

EL INFILTRÓMETRO DE CILINDRO SIMPLE COMO MÉTODO DE CÁLCULO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA DE LOS SUELOS. EXPERIENCIAS DE CAMPO EN ÁMBITOS DE MONTAÑA MEDITERRÁNEA

RAFAEL BLANCO SEPÚLVEDA

RESUMEN

Los estudios de infiltración son de gran interés por su aplicabilidad tanto en valoraciones medioambientales como en proyectos de transformación de secano a regadío. Del mismo modo, son también de gran utilidad para valorar la degradación de los suelos por uso ganadero. Existen numerosos métodos para el cálculo de este parámetro, de los cuales hemos seleccionado el infiltrómetro de cilindro simple por su simplicidad, bajo coste y manejabilidad.

El objetivo de este trabajo es adaptar el método citado a las condiciones particulares de los ámbitos de montaña mediterránea. Para ello, se sigue un método totalmente empírico en el que las experiencias de campo se convierten en la base del proceso cognoscitivo.

El trabajo de campo ha consistido en la realización de 20 ensayos de infiltración con dos infiltrómetros de cilindro de diferente diámetro, uno de 21,4 cm. y otro de 30 cm., valorándose la precisión de los resultados utilizando la teoría de la estimación.

SUMMARY

The infiltration studies are of great interest for their applicability as much in environmental valuations as in projects of unirrigated land transformation to irrigable. In the same way, it is also of great utility to value the degradation of the floors for use livestock. Numerous methods exist for the calculation of this parameter, of which we have selected the simple ring infiltrometer for their simplicity, low cost and easy use.

The objective of this work is to adapt the method mentioned to the conditions peculiar of our floors. For it, a completely empiric method is continued in the one that the field experiences become the base of the cognitive process.

The field work has consisted on the realization of 20 infiltration tests with two rings infiltrimeters of different diameter, one of 21,4 cm. and another of 30 cm., being valued the precision of the results using the theory of the estimate.

1. INTRODUCCIÓN.

La conductividad hidráulica expresa la aptitud de un medio poroso como es el suelo para transmitir agua. Se distinguen dos tipos de transmisiones de agua en el suelo, la que se realiza en régimen no saturado y en régimen saturado. En la conductividad hidráulica en régimen saturado (K_s), el espacio poroso está totalmente lleno de agua, es el régimen que existe en suelos con capa de agua circulante (Porta, 1999). En la conductividad hidráulica en régimen no saturado (K), el volumen de poros del suelo está sólo parcialmente lleno de agua, es el flujo que se da en suelos que se humectan o se secan (Porta, 1999).

Este último es el estado más frecuente en los procesos de transferencia de agua en el suelo. Este flujo resulta más difícil de describir y medir que el flujo saturado, debido a que no es posible controlar múltiples factores que son constantes en el caso del saturado, como es el caso de la cantidad de agua en el suelo. Los estudios experimentales del flujo del agua en un medio poroso han dado lugar a una serie de leyes, la que describe el flujo de agua en condiciones de régimen saturado se conoce como ley de Darcy; mientras que, la del flujo no saturado es la ley de Buckingham-Darcy.

Existen numerosos métodos para calcular la conductividad hidráulica de los suelos. Vamos a distinguir los métodos de laboratorio de los métodos de campo. La descripción de cada uno de ellos está fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que tan sólo nos limitaremos a citarlos. Para profundizar en el análisis de los métodos más usuales se pueden consultar las obras de Martínez, J. (1992), Martínez, J. et al. (1996) y Porta, J. et al. (1999), entre otros.

Los métodos de laboratorio toman muestras en el campo, conservando su estructura. Estos métodos son los permeámetros, se distinguen distintos tipos: permeámetro con carga constante y permeámetro con carga variable, permeámetro de pozo con carga constante, permeámetro de disco, permeámetro con entrada de aire, etc.

Los métodos de campo son también numerosos, destacando los siguientes: método del piezómetro, método inverso del agujero de taladro, método del doble tubo, infiltrómetros, etc.

La infiltración designa el proceso de entrada de agua, generalmente vertical, en el suelo desde la superficie, lo que constituye la primera etapa en el movimiento del agua en el suelo (Porta, 1999). Cuando se inicia una lluvia sobre un suelo seco, la entrada de agua en el mismo tiene lugar en condiciones no saturadas ($P < I$), siendo P la precipitación e I la infiltración. En los casos en los que la lluvia continua, llega un momento en que el suelo no es capaz de infiltrar toda el agua que recibe ($P > I$), se produce por tanto escorrentía y el flujo de agua que tiene lugar en el suelo se produce en condiciones saturadas. Si se considera el proceso de infiltración como un caso de flujo de agua en

suelos no saturados, su medida nos permite poder caracterizar las relaciones suelo-agua (Youngs, 1991). Por este motivo, nuestro interés se centrará en el estudio de la infiltración para poder valorar la conductividad hidráulica de los suelos.

Los estudios de infiltración son de gran interés tanto en las valoraciones medioambientales como en los proyectos de puesta en regadío. En el primer caso, los cálculos de infiltración nos pueden ayudar para valorar la degradación de suelos por erosión hídrica, determinar el caudal de aguas residuales que es capaz de infiltrar un suelo, mejorar los suelos afectados por salinidad y estudiar el ciclo hidrológico, entre otros usos. En el segundo caso, es útil conocer la infiltración para poder valorar transformaciones de secano en regadío, seleccionar equipos de riego, manejo del agua de riego, etc.

Por otra parte, conocer las tasas de infiltración también pueden ser útiles para valorar la degradación de los suelos por uso ganadero. Son innumerables los autores que coinciden al destacar que la actividad ganadera en pastoreo causa una reducción significativa de las tasas de infiltración (Knoll et al., 1959; Johnston, 1962; Rauzi, 1963; Gifford et al, 1978; Blackburn, 1984; Warren, 1987; Alconada et al., 1993), especialmente en los suelos sometidos a elevadas cargas ganaderas. Se aprecia, por tanto, una relación inversamente proporcional entre carga ganadera y capacidad de infiltración. Este comportamiento hidrológico se atribuye a la compactación, prolongada en el tiempo, debida al pisoteo por parte del ganado.

