

DETERMINACION DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA EN LADERAS MEDIANTE EL USO DE INFILTROMETROS DE MINIDISCO A LO LARGO DE UN GRADIENTE PLUVIOMÉTRICO MEDITERRÁNEO

J. D. Ruiz Sinoga, B. Lucas Santamaría, A. Romero Lopera, M. J. Noguera Robles, A. Gallegos Reina, J. Márquez Carrero y J. F. Martínez Murillo

Departamento de Geografía. Universidad de Málaga. sinoga@uma.es

RESUMEN. La presente investigación tiene dos objetivos, de una parte, mostrar la validez del método para la determinación de la conductividad hidráulica no saturada mediante el uso de infiltrómetros de minidisco, y de otra, analizar la variabilidad de tal propiedad, a partir de datos obtenidos con los mismos, en 3 laderas de similares características a lo largo de un gradiente pluviométrico en el mediterráneo, que oscila entre los 300 y los 600 mm de precipitación media anual. Las pruebas fueron realizadas a lo largo de cada una de las laderas, sobre un sistema de retículas común; en el laboratorio analizamos las propiedades físicas de los suelos. A los datos de infiltración obtenidos, aplicamos la ecuación de Zhang con el fin de obtener la tasa de conductividad hidráulica. Los resultados obtenidos muestran la validez del método por su comodidad de uso, pero destacan la influencia directa que los valores texturales del suelo ejercen en la ecuación de Zhang, por lo que se propone el uso de la ecuación de Wooding como método alternativo, o su aplicación en zonas donde las diferencias texturales no sean marcadas.

ABSTRACT. This study has two objectives of análisis, one of them is about the validity of method used for measurig the unsaturated hydraulic conductivity with a minidisk infiltrometer, the other is to see the variation of results obtained along the Mediterranean precipitation gradient. These slopes have similar characteristics that oscillate between 600 and 300 mm of anual precipitation. The tests were made along each one of the slopes using a common griding system; the soils physical properties were analysed in the laboratory. The Zhang's equation was appied to infiltration data in order to obtain the hydraulic conductivity rate. The results show that the method is valid and easy to use, but the physical properties have a direct influence in Zhang's equation, there for we propose to use Wooding's equation as an alternative method, or apply in areas with similar textural characteristics.

1. Introducción

Las referencias bibliográficas sobre conductividad hidráulica no saturada proponen entre otros, el uso de infiltrómetros de tensión o permeámetros de disco, métodos costosos que requieren de mucho tiempo para la obtención de datos de infiltración. El objetivo de este trabajo es mostrar un método alternativo, sencillo y rápido en su uso: el infiltrómetro de minidisco.

Su utilización, no está exenta de una serie de inconvenientes, aunque consideramos más interesantes las ventajas derivadas de su aplicación.

Para la determinación de la validez del método, hemos incidido en dos cuestiones, una, la aceptación de los datos estimados mediante los experimentos realizados, y otra, la comparación de los mismos en el marco de una hipótesis. En este caso, la variabilidad de la conductividad hidráulica no saturada de suelos intraladera y a lo largo de un gradiente pluviométrico de semiárido a mediterráneo.

2. Determinación de la Conductividad Hidráulica No Saturada mediante infiltrómetros de minidisco

2.1. Métodos afines

La determinación de la conductividad hidráulica no saturada (knosat) se ha analizado y explicado desde diversos métodos. Algunos autores proponen medir la conductividad a partir de la ecuación de Kozeny, en otros casos utilizan un método basado en el uso de la curva de retención de agua para medir la distribución del tamaño de los poros (Kutílek, M. 1994).

Otros autores proponen la estimación de la knosat con el permeámetro de disco, mediante la aplicación de agua con potenciales de presión inferiores a cero. Así se puede controlar el flujo de los macroporos. Cuanto mas negativo es el potencial del agua, menor es el diámetro de los poros que están implicados en el flujo desde la superficie (Perroux, White 1988).

El permeámetro de disco pone en contacto el agua de un depósito cilíndrico hermético con el suelo, por mediación de una membrana porosa de presión de entrada de aire

superior al potencial de presión ejercido. Dicho potencial es controlado mediante un cilindro de “burbujeo” conectado al depósito. El permeámetro se fija al suelo con un anillo metálico, al que se acopla herméticamente, a fin de crear la tensión entre el suelo y el agua del depósito (Martínez J, 1996).

El infiltrómetro de tensión tiene un funcionamiento similar al anterior, solo que el coeficiente de infiltración se calcula mediante las variaciones de altura del agua en una columna Mariotte. Se usa normalmente para la estimación de la conductividad hidráulica no saturada y el estudio de la macroporosidad (Watson, Luxmoore, 1986).

Los principios físicos de los dos métodos son muy similares, difieren en el diseño y sobre todo en la metodología empleada para el cálculo de la conductividad hidráulica.

Ambos métodos, comúnmente utilizados dentro del ámbito de los estudios de hidrología de formaciones superficiales, con una adecuada calibración del instrumental, ofrecen resultados satisfactorios, sin embargo, y especialmente en ámbitos de fuerte pendiente, dependiendo del factor “preparación del terreno”, pueden generar una amplia variabilidad en los resultados finales obtenidos.

2.2. Método propuesto

En nuestro caso presentamos los resultados de infiltración acumulada obtenidos mediante el uso de infiltrómetros de minidisco que, contabilizada en base al tiempo, nos permite estimar la *knosat* del suelo, mediante el método propuesto por Zhang (1997), ajustado a la siguiente función:

$$I = C_1 t + C_2 \sqrt{t} \quad (1)$$

Conocidos los valores de infiltración, la *knosat* se calcula a partir de:

$$K = \frac{C_1}{A} \quad (2)$$

obteniéndose el parámetro A de:

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)e^{[2.92(n-1.9)\alpha h_0]}}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n \geq 1.9 \quad (3)$$

$$A = \frac{11.65(n^{0.1} - 1)e^{[7.5(n-1.9)\alpha h_0]}}{(\alpha r_0)^{0.91}} \quad n < 1.9 \quad (4)$$

Donde *n* y α son los parámetros de Van Genuchten para el suelo, r_0 es el radio del disco, y h_0 es la succión en la superficie del disco.

El infiltrómetro de minidisco consiste en un tubo de ensayo graduado, de unos 20 cm de longitud y 2 cm de diámetro. La parte inferior del tubo lleva adherido un disco de cerámica porosa, mientras que el extremo superior del tubo queda abierto, a fin de poder llenarse de agua

destilada. En la base del tubo, justo por encima del disco poroso, hay un pequeño capilar insertado en la pared lateral. Para su utilización, se llena el tubo de agua hasta una altura determinada, tapándose herméticamente por la parte superior mediante un tapón de goma, y se coloca verticalmente (90°) sobre la superficie del suelo. Previamente deben eliminarse las irregularidades existentes en el terreno, al objeto de conseguir un buen contacto hidráulico entre el infiltrómetro y el suelo; para facilitar el buen contacto se extiende una fina capa de arena calibrada en una superficie de suelo igual al diámetro del infiltrómetro. Algunos autores recomiendan utilizar arena húmeda para evitar el llenado de los macroporos que se encuentran abiertos en la superficie del suelo (A. Joel and I. Messing .2000).

Una vez que se produce un buen contacto hidráulico, el agua del tubo ira infiltrándose en el suelo, a una tensión igual a la que produce el capilar (-0.5, -2.0 o -6.0 cm de columna de agua). La función del pequeño poro lateral es crear una succión constante sobre la superficie de contacto entre el disco y el suelo. En el caso del infiltrómetro de -0.5 de succión, el diámetro del capilar es mayor y se crea una menor succión; al ser el capilar mas grueso, la fuerza vertical creada por la cohesión y la tensión superficial es menor. En el infiltrómetro de -6.0 cm de succión, al ser el capilar mas delgado, la fuerza vertical es mayor.

