

# Aplicación de las medidas de infiltrómetro de disco en la caracterización de propiedades hídricas en rocas

Trabajo de fin de grado de Geología.  
Universidad de Zaragoza.

Autor: Jorge Mellado Modrego

Director: Josep Gisbert Aguilar

Codirector: David Moret Fernandez

<b>Índice</b>	1
<b>Abstract</b>	2
<b>I.-Planteamiento</b>	3
<b>II.-Objetivos</b>	3
<b>III.-Metodología</b>	4-9
<i>Planteamiento general</i>	4
<i>Montaje instrumentación</i>	4
<i>Medidas laboratorio</i>	7
<i>Tratamiento de datos</i>	8
<b>IV.-Contexto geológico</b>	10-14
<i>Contexto Geográfico/Geológico</i>	10
<i>Caracterización geológica distintos materiales</i>	11
<b>V.-Presentación y discusión resultados</b>	15-22
<i>Presentación resultados</i>	15
<i>Análisis y comparación</i>	18
<i>Discusión</i>	22
<b>VI.-Conclusions</b>	24
<b>VII.-Bibliografía</b>	24-25
<b>Anexos</b>	
Anexo1.- Plano infiltrómetro	1
Anexo 2.-	
Gráficas y listado de cálculos para valores de coeficientes de absorción y permeabilidad	2-10
Anexo 3.- Gráficas de infiltración acumulada por materiales.	11-16

## **Abstract**

In this work we use a disc infiltrometer, a device widely used in hidrology and edafology, to explore his usefulness for the calculation of the hydraulic parameters (suction and permeability) in rocks. Until now, this device has been used to measure the parameters mentioned in soils.

We have built a disc infiltrometer adapted for use in rocks, and we have used it to evaluate the characteristics of a set of eight rocks with a wide range of suction and permeability properties. We have made measurements at atmospheric pressure and negative pressures respect with the atmospheric.

The made prototype differs from the classics in his smaller size and by incorporating a pressure transducer. Feature that allow the device to automatically record the infiltration into rocks.

It has been found the relationship between pressure conditions and suction along with the possibility of obtaining porosimetric information of the rock by studying suction at different pressures.

We have analyzed different methods to calculate the absorption and permeability coefficients using the data obtained by the infiltrometer. We also have compared results between them and with those obtained through a conventional suction test. We have selected the most appropriate method of calculation and pointing out areas for improvement.

Finally we performed an analysis about the infiltrometer and method usefulness for calculating hydraulic rock parameters. Assessing their ability to provide additional useful information with which we can continue to improve our knowledge about the hydraulic properties in rocks through the incorporation of this technique.

## I Planteamiento

Este trabajo, se enmarca dentro de los esfuerzos de la caracterización petrofísica de los materiales geológicos, en concreto la piedra natural.

Se estudia la Arenisca de Uncastillo, la Caliza del Páramo o Campanil, Piedra de Calatorao, Arenisca Azul Pirineo, Calcarenita de Santa Pudia, Travertino de Albox y Travertino de Teruel con su variedad Travertino de Nogal Montoro. Estas rocas han sido seleccionadas para representar todo el abanico de succiones/permeabilidades presentes en rocas.

La profundización en la caracterización de los materiales solo es factible con el uso de nuevas tecnologías. Aunque este concepto no significa necesariamente que la tecnología sea de reciente desarrollo, vale con aplicar tecnologías existentes pero con un objetivo y planteamiento “nuevo” que le da una funcionalidad innovadora. En este caso se ha conseguido con un enfoque interdisciplinar. En este trabajo se analizará la validez y adaptabilidad de una técnica empleadas en el estudio de suelos (infiltrómetro) para la medida de los parámetros hidrogeológicos de la roca natural. En concreto la utilización de un dispositivo de infiltrómetro que se desarrollará al efecto para recabar los datos necesarios que permitan caracterizar la permeabilidad de los materiales estudiados.

## II Objetivos

- Caracterización básica de las rocas, caracterización parámetros hídricos (absorción, succión y permeabilidad)
- Desarrollo de un método nuevo de medida en rocas. Estudio de la aplicabilidad del método del infiltrómetro en siete rocas con valores muy variables de succión/permeabilidad.
- Construcción de un infiltrómetro pensado para medir parámetros hídricos en rocas

## III Metodología

### III. I. Planteamiento general

Como fase previa, se ha realizado una etapa de trabajo bibliográfico, durante la cual se ha realizado una búsqueda bibliográfica en la que se han analizado los datos existentes acerca de los materiales geológicos susceptibles, por su rango de porosidades/parámetros hídricos, de ser seleccionados para el estudio. Así como analizar su importancia y entorno geológico para planificar la fase de campo del trabajo.

En relación con el fundamento teórico de la potencialidad del infiltrómetro, hemos consultado diversos trabajos de índole matemática, necesarios para la elaboración de los cálculos a utilizar. Además hemos realizado una síntesis de los trabajos existentes acerca de la utilización de métodos y técnicas de infiltrómetro en diferentes entornos y situaciones, así como de su elaboración junto con las características específicas incorporadas en función de su distinto uso.

Para conseguir muestras de cuatro de las 8 rocas estudiadas rocas, hemos visitado varias canteras, evaluando la anisotropía, y realizado estudios sobre el terreno para seleccionar los materiales más idóneos para su utilización en el ensayo. Se realiza la selección posterior de muestras de la manera más representativa posible del conjunto de materiales escogidos. En el caso del los Travertinos y de la Calcarenita de Santa Pudía, hemos aprovechado muestras de envíos de la cantera al profesor Gisbert.

Para su uso con la técnica del infiltrómetro las muestras serán utilizadas en forma de probetas cilíndricas de unos 3cm de longitud y 4,5 cm de diámetro con la superficie lo más plana y horizontal posible, ya que es necesario que exista un buen contacto entre la superficie de la roca y base del infiltrómetro. Para la preparación de las probetas se hizo uso de las instalaciones de la empresa Control 7 donde se elaboraron con una taladradora con una broca de 4,5 cm. Se tallaron las probetas tanto en dirección paralela como perpendicular a la estratificación.

Posteriormente en el SAI de preparación de rocas, se proceso la probeta para obtener una superficie plana y pulida sobre la que colocar el infiltrómetro, repasándose los detalles necesarios tras esa fase con papel de lija y abrasivos para su perfecto pulido. También se ha encargado a este servicio las preparaciones microscópicas de algunas de las probetas.

### III. II. Características y Montaje del infiltrómetro de disco

El infiltrómetro de disco, es un instrumento de medidas de campo ampliamente usado en hidrología y edafología, para medir la conductividad hidráulica y absorción del suelo.

El método consiste en llenar el infiltrómetro de agua y medir la caída de nivel de agua del infiltrómetro. Esta medida nos dará información sobre el avance de la infiltración en el suelo. Una particularidad del aparato es que nos permite ajustar la tensión aplicada durante la infiltración, y mantenerla constante a lo largo de la medida. Esto permite hacer medidas de infiltración a succión o tensión negativa. Existen diversos modelos de infiltrómetros en el mercado. Nosotros vamos a adaptar un infiltrómetro de disco para su uso en rocas, tomando como guía, un dispositivo comercial

de Decagon Devices. En la Figura 1 vemos un diagrama de un infiltrómetro de disco comercial (ver planos del construido en Anexo 1).

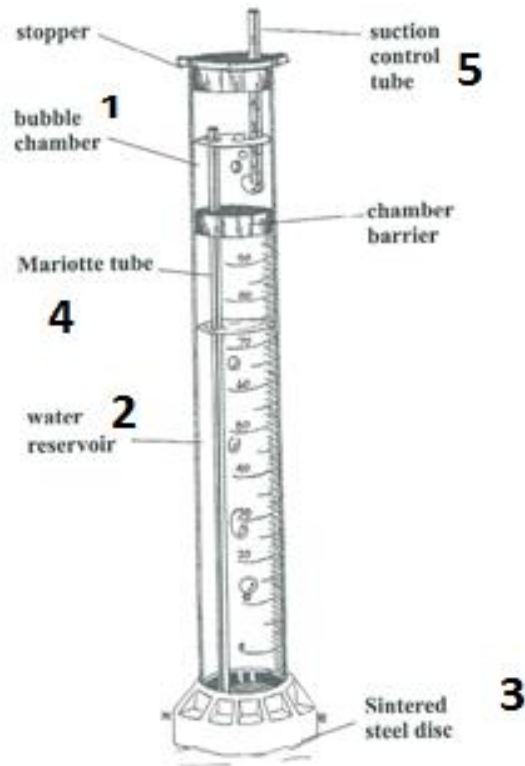


Figura 1: Diagrama de dispositivo infiltrómetro de disco extraída del manual de usuario de Decagon Devices. En el anexo 1 diseño del construido.