El significado de la alteración de las propiedades hidrológicas del suelo, por esta actividad, se resume en los términos siguientes:

- a) El aumento de compactación provoca una reducción en las tasas de infiltración, lo que motiva un aumento de la escorrentía y conduce a un proceso de pérdida de suelos.
- b) Este aumento de la escorrentía se traduce en un menor aporte de agua en profundidad lo que reduce la cantidad de agua disponible para las plantas en el suelo.

La degradación de los suelos altera las características hidrológicas del medio, al reducir la infiltración y aumentar la escorrentía. Conocer la capacidad de infiltración de un suelo determina que, indirectamente, podamos conocer, por una parte, la cantidad de agua que se pierde por escorrentía y, por otra, el agua que recarga los horizontes del suelo y que es susceptible de ser aprovechada por las raíces de las plantas. Este hecho determina la productividad forrajera y, por tanto, los recursos alimenticios que dispone el ganado para su consumo.

La caracterización de la infiltración en función de la carga ganadera o de la influencia de las distintas prácticas ganaderas, es susceptible, por tanto,

de utilizarse como índice de degradación. En este sentido, la infiltración se estudia como una variable dependiente de las prácticas culturales o de la influencia humana en la explotación del medio. Hecho que numerosos investigadores han confirmado. Porta (1999) observa que la infiltración se ve alterada por cambios estructurales debido a procesos naturales o a actividades de manejo. Amerman (1983) utiliza la tasa de infiltración como un índice edáfico para medir la incidencia de determinadas prácticas culturales. Y, por su parte, Youngs (1987) considera adecuado usar los valores de la conductividad hidráulica para controlar los cambios estructurales cerca de la superficie del suelo, indicando posibles cambios de manejo en el medio.

2. LA INFILTRACIÓN: CONCEPTOS BÁSICOS Y MÉTODOS DE MEDICIÓN.

2.1. Conceptos básicos.

Horton (1940) presenta una visión clásica de la infiltración. El modelo que presenta viene representado por una curva en la que la capacidad de infiltración varía desde una magnitud muy elevada, al principio de la precipitación, a un valor más bajo, que se hace aproximadamente constante después de un período de lluvia suficientemente largo.

Existen una serie de parámetros que se pueden obtener del análisis de dicha curva, los cuales permiten definir la infiltración. Estos parámetros son los siguientes:

- a) *Capacidad de infiltración inicial (f_0)*. Es la tasa de infiltración que se obtiene al principio del proceso de medición. El valor de esta tasa depende de la humedad inicial del suelo y de la lluvia anterior (Horton, 1940).
- b) *Capacidad de infiltración o Tasa de infiltración final estable o Velocidad de infiltración básica o final (f_c)*. Se define como la tasa constante de infiltración o velocidad de infiltración y se caracteriza por un régimen relativamente estabilizado al que se llega a lo largo del tiempo cuando el agua ha infiltrado la totalidad de la superficie del suelo. El valor de f_c para un suelo determinado no es constante, depende del valor inicial de f_0 . El tiempo requerido para alcanzar la capacidad de infiltración se define como t_c . Los términos capacidad de infiltración y tasa de infiltración, normalmente, se confunden. Se utilizan indistintamente, aunque no son exactamente lo mismo. Si la intensidad de la lluvia es inferior que la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración

no es sinónimo de capacidad. En este sentido, hay una variedad infinita de tasas pero solamente una capacidad de infiltración para un suelo dado y en un momento determinado (Horton, 1940).

- c) *Infiltración acumulada*. Corresponde a la cantidad de agua que se ha infiltrado en un suelo a lo largo de un determinado período de tiempo, por ejemplo, una lluvia.
- d) *Tasa o Velocidad de infiltración media*. Cantidad acumulada de agua infiltrada por unidad de superficie a lo largo del tiempo que ha durado el proceso.
- e) *Índice de decaimiento de la tasa de infiltración (a)* según el modelo de Horton (ángulo de la curva de infiltración). Es la diferencia entre la tasa de infiltración inicial y la tasa de infiltración final estable dividido por el tiempo transcurrido entre ambos puntos de la curva

2.2. Los métodos de medición de la infiltración.

Existen muy diferentes tipos de infiltrómetros, de los cuales se pueden destacar los siguientes: infiltrómetro de cilindro o de inundación, tanto simple como doble; infiltrómetro cerrado; infiltrómetro de tensión, etc. Diferente a estos métodos, porque no corresponde con el mismo procedimiento, se encuentra el simulador de lluvia o infiltrómetro de dispersión.

El simulador de lluvia es, en la actualidad, un método frecuentemente usado. Consiste en aplicar sobre el suelo una cantidad conocida de agua, obteniéndose la tasa de infiltración por la diferencia entre la cantidad de agua aplicada y el agua que se pierde por escorrentía. Su utilidad, por tanto, es doble ya que suministra información, tanto sobre las tasas de escorrentía como sobre el agua de infiltración.

Las comparaciones entre métodos son inevitables y prueba de ello son las innumerables citas que se pueden hacer al respecto. En relación a los juicios comparativos entre el infiltrómetro de cilindro y el simulador de lluvia se pueden destacar las siguientes consideraciones. Gifford et al. (1978) considera que se obtienen mejores resultados con el simulador de lluvia, mientras que destaca del infiltrómetro de cilindro por ser un método más simple, rápido y barato, aunque suministra resultados menos fiables. Amerman (1983) cita a numerosos autores y de todos ellos se desprenden consideraciones muy contrastadas. Unos, señalan la cautela que es necesaria tener cuando se usa el infiltrómetro de cilindro y destacan como más fiable el método de la lluvia simulada. Otros, no se ponen de acuerdo y señalan, al utilizar ambos métodos, tanto diferencias significativas como no significativas en las tasas finales de infiltración. Por el contrario, Touma et al. (1992) encuentra que el infiltrómetro de cilindro es más apropiado que el simulador de lluvia cuando la superficie del suelo es susceptible de encostramiento.

