se detallan las características constructivas del cilindro de inyección. Este se debe clavar en el suelo, mediante una tapa pesada y una maza, de forma que quede introducido al menos 5 cm, además, ha de quedar lo mejor nivelado posible.

El cilindro estará bien instalado si no presenta ninguna fuga de agua por su lateral a lo largo de la experiencia, por ello, los terrenos pedregosos, con raíces o con grietas son especialmente complicados

No se debe manipular el terreno que queda en el interior del perímetro del cilindro pero se puede compactar por fuera, o incluso formar una barrera con algo de material de la zona.



FIGURA 13. Varias horas de trabajo echadas a perder por la aparición de una fuga de agua. La única solución: cambiar de ubicación y volver a empezar

Paso 5° Montaje del cilindro de carga constante

En el caso de realizar el ensayo con ayuda del cilindro de carga, en el apartado XX se describe su características constructivas y en el anexo XX la calibración del mismo, habrá que montar este adecuadamente, en la figura se muestra una foto de un cilindro en funcionamiento.



FIGURA 14. Vista general del cilindro de inyección montado y funcionando. Se puede ver, además del soporte sobre el que se instala, los tensores que le confieren una cierta estabilidad frente al viento o algún golpe accidental.

Las únicas precauciones especiales que hay que tomar son

- a) Que esté completamente horizontal e inmovilizado mediante el dispositivo de anclaje.

- b) Comprobar que no existe ninguna fuga de agua o entrada de aire.
- c) Que se ha purgado adecuadamente el tubo indicador de nivel.
- d) Que el agua de inyección se haya mezclado perfectamente antes de verterla en su interior.



FIGURA 15. En la imagen se puede ver como la altura a la que se ajusta el tubo de salida del agua es el que determina la carga hidráulica del ensayo

La carga hidráulica sobre el suelo se ajusta regulando la altura a la que quedará el tubo de salida del agua, si no se ha programado otra cosa una carga que funciona adecuadamente en casi todo tipo de circunstancias es de 5 cm, en la figura se muestra como se determina la carga mediante una simple cinta métrica.

La mayor parte de los problemas que se han tenido con este dispositivo han sido debido al incorrecto cierre del tapón de llenado, es necesario pues asegurarse de su estanqueidad mediante cinta de teflón.



FIGURA 16. Rellenado del cilindro de inyección con la solución trazadora.

Paso 6° Montaje del TDR

Los medidores TDR se montarán a una distancia variable, dependiendo de las características del material, normalmente entre 15 y 45 cm del borde del cilindro de inyección y a una profundidad de $\frac{1}{2}$ del tamaño de celda que vaya a tener el modelo (normalmente 10 cm). Se debe comprobar su funcionamiento dejando que se estabilice mientras se monta el resto del equipo.

Es muy importante no mover ni golpear el instrumento a lo largo de la experiencia. Dependiendo del modelo que se utilice y de su calibración, es aconsejable anotar los valores de constante dieléctrica del medio en lugar de los valores de humedad.



FIGURA 17. Situación típica de los sensores de humedad (TDR) en un ensayo de infiltración a carga constante

La operación de calibración del TDR puede llevarse a cabo "in situ" a lo largo del ensayo, registrando al menos tres lecturas de diferente humedad acompañadas de la toma de una muestra de suelo en el punto y momento de la lectura para la posterior determinación de su humedad por gravimetría. Estas lecturas pueden

tomarse, por ejemplo, en un punto seco inicial, en el centro del cilindro de inyección al finalizar el ensayo y en un punto intermedio de la superficie del bulbo de humectación.

Paso 7° Desarrollo de la inyección

La inyección comienza con el llenado del cilindro de inyección y la medida de la velocidad de descenso del agua en el cilindro almacén o el tiempo entre recargas en el caso de no emplear el mismo.

Es conveniente, de manera simultánea al ensayo, monitorizar la temperatura atmosférica, la del terreno y medir la evaporación en lámina libre mediante un evaporímetro.

En todo momento se debe vigilar la aparición de fugas de agua, que como se ha explicado, harían necesario desmontar el equipo y volver a iniciar el ensayo en otro punto.

Paso 8° Toma de muestras, preparación y envío al laboratorio

De la solución trazadora se toman 0,5 L, en botella de plástico del bidón de mezcla, antes de su trasvase al depósito de inyección.

Perfil y catas, en las proximidades del punto elegido para la inyección, antes de iniciar el ensayo.

Se abre un perfil para la descripción e identificación de las capas.

Cata hasta profundidad de 150 cm., se extraen muestras mediante el taladro manual de muestreo, 1 muestra cada 10 cm, y se guarda en bolsa de plástico con cierre hermético, para determinar en laboratorio:

Humedad a tiempo cero

Solutos del extracto del suelo a tiempo cero.

Para cada capa identificada en el perfil se toman muestras no alteradas en cilindros metálicos de 100 cm³, que se protegen frente a la evaporación mediante la colocación de una tapa y/o o un envoltorio de plástico, tomando el número de réplicas que se indica para cada una de las siguientes determinaciones en laboratorio:

Permeabilidad: mínimo 4 réplicas para cada orientación (vertical y, si se considera oportuno, también horizontal)

pF con caja de arena/caolín: 3 a 6 réplicas

Densidad aparente: 4 réplicas

Para cada capa identificada en el perfil se toman 2 muestras de unos 250 g de muestra, en bolsa de plástico con cierre hermético, una para cada uno de los siguientes grupos de determinaciones:

Textura y contenido en materia orgánica y en carbonatos

pF con cámara de Richards. Para esta determinación es deseable tomar muestra poco alterada, y transportarla evitando que sufra compresiones ni deformaciones

Siete catas en un plano XY perpendicular a la superficie del terreno (y en otro plano XY' opcional, en caso de observarse anisotropía en el terreno), con dimensiones de 100 cm x 100 cm, extrayendo mediante un taladro manual de muestro 1 muestra cada 10 cm de profundidad). En la figura se representa la malla de muestreo. Las 70 muestras se guardan individualmente en bolsas de plástico con cierre hermético, para determinar en cada punto de la malla:

Humedad al final del ensayo

Solutos del extracto del suelo al final del ensayo

Los análisis deben realizarse lo antes posible para evitar una alteración significativa de las propiedades físicas o químicas de las muestras.

En este apartado se recogen sólo brevemente los métodos y/o equipos empleados en cada análisis. El protocolo detallado para las determinaciones que se realizan en el laboratorio sobre estas muestras se detalla en el documento "Procedimientos para el análisis de suelos: caracterización física en laboratorio".

El contenido de humedad de las muestras se determina por gravimetría, en relación con el suelo secado en horno a 105 °C durante 16 - 24 horas, de acuerdo con el método normalizado del ISRIC.¹ Es muy importante que se asegure el cierre hermético de las bolsas que contienen estas muestras, almacenarlas refrigeradas y analizarlas lo antes posible.

La densidad aparente también se determina por gravimetría sobre el suelo seco, según el método oficial publicado por el MAPA.²

La cuantificación de los elementos trazadores en cada muestra de suelo se realiza mediante un análisis químico de su extracto acuso. Para la obtención del extracto acuso se sigue el procedimiento de extracción de sales solubles descrito por el ISRIC para mezclas suelo-agua en proporción 1:5, que consiste en la agitación de la suspensión de suelo durante 2 horas y la separación del sobrenadante mediante filtración.¹ El análisis químico de los solutos en los extractos acuosos de estas muestras, así como de la disolución trazadora empleada en el ensayo, se realiza en el Laboratorio de Análisis de Aguas del IGME. Los analitos seleccionados son: cloruros, nitratos, sodio, potasio, amonio, fosfatos y boro. Los valores del límite de detección indicados para cada uno de estos componentes, según el método analítico de este laboratorio, son: 2 mg/L

¹ Procedures for Soil Analysis, ISRIC (Internacional Soil Reference and Information Centre), 4ª Edición, 1993.

² Métodos oficiales de análisis, t. III, MAPA (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación), Madrid, 1986. (nos falta este documento)

para Na^+ , 1 mg/L para K^+ , 0,5 mg/L para NO_3^- , 0,05 mg/L para NH_4^+ , 0,04 mg/L para P_2O_5 y 200 $\mu\text{g/L}$ para boro.