El aparato básicamente consiste en un tubo dividido en dos secciones: (i) la parte superior o cámara de burbujeo (1 en la Figura 1), que sirve para regular la presión y (ii) sección inferior o reservorio de agua (2 en la Figura 1), donde se almacena el agua. En la base del reservorio se colocara el disco poroso (3 en la Figura 1) que permite que fluya agua desde el reservorio al suelo. El aire, entra en el reservorio a través de un tubo que conecta la base del reservorio con la cámara de burbujeo. La succión de infiltración se consigue gracias al tubo parcialmente sumergido de la cámara de burbujeo. Si mantuviéramos el tubo sin la cámara de burbujeo conseguiríamos un ensayo a presión atmosférica constante (eliminando el efecto de la altura de agua en el reservorio).

La presión negativa de infiltración se consigue sumergiendo en la cámara de burbujeo el tubo de entrada de aire. (5 en la figura 1). Cuanto más sumergido esté el tubo, mayor será la succión aplicada. Esa altura de columna de agua, es la presión que el aire tendrá que vencer para llegar a la cámara, y equivaldrá a la succión aplicada. Mediremos por tanto la presión negativa respecto a la atmosférica en unidades de longitud que representaran esa altura. Desde la cámara de burbujeo, el aire pasa hasta la base del disco poroso mediante el tubo que conecta las dos cámaras. Aunque el nivel del agua desciende en el reservorio principal, por fenómeno de Mariotte, la presión de agua en la placa porosa en contacto con la roca se mantiene constante. El agua se infiltrará en el material a

estudiar, teniendo que contrarrestar la fuerza de succión generada por la torre de burbujeo, es decir, como si hubiera presión negativa respecto a la atmosférica.

Debido a que en rocas la infiltración transcurre muy lentamente, la caída de nivel de agua en el reservorio se monitorizó con un transductor de presión diferencial, que mide las diferencias de presión en la parte baja y alta del reservorio de agua. Esto nos permitirá registrar el avance de la infiltración de forma automática. Como el volumen de agua empleado no es muy elevado, se ha utilizado un reservorio de pequeño diámetro lo que permite mayor precisión en la medida. Así pues, el tubo seleccionado es más estrecho y alargado, de tal manera que cada centímetro de altura de la columna de agua equivalga a un mililitro en volumen. Al diámetro interior del tubo hay que restarle el espacio de la pipeta de vidrio que transporta el aire compaginando ambas medidas para obtener la equivalencia.

Su aplicación en rocas tendrá la ventaja de ser un método más sencillo y rápido (succión y permeabilidad), con el añadido de poder trabajar a distintas tensiones. Manteniendo la citada presión constante podremos, si mantenemos los parámetros ambientales constantes, medir los valores de la succión y la permeabilidad para una presión característica. Además podremos observar el cambio de estos valores en función de la presión, al cambiar únicamente la tensión aplicada y manteniendo constantes los demás valores. Al cambiar disminuir la tensión, el tamaño de poros por los que puede circular el agua se reduce, por lo que al tomar medidas a distintas tensiones podremos caracterizar el sistema poroso de la roca. Esto, formara parte de un estudio más amplio que desborda el ámbito del trabajo de fin de grado. Aquí mediremos la variación en rocas de los parámetros hídricos según la tensión aplicada.

Una vez decidido el diseño y medidas del instrumento se procedió a su montaje.

Inicialmente se planeó utilizar dos tubos de diferente tamaño, pero finalmente se realizó solo uno, siendo seleccionado el tubo de menor diámetro, ya que las probetas no requieren un gran volumen de agua, y las medidas de nivel son más fáciles. El diseño y las medidas del aparato se encuentran en el anexo 1.

En la Fotografía 1 se observan junto al aparato finalmente construido un modelo comercial de Decagon Devices utilizado como guía, y el esqueleto del modelo a medio construir.

El infiltrómetro construido nos permite aplicar tensiones negativas (inferiores a la atmosférica).

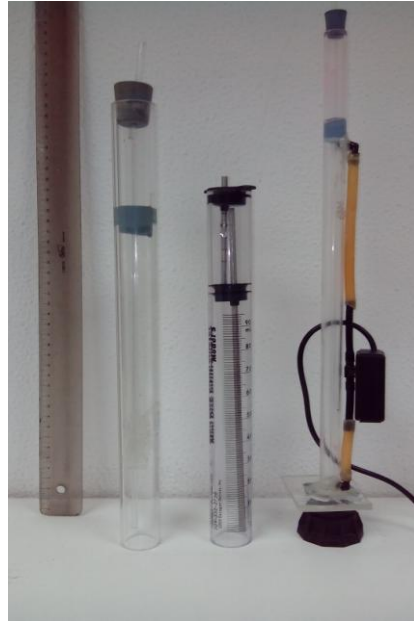
Al tiempo que se procesaban las probetas de roca se ejecutó la construcción del infiltrómetro. La composición final se observa en el esquema del anexo 1.

Conseguido un tubo de metacrilato que servirá de base para el aparato, se prepara el sistema de cámaras de burbujeo y de almacenamiento de agua necesarias para regular la presión aplicada. Esto se consigue mediante tapones de plástico que logran la estanquidad de las mismas, y pipetas de vidrio, que los atraviesan mediante orificios perforados de acuerdo a su tamaño, que permiten la circulación del aire. A continuación se construye la adaptación del tubo al diámetro del disco de filtro de acero inoxidable sinterizado. Por último se prepara el dispositivo de transductor de presión con un sensor de 0,5 psi de resolución, con el objetivo de tomar medidas automatizadas del avance

Aplicación de las medidas de infiltrómetro de disco en la caracterización de propiedades hídricas en rocas.

de la infiltración. La instalación del software pertinente la realiza el Servicio de ayuda a la investigación de la universidad de Zaragoza. Su posición final se puede ver en el anexo 1.

La medida de infiltración de las probetas se realiza con la probeta colocada sobre un recipiente de plástico cuyo tpe ha sido horadado para que pueda gotear libremente.



Fotografía 1: Dispositivos de infiltrómetro desarrollados en proceso y finalizado (izquierda y derecha respectivamente) junto a uno de ámbito comercial (centro).

### III. III. Medidas laboratorio y tratamiento de datos

- 1º) Tallado de probetas para conseguir cilindros de 40-44 mm de diámetro
- 2) Secado de las probetas. Se sometieron a 4h. de estufa a 60°C y posteriormente se enfriaron/secaron durante 48 h. en un desecador de sepiolita al 12% de HR.
- 3) Cálculo del peso seco en balanza de precisión
- 4) Ensayo de infiltración (ver detalles seguidamente)
- 5) Peso húmedo de la probeta para evaluar la absorción de agua conseguida.

En el empleo sistemático del método del infiltrómetro se emplearon los siguientes pasos:

- 4.1. Introducir la probeta una funda de caucho para evitar evaporación
- 4.2. Colocar el infiltrómetro, lleno de agua, perpendicular a la superficie de la probeta. En caso de problemas en el contacto se colocará antes de cada medida una fina capa de arena, con el objeto de que la infiltración se realice de forma homogénea en toda la superficie.
- 4.3. Comienzo de la infiltración y la captura de datos de nivel de agua por ordenador mediante el transductor depresión.



4.4.- Las medidas se prolongan hasta que comienza a gotear la probeta por la superficie inferior de la probeta.

5.-Pesada final de la muestra

Con estas medidas se logra registrar en laboratorio los datos de infiltración acumulada y contenido volumétrico en agua tanto inicial y el final tras infiltración a partir de los datos de pesada de las rocas. Con los datos de infiltración se calcularán las demás parámetros hídricos en la fase de la realización de los cálculos.