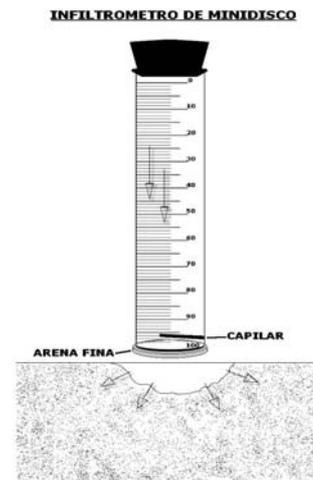


Fig. 1. Infiltrómetro de minidisco.

En el supuesto de considerar al suelo como un conjunto interconectado de tubos capilares de diferente diámetro, cuando el agua del infiltrómetro empieza a circular sólo se llenaran los poros que provoquen una tensión superior a la succión creada por el infiltrómetro sobre la superficie de contacto. Aunque aceptamos que la comunidad científica establece que la macroporosidad es aquella porosidad del suelo que retiene agua a potenciales inferiores a -15 cm (Ankeny et al., 1990), aceptamos igualmente lo establecido en la metodología del infiltrómetro de minidisco, que deja el nivel en -6 cm, dado que se encuentra dentro del rango y, el aparato en cuestión, tiene solamente en cuenta tal porosidad. Por debajo de tales valores de potencial quedan la mesoporosidad y microporosidad. Con los infiltrómetros

de -0.5 y -2.0 cm de succión, el agua circulara por un mayor número de poros, y por lo tanto la knosat que mediremos será mayor que con el infiltrómetro de -6.0 cm.

2.3. Ventajas e inconvenientes

Aunque el permeámetro de disco es el método más utilizado por la comunidad científica para determinar la knosat, proponemos utilizar como método alternativo los infiltrómetros de minidisco, concretando las ventajas e inconvenientes que pueden derivarse de su uso.

Entre las ventajas, caben destacar:

- Nos permiten realizar un gran número de mediciones y en menor tiempo, dado que alcanza la tasa de infiltración estable de una forma mas rápida.
- Son de fácil manejo.
- No necesitan calibrar la tensión.
- Se pueden transportar fácilmente por su pequeño tamaño.
- No necesitan mucha superficie que allanar en el campo porque el diámetro del cilindro es pequeño; ventaja muy importante en zonas de laderas o donde la pendiente es elevada.

Pero debemos tener en cuenta una serie de inconvenientes:

- Existencia de flujo superficial en algunos casos, provocando un supuesto aumento exagerado de la infiltración, cuando el contacto hidráulico con el suelo no es bueno.
- Al ser la base del infiltrómetro bastante pequeña, en comparación con el permeámetro de disco, obtenemos una excesiva concreción de la knosat en ese punto determinado, lo que puede dificultar criterios de generalización (siendo mayor cuanto mayor sea la base). Dicha circunstancia, puede ser paliada mediante la realización de varios experimentos en sitios próximos.
- Este método acepta los parámetros texturales de Van Genuchten para el suelo, por ello es necesario haber analizado la textura previamente, para después ajustarla a las 12 clases que establece, lo que aporta a esta variable un excesivo protagonismo. Como ejemplo de la variabilidad que en función de estos parámetros puede darse, aplicamos para una misma infiltración diferentes parámetros en función de la textura del suelo, siendo: con una infiltración acumulada, en cuatro minutos, de 12, 7 y 3 cm, respectivamente, para cada una de las tensiones aplicadas de menor a mayor, obtenemos una conductividad en textura franco-arenosa de 4.1, 1.7 y 0.5 cm/h, diferente a la que obtenemos, para la misma infiltración, si la textura fuese franco-arcillosa, con valores de conductividad de 2.9, 1.3 y 0.6 cm/h.
- Alteración del suelo durante el emplazamiento, aunque indudablemente, esta es inferior que en otros métodos.

Comparando las ventajas e inconvenientes, hemos de decir que tiene gran peso en la elección del método propuesto la comodidad de su uso; a ello, añadir que algunos de los inconvenientes citados minimizan su importancia en comparación con el permeámetro de disco.

Tanto en un método como en otro es necesaria la colocación de una superficie de arena fina calibrada para facilitar un buen contacto hidráulico desde el infiltrómetro al suelo. Por este motivo, en ambos métodos dudamos de los primeros datos obtenidos, puesto que, al contacto del infiltrómetro con la arena, los datos reales pueden verse modificados hasta la saturación de la misma.

3. Material y métodos

Para validar el método propuesto, hemos llevado a cabo una investigación en tres laderas situadas en las Cordilleras Béticas litorales dentro de un gradiente pluviométrico de mediterráneo a semiárido. En cada ladera establecimos un sistema de retícula doble, llevando a cabo los experimentos en los vértices de las mismas (ver Fig 3.)

3.1. Localización

Todas las laderas seleccionadas responden a una misma orientación sur, se encuentran en abandono y poseen una litología similar de tipo metamórfica, aunque varían, por su localización, dentro del gradiente en cuanto a características climáticas, lo cual se traduce en diferencias destacadas entre laderas en función de la densidad y tipo de vegetación predominante.

Las laderas de estudio seleccionadas se localizan cercanas al litoral mediterráneo, desde la provincia de Málaga hasta la de Almería. El rango de precipitación oscila entre los 600 y los 300 mm de media anual.



Fig. 2. Localización de la zona de estudio.

La primera de las laderas elegidas se localiza en la provincia de Málaga, enmarcada dentro de la unidad de los Montes de Málaga, en el sur de la Península Ibérica, formando parte de las Cordilleras Béticas. Se sitúa concretamente en la cabecera de la cuenca del arroyo del

Antón (afluente de la margen izquierda del río Guadalhorce), y a unos 4 km. al Oeste de la localidad malagueña de Almogía.

La morfología que caracteriza a esta ladera es de topografía muy compartimentada, con pendiente elevada hacia el fondo de los valles y formas más alomadas hacia las cimas. La litología es de tipo metamórfica; concretamente filitas carboníferas, pertenecientes al Complejo Maláguide.

En cuanto a las características climáticas, la ladera presenta un clima de tipo mediterráneo, caracterizado por la irregularidad de las precipitaciones y la suavidad de las temperaturas. La precipitación de la zona está en torno a los 600 mm de mediana. (511,1 mm de media según la estación pluviométrica de Almogía, para un periodo de registro de 48 años.)

El uso del suelo de la ladera y del entorno próximo a ella es de matorral y bosque abierto mediterráneo en rodales, de alcornoques y encinas.

En la provincia de Granada se localiza la segunda ladera, concretamente en el término municipal de Albuñol. Esta ladera forma parte de la Alpujarra Baja granadina y se encuentra en la vertiente sur de la Sierra de Contraviesa, a unos 3 km. aproximadamente de la costa mediterránea.

La litología predominante en la zona es, igualmente, de tipo metamórfico (filitas).

El clima se puede clasificar como Subtropical templado, con una temperatura media anual de 18,3°C y 500 mm de precipitación aproximadamente.

El uso del suelo predominante en el entorno, es el agrícola siendo el almendro el cultivo principal. Sin embargo, la ladera seleccionada en cuestión se halla actualmente abandonada, aunque los indicios nos hacen pensar que no desde hace mucho tiempo, pues quedan aún en ella cultivos leñosos abandonados colonizados por vegetación arbustiva.

La última de las laderas seleccionadas se localiza en la provincia de Almería, ubicada en el municipio de Berja, concretamente en el Campo de Dalías a 52 km de la capital.

El área de estudio pertenece a la unidad natural de la Sierra de Gádor, formando parte de la Alpujarra almeriense.