El método de la lluvia simulada no es del todo fiable y sobre él se argumentan diversos hechos que hacen que los resultados obtenidos no se correspondan con la realidad. Destaca el factor tamaño de las gotas. En una lluvia natural, el tamaño de las gotas puede ser muy variable, cuanto mayor sea la intensidad de la lluvia mayor será el tamaño de las gotas; sin embargo, cuando se usa el simulador de lluvia no se da la variedad de tamaños de gotas que ordinariamente se obtienen en las lluvias naturales (Horton, 1940). Estas diferencias entre el simulador de lluvia y la lluvia natural afectan a la determinación de la capacidad de infiltración. El efecto más importante que se observa es que el tamaño de la gota afecta, de forma significativa, al encostramiento o ruptura de la estructura, produciéndose un incremento de esta tasa con el tamaño de las gotas (Horton, 1940).

3. EL INFILTRÓMETRO DE CILINDRO.

El principio de funcionamiento de un infiltrómetro consiste en un cilindro abierto que se introduce suavemente en el suelo. Se somete a una carga de agua y se mide el volumen de este líquido que es drenado por unidad de tiempo, lo que constituye el término que se conoce como capacidad de infiltración (Martínez et al., 1996).

El infiltrómetro de cilindro es el que vamos a utilizar para medir la infiltración. Este método se ha empleado y se sigue empleando en numerosas investigaciones, por su sencillez, bajo coste y manejo, aunque presenta importantes limitaciones como se señala en los próximos apartados.

Existen dos tipos de infiltrómetros de cilindro, uno compuesto por un solo cilindro, se conoce como infiltrómetro de cilindro simple, y otro compuesto por dos y denominado infiltrómetro de cilindro doble.

3.1. Características técnicas y metodológicas del método: dimensiones de los cilindros, instalación, procesos de medición y duración de los ensayos.

No existen medidas estándar para los infiltrómetros y en este sentido cada autor ha propuesto las que ha considerado más convenientes para su investigación.

Para el *infiltrómetro de cilindro simple* se han sugerido numerosos materiales de fabricación, además de muy diversas dimensiones. Cerdà (1995) utiliza un cilindro de metacrilato de 15 cm. de altura y 7 cm. de diámetro; López et al. (1986) utiliza un cilindro de acero de 45 a 60 cm de altura y 22 cm. de diámetro; Youngs (1987) emplea cilindros de 91, 60,8; 30,4; 18,2; 9,8 y 2 cm. de diámetro; Bouwer (1982) recalca la importancia del diámetro del infiltrómetro

y sugiere que se utilicen cilindros de acero de pared fina de 20 a 30 cm. y Knoll et al. (1959) utiliza un cilindro simple de 15 cm. de diámetro y 38 cm. de longitud.

Para el *infiltrómetro de cilindro doble* la variedad de medidas propuestas también es muy significativa. López et al. (1986) utiliza infiltrómetros de alrededor de 35 cm. de diámetro para el cilindro exterior y 22 cm. para el interior; Ponce (1989) emplea cilindros exteriores de 35 cm. e interiores de 25 cm.; Vivar et al. (1993, 1994) utiliza varias dimensiones, entre 53 y 57 cm. de diámetro para los cilindros exteriores y entre 28 y 32 cm. para los interiores; Bouwer (1982) usa un cilindro interior de 20 cm. y otro exterior de 30 cm. y sugiere que se debe mantener el mismo nivel de agua en ambos cilindros; Porta (1999) también utiliza un cilindro interior de 15 a 20 cm.

Otro de los aspectos técnicos del método es la instalación. El proceso de instalación se debe hacer cuidando de alterar lo menos posible el suelo. En suelos blandos es posible empujar el cilindro; mientras que, en suelos duros, es necesario clavarlos. Ya sea por empuje o por clavado estos procedimientos deben hacerse de forma recta y uniforme. Cuando se clava el cilindro se puede utilizar una pieza guía del mismo material del que está hecho el cilindro, con lo que se consigue mantener recto y uniforme el cilindro durante el proceso de clavado (BOUWER, 1982).

La profundidad de instalación debe ser tan pequeña como sea posible para minimizar la alteración del suelo. Aquí, de nuevo, los autores no se ponen de acuerdo y utilizan diversas medidas. Bouwer (1982) considera que una instalación de alrededor de 5 cm. es normalmente suficiente. Considera además, éste autor, que en algunos estudios se han utilizado profundidades de 30 cm. o más, probablemente para obtener un flujo de infiltración unidimensional, sin embargo, este procedimiento incrementa la alteración del suelo. Una alternativa eficaz para obtener un flujo unidimensional es aumentando el diámetro del cilindro. Para que el proceso de instalación tenga el éxito esperado, debemos tener en cuenta las condiciones del suelo. Así, si la superficie del suelo está agrietada, el cilindro debe introducirse, al menos, hasta la profundidad de las grietas, para prevenir el flujo de agua que se escapa lateralmente a través de éstas. Si después de la instalación del cilindro hay alguna separación entre el suelo y la pared de éste, el suelo debería ser empujado o prensado contra el cilindro. Si una capa superficial de baja permeabilidad es alterada por la instalación del cilindro y no hay un buen contacto entre ambas superficies se puede utilizar algún pulverizado fino de arcillas o de suelo dentro de la pared para prevenir la infiltración excesiva. López et al. (1986) introduce el infiltrómetro de cilindro simple a 40 ó 50 cm.; Youngs (1987) adopta una profundidad de instalación de 2 a 5 cm.; Knoll et al. (1959), lo hace a una profundidad aproximada de 7 cm. López et al. (1986), para el cilindro doble, no concreta demasia-

do y tan sólo cita que introduce los cilindros “un poco por debajo de la superficie del suelo”; mientras, Ponce (1989) añade que la profundidad de instalación debe ser de 2 a 5 cm.

Para evitar una excesiva alteración del suelo, Porta (1994) señala la conveniencia de realizar la instalación en un suelo previamente húmedo. Por tanto, las condiciones de humedad ideales para la instalación es con el suelo a la capacidad de campo.

Dentro del apartado metodológico hay que destacar el hecho que se distinguen dos procedimientos de medición, uno que se hace con carga de agua constante y otro con carga de agua variable.