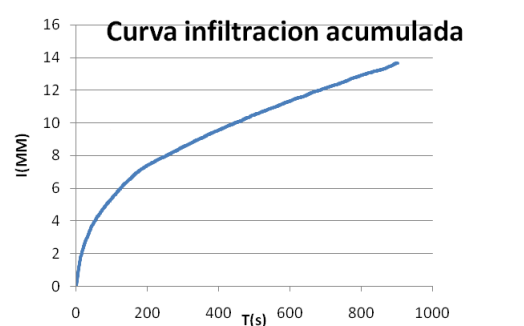
## Medidas convencionales de succión

Se ha seguido la norma AENOR (1999) UNE – EN 1925

El ensayo de succión según la norma UNE – EN 1925, consiste en colocar las probetas en una lamina de agua de 3 +/- 1 mm con apoyos parciales en la base e ir midiendo el peso de las probetas en función del tiempo transcurrido. Con el aumento del peso respecto al tiempo obtendremos el coeficiente de absorción siguiendo la norma.

### III. IV. Tratamiento de datos

Los datos de infiltración son recogidos por el software que controla el transductor de presión. Estos datos son exportados a tablas de Excel en bruto para su tratamiento, obteniéndose una gráfica con la curva de infiltración acumulada con las medidas deseadas, ver ejemplo en la Gráfica 1.



Gráfica 1: Ejemplo de gráfica de infiltración acumulada, vemos los valores alcanzados de infiltración medida en litros por metros cuadrados (mm) alcanzada a lo largo del tiempo, medido en segundos. Los datos de altura se traducen posteriormente en volumen /peso de agua.

Con estas gráficas obtenemos la infiltración acumulada en función del tiempo para cada material, permitiéndonos analizar su succión.

A partir de los datos de infiltración obtendremos, utilizando diferentes modelos, los parámetros hidráulicos de la roca.

El método más sencillo está basado en la relación

$$I = S\sqrt{t}$$

que calcula los valores de absorción a partir de los primeros intervalos de infiltración. Esta ecuación pierde precisión conforme se amplía el rango de tiempo, por lo que solo se tendrán en cuenta los primeros segundos de infiltración según Minasny y McBratney (2000). Con este modelo obtendremos solo el parámetro  $S$ , que se calcula a partir de la relación gráfica entre la infiltración acumulada y la raíz del tiempo, mediante el programa excel, siendo la pendiente de la recta de regresión la constante. Dicho método lo llamaremos "cumulative linearization" (Cl)

El segundo método de medida de las propiedades hidráulicas se basa en la optimización numérica ecuación simplificada de Haverkamp (Haverkamp et al., 1994). Dicha ecuación, un poco más compleja que la anterior y válida para el régimen transitorio de una infiltración simétrica axialmente, viene expresada por

$$I = S\sqrt{t} + \left( K \frac{(2-\beta)}{3} \right) t$$

donde  $I$  es la infiltración,  $t$  al tiempo,  $S$  al coeficiente de absorción (también llamada sorptividad) y  $K$  la conductividad hidráulica.  $\beta$  está dentro del intervalo (0,1) y queda fijado en 0,6 (Vandervaere et al., 2000). Para la optimización numérica  $\beta$  es un coeficiente con un valor 0.6 y  $K$  (conductividad hidráulica) se calcula según Darcy a partir del flujo de drenaje de la probeta al final de la sesión de infiltración. Es necesario para ello que la probeta gotee. La curva infiltración la obtenemos de las medidas experimentales.

El tercer método es el de "Diferenciación Lineal" DL (Vandervaere et al., 2000), basado en diferenciar la ecuación simplificada de infiltración de Haverkamp respecto a la raíz cuadrada del tiempo:

$$\frac{dI}{d\sqrt{t}} = C_1 + 2C_2 \sqrt{t} \quad \frac{dI}{d\sqrt{t}} \approx \frac{\Delta I}{\Delta \sqrt{t}} = \frac{I_{i+1} - I_i}{\sqrt{t_{i+1}} - \sqrt{t_i}}$$

$$C_1 = S$$

$$C_2 = \frac{2-\beta}{3} K$$

Ésta es considerada una buena técnica de cálculo la absorción y la conductividad hidráulica cuando se necesita colocar una capa de arena para facilitar la infiltración en superficies rugosas, ya que permite descontar su efecto (Vandervaere et al., 2000).

Finalmente, calcularemos las propiedades hidráulicas utilizando un último método más complejo basado en la optimización numérica de la solución analítica de Haverkamp et al. (1994), para infiltración 1D (Latorre et al., 2015).

$$\frac{2(1-\beta)\Delta K^2}{S_0^2}t = \frac{2\Delta K(I_{1D} + K_n t)}{S_0^2} - \ln \left\{ \frac{1}{\beta} \exp \left[ \frac{2\beta\Delta K(I_{1D} + K_n t)}{S_0^2} \right] + 1 - \frac{1}{\beta} \right\}$$

La optimización se realizará con el el programa R-commader. El anexo 2 muestra los calculos realizadas con el citado programa, proporcionados por el codirector del trabajo. Este método se desarrolló para solucionar los problemas que presentan los métodos anteriores en algunos materiales. Puede descontar el efecto de la arena, y es capaz de calcular tanto la absorción como la conductividad hidráulica a partir de los datos experimentales, aunque la primera con mayor precisión. Este método se basa en el análisis de todos los datos experimentales tomados, y asigna a cada curva de infiltración unas constantes características de absorción e infiltración que le corresponden según la infiltración. El método funciona gracias a unos cálculos complejos que ajustan los datos experimentales a la mejor infiltración teórica. Este método tarda bastante en analizar los datos experimentales y requiere de un ordenador potente. Se han utilizado medios del CSIC proveídos por el codirector del trabajo (ver en el anexo 2 el listado de cálculos a aplicar).

En el caso de goteo de la probeta al final de la infiltración, la conductividad se calculará por Darcy.

$$Q = K * i * A$$

donde Q es el caudal por segundo, i el gradiente, A la sección y K el coeficiente de permeabilidad. Ésta es igual a la pendiente de la recta de infiltración acumulada por tiempo a partir del momento en que la probeta comienza a gotear. Compararemos también los valores obtenidos por Darcy mediante la medición del drenaje de forma tradicional con los de los cálculos anteriores.

## IV CONTEXTO GEOLOGICO

### IV.I. Contexto geográfico/geológico

Los materiales empleados en este trabajo se extraen en yacimientos de las siguientes localidades:

La cantera de la roca Piedra de Uncastillo se localiza en el término municipal de Uncastillo, en la provincia de Zaragoza. Cordillera Pirenaica. Formación Uncastillo

El yacimiento de la Caliza Campanil se localiza al en el término municipal de Fraga, al oeste del núcleo de población, en la provincia de Huesca. Depresión del Ebro. Formación de calizas y calizas arenosas con sílex Unidad Torrente Del Cinca-Alcolea Del Pinar

La Piedra de Calatorao proviene del término municipal de Calatorao, de las canteras al suroeste del núcleo de población, provincia de Zaragoza. Depresión del Ebro. Formación Chelva.

El travertino de Albox proviene del término municipal de Albox, provincia de Almería. Cordillera Bética. Conjunto de Travertinos Pleistocénicos.

La arenisca Azul Pirineo proviene del municipio de Marte, provincia de Huesca. Cordillera Pirenaica. Formación Belsue-Atares

Aplicación de las medidas de infiltrómetro de disco en la caracterización de propiedades hídricas en rocas.

La Calcarenita de Santa Pudía proviene del municipio de Escúzar, provincia de Granada. Cordillera Bética. Formación Calcarenítica del Tertiense Inferior Medio.

El Travertino de Teruel proviene de Villalba Baja, Provincia de Teruel. Cordillera Iberica. Formación del Mioceno superior Calizas Margas y Yesos del Turolense.

El Travertino de Teruel variedad Travertino Nogal Montoro proviene de Villarlugo, Provincia de Teruel. Cordillera Iberica. Formación de Calizas Oquerosas del Mioceno

## IV.II. Caracterización geológica de los distintos materiales

### Piedra de Calatorao

Mapa geológico donde se muestra ubicación de la cantera en rojo

Foto de cantera



Fotografía 2: Fotografía tomada en la zona de recolección de muestras.

Mapa 1: Modificado a partir del esquema tectónico de la hoja de Épila de la serie magna 50.000(segunda serie).