La litología del entorno está constituida principalmente por rocas pertenecientes a los mantos alpujarrides dentro de la zona Bética, con dominio de los micaesquistos y filitas.

El clima que caracteriza al entorno de la ladera presenta condiciones de aridez marcadas por un régimen pluviométrico bajo, en torno a los 350 mm anuales, elevadas temperaturas y altos índices de insolación.

El uso del suelo predominante de la ladera es, en general, el matorral de bajo porte.

3.2. Puntos de muestreo

El sistema de retícula varía en cada ladera dependiendo de la longitud de la misma. En todos los casos la retícula es de 9 x 2,5 m, lo que nos permite realizar experimentos cada nueve metros, así como replicas a 2,5 m a izquierda y derecha de los anteriores. En cada uno de los vértices de la retícula realizamos tres experimentos con los infiltrómetros

de minidisco y a tres tensiones, -0.5, -2.0 y a -6.0, todos ellos en el mismo lugar, sustituyendo los infiltrómetros en función de la succión de los mismos, siempre de mayor (6.0 cm) a menor succión (0.5 cm). El total de puntos de muestreo para cada ladera ha sido de 9 puntos longitudinalmente (27 en total) en Almogía, 8 en Albuñol (24 en total) y en Berja 6 (18 en total).

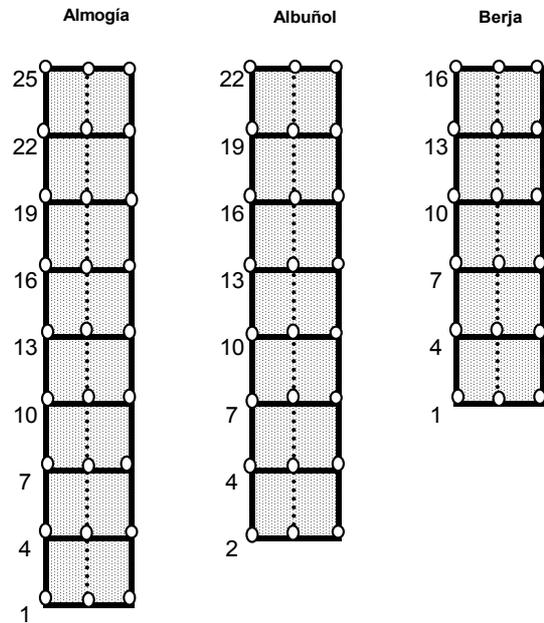


Fig. 3. Esquema de muestreo de cada una de las laderas.

Colocados los infiltrómetros en cada punto de muestreo, medimos la infiltración en el suelo por unidad de tiempo, siendo la duración del experimento variable, dependiendo del momento en el que se alcanza la tasa de infiltración estable, pero en ningún caso superior a cuatro minutos.

En el tratamiento de los datos de campo ajustamos la infiltración del primer minuto, por considerar que es irregular y en ocasiones exagerada debido a la absorción de la arena fina que usamos de base, variable en su contenido de humedad, o a la colocación inicial del infiltrómetro en contacto con el suelo. Por otro lado, hemos de tener en cuenta que las condiciones iniciales del suelo al que sometemos al experimento son variables en cada una de las laderas de estudio y están condicionadas por la época del año en que fueron realizados; en concreto, en el mes de Diciembre presentando el suelo un porcentaje de humedad variable ajustado al gradiente, que oscila entre 8,8 % de humedad media en Almogía y el 4,4 % en Berja; siendo la humedad media del suelo en Albuñol del 6%. Relacionando el porcentaje de humedad y el potencial matricial de cada ladera obtenemos que el punto de marchitez y el de capacidad de campo son muy similares en Berja y Albuñol, pero en Almogía ambos puntos están por encima, lo que hace que, aún siendo mayor la capacidad de retención en Almogía, el agua útil sea superior en Albuñol (los valores de humedad han sido obtenidos, mediante la toma de datos en el campo, con el uso del TDR Tektronic; el potencial matricial, en el laboratorio, mediante las

bandejas de pF Eijkelkamp y la placa de Richard, que nos relacionan la humedad que retiene cada ladera a los distintos pF a los que sometemos las muestras de suelo.)

Por otro lado, a lo largo de la parcela experimental se tomaron muestras de suelo que después fueron analizadas en laboratorio para determinar una serie de propiedades físicas tal como la textura, porosidad, gravas, estabilidad estructural y materia orgánica, que consideramos ejercen un papel fundamental en la knosat.

Tabla 1. Propiedades físicas (%): ladera Almogía

| Parcelas | Arenas | Limos | Arcillas | Gravas | Porosidad | E.E | M.O |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|------|-----|
| 1 | 50.1 | 30.7 | 19.2 | 62.1 | 50 | 74.8 | 3.0 |
| 4 | 51.3 | 22.4 | 26.3 | 57.9 | 54 | 76.4 | 2.1 |
| 7 | 48.6 | 24.1 | 27.4 | 60.8 | 48 | 73.0 | 2.2 |
| 10 | 41.5 | 26.0 | 32.5 | 72.7 | 50 | 76.2 | 1.7 |
| 13 | 59.8 | 18.0 | 22.2 | 56.8 | 49 | 77.6 | 1.7 |
| 16 | 45.4 | 28.5 | 26.1 | 63.3 | 44 | 76.3 | 2.6 |
| 19 | 55.6 | 22.4 | 22.0 | 67.0 | 53 | 74.5 | 3.0 |
| 22 | 28.2 | 40.1 | 31.6 | 68.7 | 45 | 84.6 | 2.6 |
| 25 | 59.2 | 6.5 | 34.3 | 66.0 | 55 | 72.3 | 3.3 |
| Media | 48.9 | 24.3 | 26.8 | 63.9 | 50 | 76.2 | 2.5 |

E.E.: Estabilidad Estructural; M.O.: Materia Orgánica

Tabla 2. Propiedades físicas (%): ladera Albuñol

| Parcelas | Arenas | Limos | Arcillas | Gravas | Porosidad | E.E | M.O |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|------|-----|
| 2 | 71.0 | 17.5 | 11.5 | 43.2 | 45 | 13.0 | 1.0 |
| 5 | 66.5 | 21.5 | 12.0 | 53.9 | 40 | 14.9 | 1.0 |
| 7 | 77.0 | 15.2 | 7.9 | 52.9 | 42 | 2.1 | 0.7 |
| 10 | 70.7 | 18.5 | 10.9 | 50.9 | 41 | 24.5 | 1.0 |
| 13 | 78.2 | 9.5 | 12.3 | 41.7 | 40 | 4.2 | 0.8 |
| 16 | 67.5 | 21.4 | 11.2 | 45.6 | 43 | 5.5 | 1.7 |
| 19 | 76.9 | 13.0 | 10.1 | 56.6 | 45 | 4.3 | 0.6 |
| 22 | 54.6 | 44.8 | 0.6 | 37.3 | 54 | 70.4 | 4.5 |
| Media | 70.3 | 20.2 | 9.6 | 47.7 | 44 | 17.4 | 1.4 |

E.E.: Estabilidad Estructural; M.O.: Materia Orgánica

Tabla 3. Propiedades físicas (%): ladera Berja

| Parcelas | Arenas | Limos | Arcillas | Gravas | Porosidad | E.E | M.O |
|----------|--------|-------|----------|--------|-----------|------|-----|
| 1 | 60.4 | 23.2 | 16.4 | 17.4 | 55 | 52.6 | 2.4 |
| 4 | 56.3 | 27.2 | 16.5 | 49.0 | 29 | 31.2 | 0.7 |
| 7 | 51.4 | 28.7 | 19.9 | 58.7 | 38 | 44.8 | 1.0 |
| 10 | 59.3 | 24.3 | 16.4 | 61.0 | 49 | 3.3 | 1.2 |
| 13 | 60.7 | 22.5 | 16.9 | 52.1 | 42 | 2.3 | 0.8 |
| 16 | 71.6 | 16.0 | 12.4 | 50.4 | 35 | 11.2 | 0.4 |
| Media | 60.0 | 23.7 | 16.4 | 48.1 | 41 | 24.2 | 1.1 |

E.E.: Estabilidad Estructural; M.O.: Materia Orgánica

Al comparar las propiedades físicas entre laderas, destacamos que la textura de Almogía es franco-arcillosa, a diferencia de Albuñol y Berja que responden a textura franco-arenosa; el porcentaje de gravas, la porosidad, la estabilidad estructural y la materia orgánica son superiores

en Almogía, siendo similares los valores obtenidos en las laderas de Albuñol y Berja.