La clasificación textural de las capas del suelo se basa en los análisis granulométricos de las muestras que se realizan en el Laboratorio de Ensayos Mineralúrgicos y Geotécnicos del IGME. En este mismo laboratorio se lleva a cabo también la cuantificación del porcentaje de materia orgánica y del porcentaje de carbonatos (método del calcímetro de Bernard), que presentan estas muestras.

Los ensayos de permeabilidad se realizan en un permeámetro de laboratorio (Eijkelkamp, modelo 09.02) con capacidad para 5 muestras, siguiendo el protocolo desrito por el fabricante.³ Estos ensayos permiten determinar el coeficiente de permeabilidad K.

La curva pF característica del suelo en cada capa se construyen a partir de las determinaciones realizadas con la caja de arena/caolín y con la cámara de Richards. La caja de arena/caolín (Eijkelkamp, modelo 08.02.SA) opera en el intervalo de pF 2,0 a 2,7, y tiene una capacidad de 40 muestras. El aparato de membrana a presión o cámara de Richards (Eijkelkamp, modelo 08.03) opera en el intervalo de pF 3,0 a 4,2, y tiene capacidad para 15 muestras. Las determinacione se llevan a cabo siguiendo los procedimientos descritos por el fabricante para cada uno de estas técnicas.^{4,5}

Tanto para los ensayos de permeabilidad como para las medidas de pF las muestras debe evitarse que las muestras pierdan humedad y deben protegerse de cualquier otra alteración. Si las muestras no pueden analizarse en un plazo breve es muy importante su almacenamiento con refrigeración para reducir la actividad microbiana, ya que ésta puede producir cambios en la estructura del suelo que conducen a una falta de reproducibilidad en las medidas. Las muestras no deben congelarse, ya que este proceso afecta a la estructura del suelo.

³ Operating Instructions for 09.02 Laboratory Permeameters. Documento M1.09.02.E disponible en versión pdf para la descarga en el sitio web <http://www.eijkelkamp.com>

⁴ Operating Instructions for 08.02 Sand/kaolin Box. Documento M1.08.02.E disponible en versión pdf para la descarga en el sitio web <http://www.eijkelkamp.com>

⁵ Operating Instructions for 08.03 Pressure Membrane Apparatus. Documento M1.08.03.E disponible en versión pdf para la descarga en el sitio web <http://www.eijkelkamp.com>

ANEXO I. DESCRIPCIÓN DEL MONTAJE EXPERIMENTAL, DEL EQUIPO Y DE SUS PARTES

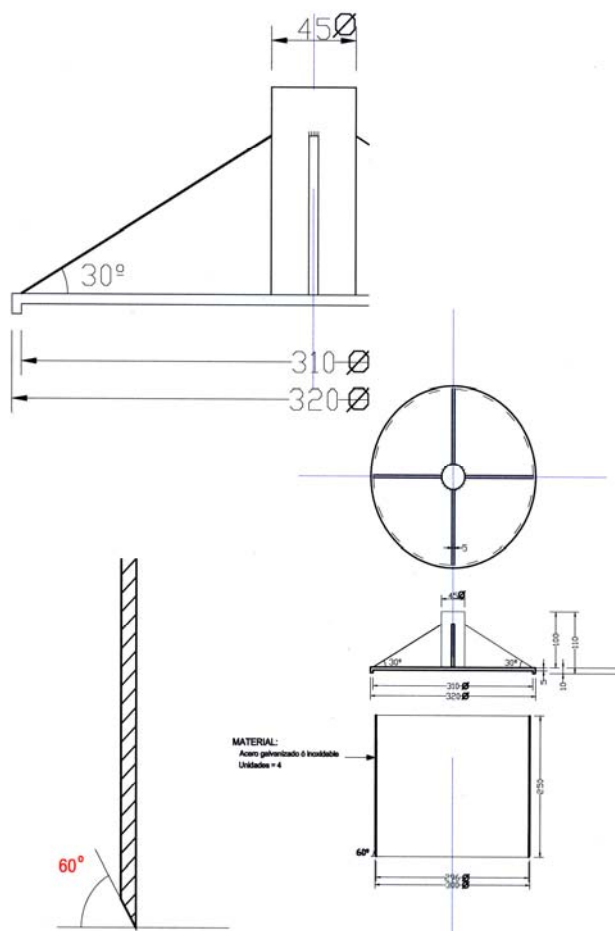
El equipo de infiltrometría está compuesto por cuatro subconjuntos:

Anillo de infiltración

El anillo de infiltración es un cilindro de acero de 2 mm de espesor de 33 cm de diámetro y 40 cm de altura, biselado en un o de sus extremos para poder penetrar mejor en el suelo. Se han construido seis anillos con el fin de disponer de repuesto en el caso de que se estropeen con el uso. A los anillos les acompaña una tapa metálica con un vastago de 6 cm de diámetro que permite su clavado en el suelo con mucha más comodidad. Para clavar el cilindro hay que emplear una

maza pesada, preferiblemente que no rebote, el modelo que suministra Eijkelkaamp para clavar los cilindros de los infiltrómetros de doble anillo son muy adecuados para este fin.

En la figura se muestra un esquema con cotas del dispositivo, en la fotografía se puede ver la tapa empleada para clavarlos en el suelo y la maza.



ANILLO DE INFILTRACIÓN
Unidades expresadas en milímetros

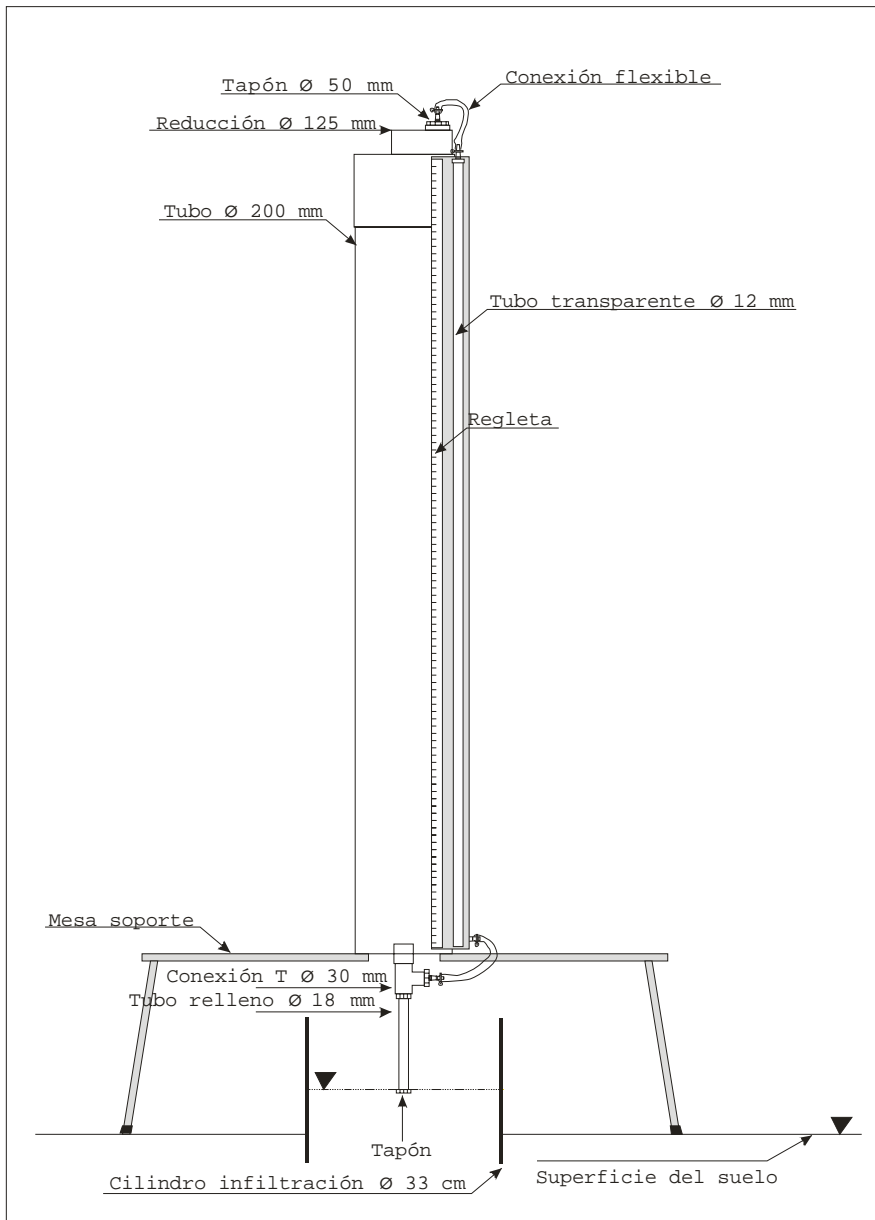
FIGURA 18. Plano constructivo del cilindro de inyección y de la tapa empleada para introducirlo en el terreno



FIGURA 19. Procedimiento de clavado del cilindro de infiltración en el suelo mediante la tapa y el mazo.