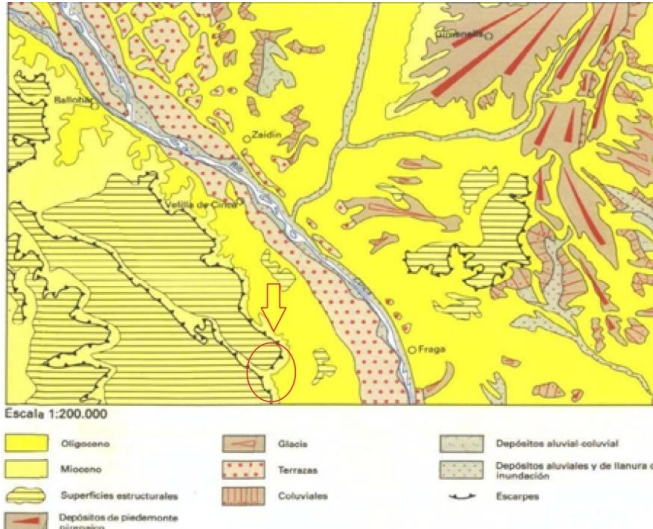
*Descripción de Visu:* La roca es de color gris oscuro (N3), masiva, de grano fino y con bioturbación. Los macrofósiles son escasos y frecuentemente reemplazados por calcita, de coloración clara. Las discontinuidades observadas, escasas, corresponden a grietas de espesor submilimétrico rellenas por calcita blanca. Se aprecia una laminación por disolución incipiente, marcada por superficies paralelas a la estratificación, de color rojizo (Aranz et al., 2004).

*Descripción Microscopio:* Es una roca caliza (biomicrita –wackestone/packstone bioclástico), de textura sostenida por la matriz o, localmente, granosostenida, con una bioturbación intensa de pequeña escala que borra parcialmente la laminación original. Los macrofósiles son escasos (briozoos, braquiópodos, belemnoides). En las distintas muestras, la micrita, peloides y los bioclastos (PelecípodosPositrabouchi , crinoides, y foraminíferos) se presentan – con tamaños de 20-80 micras en proporciones variables (30-65%), sumando en conjuntp el 95 % de la roca . El cuarzo detrítico y los minerales opacos son minoritarios (1-2%) junto con la moscovita muy escasa y esparita(2%), que ocupa algunos espacios entre los bioclastos (Aranz et al., 2004).

## Caliza Campanil

Mapa geológico donde se muestra la ubicación de la cantera.

Foto de cantera



Fotografía 3: Fotografía tomada en la zona de recolección de muestras.

Mapa 2: Modificado a partir del esquema morfoestructural de la hoja de Fraga del Magna a escala 50.000 (segunda serie).

*Descripción Visu:* El aspecto macroscópico es el de una roca masiva de color gris amarillento oscuro (Munsell: 5Y 7/1), bastante homogénea. Ocasionalmente presenta niveles margosos centimétricos, laminaciones paralelas poco marcadas y nódulos de sílex. Es una roca porosa, con poros abundantes de tamaño milimétrico (2-5mm). Presenta una intensa bioturbación por raíces. La ausencia de fisuras es más marcada cuanto más potente es el estrato (Aranz et al., 2004).

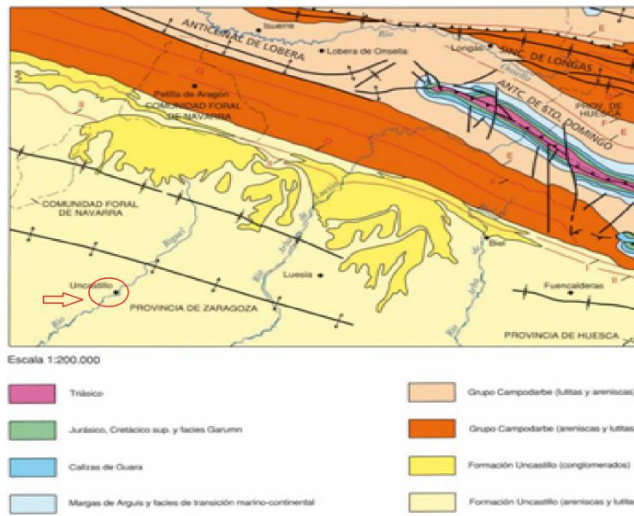
*Descripción Microscopio:* Se trata de una roca caliza (Micrita con bioclastos- Mudstone), con textura soportada por la matriz, compuesta por micrita (87%, incluye un porcentaje indeterminado de materia orgánica), extraclastos de grano fino (1%; cuarzo, feldespatos, moscovita), opacos (1%) y bioclastos (1%). La porosidad, relacionada principalmente con procesos de bioturbación por raíces, representa un 10 % del volumen de la roca (Aranz et al., 2004).

Aplicación de las medidas de infiltrómetro de disco en la caracterización de propiedades hídricas en rocas.

## Arenisca de Uncastillo

Mapa geológico donde se muestra la ubicación de la cantera

Foto de cantera



Fotografía 4: Fotografía tomada en la zona de recolección de muestras.

Mapa 3: Modificado a partir del esquema tectónico de la hoja de Uncastillo de la serie Magna 50.000 (serie N<sup>o</sup>2).

*Descripción de Visu:* La roca, de grano medio, es de color marrón amarillento medio (10YR 5/4), con porosidad abierta. No presenta discontinuidades ni tampoco fósiles (Aranz et al., 2004).

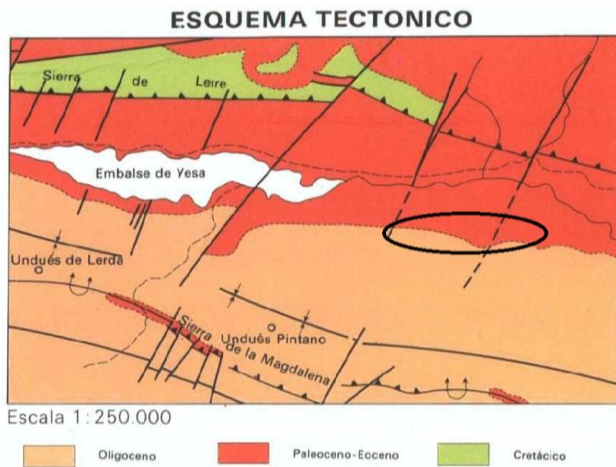
*Descripción al Microscopio:* Se trata de una arenita (Arenita lítica), con textura granosostenida, constituida por granos de cuarzo (20%), líticas (28% carbonatados –calcíticos y dolomíticos- y 22% metamórficos y otros), feldespatos (7%), con escasa matriz (1%), ocasionalmente ferruginizada. El cemento es calcítico (12%). La porosidad abierta, distribuida homogéneamente en la roca supone un 10% del volumen total de la roca (Aranz et al., 2004).

Aplicación de las medidas de infiltrómetro de disco en la caracterización de propiedades hídricas en rocas.

## Arenisca Azul Pirineo

Mapa geológico donde se muestra ubicación explotación.

Foto de cantera



Fotografía 5: Fotografía tomada en la zona de recolección de muestras.

Mapa 4: Modificado a partir del esquema tectónico de la hoja de Sigües de la serie Magna 50.000 (serie Nº2).

### *Descripción de Visu:*

Se trata de una arenisca (litoarenita) de tonalidad azulada en ocasiones con zonas marrones y tamaño de grano fino-medio uniforme, no presenta indicios de bioturbación discontinuidades o fósiles.

### *Descripción de Microscopio:*

Petrográficamente, corresponde a una roca arenítica, de grano fino (diámetro promedio 100 micras), en la que el cemento y parte de sus componentes son de composición calcítica. La textura es granosostenida y la roca carece de matriz.

Las partículas detríticas corresponden a cuarzo, mayoritariamente anguloso (31%) y fragmentos de roca (50,2%, silíceos, cuarcíticos/limolíticos, calcíticos y dolomíticos). El cemento (11,6%) es calcítico normal o ferroso y recrece a las partículas carbonatadas en continuidad cristalina. De modo adicional cabe destacar la presencia de opacos y partículas ferruginosas, así como de proporciones accesorias de turmalina y moscovita (Olnasa S.L.).

Para La Calcarenita de Santa Pudía y los Travertinos se han aprovechado envíos de cantera al profesor Gisbert, encontrándose la caracterización geológica de los Travertinos de Teruel en el capítulo 6 del libro de la piedra natural en Aragón, (Aranz et al., 2004).Pudiendo consultarse la caracterización de la Calcarenita de Santa Pudía en Rodríguez-Navarro (1994) y la del Tavertino de Albox (García del Cura et al., 2007).