4. Resultados y discusión

4.1. Determinación de la knosat entre laderas

La tabla 4 presenta los valores medios de infiltración, obtenidos a partir de las pruebas de campo, y los valores de conductividad que, en base a éstos, calculamos mediante la aplicación del método propuesto por Zhang, por laderas, parcelas y tensión.

La tasa media de infiltración por tensión muestra que a tensión -0.5 los valores son superiores en la ladera de Almogía, sin embargo, a tensiones mayores son superiores en la ladera de Berja, siendo similares en Almogía y Albuñol. En general, teniendo en cuenta que la diferencia de infiltración a tensión -0.5 es mínima entre las laderas de Almogía y Berja, y que esta última es la que presenta mayores tasas en las demás tensiones, podemos decir que es Berja la ladera con mayor tasa de infiltración. A pesar de ello, los valores máximos y mínimos absolutos los encontramos en la ladera de Almogía.

Los datos de infiltración nos permiten calcular la knosat (Zhang). Observando los valores medios obtenidos (tabla 4) hemos de comentar que a menor tensión es la ladera de Almogía la que mayor tasa presenta, siendo la diferencia respecto al resto de laderas mayor que la existente en datos de infiltración. A tensiones mayores estas diferencias se atenúan, haciéndose similares los resultados obtenidos en las tres laderas, ligeramente inferiores en Albuñol. Al igual que en infiltración, los valores máximos y mínimos absolutos de knosat aparecen en la ladera de Almogía.

Comparando la infiltración y la knosat entre laderas (tabla 4) destacar que el comportamiento no es el mismo; atendiendo a los datos de infiltración es la ladera de Berja la que presenta mayores tasas, sin embargo en datos de conductividad es la ladera de Almogía la que le resta protagonismo, igualando las diferencias existentes entre Berja y Albuñol.

En realidad, el comportamiento hidráulico del suelo es diferente en relación a la tensión a la que se aplique la carga hidráulica. A la menor tensión, (-0,5), es la ladera de Almogía la que presenta una mayor Knosat -6,1 cm/h-, siendo esta muy similar en Albuñol y Berja, -3,4 y 3,5 cm/h respectivamente-, es decir, cuando el agua circula a través de macroporos.

A tensión media, (-2), los resultados son muy similares, aunque la Knosat se incrementa ligeramente con la aridez. Así, Berja tiene una Knosat de 1,84 cm/h, Albuñol de 1,65 cm/h, y Almogía de 1,52 cm/h. A tensión mas alta (-6), mientras Almogía y Berja poseen una Knosat muy similar (0,80 y 0,81 cm/h, respectivamente), en Albuñol es de 0,47 cm/h. Es decir, dependiendo del tipo de tensión que apliquemos, la Knosat posee una extraordinaria variabilidad entre las laderas seleccionadas

Tabla 4. Infiltración (desde minuto uno) y knosat (Zhang). Se exponen también la media, desviación estándar y el coeficiente de variación por ladera.