Depósito de agua y regulador de carga hidráulica

En la figura se puede ver un esquema constructivo del depósito de agua, está construido en PVC de 200 mm de diámetro y dotado de una toma lateral de agua



mediante un tubo plástico transparente que permite medir el nivel del agua en el interior del cilindro. La salida del agua se produce por una toma situada en la base del cilindro construida mediante tubo estandar de latón de $\frac{3}{4}$ de pulgada, esta toma puede cambiarse para ajustar el espesor de la lámina de agua que se pone como carga hidráulica. El cilindro descansa sobre un soporte de madera y se asegura mediante cuatro vientos de nailon.

FIGURA 20. Esquema constructivo del depósito de agua. Todas las partes son desmontables y pueden cambiarse fácilmente. En la figura no se han dibujado los vientos que se emplean para asegurar su estabilidad una vez instalado.

TDR

La medida de la humedad se hace mediante un equipo HSM 9000 - MICROTERM 4800 de la casa francesa SCEC que permite situarlo a cualquier profundidad entre 5 cm y 200 cm.

Equipo para la toma de muestras de suelo

La toma de muestras de suelo se realiza mediante una sonda manual de la casa Eijkelkamp y cilindros normalizados de 100 cc

ANEXO II

ENSAYO DE CALIBRACIÓN DEL DISPOSITIVO DE INFILTRACIÓN

Durante junio de 2006 se procedió a la calibración del equipo probando los dos depósitos de agua que se han construido (identificados como Tubo 1 y Tubo 2). Con ellos se realizaron ensayos de llenado y vaciado en diferentes condiciones, comprobando que no se producían fugas de agua ni entradas de aire por las conexiones y elementos de cierre del sistema. En todos los casos se montó el dispositivo experimental prescindiendo del cilindro de infiltración, ya que este componente no es necesario para la calibración. En los siguientes epígrafes se describen brevemente los diferentes ensayos realizados, que se resumen en la tabla.

Ensayos de calibración realizados con los depósitos del dispositivo de infiltración y los valores obtenidos para el cociente $\Delta V/\Delta h$ en cada caso (ΔV representa el incremento de volumen en el depósito y Δh el incremento en la altura del nivel de agua medido en la escala). Se indican los valores promedio con su intervalo de confianza (95 %).		
Tubo	Ensayo	$\Delta V/\Delta h$ (L/cm)
1	Llenado	$0,291 \pm 0,003$
1	Vaciado 1, extracción con vaso	$0,300 \pm 0,018$
2	Vaciado 2, extracción con vaso	$0,297 \pm 0,010$
2	Vaciado 3, extracción con manguera	$0,299 \pm 0,019$
2	Vaciado 4, extracción con vaso y registro del nivel de agua en el recipiente de recogida	$0,299 \pm 0,015$
		$0,296 \pm 0,004^*$
2	Vaciado 5, extracción por drenaje y registro del nivel de agua en el recipiente de recogida	$0,302 \pm 0,014$
		$0,298 \pm 0,013^*$

* Datos corregidos por la variación del nivel de agua en el recipiente de recogida.

Curva de llenado del depósito

En este ensayo el depósito se cerró por su parte inferior, manteniéndolo abierto por la parte superior para su llenado. Esta operación se realizó mediante adiciones regulares de un volumen de agua medido con una probeta, esperando a que el nivel del agua se mantuviera estable en el tubo transparente para tomar lectura de su altura en la escala adyacente a éste. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo para el tubo 1 se muestran en las figuras.

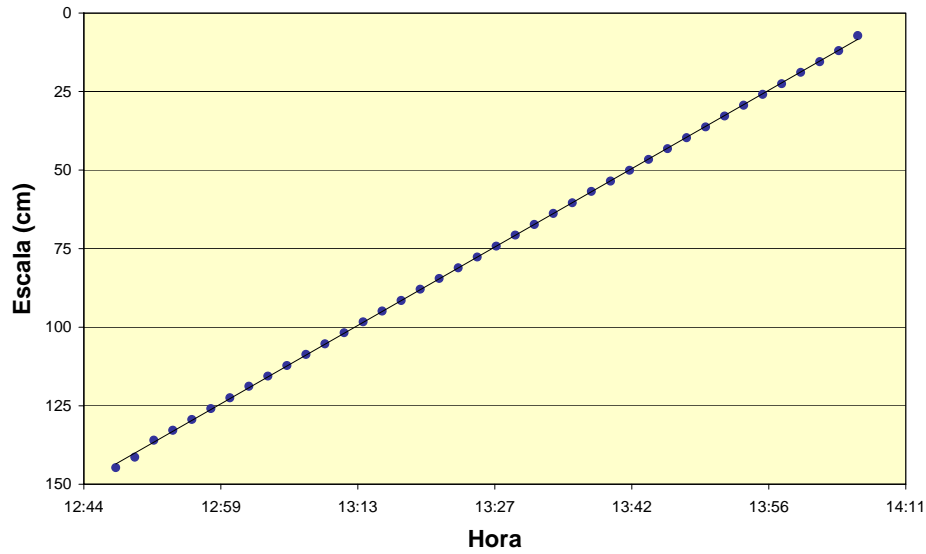


FIGURA 21. Variación de la altura del nivel del agua en el tubo 1 durante su llenado mediante adiciones regulares de 1,00 L cada 2 minutos.

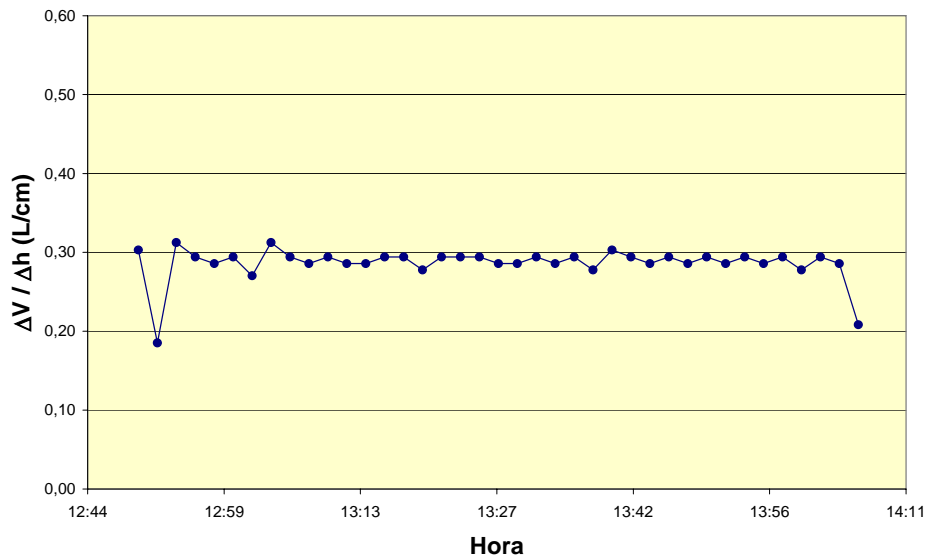


FIGURA 22. Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura obtenido para cada adición ($\Delta V = 1,00$ L) durante el ensayo de llenado del tubo 1.