## V Presentación y discusión de resultados

### V.I. Presentación de resultados

Los datos experimentales, se han obtenido utilizando 32 probetas distintas: 4 de Caliza Campanil, 8 de Arenisca de Uncastillo, 3 de Calcarenita de Santa Pudía, 4 de Piedra de Calatorao, 4 de Arenisca Azul Pirineo y 3 de cada travertino. Realizando medidas a tres presiones diferentes en cada una con el método del infiltrómetro más el método de succión convencional.

Se han expuesto los datos más representativos. Diferenciando entre muestras paralelas y perpendiculares a la estratificación cuando corresponda. Cuando se dan valores de probetas individuales se añadirá la signatura empleada para poder diferenciarlas.

Entre los diferentes materiales estudiados, hay algunos con valores de succión /permeabilidad muy bajos en los que no hay apenas infiltración. En estos casos no se han podido hacer cálculos con los datos de infiltración acumulada, por lo que más allá del análisis de su succión no se realizaran otros cálculos con los diferentes métodos descritos. Por ello, para la Piedra de Calatorao, la arenisca Azul Pirineo y los travertinos no se incluirán valores del coeficiente de absorción y la conductividad hidráulica.

En el anexo 3 se incluyen las gráficas de infiltración acumulada para cada material, observándose la diferencia de la succión en función del material y de las condiciones de presión aplicadas

### Resultados de succión convencional

Resultados del cálculo del coeficiente de absorción empleando el método de succión tradicional empleando la norma UNE – EN 1925. Resultados en tabla 1.

Roca	Promedio Valores coeficiente de succión	Desviación estándar	Coeficiente de Variación
Caliza Campanil Paralela	0.0353648 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.006995473	0.197808961
Caliza Campanil Perpendicular	0.0822625 mm/ s <sup>1/2</sup>		
Arenisca de Uncastillo Paralela	0.0451140 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.007868886	0.174422281
Arenisca de Uncastillo perpendicular	0.1196370 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.022801439	0.190588573
Calcarenita de Santa Pudía	0.4625395 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.087800926	0.189823637
Piedra de Calatorao	0.0009424 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.000168623	0.178923455
Arenisca Azul Pirineo	0.0047122 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.000937357	0.198923443
Travertino de Teruel	0.0012006 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.000225867	0.188123443
Travertino de Nogal Montoro	0.0100182 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.001955969	0.195242342
Travertino de Albox	0.0003486 mm/ s <sup>1/2</sup>	0.000061124	0.175356437

Tabla 1. Resultados de coeficiente de absorción según la norma UNE – EN 1925. Valor medio de todas las probetas de la misma roca Medidas en dirección paralela a la estratificación.



No se incluyen valores de desviación estándar y coeficiente de variación en la caliza campanil perpendicular al contar con una sola muestra válida.

### Resultados empleando el infiltrómetro.

Valores del coeficiente de absorción en probetas individuales, los números equivalen a la signatura, calculado por distintos métodos, medido en  $\text{mm s}^{-0.5}$ , es decir litros por metro cuadrado divididos por la raíz cuadrada del tiempo en segundos. Los valores de volumen y superficie se obtienen mediante los datos de infiltración acumulada y la superficie de la probeta. En la tabla dos están los resultados por probetas en función del tipo de cálculo y presión de infiltración.

Presión	Caliza Campanil							
	Método	Probetas				Calcarenita de Sta. Pudia		
		1	2	4	5	50		
Saturación	CI	X	X	X	X	0.651		
	Haverkamp	X	X	X	X	0.53		
	Latorre	0.02902	0.01693	0.04273	0.03735	0.4878		
Menos 2 cm	CI	X	X	X	X	0.233		
	Haverkamp	X	X	X	X	0.172		
	Latorre	0.0284	0.02076	0.02775	0.04363	0.07902		
Menos 4 cm	CI	X	X	X	X	0.176		
	Haverkamp	X	X	X	X	0.168		
	Latorre	0.01569	0.01569	0.03264	0.05203	0.04288		
Presión	Arenisca de Uncastillo							
	Método	Probetas						
		9	9.a	10	11	11.a	12	51
Saturación	CI	0.043	0.045	0.068	0.06	0.062	0.088	0.075
	Haverkamp	0.042	0.053	0.07	0.032	0.042	0.068	0.058
	Latorre	0.1234	0.0399	0.08012	0.09622	0.05692	0.08856	0.0612
Menos 2 cm	CI	X	0.018	0.034	0.034	X	X	0.021
	Haverkamp	X	0.015	X	X	X	X	0.014
	Latorre	X	0.02617	0.03709	0.01911	X	X	0.04872
Menos 4 cm	CI	0.024	X	0.026	X	X	0.056	0.009
	Haverkamp	0.007	X	0.028	X	X	0.134	0.01
	Latorre	0.03558	X	0.03099	0.01107	X	0.06672	0.07529

Tabla 2. Conjunto de resultados coeficiente de absorción con el infiltrómetro, en función de la presión aplicada a la infiltración método y roca por probetas individuales. Medido en  $\text{mm s}^{-0.5}$

## Resultados Conductividad hidráulica

Resultados del coeficiente de permeabilidad a saturación en la tabla 3, medidos en mm/s (litros por metro cuadrado y segundo)

Tabla 3 Comparaciones constantes de conductividad hidráulica con el infiltrómetro por diferentes métodos. Método de Darcy medido por el drenaje de la probeta y el de Latorre mediante cálculos de optimización numérica con los datos globales de infiltración acumulada recogidos por el infiltrómetro. Medido en mm/s

Probetas							
	Caliza Campanil				Calcarenita de Sta. Pudia		
Método	1	2	4	5	50		
Darcy	X	X	X	X	0.0083157		
Latorre	0.000030	0.0000032	0.00000320	0.00000320	0.0000034		
Probetas							
	Arenisca de Uncastillo						
Método	9	9.a	10	11	11.a	12	51
Darcy	0.002106	0.001643	0.00026342	0.00056265	0.0002531	0.00119875	0.00119875
Latorre	0.002089	0.001202	0.00000339	0.00000320	0.0000033	0.00000320	0.00000339

Los datos de la Tabla 3 son los resultados por probetas en los cuales ha sido posible calcular la conductividad hidráulica en condiciones de saturación, a presión atmosférica. En las probetas en las que ha habido drenaje, las que gotean por la parte inferior en la parte final de la infiltración, se calcula el coeficiente de permeabilidad según la ley de Darcy. El gradiente, es el gradiente de alturas piezométricas, se calcula dividiendo la diferencia de alturas por la longitud del recorrido. En este caso la diferencia de alturas es igual a la longitud de la probeta, por lo que el gradiente será 1. Dividiendo el caudal medido en l/s por la sección medida en m<sup>2</sup> obtenemos el coeficiente de permeabilidad medido en l/m<sup>2</sup> por segundo, mm/s. Con los datos de infiltración medidos por el infiltrómetro se realiza una gráfica mm/s siendo el coeficiente de permeabilidad la pendiente de la recta cuando la probeta gotea en la parte final.

La constante de permeabilidad obtenida mediante el análisis de los datos de infiltración mediante el método de Latorre se basa en cálculos complejos de optimización numérica explicados en Latorre et al. (2015). Los resultados para las dos probetas 9 son los únicos que se aproximan al valor obtenido por Darcy, son también los únicos para los que este método da un margen aceptable, siendo posible por tanto identificar valores válidos de los inválidos, en los otros casos los valores del coeficiente de permeabilidad son muy bajos.

## V.II. Análisis y comparación

### Análisis de los métodos de cálculo

*Cálculo de  $S$  por regresión lineal de los primeros valores de infiltración respecto a la raíz cuadrada del tiempo (CI):* En la aplicación a rocas vemos como este método sufre el inconveniente de que los datos recabados en los primeros tiempos de infiltración pueden ser algo irregulares, tardando algún tiempo en el comienzo de la infiltración o presentando un ritmo algo irregular al comienzo. Se profundiza en esta tendencia al realizar la infiltración a presiones negativas ya que el agua que infiltra tiene una trayectoria más compleja y más fuerzas que vencer. Por lo anterior, el cálculo de los valores de absorción por este método requiere de cierta habilidad para ser capaz de identificar el segmento exacto en el que calcular el coeficiente de absorción, por ello este método conlleva cierto margen de incertidumbre en el uso en rocas, especialmente con permeabilidades bajas. No sirve cuando se coloca una capa de arena inicial. No calcula conductividad hidráulica.