El procedimiento con carga de agua constante se utiliza cuando la velocidad de infiltración es lenta (Vivar et al., 1994). Normalmente, cuando se utiliza el infiltrómetro de doble cilindro, se aplica la técnica de la carga constante (Ponce, 1989), siempre que la velocidad de infiltración sea baja. La columna de agua puede mantenerse constante de forma manual, por ejemplo, añadiendo con una frecuencia dada pequeñas cantidades de agua, o de forma automática mediante un sifón dentro del cilindro y alimentado desde un depósito aforado. En este caso sería necesaria una botella graduada como reservorio de agua (Bouwer, 1982).

El procedimiento con carga de agua variable consiste en encharcar el cilindro o los cilindros y medir la altura del agua infiltrada a cada intervalo de tiempo. Se utiliza cuando la velocidad es alta. Vivar et al. (1994) inicia la medición con una determinada cantidad de agua que oscila entre 10 y 12 cm. y mide los tiempos a cada centímetro infiltrado. Cuando quedan 2 cm. se rellenan los cilindros hasta la carga máxima. Cerdà (1995), con el infiltrómetro de 1 anillo, realiza regularmente las mediciones cada 5 minutos, pero también en el primer y segundo minuto y tras cada medición vuelve a rellenar el cilindro y humectar la zona colindante.

Diversos autores destacan la influencia que ejerce la carga hidráulica o altura de la columna de agua dentro del cilindro sobre la velocidad de infiltración (Bouwer, 1982; Vivar et al., 1993). Estos advierten que la columna de agua debe ser lo más pequeña posible. Youngs (1987) mantiene el agua a una altura de 1 cm. por encima de la superficie. Knoll et al. (1959) aplica agua a una altura de 1 a 2 mm.

En resumen, aunque es evidente la importancia de este hecho, no se debe sobredimensionar su significado ya que se considera que la columna de agua, dentro de los límites normales, entre 0 y 30 cm., no hace variar excesivamente la infiltración. Tan sólo, en el caso, de querer obtener datos comparables de los diferentes ensayos sí que es importante mantener estable la altura de la columna de agua.

La duración de los ensayos sería el último de los aspectos metodológicos que veríamos en este apartado. El tiempo de duración de cada ensayo puede

ser variable, aunque se considera que es hasta que la infiltración quede estabilizada. Si bien es cierto que el tiempo de duración de cada ensayo no se rige por reglas, dependiendo ésta principalmente del tipo de suelo, los autores tampoco en este aspecto se ponen de acuerdo, ya que mientras unos recomiendan una duración de 3 a 4 horas, otros, reducen este tiempo a tan sólo 30 ó 40 minutos.

Así, Vivar (1993) prolonga sus ensayos con infiltrómetro de doble cilindro durante aproximadamente 3 horas; Bouwer (1982) considera que la duración de las mediciones se deben prolongar hasta que la tasa de infiltración llegue a ser constante y no expresa ningún tiempo mínimo para efectuar los ensayos; Cerdà (1995) utiliza este mismo criterio; Horton (1940) considera que se llega a la capacidad de infiltración constante o fija después de un intervalo de tiempo determinado, normalmente de $1/4$ de hora a 3 horas, aunque usualmente se produce entre $1/2$ hora y $1\frac{1}{2}$ hora; Knoll et al. (1959) llena los cilindros con agua durante 48 horas para cerrar las grietas provocadas por la sequía y después realiza el ensayo durante un período de 2 horas.

3.2. Consideraciones sobre el método.

Son numerosos los problemas que se le atribuyen al método. Los autores que han trabajado con el infiltrómetro de cilindro distinguen numerosos aspectos, tanto referentes a la instalación como inherentes a las propias limitaciones del método. Explicar con detenimiento cada uno de ellos no es el objetivo de este trabajo, por lo que tan sólo nos limitaremos a explicarlos brevemente, pudiéndose acudir a la bibliografía citada para poder profundizar en cada apartado.

Las consideraciones que se plantean son las siguientes:

- a) *Introducir los cilindros modifica las condiciones del suelo.* La fricción del tubo al ser introducido en el suelo puede llegar a producir un importante deterioro estructural del suelo dentro del cilindro (Horton, 1940; Ponce, 1989; López et al., 1986). Esta alteración puede ser una compactación del suelo, por lo que la tasa de infiltración sería más baja. Si el suelo tiene una costra u otra capa de baja permeabilidad en la superficie o cerca de ella la instalación del infiltrómetro la rompería por lo que las medidas de infiltración serían, en este caso, más elevadas.
- b) *Los flujos laterales afectan a las tasas de infiltración.* No se consigue por completo que el agua del cilindro interior se mueva sin extenderse lateralmente (Horton, 1940; Amerman, 1983; López et al., 1986; Youngs, 1987, 1991). Las causas de los flujos laterales pueden estar motivadas por las fuerzas capilares en el contacto entre la porción de suelo bajo el

- cilindro y el resto del suelo, por capas de reducida conductividad hidráulica en el perfil y por la altura de la columna de agua (Bouwer, 1982).
- c) En el caso de que se utilice un infiltrómetro doble es difícil *mantener un mismo nivel de agua en ambos cilindros* (Ponce, 1989; López et al., 1986).
 - d) *La inundación a la que se ve sometida el suelo no es representativa de las condiciones reales que se dan en la naturaleza, junto con el efecto de la columna de agua sobre el suelo.* Además, cuando se utiliza este método se prescinde, del efecto de compactación producido por el impacto de las gotas de lluvia (Horton, 1940; López et al., 1986; Ponce, 1989).
 - e) *Aplicación descuidada del agua en el cilindro* (Bouwer, 1982). Cuando se aplica agua dentro del cilindro se debe cuidar que las arcillas y demás partículas finas no asciendan en suspensión porque cuando se depositen puede crear una capa de baja permeabilidad en la superficie. El resultado es una tasa de infiltración final inferior a la real. Para minimizar este error se debe evitar el impacto directo del agua sobre la superficie del suelo dentro del cilindro, por ejemplo, utilizando una tapa invertida o cubriendo la superficie con un paño o capa de arena gruesa o grava fina o mediante algún dispositivo similar que proteja la superficie del suelo contra el impacto directo del flujo de agua.
 - f) *La calidad y composición química del agua, incluyendo sedimentos, usada en los ensayos, debería ser la misma que la que se infiltra en condiciones naturales* (Bouwer, 1982). Esto es porque la composición aniónica del agua afecta a la floculación-defloculación de la arcilla, de ahí que afecte a la estructura del suelo y a la conductividad hidráulica. Sedimentos y otras suspensiones sólidas en el agua de infiltración formarían capas de baja permeabilidad, lo que reduce las tasas de infiltración.
 - g) *La temperatura del agua de infiltración debería ser la misma que la del suelo* (Bouwer, 1982). Si el agua de infiltración está más fría que el suelo, se pierde el aire del agua de infiltración. Se conoce que hay una relación entre temperatura y capacidad de transmisión de suelos saturados y, en general, entre temperatura y flujos laminares. La temperatura actúa en el cambio del flujo laminar a través de un cambio de viscosidad del fluido, la tasa del flujo aumenta cuando la viscosidad decrece. Mientras la viscosidad del agua decrece cuando la temperatura aumenta, la viscosidad del aire sigue la ley inversa o aumenta con el aumento de la temperatura (Horton, 1940).
 - h) *Efecto biológico sobre la tasa de infiltración* (Horton, 1940; Bouwer, 1982). El crecimiento de bacterias y algas en la superficie del suelo