Del análisis estadístico de todos los datos registrados se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V / \Delta h$ (donde ΔV representa el incremento de volumen en el depósito y Δh el incremento en la altura del nivel de agua medido en la escala) de 0,286 L/cm (39 datos, desviación estándar 0,023). Si se eliminan del análisis los dos primeros puntos y el último punto de la serie, el valor promedio que se obtiene para $\Delta V / \Delta h$ es 0,291 L/cm (36 datos, desviación

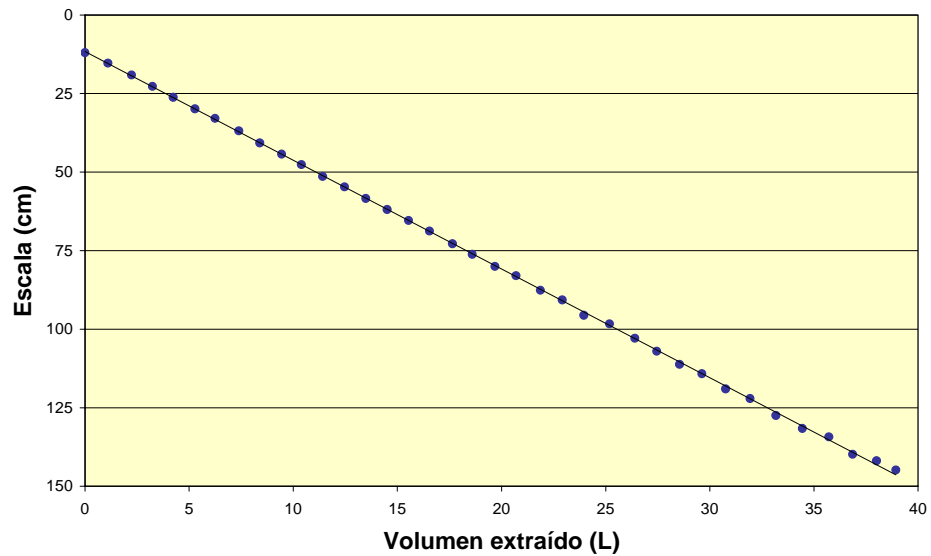
estándar 0,008). En la tabla se incluye este valor, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados.

Curvas de vaciado del depósito

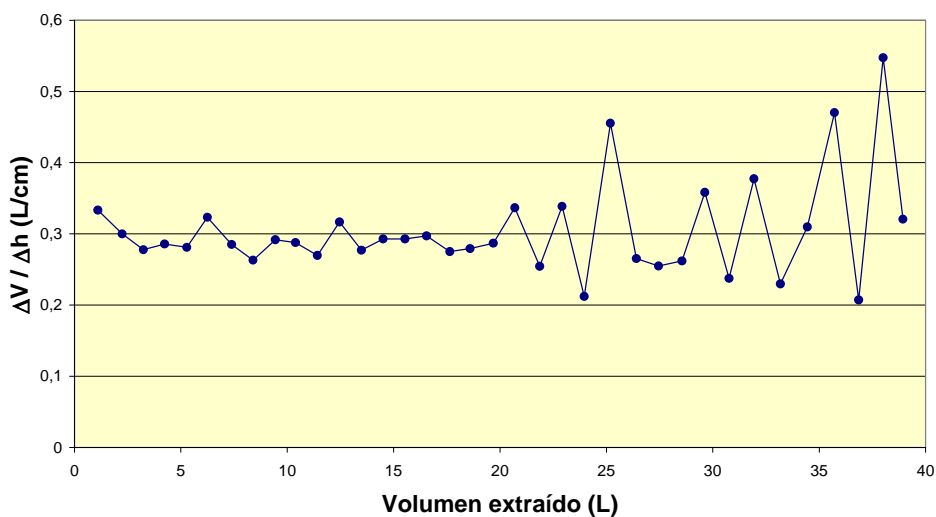
Los ensayos de calibración mediante vaciado de los depósitos se realizaron para simular de una forma más realista las condiciones de funcionamiento del dispositivo en el campo. Al igual que en el ensayo descrito en el apartado anterior, el dispositivo se montó con un recipiente de geometría y dimensiones conocidas en la posición que ocupa el cilindro de infiltración. Antes del inicio de cada ensayo, se cerró la salida inferior del tubo para llenarlo con agua y se ajustaron a continuación las conexiones de la parte superior del tubo para cerrar herméticamente el sistema. Cada ensayo se inició retirando el tapón de la parte inferior del tubo, produciéndose así su vaciado parcial y la elevación del nivel del agua en el recipiente de recogida hasta su igualar (o superar ligeramente) la altura de la boca de salida del depósito. A partir de este momento se procedió al vaciado progresivo y controlado del tubo mediante sucesivas extracciones de agua del recipiente de recogida. Tras cada operación de extracción se midieron el volumen de agua extraído y la altura del nivel de agua en la escala del depósito una vez reequilibrado el sistema. En los dos últimos ensayos realizados (ensayos 4 y 5), se midió además la variación de la altura del nivel del agua en el recipiente de recogida tras cada nuevo equilibrio del sistema, con objeto de controlar este parámetro para posteriormente corregir los valores del volumen de agua correspondiente a cada extracción.

a) ENSAYO 1: vaciado del tubo 1, extracción del agua con vaso.

Para el tubo 1 se realizó un ensayo de vaciado del modo descrito en el párrafo anterior. El agua de vaciado del tubo se recogió en un cubo de 30 cm de altura, 22,1 cm de diámetro interno en la parte superior y 20,8 cm de diámetro interno a una altura de 12 cm (altura a la que se encuentra la boca de salida del depósito). La extracción de agua se realizó mediante un vaso, completando volúmenes de 1 L en cada extracción. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo se muestran en las figuras.



Variación de la altura del nivel del agua en la escala del tubo 1 durante un ensayo de vaciado progresivo manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 1).



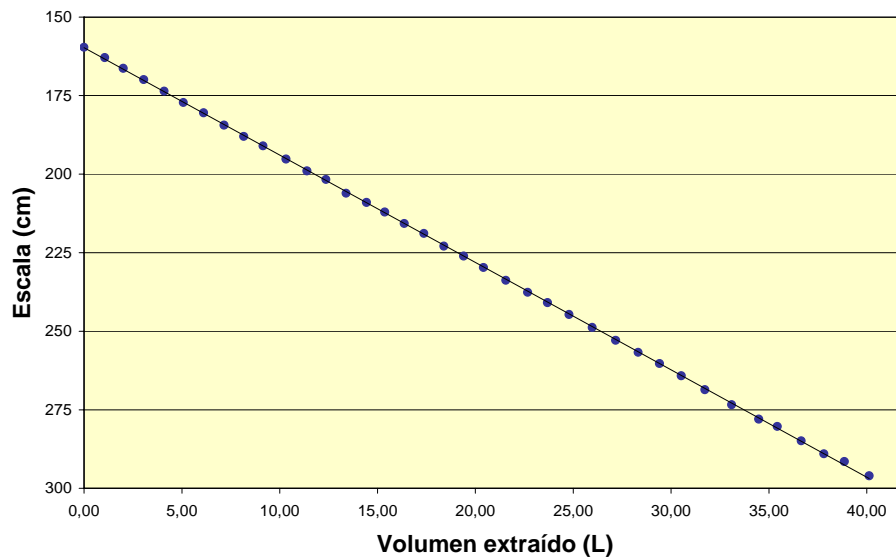
Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura en la escala obtenido durante un ensayo de vaciado progresivo del tubo 1 manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 1).

Del análisis estadístico de todos los datos registrados se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V / \Delta h$ (donde ΔV representa el incremento de volumen en el tubo y Δh el incremento en la altura del nivel de agua) de 0,304 L/cm (36 datos, desviación estándar 0,069). Si se eliminan del análisis los dos valores extremos de la serie, el valor promedio que se obtiene para $\Delta V / \Delta h$ es 0,300 L/cm (34 datos, desviación estándar 0,054). En la tabla 5 se incluye este valor, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados. Si se realiza el análisis por separado en dos tramos, el valor de

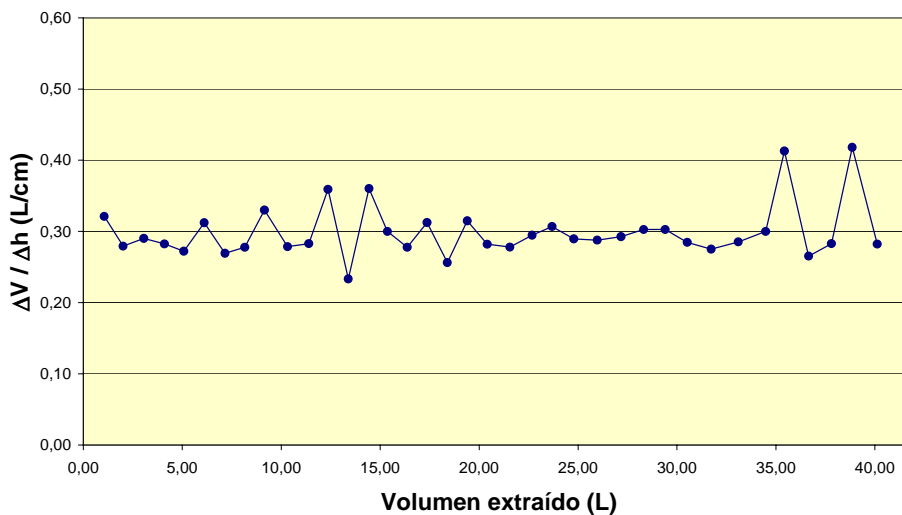
$\Delta V/\Delta h$ para el subgrupo correspondiente a los 18 primeros puntos de la serie es de 0,291 L/cm (desviación estándar 0,018) y de 0,318 L/cm (desviación estándar 0,095) para el subgrupo de los 18 últimos puntos de la serie.

b) ENSAYO 2: vaciado del tubo 2, extracción del agua con vaso

Para el tubo 2 se realizó un ensayo de vaciado siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayo 1, descrito en el apartado anterior. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo se muestran en las figuras.