| | <i>Infiltración desde minuto 1 (cm/min)</i> | | | | | | | | | <i>Knosat (Zhang) cm/h</i> | | | | | | | | | |
|----------|---|------|------|--------|------|------|-----------|------|------|----------------------------|-------|-------|--------|-------|------|-----------|-------|------|-------|
| | Derecha | | | Centro | | | Izquierda | | | Derecha | | | Centro | | | Izquierda | | | |
| Parcelas | 0,5 | -2 | -6 | 0,5 | -2 | -6 | 0,5 | -2 | -6 | 0,5 | -2 | -6 | 0,5 | -2 | -6 | 0,5 | -2 | -6 | |
| Almogía | 1 | 5,71 | 1,84 | 0,27 | 1,63 | 0,98 | 0,37 | 4,49 | 1,33 | 0,15 | 5,98 | 1,26 | 0,44 | 1,22 | 1,20 | 0,18 | 4,02 | 1,20 | 0,26 |
| | 4 | 9,59 | 2,76 | 0,97 | 5,31 | 1,35 | 0,49 | 6,02 | 0,73 | 0,32 | 15,03 | 2,89 | 3,32 | 10,80 | 2,70 | 1,94 | 12,11 | 1,52 | 0,45 |
| | 7 | 7,35 | 4,69 | 0,50 | 1,54 | 0,86 | 0,45 | 1,67 | 0,90 | 0,12 | 15,86 | 10,29 | 1,94 | 3,21 | 0,51 | 0,11 | 3,31 | 1,41 | 0,08 |
| | 10 | 5,61 | 1,51 | 0,38 | 2,86 | 1,09 | 0,31 | 5,82 | 1,82 | 0,27 | 5,76 | 1,44 | 0,27 | 2,94 | 0,86 | 0,42 | 5,52 | 1,22 | 0,38 |
| | 13 | 2,24 | 0,41 | 0,20 | 1,27 | 0,75 | 0,27 | 1,84 | 0,90 | 0,37 | 4,48 | 1,03 | 0,22 | 2,34 | 1,80 | 1,38 | 3,60 | 1,67 | 0,55 |
| | 16 | 3,37 | 1,00 | 0,48 | 3,20 | 1,38 | 0,16 | 6,63 | 1,23 | 0,23 | 6,32 | 1,38 | 0,91 | 6,18 | 1,99 | 0,80 | 13,23 | 2,35 | 2,31 |
| | 19 | 7,43 | 0,71 | 0,04 | 1,22 | 0,59 | 0,00 | 2,24 | 1,06 | 1,12 | 15,66 | 0,51 | 0,22 | 2,34 | 0,03 | 0,02 | 4,67 | 0,51 | 0,14 |
| | 22 | 3,27 | 0,96 | 0,27 | 4,42 | 0,80 | 0,28 | 3,88 | 0,99 | 0,29 | 2,99 | 0,66 | 0,38 | 4,60 | 0,58 | 0,38 | 3,87 | 0,47 | 0,37 |
| | 25 | 2,45 | 0,64 | 0,04 | 1,47 | 0,82 | 0,04 | 2,04 | 1,09 | 0,64 | 4,48 | 0,64 | 0,22 | 2,14 | 1,03 | 0,22 | 3,21 | 2,22 | 1,54 |
| | Media | 5,22 | 1,61 | 0,35 | 2,55 | 0,96 | 0,26 | 3,85 | 1,12 | 0,39 | 8,51 | 2,23 | 0,88 | 3,97 | 1,19 | 0,61 | 5,95 | 1,40 | 0,68 |
| | Desv.Est | 2,57 | 1,36 | 0,28 | 1,50 | 0,27 | 0,17 | 1,98 | 0,32 | 0,31 | 5,35 | 3,10 | 1,07 | 2,95 | 0,84 | 0,65 | 3,89 | 0,65 | 0,75 |
| | cv (%) | 49,1 | 84,5 | 80,3 | 59,0 | 28,3 | 63,8 | 51,5 | 28,5 | 80,0 | 62,9 | 138,8 | 122,0 | 74,4 | 70,5 | 107,7 | 65,3 | 46,6 | 110,6 |
| | Máximo | 9,59 | 4,69 | 0,97 | 5,31 | 1,38 | 0,49 | 6,63 | 1,82 | 1,12 | 15,86 | 10,29 | 3,32 | 10,80 | 2,70 | 1,94 | 13,23 | 2,35 | 2,31 |
| Mínimo | 2,24 | 0,41 | 0,04 | 1,22 | 0,59 | 0,00 | 1,67 | 0,73 | 0,12 | 2,99 | 0,51 | 0,22 | 1,22 | 0,03 | 0,02 | 3,21 | 0,47 | 0,08 | |
| Albuñol | 2 | 2,24 | 0,94 | 0,46 | 2,52 | 0,64 | 0,28 | 2,24 | 1,84 | 0,77 | 3,12 | 0,83 | 0,35 | 4,01 | 0,83 | 0,35 | 2,78 | 2,56 | 0,78 |
| | 5 | 3,57 | 1,47 | 0,47 | 2,24 | 1,40 | 0,47 | 2,45 | 1,48 | 0,41 | 5,30 | 2,04 | 0,60 | 3,06 | 2,04 | 0,60 | 3,40 | 1,83 | 0,32 |
| | 7 | 3,10 | 1,32 | 0,57 | 2,24 | 1,28 | 0,39 | 3,03 | 1,48 | 0,42 | 4,55 | 1,83 | 0,60 | 3,12 | 1,83 | 0,49 | 4,62 | 1,35 | 0,35 |
| | 10 | 3,06 | 0,41 | 0,27 | 2,65 | 1,84 | 0,28 | 1,63 | 1,23 | 0,45 | 4,82 | 0,55 | 0,35 | 4,14 | 2,56 | 0,35 | 2,24 | 1,87 | 0,35 |
| | 13 | 1,19 | 0,64 | 0,39 | 3,88 | 2,24 | 1,11 | 2,24 | 1,26 | 0,45 | 1,36 | 0,55 | 0,46 | 5,47 | 3,25 | 1,48 | 3,12 | 1,66 | 0,53 |
| | 16 | 2,45 | 1,22 | 0,50 | 2,24 | 0,98 | 0,58 | 3,88 | 3,06 | 0,77 | 3,37 | 1,49 | 0,32 | 3,22 | 1,24 | 0,36 | 6,13 | 4,10 | 0,22 |
| | 19 | 2,18 | 1,54 | 0,57 | 1,70 | 0,89 | 0,58 | 1,17 | 0,65 | 0,40 | 2,45 | 2,18 | 0,71 | 2,38 | 0,97 | 0,64 | 1,46 | 0,80 | 0,46 |
| | 22 | 1,43 | 0,53 | 0,41 | 2,24 | 1,63 | 0,29 | 2,16 | 0,65 | 0,27 | 1,63 | 0,48 | 0,21 | 3,19 | 2,22 | 0,04 | 3,33 | 0,62 | 0,35 |
| | Media | 2,40 | 1,01 | 0,45 | 2,47 | 1,36 | 0,50 | 2,35 | 1,46 | 0,49 | 3,33 | 1,25 | 0,45 | 3,57 | 1,87 | 0,54 | 3,39 | 1,85 | 0,42 |
| | Desv.Est | 0,83 | 0,44 | 0,10 | 0,63 | 0,53 | 0,28 | 0,83 | 0,77 | 0,18 | 1,47 | 0,72 | 0,17 | 0,95 | 0,83 | 0,42 | 1,44 | 1,10 | 0,17 |
| | cv (%) | 34,4 | 43,7 | 22,0 | 25,7 | 38,9 | 55,9 | 35,1 | 52,7 | 36,3 | 44,3 | 57,7 | 37,7 | 26,5 | 44,5 | 78,7 | 42,5 | 59,4 | 40,9 |
| | Máximo | 3,57 | 1,54 | 0,57 | 3,88 | 2,24 | 1,11 | 3,88 | 3,06 | 0,77 | 5,30 | 2,18 | 0,71 | 5,47 | 3,25 | 1,48 | 6,13 | 4,10 | 0,78 |
| | Mínimo | 1,19 | 0,41 | 0,27 | 1,70 | 0,64 | 0,28 | 1,17 | 0,65 | 0,27 | 1,36 | 0,48 | 0,21 | 2,38 | 0,83 | 0,04 | 1,46 | 0,62 | 0,22 |
| Berja | 1 | 3,06 | 1,22 | 0,37 | 7,35 | 5,51 | 0,83 | 2,35 | 1,12 | 0,57 | 4,21 | 1,11 | 0,14 | 8,63 | 5,68 | 1,06 | 0,54 | 0,78 | 0,48 |
| | 4 | 6,53 | 1,80 | 0,60 | 2,47 | 1,48 | 0,43 | 3,06 | 1,45 | 0,66 | 7,10 | 0,93 | 0,46 | 2,82 | 0,62 | 0,18 | 3,97 | 1,21 | 0,49 |
| | 7 | 1,36 | 1,02 | 0,58 | 5,92 | 1,77 | 0,67 | 3,06 | 2,24 | 0,59 | 0,69 | 0,97 | 0,36 | 7,06 | 1,25 | 0,61 | 3,39 | 2,28 | 1,05 |
| | 10 | 2,44 | 1,53 | 0,45 | 3,27 | 2,76 | 1,28 | 3,16 | 2,11 | 0,69 | 2,92 | 1,42 | 0,32 | 4,21 | 3,05 | 1,27 | 3,70 | 1,73 | 0,56 |
| | 13 | 1,28 | 1,40 | 0,87 | 3,27 | 2,45 | 1,36 | 2,45 | 2,31 | 0,61 | 1,29 | 1,20 | 0,97 | 3,60 | 2,28 | 1,48 | 2,84 | 2,04 | 1,20 |
| | 16 | 2,24 | 2,50 | 0,95 | 1,94 | 1,56 | 1,00 | 2,76 | 2,55 | 0,69 | 2,68 | 2,63 | 0,92 | 1,97 | 1,52 | 0,95 | 3,63 | 2,87 | 0,85 |
| | Media | 2,82 | 1,58 | 0,64 | 4,03 | 2,59 | 0,93 | 2,81 | 1,96 | 0,64 | 3,15 | 1,38 | 0,53 | 4,72 | 2,40 | 0,93 | 3,01 | 1,82 | 0,77 |
| | Desv.Est | 1,94 | 0,52 | 0,23 | 2,12 | 1,52 | 0,36 | 0,35 | 0,56 | 0,05 | 2,30 | 0,44 | 0,34 | 2,59 | 1,81 | 0,47 | 1,27 | 0,75 | 0,31 |
| | cv (%) | 68,8 | 33,2 | 35,9 | 52,7 | 58,7 | 38,7 | 12,3 | 28,3 | 8,0 | 73,1 | 46,4 | 64,1 | 54,9 | 75,5 | 50,8 | 42,1 | 41,3 | 39,6 |
| | Máximo | 6,53 | 2,50 | 0,95 | 7,35 | 5,51 | 1,36 | 3,16 | 2,55 | 0,69 | 7,10 | 2,63 | 0,97 | 8,63 | 5,68 | 1,48 | 3,97 | 2,87 | 1,20 |
| | Mínimo | 1,28 | 1,02 | 0,37 | 1,94 | 1,48 | 0,43 | 2,35 | 1,12 | 0,57 | 0,69 | 0,93 | 0,14 | 1,97 | 0,62 | 0,18 | 0,54 | 0,78 | 0,48 |