reduce las tasas de infiltración a través de la acumulación de biomasa y productos metabólicos (Bouwer, 1982). Horton (1940) considera que los factores biológicos son las principales causas del ciclo estacional de la capacidad de infiltración. Debido a este hecho se llega a apreciar un marcado incremento de la capacidad de infiltración durante la primavera, cuando la fauna del suelo llega a ser activa y, por el contrario, se produce un marcado decremento de la capacidad de infiltración cuando éstos bajan su actividad.

- i) Existen *otros problemas* como son la presencia de aire en el cilindro y bajo el mismo (Hills, 1970, citado por Martínez, 1996), influencia del diámetro de los cilindros, variabilidad de los suelos y heterogeneidad del perfil, macroporosidad y contracción-expansión de los suelos, debido a que influyen en el representatividad de los resultados (Youngs, 1991).

Pese a todas estas consideraciones sobre el método, su fiabilidad queda fuera de toda duda y prueba de ello son las reflexiones que hacen los autores consultados al respecto. Bouwer (1982), White (1985, citado por Youngs, 1987) y Youngs (1987) consideran el infiltrómetro de cilindro como un buen método para determinar las tasas de infiltración. Amerman (1983) reitera esta afirmación y alude al hecho de ser un método fácil de transportar, a lo que añade Porta (1999) el ser un método práctico y sencillo. Ponce (1989) llega todavía más lejos y considera que el infiltrómetro de cilindro tiene un alto valor de estimación.

3.3. Consideraciones sobre los infiltrómetros de cilindro simple y doble.

Uno de los problemas del método al que hemos aludido en el apartado anterior es el flujo lateral de agua, que provoca una sobreestimación de la tasa de infiltración vertical, lo cual depende, a su vez, del ratio entre el diámetro del cilindro (d) y la altura de la columna de agua (h_{cr}). Por ejemplo, para un cilindro de 30 cm. de diámetro (d) y con una columna de 30 cm. de agua, la capacidad de infiltración que resulta es 3,5 veces superior al valor real; si el cilindro tiene un diámetro de 5 cm., la capacidad de infiltración final se habría sobreestimado en una proporción once veces superior (Bouwer, 1982).

En este sentido, el objetivo real de un infiltrómetro de cilindro doble es disminuir el flujo lateral del agua en el cilindro interior, por lo que la infiltración en éste debería ser una medida real de la capacidad de infiltración vertical del suelo, suponiéndose que el cilindro exterior absorba las divergencias laterales. Es decir, la razón de ser del cilindro doble es que el cilindro interior mida la capacidad de infiltración real y el exterior impida que el agua del

cilindro interior, una vez que haya sobrepasado el tubo, se extienda lateralmente.

Pese a todo ello, numerosos estudios de campo han demostrado que hay tan sólo pequeñas diferencias de capacidad de infiltración entre el infiltrómetro de doble cilindro y el infiltrómetro de un cilindro, siendo éste último de gran tamaño.

Diversos autores consideran que el infiltrómetro de doble cilindro no es efectivo para reducir la divergencias laterales de agua, por lo que no se obtiene una medida de la verdadera tasa de infiltración vertical (Swartzendruber y Olson, 1961, citado por Bouwer, 1982). Estos autores consideran que el único medio fiable de medir la verdadera capacidad de infiltración vertical de un suelo es usando cilindros con un diámetro en el que el ratio h_{cr}/d sea cero. Con este ratio todas las tasas de infiltración dentro del cilindro serían verticales y no hay necesidad de utilizar el infiltrómetro de doble cilindro. En el modelo de Swartzendruber y Olson esta situación se consiguió con cilindros de diámetro de 1,2 m.

En este sentido, cabe destacar que, aumentar el tamaño del infiltrómetro es el único medio de reducir el efecto de la divergencia lateral del flujo a través del cilindro (Bouwer, 1982). Este mismo autor considera que los infiltrómetros de doble cilindro pueden ser efectivos sólo cuando hay una capa de baja permeabilidad en la superficie o en el perfil u otro aspecto del suelo que dificulte el contacto correcto entre el suelo y la pared del cilindro.

Youngs (1991) considera que aunque se utilice el infiltrómetro doble, el movimiento lateral del agua en los suelos no saturados se sigue produciendo, concretamente en el área comprendida entre el cilindro interior y exterior. Este agua no se puede cuantificar y es desestimada, por lo que se considera que el movimiento dentro del anillo interior es aproximadamente vertical.

Youngs (1987) considera, por otra parte, que el infiltrómetro de cilindro simple es un método adecuado para medir los cambios estructurales del suelo cerca de la superficie.

Cilindros dobles o cilindros simples de gran tamaño son igualmente poco manejables en el campo, sin embargo, si se utiliza un diámetro no inferior a 30 cm., como sugieren algunos autores, aunque tampoco muy superior, su manejo resulta más fácil, y el tiempo que se gana en operatividad se puede invertir en repetitividad de los ensayos, es decir, es posible hacer más repeticiones y este hecho es muy importante, debido a la variabilidad tan extraordinaria de las tasas de infiltración.