Variación de la altura del nivel del agua en la escala del tubo 2 durante un ensayo de vaciado progresivo manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 2).

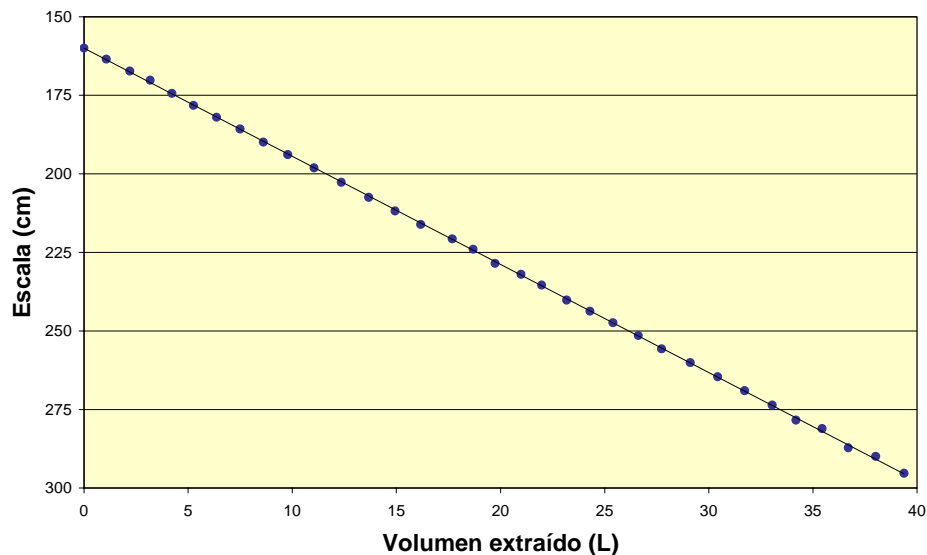


Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura en la escala obtenida durante un ensayo de vaciado progresivo del tubo 2 manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 2).

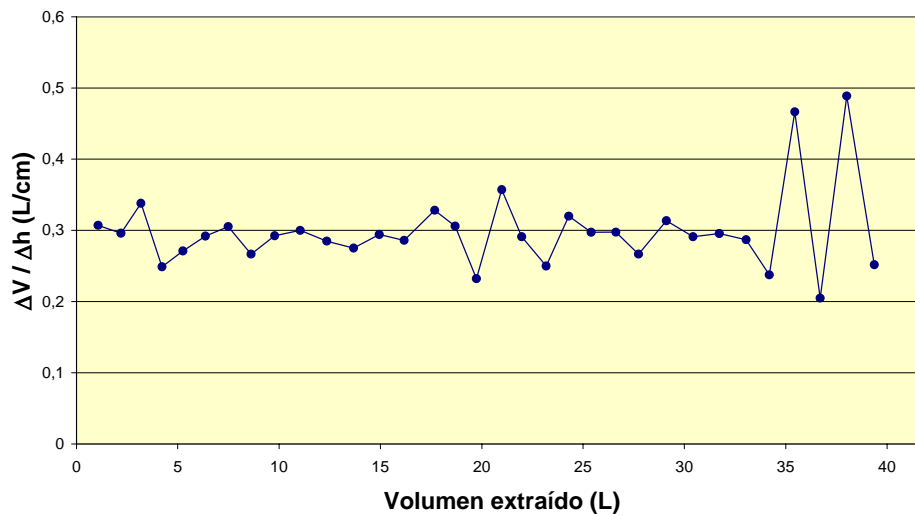
Del análisis estadístico de todos los datos registrados se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V/\Delta h$ de 0,299 L/cm (37 datos, desviación estándar 0,037). Si se eliminan del análisis los dos valores extremos de la serie, el valor promedio que se obtiene para $\Delta V/\Delta h$ es 0,297 L/cm (35 datos, desviación estándar 0,031). En la tabla se incluye este valor, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados. Si se realiza el análisis por separado en dos tramos, el valor de $\Delta V/\Delta h$ para el subgrupo correspondiente a los 19 primeros puntos de la serie es de 0,295 L/cm (desviación estándar 0,033) y de 0,303 L/cm (desviación estándar 0,041) para el subgrupo de los 19 últimos puntos de la serie.

c) ENSAYO 3: vaciado del tubo 2, extracción del agua con manguera

Se realizó un nuevo ensayo de vaciado para el tubo 2 modificando el procedimiento de extracción del agua del recipiente. En este ensayo se utiliza una manguera para extraer las alícuotas de 1 L de una forma más continua que mediante el vaso empleado en los ensayos 1 y 2, intentando así reducir las oscilaciones de la altura del nivel de agua en el recipiente que se producen al reequilibrarse el sistema. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo se muestran en las figuras 11 y 12.



Variación de la altura del nivel del agua en la escala del tubo 2 durante un ensayo de vaciado progresivo manteniendo cerrado el tubo de compensación y extrayendo el agua del recipiente con manguera (ensayo 3).

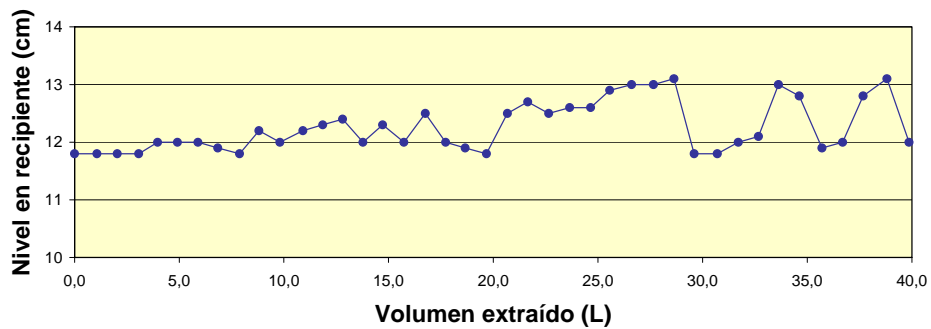
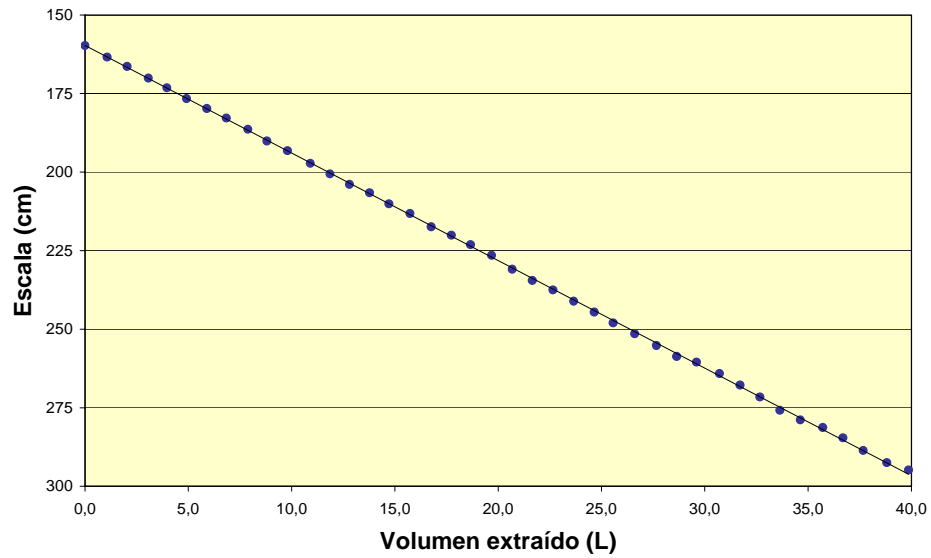


Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura en la escala obtenido durante un ensayo de vaciado progresivo del tubo 2 manteniendo cerrado el tubo de compensación y extrayendo el agua del recipiente con manguera (ensayo 3).