*Método de optimización numérica de la ecuación simplificada de Haverkamp et al. (1994):* Este método, que también se basa en los primeros datos experimentales, elimina el problema de la irregularidad en los primeros datos mediante el análisis en conjunto de los primeros datos experimentales, al compara este conjunto de datos con datos teóricos según la ecuación simplificada de Haverkamp. Este método, que también se basa en los primeros datos experimentales, sule el problema de la irregularidad en los primeros datos de infiltración, ya que compara el conjunto de los primeros datos experimentales ( $t$  a seleccionar, aunque primeros segundos), y la infiltración teórica según ecuación simplificada de Haverkamp.

Este método presenta, frente al anterior, la ventaja que ya no hay que seleccionar el momento exacto donde calcular el coeficiente  $S$ , aunque hay que seleccionar un intervalo de tiempo durante los primeros segundos de infiltración. Éste puede ponerse por norma general en los primeros 80 segundos de infiltración. Este método, que soluciona parte de incertidumbre del anterior método, realiza una aproximación a través de un conjunto de datos, lo que no lo hace mucho más preciso que el método anterior. Así pues, en el caso de experimentos con rocas en los que los primeros instantes de infiltración presentan cierta irregularidad, es preferible este método frente al primero. Sin embargo, en el caso que los tiempos de infiltración iniciales son lentos o irregulares, este método pierde validez, ya que si el comienzo de la infiltración no está claro, es difícil identificar el intervalo de tiempo en el que realizar los cálculos. Tampoco sirve cuando se coloca una capa de arena sobre la superficie de la roca, ya que no tiene en cuenta el efecto de la misma en la infiltración. No calcula conductividad hidráulica.

*Método de "differentiated linearization" DL, desarrollado en Vandervaere et al. (2000):* Aunque es considerado la mejor técnica para calcular la absorción y la conductividad hidráulica cuando es necesario colocar una capa de arena para facilitar la infiltración en superficies rugosas, los resultados en las rocas estudiadas no dan como gráficas lineales, por lo que resulta inviable hacer la regresión lineal. Este método por tanto no parece ser viable en rocas, como tampoco lo es en muchos suelos.

*Método de optimización numérica según Latorre et al. (2015):* Los resultados muestran que cuantos más datos de infiltración se disponga, mejor. Arroja resultados intermedios entre los demás tipos de cálculos, variando en función de la roca y de la presión aplicada a la infiltración, quizás más

centrados. En la conductividad hidráulica por lo general no da valores con la certidumbre necesaria, en estos casos da valores muy bajos, sin embargo en los casos en los que da el valor sin margen de error este coincide prácticamente con el calculado por Darcy.

### Comparación resultados tradicionales con técnica infiltrómetro.

Comparación de la media de resultados de coeficiente de absorción por tipo de roca a saturación con el promedio de los valores validos resultados en la tabla 4, medidos en  $\text{mm s}^{-0.5}$ .

Método	Campanil Pa	Campanil Per	UncastilloPa	Uncastillo Per	CalcarenitaPa
Convencional	0.035364793	0.08226252	0.045113995	0.11963697	0.46253948
Cl			0.052	0.07125	0.651
Haverkamp			0.055	0.05	0.53
Latorre	0.02956	0.03735	0.0555	0.081993333	0.4878

Tabla 4. Comparación resultados método convencional con distintas metodologías infiltrómetro. Resultados promedio coeficiente de absorción medidos en  $\text{mm s}^{-0.5}$  medidos a presión atmosférica.

Se ha realizado una comparación con los valores promedio para cada método de cálculo, diferenciando entre rocas paralelas y perpendiculares a la estratificación cuando ha sido posible, en la caliza campanil solo se ha podido utilizar un método de cálculo con el infiltrómetro al haberse empleado una capa de arena para facilitar la infiltración, descartando la estimación de los primeros valores y el método de Haverkamp. El método de Vandervaere no está incluido debido a que ha resultado imposible emplearlo. El resto de rocas presenta unos valores de succión /permeabilidad tan bajos y cercanos a 0 que no ha sido posible realizar un cálculo de sus coeficientes de absorción mediante la infiltración acumulada.

### Análisis y comparación de los materiales estudiados

#### *Piedra de Calatorao*

La Piedra de Calatorao, es una roca caliza con una muy baja permeabilidad. En el ensayo tradicional se observa la succión es muy pequeña, constituyendo el aumento de peso únicamente la absorción muy superficial de la superficie en contacto con el agua sin observarse una autentica penetración a lo largo de la probeta. Al utilizar el método del infiltrómetro se repiten esta situación al estar limitado el avance de la infiltración, aún a lo largo de un periodo de tiempo de más de 48h, a condiciones de saturación, como se muestra en la gráfica 4 en el anexo 3. Por todo ello la obtención de datos válidos sobre los que calcular sus parámetros hidráulicos no es posible. A pesar de lo expuesto anteriormente en condiciones de sobrepresión, aumentando la presión aplicada sobre el agua para vencer la resistencia del sistema poroso, la técnica del infiltrómetro sería viable para caracterizar el sistema poroso de la roca, mediante el análisis de la infiltración a distintas presiones positivas.

### *Arenisca Azul Pirineo*

La Arenisca Azul Pirineo presenta unas características similares a la Piedra de Calatorao, en tanto que es una roca muy impermeable. A diferencia de la anterior la Arenisca Azul Pirineo presenta unos valores algo más altos de absorción según el método de succión convencional y experimentalmente se observa como la penetración de la infiltración avanza algo por la probeta, a diferencia de la anterior roca, aunque sin llegar a impregnarla entera. Al recabar datos del avance de la infiltración mediante el infiltrómetro experimentalmente observamos un avance limitado lento e irregular, ver gráfica 5 en el anexo 3, con lo que ulteriores cálculos para hallar sus parámetros hídricos por las técnicas objeto de estudio no son necesarios.

### *Calcarenita de Santa Pudía*

La Calcarenita de Santa Pudía obtiene según los resultados experimentales los valores más altos de coeficiente de absorción y conductividad hidráulica, además de la mayor velocidad de infiltración, a excepción del Travertino de Nogal Montoro a saturación. Con el método de succión tradicional se observa una rápida absorción y penetración de la infiltración de modo que en los primeros 4 minutos ya se absorbido la mayor cantidad de agua. Con el infiltrómetro observamos como la infiltración comienza de forma inmediata y a buen ritmo observándose el paso de la infiltración por capilaridad del comienzo hasta el ritmo constante del drenaje por goteo cuando ya está saturada, cuando actúa según Darcy, de forma progresiva e ideal para la realización de los cálculos para obtener sus parámetros hídricos. Siendo la roca que mejor se ajusta al modelo ideal para el que los cálculos se han diseñado en edafología.

Poniendo tensión negativa en el infiltrómetro se observa cómo se reduce progresivamente el ritmo de la infiltración al restringirse el tamaño de poros por los que circula el agua, llegando a dificultar el drenaje de la probeta en algunas de las mediciones, como se observa en la gráfica 6 del anexo 3. Esto se repite en todas las rocas.

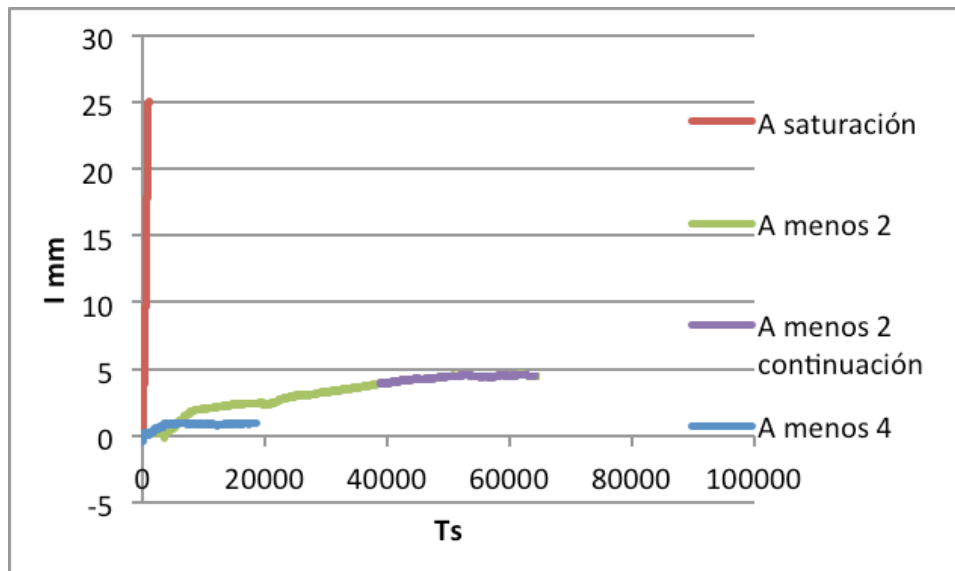
### *Travertinos*

El estudio de las características hídricas de los travertinos en general, requiere de un enfoque específico en tanto que su sistema poroso tiene mayor complejidad.