4. EXPERIENCIAS DE CAMPO Y ELECCIÓN DEL INFILTRÓMETRO DE CILINDRO.

4.1. Condiciones topográficas y edáficas idóneas para el método.

El método del infiltrómetro de cilindro exigiría, por sus características técnicas, unas condiciones topográficas y edáficas particulares.

En primer lugar, se acepta, por lo general, que la instalación del cilindro debe ser vertical al suelo porque lo que se busca es estimar la conductividad hidráulica vertical del mismo. Esta circunstancia provoca que en las situaciones topográficas de fuerte pendiente, para conservar la verticalidad, sea necesario introducir el cilindro en el suelo a gran profundidad por uno de sus laterales, hecho que redundaría negativamente sobre la conservación de la estructura del suelo, ya que a mayor profundidad de instalación, mayor riesgo se corre de deformarla, con lo cual estaríamos alterando los resultados.

En segundo lugar, las paredes del cilindro, ya sean de acero o metacrilato pueden sufrir algún tipo de daño físico al introducirlos en un suelo pedregoso. En este mismo sentido, parece obvio considerar que este método estaría restringido a suelos con una mínima profundidad, ya que en suelos de escasa potencia edáfica se corre el riesgo de dañar las paredes biseladas de nuestro cilindro.

Las condiciones ideales de instalación de los infiltrómetros de cilindro son, por tanto, suelos de escasa o nula pendiente y pedregosidad y con una profundidad mínima de desarrollo del perfil.

Fuera de toda premisa, los suelos a los que nos enfrentamos y de los que pretendemos calcular la infiltración se caracterizan por no reunir casi ninguna de las condiciones ideales. Los suelos que queremos caracterizar corresponden a un ámbito de montaña mediterránea, de características particulares por encontrarse en un estado de degradación muy acentuado. La mayoría de ellos se encuentran en zonas de muy elevada pendiente, como media oscila alrededor de un 45%, aunque ésta puede llegar en algunos puntos a superar el 60%. La pedregosidad de los suelos es generalmente muy elevada; mientras que, la profundidad de los perfiles, por lo general, es suficiente, aunque sólo localmente llega a reducirse considerablemente, comprometiendo la instalación de dichos instrumentos.

Pese al hecho de que no se cumplan las condiciones ideales del infiltrómetro de cilindro, no parece muy aventurado afirmar que es posible realizar algún tipo de modificación que permita adaptar este instrumento a las condiciones particulares de cada zona de estudio sin temor a desvirtuar los resultados.

En las próximas líneas adaptamos el método a las condiciones particulares de nuestros suelos siguiendo con un método totalmente empírico en el

que las experiencias de campo se convierten en la base del proceso cognoscitivo.

Con esto solucionamos el problema de la adaptación al medio, pero no es el único aspecto que debemos tener presentes. Nos quedan, para más adelante, las consideraciones que deberemos tomar para caracterizar la estacionalidad de la infiltración, aspecto que adquiere un especial significado en nuestro clima mediterráneo, caracterizado por unas precipitaciones con unas variabilidades intraanuales muy importantes.

4.2. Experiencias de campo con infiltrómetros de cilindro con diferentes características técnicas y en diferentes condiciones de humedad. Resultados obtenidos.

El objetivo es caracterizar las condiciones técnicas del método y la dimensión del infiltrómetro de cilindro más apropiado para nuestro ámbito de estudio. Los ensayos se han realizado bajo las mismas condiciones ambientales, cambiando sólo el estado de humedad del suelo, algunas condiciones de instalación y las dimensiones de los cilindros

Las dimensiones de los cilindros empleados en la experiencia son 15,2 - 21,4 - 30 y 40 cm.

Los ensayos experimentales se han llevado a cabo en las siguientes situaciones:

1. Suelos de elevada pendiente, humedad a la capacidad de campo y elevada pedregosidad.
2. Suelos de elevada pendiente, secos y elevada pedregosidad.

4.2.1. Primera serie de ensayos: suelos de elevada pendiente, humedad a la capacidad de campo y elevada pedregosidad.

La instalación de cilindros de 15,2 cm., tanto en sentido vertical como perpendicular al suelo, plantea escasa dificultad, pudiéndose llegar, en el caso de la instalación vertical, hasta 10 y 6 cm. de profundidad en la parte alta y baja de la ladera, respectivamente, sin alterar aparentemente la estructura.

Los cilindros de 21,4 cm. tampoco plantean ningún tipo de dificultad, ya sea en instalación vertical como perpendicular al suelo.

Con cilindros de 30 cm. y verticales al suelo, la instalación no es dificultosa, llegando hasta 14 y 5,5 cm. de profundidad en la parte alta y baja de la ladera, respectivamente, aunque se aprecia una alteración excesiva de la estructura del suelo en el interior del cilindro. Siguen sin tener dificultad los tipos de instalaciones perpendiculares al suelo, aunque hay que destacar que

con este sistema se obtiene una menor alteración de la estructura. La profundidad de instalación a 5 cm. de profundidad llega a dar, en numerosos casos, pérdidas laterales de agua, aunque si ésta se extiende hasta los 7 cm., los errores se reducen considerablemente.

Con cilindros de 40 cm., tanto verticales como perpendiculares al suelo, la instalación es más difícil. Muchos de los intentos resultaron infructuosos y los que parecían tener éxito se desaconsejan debido a que como ha de instalarse a mucha profundidad por la parte más alta del cilindro se destruye excesivamente la estructura del suelo. Se considera, por tanto, que en las condiciones de instalación citadas, el cilindro de 40 cm de diámetro es inviable.

En relación al tipo de carga. Con los cilindros de 15,2 cm. la boya de los ensayos con carga constante controla la infiltración en el suelo, desde el principio, sin necesidad de carga variable, lo mismo ocurre con cilindros de 21,7 y 30 cm. de diámetro.