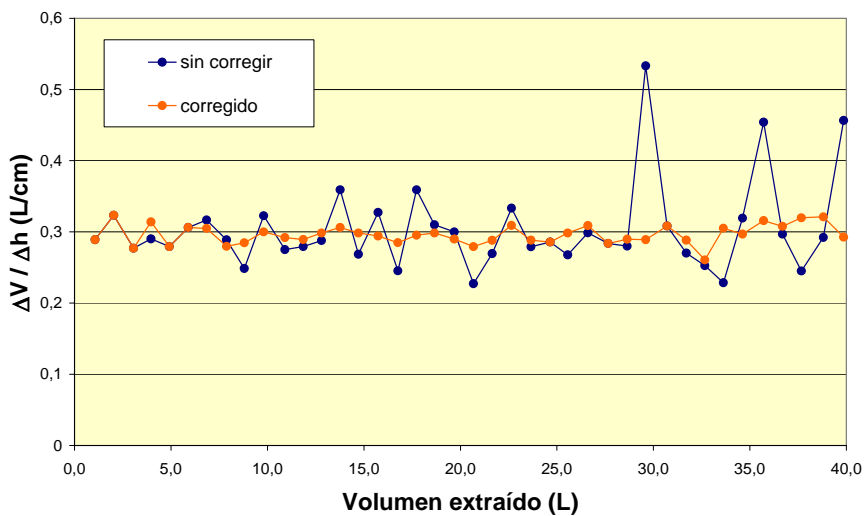
Del análisis estadístico de todos los datos registrados se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V/\Delta h$ de 0,298 L/cm (33 datos, desviación estándar 0,056). Si se eliminan del análisis los dos valores extremos de la serie, el valor promedio que se obtiene para $\Delta V/\Delta h$ es 0,299 L/cm (31 datos, desviación estándar 0,054). En la tabla 5 se incluye este valor, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados. Si se realiza el análisis por separado en dos tramos, el valor de $\Delta V/\Delta h$ para el subgrupo correspondiente a los 17 primeros puntos de la serie es de 0,290 L/cm (desviación estándar 0,026) y de 0,303 L/cm (desviación estándar 0,075) para el subgrupo de los 17 últimos puntos de la serie.

d) ENSAYO 4: vaciado del tubo 2, extracción del agua con vaso y registro de la altura del nivel del agua en el recipiente

Para el tubo 2 se realizó un ensayo de vaciado siguiendo el mismo procedimiento que en los ensayos 1 y 2, utilizando como recipiente de recogida el cubo de las dimensiones descritas anteriormente y registrando las oscilaciones del nivel de agua en el recipiente tras cada extracción con objeto de corregir los valores de $\Delta V/\Delta h$ calculados. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo se muestran en las figuras.



Variación de la altura del nivel del agua en la escala del tubo 2 (arriba) y en el recipiente de recogida (abajo) durante un ensayo de vaciado progresivo manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 4).



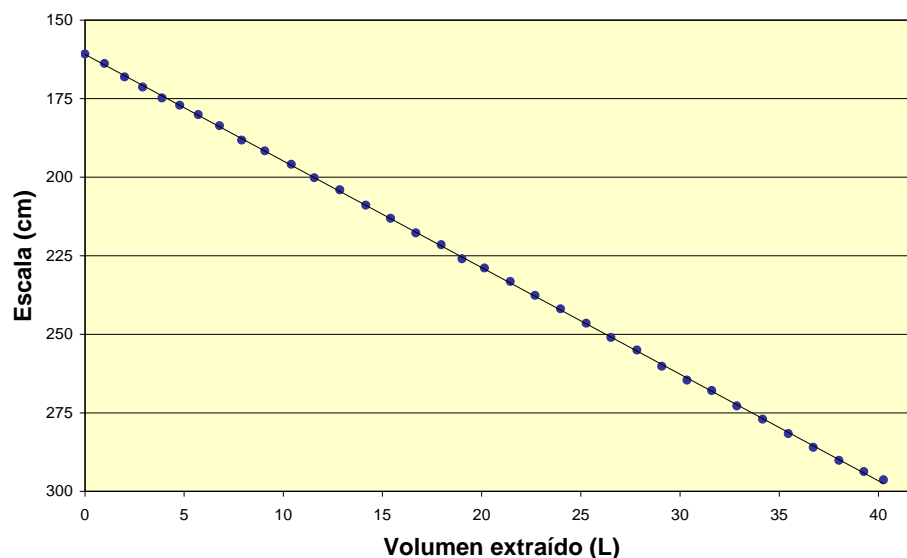
Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura en la escala obtenido durante un ensayo de vaciado progresivo del tubo 2 manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 4). Se compara el cociente $\Delta V / \Delta h$ aparente (o sin corregir, en color azul,

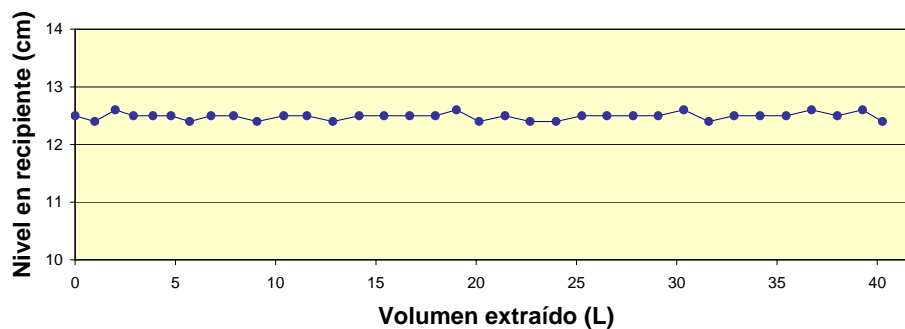
calculado sin tener en cuenta la oscilación del nivel de agua en el recipiente de recogida) con $\Delta V/\Delta h$ corregido (en color anaranjado, calculado a partir de los valores corregidos por las variaciones de nivel en el recipiente de recogida).

Del análisis estadístico de todos los datos registrados (40 datos) se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V/\Delta h$ aparente de 0,303 L/cm (desviación estándar 0,060) y para el cociente $\Delta V/\Delta h$ corregido de 0,296 L/cm (desviación estándar 0,013). Si se eliminan del análisis los dos valores extremos de la serie, los valores promedio que se obtienen son 0,299 L/cm (desviación estándar 0,047) y 0,296 L/cm (desviación estándar 0,012) para $\Delta V/\Delta h$ aparente y corregido, respectivamente. En la tabla se incluyen estos valores, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados.

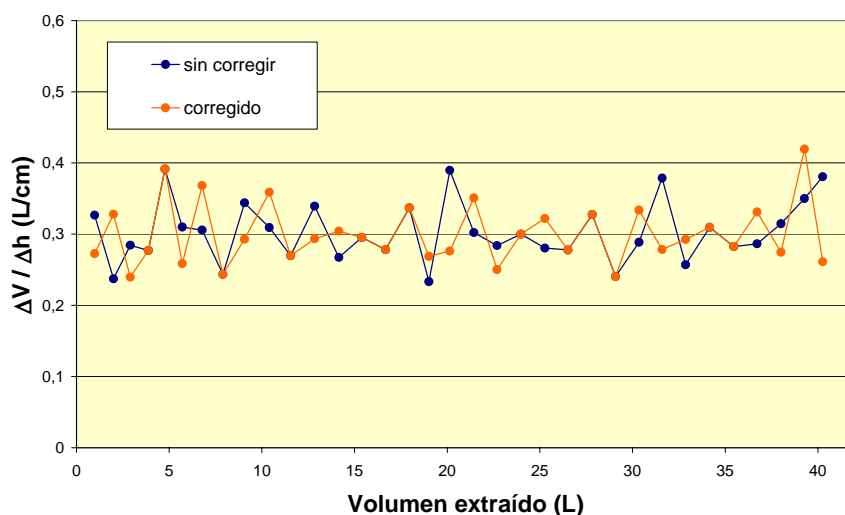
e) ENSAYO 5: vaciado del tubo 2, extracción del agua mediante drenaje y registro de la altura del nivel del agua en el recipiente

Se realizó un último ensayo de vaciado con el tubo 2 siguiendo el mismo procedimiento que en el ensayo 4 pero cambiando el cubo y el método de vaciado por extracción con un vaso por un recipiente que dispone de un sistema de drenaje en la base. Se trata de una caja metálica de 37,5 cm de altura y base rectangular de 32,1 cm de ancho y 53,9 cm de largo (dimensiones interiores). La salida del agua de este recipiente se regula mediante una llave que abre y cierra el circuito de drenaje situado en la parte inferior. Tras cada extracción se toma nota de la variación del nivel de agua en el recipiente con precisión de 0,1 cm para corregir los valores de $\Delta V/\Delta h$ calculados. Las representaciones gráficas de los registros obtenidos en este ensayo se muestran en las figuras.