El método de succión convencional nos muestra unos resultados variados en función del tipo de travertino siendo el de Albox el más impermeable con unos valores inferiores a la Piedra de Calatorao, el de Teruel con valores algo inferiores a la Arenisca Azul Pirineo y el de Nogal Montoro con cierta capacidad de infiltración aunque limitada. En todo caso presentan valores muy baja permeabilidad y la penetración de la infiltración en el caso de Nogal Montoro (el único que la presenta apreciable) está condicionada por la presencia de macroporos.

Los travertinos en sus distintas variantes presenta la particularidad de tener dos sistemas porosos bien diferenciados. En la variedad del Travertino de Nogal Montoro nos encontramos con unos macroporos de gran diámetro que provocan a saturación que el agua del infiltrómetro baje por ellos por el mero efecto de la gravedad sin que medie capilaridad. En la gráfica 2 se han superpuesto las curvas de infiltración acumulada a diferentes presiones para una misma probeta. Se observa como a saturación el agua cae muy rápidamente por los macroporos y gotea enseguida, bajo observación directa se aprecia cómo ni siquiera se infiltra toda la roca. Regulando la presión en el

infiltrómetro con dos cm de columna de agua a superar, dos centímetros de presión negativa respecto a la atmosférica, progresa lentamente hasta estancamiento y a menos cuatro no infiltra, solo se aprecia una bajada del nivel de agua para empapar la superficie pero no va a más. Las otras variedades de travertinos si bien no cuentan con unos macroporos tan desarrollados sí que presentan la permeabilidad baja en el resto de poros siendo el caso más extremo el del travertino de Albox que no presenta infiltración a saturación. Se requiere profundizar en el estudio de sus sistemas porosos y ajustar la presión aplicada a un intervalo menor habiendo que estudiar cual aplicar para cada variedad, para poder calcular las constantes hidráulicas utilizando el método del infiltrómetro



Gráfica 2: Medidas con el infiltrómetro de una roca con sistema poroso complejo. Gráfica de infiltración acumulada a distintas presiones Travertino de Nogal Montoro. La curva a saturación representa la infiltración a través de los macroporos, la -2 y -4 a través de microporos progresivamente más pequeños. Menos 2 y menos 4 cm de altura de agua en el infiltrómetro, presión negativa respecto a la atmosférica.

### *Arenisca de Uncastillo*

La Arenisca de Uncastillo tiene unas características intermedias de permeabilidad entre la Calcarenita de Santa Pudia y la Caliza Campanil. Se observa una marcada diferencia entre las probetas perpendiculares y paralelas a la estratificación, las primeras con unos valores más altos de permeabilidad. En el método convencional para hallar el coeficiente de absorción se marcan más las diferencias entre perpendiculares y paralelas que en los cálculos con los valores del infiltrómetro. Esta roca presenta heterogeneidades en su composición, por ejemplo una lámina de arena en una probeta, esta heterogeneidad provoca que el sistema poroso sea más complejo y que haya cierta variedad entre una muestra y otra. En esta roca al analizar los datos medidos con el infiltrómetro se observa que en algunas probeta la infiltración progresa de forma irregular: tras el comienzo en lugar de progresar hasta que la infiltración sea constante en el momento del drenaje, puede darse un periodo de transición en el que la infiltración aumenta muy lentamente esto se interpreta como que se llega a un punto una vez la probeta esta en un estado avanzado de infiltración en el que la tensión superficial de los poros impide el drenaje y que esto cambia al ir llenándose poco a poco poros de menor tamaño hasta que la fuerza sea mayor que la resistencia y la probeta comience el drenaje. A

presiones negativas puede, al ser la fuerza menor, no se producirse el drenaje y produciéndose una situación de estancamiento al final. Este comportamiento puede utilizarse para medir el tamaño de la red de poros que actúa en cada momento. Gráficas de infiltración en el anexo 3.

### *Caliza Campanil*

La Caliza Campanil presenta experimentalmente los valores de permeabilidad más bajos de las rocas en las que se han calculado sus parámetros hídricos completos mediante los cálculos asociados a la técnica del infiltrómetro. Esta roca Caliza presenta una composición muy homogénea estando compuesta básicamente por calcita, además tenemos datos porosimétricos sobre esta roca (el 95% de sus poros son del orden de 0,5 micrones), por lo que su sistema poroso es muy regular y de pequeño tamaño, esto provoca que el ritmo de infiltración medido por el infiltrómetro sea lento pero regular. Para favorecer la infiltración en un material poco permeable se ha colocado una fina capa de arena en la parte superior de la probeta al hacer las mediciones, esta medida facilita el comienzo de la infiltración. Al haber puesto una capa de arena solo es posible utilizar el método de Latorre en esta roca. Los resultados que arroja el método son ligeramente más pequeños que en convencional, especialmente en la probeta perpendicular a la estratificación. Los valores de conductividad hidráulica no ha sido posible calcularlos. Las probetas no han llegado a drenar debido a la tensión superficial de los poros de tan pequeño tamaño que impiden el drenaje a saturación. Asimismo el método de Latorre no ha arrojado valores de conductividad hidráulica claros.

Haría falta aplicar presiones de agua más elevadas para conseguir el flujo por goteo y así medir la conductividad hidráulica. Gráficas de infiltración en el anexo 3.

## V.III. Discusión

Al regular la tensión del infiltrómetro, observamos diferencias de infiltración en todos los materiales en función de la presión utilizada, obteniéndose unos valores menores de velocidad de infiltración con tensiones más negativas. Se observa en el Travertino de Nogal Montoro, donde al disminuir la tensión, el diámetro de los poros por los que circula el agua se restringe (gráfica 2). Observamos como, a presión atmosférica, el agua cae de forma directa por los macroporos de la muestra a gran velocidad, mientras que al disminuir la tensión el agua no entra en éstos, restringiéndose el flujo de agua a aquellos poros con diámetros más pequeños, limitándose la infiltración. Esta limitación de la infiltración ocurre con todas las rocas, lo que nos permite concluir las bondades de este método para hallar información porosimétrica sobre los materiales. Sin embargo en aquellos materiales con bajas permeabilidades, la infiltración es casi nula a presión atmosférica, con lo que no se pueden apreciar estas diferencias. Esto ha sucedido en la Piedra de Calatoro y en la Arenisca de Azul Pirineo, gráficas de infiltración 4 y 5 en el anexo 3. Para que sea válido en estas rocas se precisaría modificar el infiltrómetro para aplicar sobrepresión, aumentando la presión para que las rocas goteen. Así podríamos ir modificando las presiones positivas e ir viendo las diferencias de presión/succión en estos materiales.

Los resultados de los coeficientes de absorción y permeabilidad en los materiales estudiados varían en función del método estudiado, aunque el orden de permeabilidades relativo se mantienen siempre entre los materiales, siendo capaces de identificar en todo momento los materiales más permeables de los menos permeables en todo el abanico de rangos estudiados. De los distintos métodos de cálculo del coeficiente de absorción con los datos de infiltración recogidos por el

infiltrómetro, el que más se aproxima a los valores obtenidos por el método de succión convencional es el método de Latorre. Este método también es el más complejo de los estudiados, ya que utiliza en los valores globales de infiltración y permite calcular, ambos coeficientes: la S con más precisión que la K. Los métodos de optimización numérica de ecuación simplificada de Haverkamp y el de "cumulative linearization" (CI) tienen mayor incertidumbre. Esto es debido a que utilizan solo las primeras medidas de infiltración para calcular el coeficiente de absorción, medidas que en ocasiones son irregulares hasta que comienza la infiltración constante. Estas incertidumbres son más notables en el método CI, en el que hay que seleccionar gráficamente el intervalo en el que realizar la medida. Aunque este último método es más simple, el de optimización numérica tiene menor incertidumbre, ya que realiza una optimización numérica del conjunto de primeros tiempos de infiltración seleccionados, limitando los efectos de mala selección del tiempo concreto del primero. Sin embargo, comparados con Latorre, estos dos métodos no son capaces de medir el coeficiente si se ha empleado una capa de arena, ya que sus mayores valores de permeabilidad inicial distorsionan el resultado, tampoco miden el coeficiente de permeabilidad cosa que el anterior método sí hace. El último método utilizado, de diferenciación lineal (DL), que serviría para calcular ambos coeficientes, no ha podido ser utilizado en ninguno de los materiales con lo que se concluye que no es apto para rocas.