4.2.2. Segunda serie de ensayos: suelos de elevada pendiente, secos y de elevada pedregosidad.

La intalación de cilindros de 15,2 cm. y en sentido perpendicular al suelo entraña gran dificultad. La mayoría de los procesos de instalación sólo tuvieron éxito después de varios intentos fallidos, en los que se apreció claramente una elevada alteración de la estructura interior del cilindro. Cuando las condiciones son mejores y no se encuentra ningún obstáculo en forma de piedra en el trayecto del cilindro, éste llega a clavarse con facilidad hasta 5 cm. Se provoca, no obstante, algo de alteración interior, aunque no excesiva.

Tanto con cilindros de 21,4 como de 30 cm. y perpendiculares al suelo es difícil alcanzar profundidades de instalación de 5 cm. Esta difilcultad se reduce si la instalación se hace en el sentido vertical del suelo. En este último caso, la estructura interior se altera algo por las vibraciones, aunque no excesivamente, y las pérdidas laterales de agua son casi generalizadas.

Con respecto a las consideraciones sobre la utilización de los procedimientos de carga variable o carga constante, se observa una elevada infiltración de agua al principio de los ensayos, no pudiendo ser controlada por la boya. Sería aconsejable, por tanto, usar el método de carga variable en estos momentos y cambiar al método de la carga constante cuando la boya controle la infiltración.

4.2.3. Consideraciones técnicas sobre el método.

La profundidad de instalación que aconsejan Youngs (1987) y Ponce (1989) entre 2 y 5 cm., llevadas por nosotros hasta los 5 cm., llega a presentar pérdidas

laterales de agua, no de forma generalizada, aunque sí dignas de tener en cuenta. Las experiencias llevadas a cabo en este trabajo nos demuestran que llevar la instalación hasta una profundidad aproximada de 7 cm. reduce considerablemente los flujos laterales, por lo que adoptamos esta medida como la profundidad de instalación mínima aconsejable. Se consigue, además, no alterar excesivamente la estructura del suelo, hecho que podría ocurrir si empleamos una profundidad mayor, lo cual tendría graves consecuencias sobre la representatividad o fiabilidad de los resultados. Con este resultado nos acercamos al método sugerido por Knoll et al. (1959) en el que también se utiliza esta profundidad de instalación.

El método es posible utilizarlo en laderas de elevada pendiente. Pese a que la instalación vertical es la más aconsejable, no es la más apropiada para nuestras condiciones particulares, por lo que se aconseja la instalación perpendicular a la pendiente, principalmente por razones de conservación de la estructura.

Debido a que los procedimientos realizados con carga constante son más adecuados y como éstos sólo se han conseguido en condiciones de humedad a la CC, nos inclinamos por esta situación. Además, bajo estas condiciones se consigue una menor alteración de la estructura.

La elección de un tamaño adecuado para nuestros cilindros es una tarea muy delicada debido a que es uno de los factores de los que depende la variabilidad de los resultados. Debemos aclarar que la infiltración de los suelos es un fenómeno que se caracteriza por una gran variabilidad, tanto temporal como espacial, por razones que se asocian a los factores que influyen sobre la infiltración, todos ellos estudiados por numerosos autores (Horton, 1940; Lopez y Mintegui, 1986; Porta, 1999; Fuentes, 1994) y cuya descripción obviamos para destacar, tan sólo, aquellos que de forma especial inciden sobre la variabilidad. Entre ellos, podemos destacar los siguientes (AMERMAN, 1983; YOUNGS, 1983, 1987):

- a) Diferencias intrínsecas entre suelos (características físico-químicas de los suelos) y otras diferencias, como las inclusiones de diferentes materiales en los horizontes.
- b) Variabilidad de los factores ambientales.
- c) Influencias culturales del hombre: agricultura, ganadería, etc.
- d) Actividades de flora y fauna.
- e) Cambios usuales en la distribución del gradiente hidráulico dentro del sistema de flujo del agua en el suelo.
- f) Diferentes dimensiones del diámetro de los cilindros.

Si se consideran que los primeros factores dentro de la zona de nuestro estudio son homogéneos, debido a que se han delimitado el espacio en unida-

des ambientales homogéneas, sólo nos queda el factor diámetro del cilindro como variable a controlar. En este sentido, hay que destacar que el tamaño debe ser lo más grande posible, como veremos más adelante. Como ya hemos podido observar en los ensayos de campo, el cilindro de 40 cm. no es aconsejable por los problemas que se derivan de su instalación. Los que han dado mejores resultados han sido los cilindros de 15,2 - 21,4 y 30 cm., de todos ellos elegimos los 2 últimos, por su mayor tamaño, para realizar un ensayo experimental con el objetivo de caracterizar la variabilidad de los resultados y estimar la precisión de las estimaciones en función del tamaño de los cilindros, destacando, por tanto, la importancia del diámetro de estos instrumentos.

4.3. Elección del tamaño de cilindro más apropiado.

La infiltración es un fenómeno que depende de todos los factores enumerados anteriormente, sin embargo, debemos considerar que existe una variabilidad inherente en los propios resultados de conductividad hidráulica de suelos.

El transporte de agua en el suelo tiene una elevada heterogeneidad intrínseca. Desde una óptica de estudio a microescala habría que considerar, para entender esta heterogeneidad de resultados, la porosidad y particularmente la interconexión de canales a través de los cuales pasa el fluido, debido a que la conductividad hidráulica es el resultado de flujos entre los canales individuales de las partículas del suelo. La interconexión de canales es tan importantes como los propios canales considerados individualmente (Youngs, 1983).

El volumen de muestreo tiene, en este sentido, una gran importancia. Un muestreo de volumen muy pequeño da una variación elevada en el contenido volumétrico del agua; mientras que, un muestreo de gran volumen reduce el registro de los resultados, hasta que se muestrea un volumen suficiente, a partir del cual se obtiene prácticamente el mismo resultado (Youngs, 1983).

Debido a la variabilidad espacial del suelo y de sus propiedades se debe hacer un *número mínimo de ensayos de infiltración* para obtener un valor preciso de la tasa de infiltración. Este hecho exige realizar un nº elevado de repeticiones para tener resultados fidedignos. Esta variabilidad se suele estimar mediante varianzas, límites de confianza y otros aspectos estadísticos. Incluso para el caso teórico de un suelo uniforme, sería necesario repetir los ensayos porque pueden existir causas de error debido a las técnicas de medida (Bouwer, 1982). En este sentido, Porta (1999) señala que, debido a la gran variabilidad espacial del suelo, las medidas de infiltración deben realizarse por triplicado, en emplazamientos que se encuentren a una distancia inferior a 10 m. y si es posible cerca de una calicata, para disponer de información acerca del suelo.