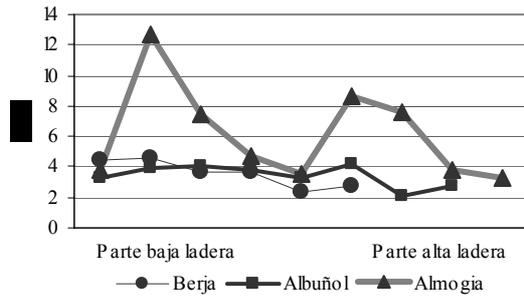


Fig. 4. Diferencias entre laderas- knosat t -0.5

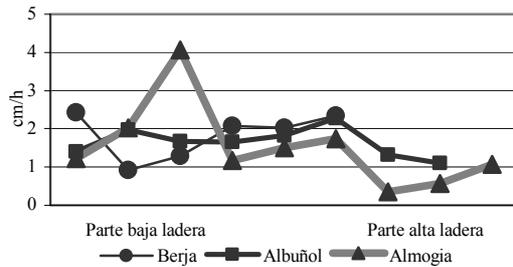


Fig. 5. Diferencias entre laderas- knosat t -2

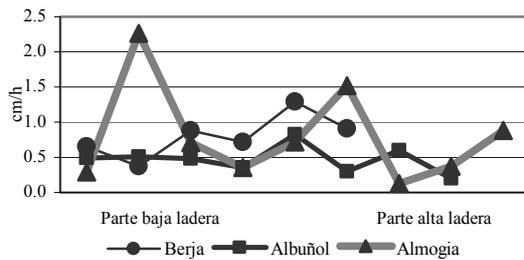


Fig. 6. Diferencias entre laderas- knosat t -6

El diferente comportamiento de los datos de conductividad entre laderas puede ser explicado por el hecho de que el método de Zhang aplica a los datos de infiltración los diferentes parámetros texturales de Van Genuchten. Por tanto, al poseer la misma textura las laderas de Albuñol y Berja, los datos de conductividad tienden a ser similares; la ladera de Almogía, con textura diferente, incrementa su protagonismo en los resultados de conductividad. Por tanto, y según el método, la textura ejerce una influencia directa en el comportamiento hidrodinámico del suelo, pero evidentemente, también lo ejercen otras propiedades físicas. Por ello es necesario llevar a cabo un análisis en la línea de determinar cuales pueden ser las posibles incidencias entre ambos factores.

Correlacionando la knosat con las propiedades físicas de cada una de las laderas, merece destacarse la similitud existente entre las laderas de Berja y Albuñol, en contraste con la de Almogía, como respuesta a las propiedades físicas (ver tabla 5).

La knosat en Almogía está influenciada por los elevados porcentajes de materia orgánica y gravas que la ladera posee. Sin embargo, Berja y Albuñol ven influenciada su

conductividad por la textura, la estabilidad estructural y la porosidad. En concreto, Berja acentúa su conductividad por su contenido en arenas y limos, y Albuñol por su porosidad.

Tabla 5. Correlación de Pearson. Knosat-Propiedades Físicas.

| Propiedades Físicas | Almogía | Albuñol | Berja |
|---------------------|---------|---------|--------|
| arenas (t-0.5) | - | - | -0.657 |
| arenas (t-2) | - | - | 0.657 |
| arenas (t-6) | - | 0.667 | 0.543 |
| limos (t-0.5) | - | - | 0.657 |
| limos (t-2) | - | - | -0.657 |
| limos (t-6) | -0.433 | 0.738 | -0.543 |
| arcillas (t-2) | - | 0.619 | -0.771 |
| arcillas (t-6) | - | 0.619 | - |
| gravas (t-2) | -0.617 | - | - |
| gravas (t-6) | -0.633 | - | - |
| porosidad (t-0.5) | - | -0.571 | - |
| porosidad (t-2) | - | 0.738 | 0.657 |
| E.E. (t-0.5) | - | - | 0.771 |
| E.E. (t-6) | - | 0.548 | -0.6 |
| M.O. (t-2) | -0.600 | - | - |
| M.O. (t-6) | - | 0.786 | - |

E.E.: Estabilidad Estructural; M.O.: Materia Orgánica

Para comprobar la validez del método utilizado, ya que como hemos visto anteriormente le otorga un excesivo protagonismo a la textura en el cálculo de la conductividad, vamos a aplicar a los datos de infiltración la ecuación de Wooding (1968), la cual asume una relación exponencial entre k y h (Gardner, 1958):

$$k = K_s \exp(\alpha h) \tag{5}$$

Donde K_s es la knosat, α es una constante que relaciona el radio del infiltrómetro, la infiltración obtenida y la diferencia de tensión aplicada, y h es la presión del agua en el suelo.

El motivo de utilizar como elemento comparativo dicha ecuación se debe a que solo considera parámetros relacionados con el comportamiento hidráulico del suelo por unidad de tiempo, con lo que podría despejar el excesivo protagonismo que a nuestro juicio se otorga al papel de la textura.

La Tabla 6 muestra los resultados de conductividad obtenidos mediante el método de Zhang para la tensión -2, y los obtenidos mediante la aplicación de la fórmula de Wooding para igual tensión, en la diferencia de tensión de -0.5 y -2. Ambos resultados los hemos calculado a partir de las pruebas realizadas en la zona centro de cada ladera.

Normalizados los datos de ambos métodos, calculamos la correlación existente, obteniendo que es la ladera de Albuñol la que tiene un comportamiento más homogéneo, con una correlación del 0.7; Almogía también presenta correlación, pero inferior, de un 0.4; Berja no presenta correlación alguna entre la knosat de ambos métodos (0.03), tal y como puede observarse en las siguientes gráficas. (Fig. 7 y 8)

Tabla 6. Knosat obtenidas mediante los métodos de Zhang (Z) y de Wooding (W) a tensión -2 (cm/h)

| Knosat Tensión -2 (cm/h) | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|------|---------|---------|------|---------|-------|------|
| Parcela | Almogía | | Parcela | Albuñol | | Parcela | Berja | |
| | Z | W | | Z | W | | Z | W |
| 1 | 1.22 | 1.20 | 2 | 1.41 | 2.29 | 1 | 2.42 | 7.19 |
| 4 | 2.02 | 4.87 | 5 | 1.97 | 2.66 | 4 | 0.92 | 2.99 |
| 7 | 4.07 | 1.89 | 7 | 1.67 | 2.75 | 7 | 1.30 | 5.99 |
| 10 | 1.17 | 3.27 | 10 | 1.66 | 2.50 | 10 | 2.07 | 2.31 |
| 13 | 1.50 | 1.53 | 13 | 1.82 | 4.73 | 13 | 2.03 | 3.19 |
| 16 | 1.74 | 3.80 | 16 | 2.28 | 2.69 | 16 | 2.34 | 1.56 |
| 19 | 0.35 | 1.50 | 19 | 1.32 | 2.10 | | | |
| 22 | 0.57 | 3.13 | 22 | 1.11 | 2.31 | | | |
| 25 | 1.07 | 1.80 | | | | | | |

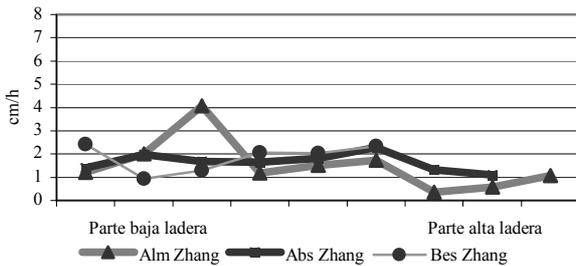


Fig.7. Diferencia entre laderas Knosat t-2 (Zhang)

En términos generales las tasas no son muy diferentes entre ambos métodos -según los criterios aceptados por la comunidad científica (Porta et al, 1999)- aunque si la conductividad media calculada mediante el método de Zhang nos mostraba como la ladera con mayores tasas de knosat era Almogía, y Albuñol y Berja, con escasas diferencias, las de menores; tras aplicar la formula de Wooding obtenemos que es la ladera de Berja la que presenta mayores tasas de conductividad, -3,87 cm/h-,

seguida de Albuñol, -2,75 cm/h-, y Almogía, -2,55 cm/h-, por tanto, relacionadas inversamente con su posición dentro del gradiente pluviométrico, aunque las diferencias entre ellas sean escasas. Cabe destacar que con la aplicación de la ecuación de Wooding, los valores de knosat intraladera son más heterogéneos entre si comparativamente a los obtenidos con el método de Zhan.