El coeficiente de permeabilidad ha sido medido mediante el drenaje de las probetas utilizando la ley de Darcy y mediante los cálculos del método de Latorre. La permeabilidad es mayor en aquellos materiales cuya velocidad de infiltración ha sido más rápida. Al comparar los dos métodos se observa coincidencia solo en dos valores, debido a que solo en estas dos muestras el método de Latorre a dado valores satisfactorios del coeficiente de conductividad. Estos resultados pueden indicar una falta de precisión del método, así como su capacidad efectiva de poder calcular el coeficiente de permeabilidad de manera óptima, aunque de forma limitada.

Para los materiales estudiados se ha podido calcular sus características de succión/permeabilidad. Observando sus gráficas de infiltración acumulada a distintas presiones y siendo posible ordenarlos relativamente de mayor a menor permeabilidad. Su coeficiente de permeabilidad solo ha sido posible calcularse en Arenisca de Uncastillo y Calcarenita de Santa Pudia, y su coeficiente de absorción en sendas dos más la Caliza Campanil, utilizando el infiltrómetro. El método convencional se ha podido aplicar en todas las rocas utilizando. En las rocas de menor permeabilidad los resultados con los dos métodos son dudosos.

Las rocas ordenadas de mayor a menor permeabilidad son: la Calcarenita de Santa Pudia, Arenisca de Uncastillo, Caliza Campanil, Arenisca Azul Pirineo y Piedra de Calatorao. Los travertinos quedan fuera de esta clasificación debido a sus características particulares, varios sistemas porosos, que requieren de un enfoque específico.

Ventajas e inconvenientes del método del infiltrómetro. Las mejoras que nos aporta este método respecto a los ensayos convencionales de succión, permeabilidad y otros métodos de análisis del sistema porosimétrico, como el porosímetro de mercurio, es su capacidad para calcular todos estos parámetros utilizando un único instrumento y muestra, también nos permite tomar los datos de forma automatizada, ahorrándonos tiempo. Otra ventaja es que el aparato es portátil estando menos ligado a las instalaciones de un laboratorio.



Los inconvenientes radican en que son necesarios más estudios para poder establecer la ventaja de los estudios mediante este aparato respecto a otros métodos. Por lo que si bien el uso de este método trae consigo avances respecto a los anteriores, serán necesarios más estudios y modificaciones del el aparato para medir a sobre presión, aumentando la distancia entre el tubo principal y la base del disco poroso. Hacen falta más estudios sobre el método de cálculo de los coeficientes sobre la infiltración para los distintos tipos de rocas, introduciendo variables que nos permitan tener en cuenta de manera optima el efecto que el tipo de mineralogía textura y fabrica de los materiales efectúan sobre la infiltración.

En ensayos de restauración se utiliza mucho el tubo Karsten, que mide la infiltración a presión variable. Nuestro método puede sustituirlo ya que es igual de portátil y permite la medida a presión constante estandarizada.

## VI Conclusions

The Infiltrometer technique allows us to measure different parameters in a combined way using the accumulated infiltration dataset of each material. And regulating suction in different controlled conditions of a constant and selected at will pressure.

The results show us that it is possible to observe differences in suction depending on the employ of different pressures. We see how the pore size whereby the infiltrating water can circulate is restricted in function of the applied pressures, as demonstrated unequivocally in the case of the "Travertino de Nogal Montoro" For further studies we would have to make modifications in the device that would allow us to increase the range of pressures applied.

For calculating the absorption and permeability coefficients using the infiltrometer, several methods of calculation have been tested, being the results obtained by Latorre method the closest to the values obtained by the conventional suction test. In the less permeable materials, it is convenient to use a sand layer at the interface, for which the method Latorre also allow us to calculate the absorption and permeability coefficients .Comparison with Darcy indicates that is necessary improving the calculation method.

We have calculated these values in 3 of the studied rocks, the more permeables ones, albeit with a range of uncertainty. Therefore we conclude that the method of infiltrometer is potentially able to provide us with improvements as it is able to gather information of the suction in relation with the pressure, pore system, and suction and permeability coefficients, although in a limited way.

This allows us to say that the modifications to optimize the device are the adaptation of the apparatus in order to measure a in a wider range of positive or negative pressures. The calculations used for infiltration in soil should be reviewed for application in rocks. Taking into account the characteristics of mineralogy, texture and fabric of rocks.

## VII Bibliografía

AENOR (1999)

Arranz, E ., Buj, O., Franco, B., Gisbert, J. y Mateos, I. (2004): Capítulo 6 Características tecnológicas de las rocas de usos constructivos. En: la piedra natural en Aragón (Gobierno de Aragón

departamento de industria comercio y turismo, eds.). San Francisco S.L.E. de artes gráficas, Zaragoza, 155-272.

De rojas Tapia, B. J. y Martínez Díaz, C.(1973): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 175 (Sigües) y memoria. IGME, Madrid, 15 p.

García del Cura, M.A., La Iglesia, A., Benavente, D., Bernabéu, A. y González Martín, J.A. (2007): Mineralogía de los Travertinos Pleistocenos de Albox (Almería), Importante Recurso de Materia Prima de Rocas Ornamentales. En: XXVII Reunión de la Sociedad Española de Mineralogía. Macla, 7:89.

Godoy, A., Olivé, A., Moissenet, E. (1983): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 567 (Teruel) y memoria. IGME, Madrid, 70 p.

Haverkamp, R., Ross, P.J., Smettem, K.R.J., y Parlange, J.Y. (1994): Three-dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer 2. Physically based infiltration equation. *Water Resources Research*, 30: 2931-2935.

Latorre, B., Peña, C., Lassabatere, L., Angulo-Jaramillo, R. y Moret-Fernández, D.(2015): Estimate of soil hydraulic properties from disc infiltrometer three-dimensional infiltration curve. Numerical analysis and field application. *Journal of Hydrology*, 527: 1-12.

Lendínez González, A., Gozalo Gutiérrez, R., Ramajo Cordero, J., Robador Moreno, A., Cabra Gil, P. y Pérez García, A (2006): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 382 (Epila) y memoria. IGME, Madrid, 163 p.

Minasny, B., McBratney, A. B., (2000): Estimation of sorptivity from disc-permeameter measurements. *Geoderma*, 95:305–324.

Navarro, J.J., Hernandez, A., Ramirez, J.I., Arlegui, L., Liesa, C., Rodriguez, R. y Garcia, A. (1998): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 387 (Fraga) y memoria. IGME, Madrid, 60 p.

Olnasa, (en línea). Azul Pirineo. Olnasa S.L. (fecha de consulta: 26/03/2016). Disponible en: [http://www.olnasa.com/tipo\\_de\\_piedra\\_natural/azul-pirineo/4](http://www.olnasa.com/tipo_de_piedra_natural/azul-pirineo/4)

Rodríguez-Navarro, C. (1994): Causas y mecanismos de alteración de los materiales calcáreos de las catedrales de Granada y Jaén. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 404 p.

TeixellCacharo, A., - Montes Santiago, M.J., Arenas, C. y Garrido Schneider, E.A. (2009): Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 208 (Uncastillo) y memoria. IGME, Madrid, 46 p.

Vandervaere, J.P., Vauclin, M., y Elrick, D. E. (2000): Transient Flow from Tension Infiltrometers: I. The Two-Parameter Equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1263–1272.

Vandervaere, J.P., Vauclin, M., y Elrick, D. E. (2000): Transient Flow from Tension Infiltrometers:II. Four Methods to Determine Sorptivity and Conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64: 1272–1284.