Variación de la altura del nivel del agua en la escala del tubo 2 (arriba) y en el recipiente de recogida (abajo) durante un ensayo de vaciado progresivo manteniendo cerrado el tubo de compensación (ensayo 5).



Representación del cociente entre el incremento en volumen y el incremento en altura en la escala obtenido durante un ensayo de vaciado progresivo del tubo 2 manteniendo cerrado el tubo de compensación y extrayendo el agua del recipiente por el drenaje inferior (ensayo 5). Se compara el cociente $\Delta V/\Delta h$ aparente (o sin corregir, en color azul, calculado sin tener en cuenta la oscilación del nivel de agua en el recipiente de recogida) con $\Delta V/\Delta h$ corregido (en color anaranjado, calculado a partir de los valores corregidos por las variaciones de nivel en el recipiente de recogida).

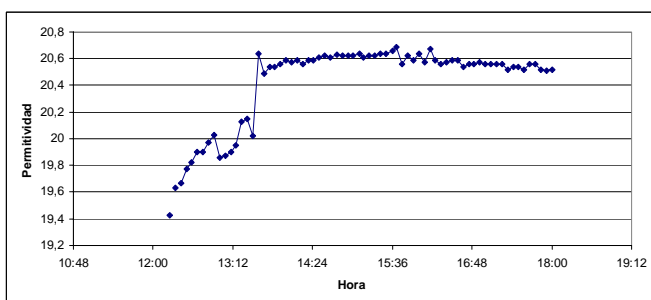
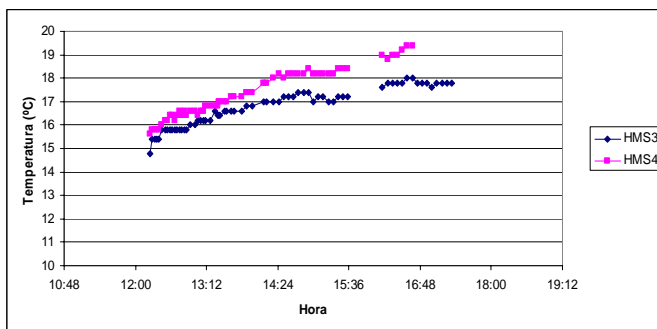
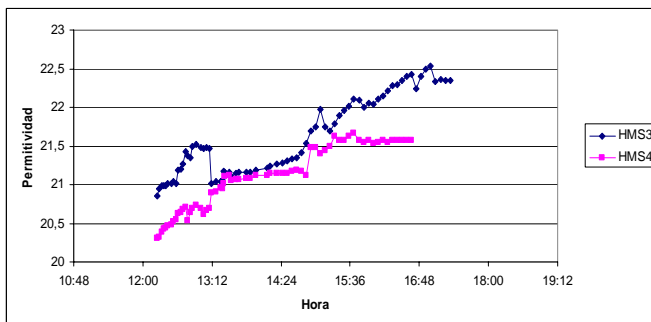
Del análisis estadístico de todos los datos registrados (34 datos) se obtiene un valor promedio para el cociente $\Delta V/\Delta h$ aparente de 0,303 L/cm (desviación estándar 0,043) y para el cociente $\Delta V/\Delta h$ corregido de 0,300 L/cm (desviación estándar 0,043). Si se eliminan del análisis los dos valores extremos de la serie, los valores promedio que se obtienen son 0,302 L/cm (desviación estándar 0,039) y 0,298 L/cm (desviación estándar 0,037) para $\Delta V/\Delta h$ aparente y corregido, respectivamente. En la tabla se incluyen estos valores, junto con los obtenidos para este parámetro en el resto de ensayos realizados.

ANEXO III

EJEMPLOS DE CURVAS DE INFILTRACIÓN OBTENIDAS MEDIANTE DIVERSOS MÉTODOS

Se presentan en este anexo, y se comentan brevemente, a título ilustrativo, diversas curvas obtenidas en los ensayos que se han realizado mediante la metodología propuesta para determinar las características hidráulicas de diferentes materiales ensayados.

En la figura se observa la evolución de la permitividad eléctrica y de la temperatura en un ensayo de inyección realizado en Arganda del Rey, en las proximidades de unas parcelas experimentales de depuración de lodos, sobre materiales arenosos o arenosolimosos. El punto HSM3 es el más próximo al cilindro de inyección.



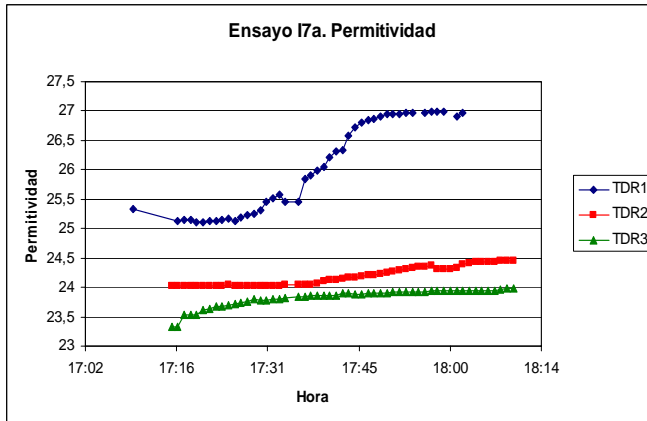
Como se puede observar, temperatura y humedad, muestran una evolución parecida y es que cuando hay una diferencia de temperatura suficiente entre el agua de inyección y el suelo la llegada de esta se puede monitorizar bien monitorizando la evolución de la temperatura. No obstante es importante evitar, especialmente en el caso de ensayos largos que llegan a durar varias horas, que la elevación de la temperatura del suelo debido al calentamiento diurno interfiera con

la variación debida a la llegada del agua de ensayo.

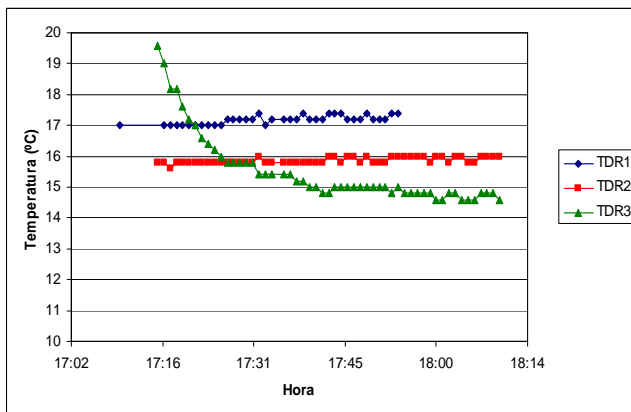
Por otro lado, las oscilaciones relativamente grandes que a veces se observan en el medidor de humedad se deben a ruido o errores de medida, por ejemplo, el brusco descenso que se ve en el sensor HSM3 sobre las 13:12 se debió a un golpe fortuito que recibió y que modificó el contacto entre los electrodos y el suelo. Es muy importante evitar a toda costa este tipo de accidentes.

En la última de las tres gráficas se observa la curva final después de repetir el ensayo hasta asegurar la estabilización.

En la figura se observan los resultados de un ensayo realizado sobre ovas en Las Tablas de Daimiel, provincia de Ciudad Real. Como se puede ver, la curva que proporciona en el sensor TDR1, que es el más próximo al cilindro de inyección, responde a la forma esperada en un ensayo ideal, con un periodo de humectación relativamente rápido, para posteriormente estabilizarse.