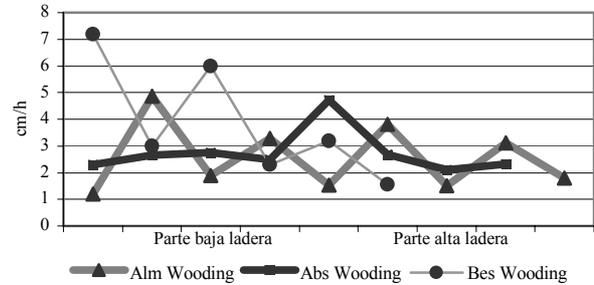


Fig. 8. Diferencia entre laderas Knosat t-2 (Wooding)

4.2. Determinación de la knosat intraladeras

Una vez realizado el análisis de los resultados de knosat entre laderas, realizaremos el análisis espacial de los resultados obtenidos a partir del método de Zhang dentro de cada una de las laderas.

La Tabla 7 muestra los valores medios de conductividad por parcela y tensión para cada una de las laderas. Del análisis de la misma, podemos destacar la mayor conductividad en la ladera de Almogía y la homogeneidad de valores en la comparación de las laderas de Berja y Albuñol, tal y como se indicaba en el apartado anterior.

Tabla 7. Valores medios de knosat por parcela y tensión.

| Parcelas | Tensión -0,5 | | | Tensión -2 | | | Tensión -6 | | | |
|----------|--------------|---------|---------|------------|---------|---------|------------|---------|---------|--------|
| | MEDIA | Desvest | C.V.(%) | MEDIA | Desvest | C.V.(%) | MEDIA | Desvest | C.V.(%) | |
| Almogía | 1 | 3,74 | 2,39 | 63,97 | 1,22 | 0,03 | 2,84 | 0,29 | 0,13 | 45,08 |
| | 4 | 12,65 | 2,17 | 17,12 | 2,02 | 1,36 | 67,30 | 2,26 | 0,94 | 41,71 |
| | 7 | 7,46 | 7,27 | 97,52 | 4,07 | 5,40 | 132,64 | 0,71 | 1,06 | 149,94 |
| | 10 | 4,74 | 1,56 | 32,96 | 1,17 | 0,29 | 25,10 | 0,36 | 0,08 | 22,32 |
| | 13 | 3,47 | 1,08 | 31,01 | 1,50 | 0,41 | 27,48 | 0,72 | 0,60 | 83,58 |
| | 16 | 8,58 | 4,03 | 46,99 | 1,74 | 0,74 | 42,45 | 1,51 | 0,78 | 51,75 |
| | 19 | 7,56 | 7,12 | 94,18 | 0,35 | 0,28 | 80,27 | 0,13 | 0,10 | 79,72 |
| | 22 | 3,82 | 0,80 | 21,05 | 0,57 | 0,10 | 17,27 | 0,38 | 0,01 | 1,55 |
| 25 | 3,28 | 1,17 | 35,68 | 1,07 | 0,45 | 42,14 | 0,89 | 1,15 | 129,90 | |
| Albuñol | 2 | 3,31 | 0,63 | 19,09 | 1,41 | 1,00 | 70,99 | 0,49 | 0,24 | 49,49 |
| | 5 | 3,92 | 1,21 | 30,84 | 1,97 | 0,12 | 6,08 | 0,51 | 0,16 | 32,22 |
| | 7 | 4,10 | 0,84 | 20,59 | 1,67 | 0,28 | 16,72 | 0,48 | 0,12 | 25,70 |
| | 10 | 3,74 | 1,34 | 35,81 | 1,66 | 1,02 | 61,38 | 0,35 | 0,00 | 0,00 |
| | 13 | 3,32 | 2,06 | 62,15 | 1,82 | 1,36 | 74,45 | 0,82 | 0,57 | 69,41 |
| | 16 | 4,24 | 1,64 | 38,65 | 2,28 | 1,58 | 69,50 | 0,30 | 0,07 | 24,98 |
| Berja | 19 | 2,09 | 0,55 | 26,26 | 1,32 | 0,75 | 57,35 | 0,60 | 0,13 | 21,21 |
| | 22 | 2,72 | 0,94 | 34,73 | 1,11 | 0,96 | 86,83 | 0,20 | 0,16 | 79,57 |
| | 1 | 4,46 | 4,05 | 90,74 | 2,42 | 2,84 | 117,00 | 0,66 | 0,47 | 71,34 |
| | 4 | 4,63 | 2,21 | 47,81 | 0,92 | 0,29 | 31,89 | 0,38 | 0,17 | 46,25 |
| | 7 | 3,71 | 3,20 | 86,18 | 1,30 | 0,96 | 74,18 | 0,88 | 0,23 | 26,46 |
| | 10 | 3,61 | 0,65 | 18,00 | 2,07 | 0,86 | 41,81 | 0,72 | 0,49 | 68,29 |
| 13 | 2,31 | 1,18 | 51,03 | 2,03 | 0,96 | 47,28 | 1,29 | 0,16 | 12,60 | |
| 16 | 2,76 | 0,83 | 30,23 | 2,34 | 0,72 | 30,73 | 0,91 | 0,05 | 6,04 | |

Para analizar el comportamiento de la knosat dentro de cada una de las laderas, y a modo de ensayo, hemos llevado a cabo un análisis espacial que nos permite observar las diferencias existentes en función de la tensión aplicada.

El análisis espacial se ha obtenido de la aplicación de la técnica de estimación de krigeado (Kriging), mediante un sistema puntual, método de interpolación óptimo y carente de sesgo (Journel, Huij-Bregts, 1978). El software utilizado en dicho ensayo ha sido el programa informático Surfer versión 8.0.

Con la aplicación de esta técnica hemos obtenido tres mapas para cada una de las laderas, uno por cada tensión, que responden a una leyenda común realizada a partir de los valores máximos y mínimos de knosat por tensión del conjunto de las laderas, posibilitando la comparación entre ellas.

| | Tensión -0.5 | Tensión -2 | Tensión -6 |
|--|--------------|------------|------------|
|  | 12.8 - 16 | 8.8 - 11 | 3,2 - 4 |
|  | 9.6 - 12.8 | 6.6 - 8.8 | 2.4 - 3.2 |
|  | 6.4 - 9.6 | 4.4 - 6.6 | 1.6 - 2.4 |
|  | 3.2 - 6.4 | 2.2 - 4.4 | 0.8 - 1.6 |
|  | 0 - 3.2 | 0 - 2.2 | 0 - 0.8 |

Las siguientes figuras (Fig.9 ,Fig.10, Fig.11) nos permitirán comentar el comportamiento intraladera de la knosat.

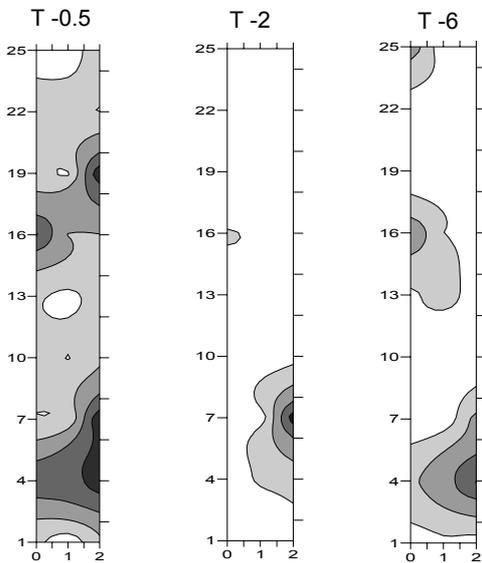


Fig. 9. Mapas de knosat: Almogía.

Almogía: la observación de los tres mapas marcan una clara diferencia de la conductividad a distinta tensión. A menor tensión la conductividad más elevada se concentra en la parte baja y media-alta de la ladera. Conforme aumentamos la tensión es la zona baja la que mantiene los valores más elevados. Este comportamiento solo es

explicable por la existencia de una menor pendiente en la zona baja y una mayor densidad de vegetación anual, dado que no existen grandes diferencias en cuanto al resto de propiedades físicas analizadas.

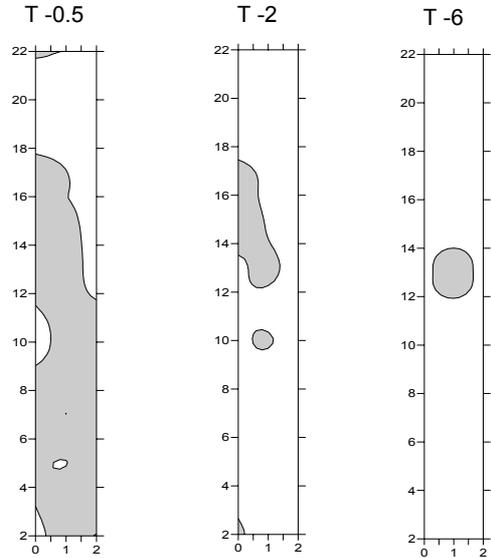


Fig. 10. Mapas de conductividad hidráulica no saturada: Albuñol.

Albuñol: al visualizar los mapas destaca la homogeneidad y el descenso de la knosat conforme aumenta la tensión. En general, la ladera posee una baja conductividad, presentando a menor tensión los valores mayores en las zonas media y baja de la ladera, disminuyendo su área de influencia hasta zonas muy puntuales en la parte media de la ladera cuanto mayor es la tensión aplicada. Relacionando este comportamiento con las propiedades físicas, hay que destacar que es esta zona central, de mayor conductividad, la que posee mayor porcentaje de arenas y arcillas.

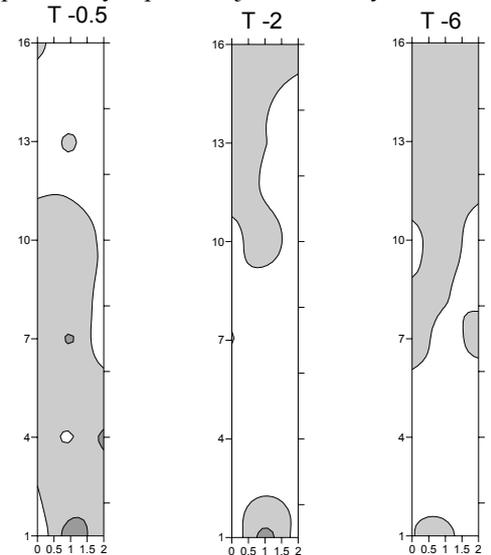


Fig. 11. Mapas de knosat: Berja.

Berja: presenta un comportamiento curioso en respuesta a la diferente tensión que le apliquemos, cuando la tensión es baja los valores mayores de conductividad se concentran en la parte media-baja de la ladera; sin embargo, al aumentar

la tensión que aplicamos al suelo, los mayores valores se dan en la zona alta. Es decir, donde son menores tanto la estabilidad estructural como el contenido de materia orgánica, la Knosat es algo más alta; por el contrario, a tensión -0.5 el comportamiento puede ser explicado por corresponderse la zona de mayor conductividad con la de mejor estructura, con mayor contenido de materia orgánica y mayor porosidad.

5. Conclusiones

Desde el punto de vista metodológico, podemos destacar que con el método utilizado podemos obtener unos resultados satisfactorios, y ajustados a otros métodos, sobretudo allí donde las diferencias texturales no sean excesivas, puesto que la ecuación de Zhang, puede dotar a esta propiedad de un excesivo papel. Por ello, proponemos la utilización de la ecuación de Wooding como alternativa. Por otra parte, su fácil manejo, la rapidez de obtención de datos fiables dado lo reducido del área de contacto hidráulico con el suelo, unido a la posibilidad de reproducir in situ diversos experimentos y a diferentes tensiones, son circunstancias favorables a su manejo. Por último, y en relación con los datos obtenidos hemos de plantear:

1.- A escasa tensión, (-0,5) la Knosat descende con el gradiente, y en términos generales es mayor en las zonas medias y bajas de las laderas que en la altas.

2.- A tensión media, (-2) la Knosat es muy similar entre las laderas consideradas, si bien, se incrementa en orden inverso al gradiente, siendo su localización intraladera muy variable.

3.- A la tensión más elevada, (-6) la Knosat es similar en los extremos del gradiente, mientras que en Albuñol, presenta datos de menor valor.

4.- Algunas propiedades físicas del suelo, como la materia orgánica, contenido de gravas, estabilidad estructural, porosidad y textura, ejercen una influencia directa en la Knosat.

Agradecimientos. Los autores quieren expresar su agradecimiento a la Confederación Hidrográfica del Sur de España, por el apoyo prestado para la realización de la presente investigación.

Referencias

- Cho, S.E. and Lee, S.R. 2001. Instability of unsaturated soil slopes due to infiltration. *Computers and Geotechnics* 28:185-208. Elsevier.
- Cobertera, E. 1993. *Edafología Aplicada*. Ed. Cátedra.
- Joel, A. and Messing, I. 2000. Application of two methods to determine hydraulic conductivity with disc permeameters on sloping land. *European Journal of Soil Science*. 51:93-98.
- Journel, A.G., C.H.J. Huijbregts, 1978. *mining Geostatistics* Academic Press, London.
- Kosugi, K., Hopmans J.W. and Dane, J.H., 2002. *Soil Science Society of America. Book series. Number 5.*
- Kutilek, M. and Nielsen, D. 1994. *Soil hydrology*. Geocoloy.
- Martínez, J. 1996. Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. Universidad de Murcia.
- Porta, J., Lopez Acevedo, M y Roquero, C. 1999. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ediciones MP.
- Tuli, A., Kosugi, K. and Hopmans, J.W. 2001. Simultaneous scaling of soil water retention and unsaturated hydraulic conductivity functions assuming lognormal pore-size distribution. *Advances in Water Resources* 24:677-688. Elsevier.
- Vandervaere, J.P., Peugeot, C., Vauclin, M., Angulo Jamarillo and Lebel, T. 1997. Estimating hydraulic conductivity of crusted soils using disc infiltrometer and minitensiometers. *Journal of Hydrology* 188-189.
- White, I., Sully, M.J. and Perroux, K.M. 1992. Measurement of Surface-Soil Hydraulic Properties: Disc Permeameters, Tension Infiltrometers, and other Techniques. *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing.. SSSA. Number 30.*
- Zhang, R. 1997. Determination of Soil Sortivity and Hydraulic Conductivity from the Disk Infiltrometer. *Soil Sci.* 61:1024-1030.
- Zhuang, J., Nakayama, K., Yu, G.R. and Miyazaki, T. 2001. Predicting unsaturated hydraulic conductivity of soil based on some basic soil properties. *Soil and Tillage Research* 59:143-154. Elsevier.