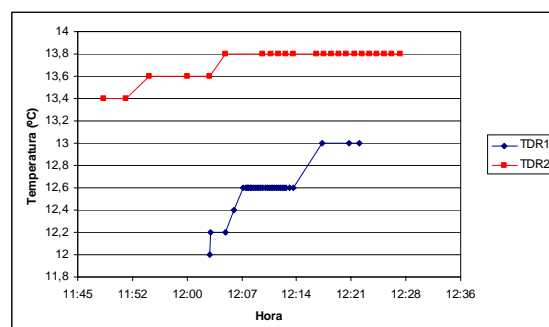
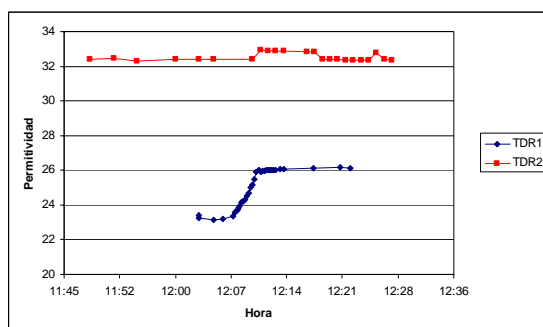


responde a la forma esperada en un ensayo ideal, con un periodo de humectación relativamente rápido, para posteriormente estabilizarse. Los otros sensores, aunque responden lo hacen demasiado lentamente, con un frente de humectación muy poco claro, formas típicas de situaciones en las que predomina el flujo vertical.



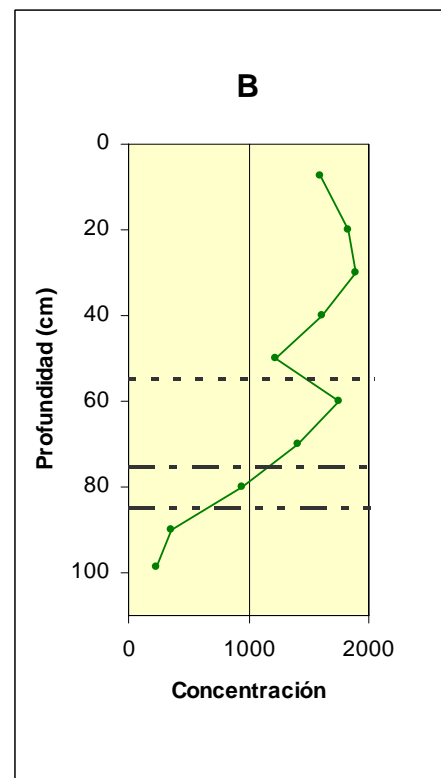
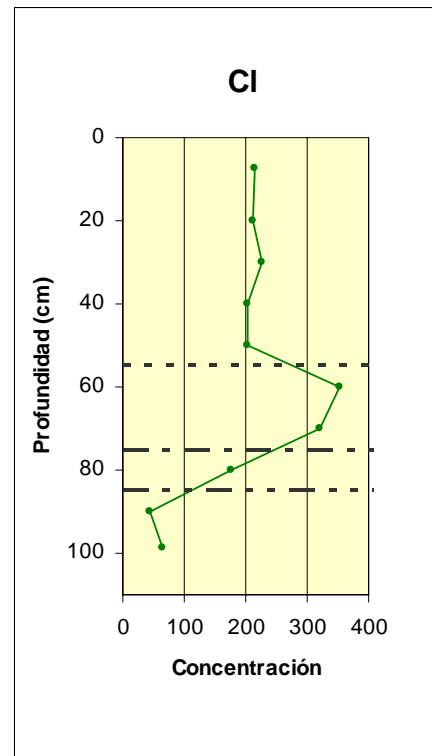
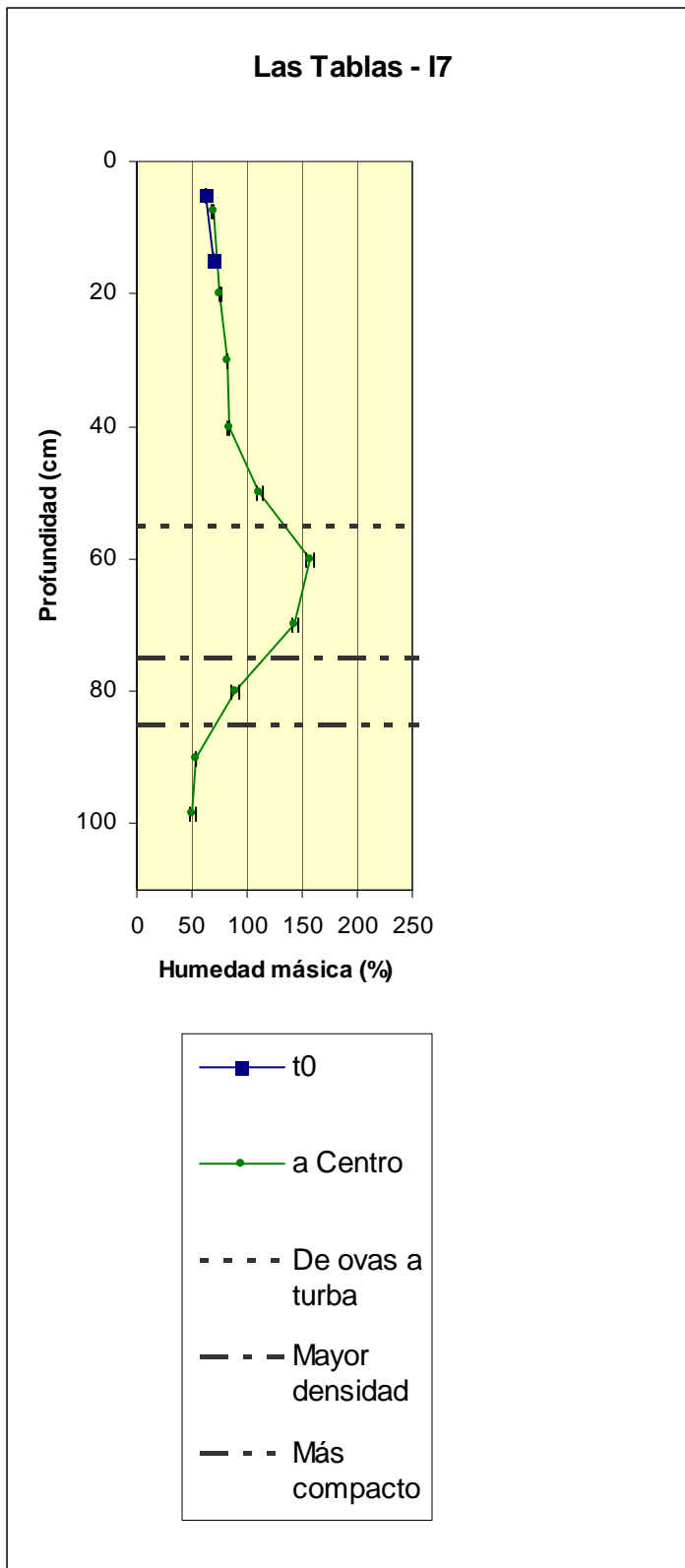
El enfriamiento observado en el sensor TDR3 no tiene explicación lógica, puede deberse a que estuviese incorrectamente almacenado lo que hace necesario recomendar no empezar los ensayos hasta que se haya asegurado una correcta estabilización térmica del sistema.

La siguiente gráfica, también en Las Tablas de Daimiel, pero en esta ocasión sobre un material turboso, muestra un comportamiento similar al anterior, con un claro predominio del flujo vertical, que da lugar a que el sensor mas alejado no mida ningún aumento de la humedad a lo largo del ensayo, mientras que el sensor próximo responde con un aumento muy brusco de la humedad y una estabilización rápida.



ANEXO IV EJEMPLOS DE CURVAS DE TRAZADO

Se muestra como ejemplo las curvas de trazado (humedad, cloruro y boro) obtenidas en un el ensayo realizado en Las Tablas de Damiel. La solución trazadora empleada fue la descrita en este informe.



ANEXO V EJEMPLOS DE RESULTADOS DE MODELOS

Se muestran cuatro imágenes de la evolución del bulbo de humectación simuladas mediante el programa VS2DTI y las gráfica de calibración de los sensores de humedad.