Existen pocos estudios sistemáticos sobre variabilidad espacial de la capacidad de infiltración. Sharma et al. (1980), citado por Bouwer (1982) realiza

una investigación sobre la variabilidad de la infiltración y encuentran que es necesario realizar 20 ensayos para obtener una desviación estandar por debajo del 10%. Aldabagh y Beer (1971), citado por Bouwer (1982), concluye en sus trabajos que es necesario realizar 11 ensayos para obtener un valor de la conductividad hidráulica vertical dentro de un promedio del 20% del valor real.

El diámetro del cilindro es uno de los factores citados que influyen sobre la infiltración. La mayor parte de los autores insisten sobre la importancia de este hecho. La idea es que esta medida debe ser grande para que el cilindro encierre el mayor volumen posible de suelo. Se sugiere que éste debe ser lo más grande posible para obtener una medida fiable de la tasa vertical de infiltración, lo cual se refleja en una reducción de la variabilidad de resultados, así con infiltrómetros de diámetro elevado se obtienen valores más uniformes que con infiltrómetros de diámetro pequeño (Bouwer, 1982).

Bouwer (1982) y Youngs (1987) demuestran la importancia de hacer las mediciones con infiltrómetro de cilindro lo suficientemente grandes como para abarcar un área representativa de la superficie del suelo. Este hecho es debido a que la infiltración está marcadamente influenciada por los poros más grandes y los canales estructurales que pueden existir a una escala significativa. Estos autores sugieren el uso de un cilindro de un tamaño aproximado de 30 cm. para hacer un muestreo representativo del área. El primero de los autores considera, además, que los infiltrómetros de diámetro superiores a 1 m. son mejores que aquellos con diámetro más pequeño. Con cilindros de diámetro más pequeño el flujo a través de los macroporos está excluido, observándose, además, una amplia dispersión de resultados, lo cual es el resultado de la heterogeneidad de la macroestructura entre agregados que pasa a ser inadvertida cuando se usan cilindros más grandes.

Existe, por tanto, una estrecha dependencia entre infiltración y diámetro del cilindro. La infiltración se incrementa a medida que decrece el diámetro, al igual que la tasa estable de infiltración es más elevada en los cilindros de diámetro más pequeño (Youngs, 1987).

Llegados a esta altura del trabajo, se plantea la necesidad de valorar la importancia del tamaño de los cilindros con el objetivo de elegir una dimensión concreta.

El trabajo de campo ha consistido en la realización de 20 ensayos de infiltración con dos infiltrómetros de cilindro de diferente diámetro, uno de 21,4 cm. y otro de 30 cm.

La valoración de la precisión se realiza utilizando la teoría de la estimación, la cual se desarrolla en dos direcciones (Rodríguez, 1993):

- a) Estimación por puntos y sus respectivos errores de muestreo. Esta estimación se realiza a través de la media y la varianza corregida.

- b) Estimación por intervalos. Se utiliza un intervalo de valores, los cuales definen los límites de confianza de la media poblacional. Para obtener una mayor precisión en las estimaciones se acompaña el coeficiente de variación de la estimación.

Para conocer las expresiones matemáticas de estos parámetros remitirse a la bibliografía citada. Los resultados obtenidos se esquematizan en el cuadro 1 y se representan en los gráficos 1 a 4.

El área donde se han llevado a cabo los ensayos corresponde con una pequeña parcela de terreno de 250 m² de superficie. La unidad muestral elegida, desde el punto de vista ambiental, es homogénea y se caracteriza, por una pendiente media del 45%, una orientación NE., una litología compuesta por filitas paleozoicas del zócalo maláguide y un suelo compuesto por una asociación de cambisoles eútricos y luvisoles crómicos con inclusiones de leptosoles eútricos. Es un área sometida a pastoreo, caracterizándose por una carga ganadera acumulada y una frecuencia de pastoreo anual elevadas. Dicha unidad muestral se ha dividido en 10 parcelas de 25 m², y en cada una de ellas se han realizado alternativamente los ensayos con cada uno de los cilindros, realizándose un total de 2 ensayos de infiltración por cada subparcela.

Cuadro 1

Resultados estadísticos de las series de ensayos con cilindros de 21,4 y 30 cm Ø

Dimensiones de los cilindros	n	\bar{x}	\hat{s}^2	e	CV(e)
21,4 cm. Ø	10	619,94	28423,43	104,49	16,85
30 cm. Ø	10	704,01	10095,91	62,27	8,84

n = tamaño de la muestra

\bar{x} = media muestral.

\hat{s}^2 = varianza corregida.

e = error de la estimación para un intervalo de confianza del 95%.

CV (e) = coeficiente de variación de la estimación.

En los gráficos 1 y 2 se representan los ensayos de infiltración (en mm/hora) de cada uno de los cilindros. Dichos ensayos se llevaron a cabo durante un período de tiempo de 30 minutos, lo cual se ha considerado suficiente como para apreciar una estabilización de la infiltración. Como se puede observar en los gráficos, la influencia del tamaño de los cilindros se deja sentir en los resultados obtenidos. La capacidad de infiltración inicial registra valores con recorridos muy diferentes, con el cilindro de 21,4 cm. se obtiene un menor recorrido que con el de 30 cm., ya que mientras los resultados del primero oscilan entre 1004,5 y 522,2 mm/hr⁻¹, los del segundo el recorrido se eleva y alcanza

valores comprendidos entre 1424,5 y 356,1 mm/hr⁻¹. Por el contrario, la capacidad de infiltración final estable que es, por otra parte, la que más se utiliza para caracterizar la infiltración de un suelo, registra un menor recorrido entre los resultados obtenidos con el infiltrómetro de 30 cm., ya que los valores oscilan entre 195,8 y 836,9 mm/hr⁻¹; mientras que, con el de 21,4 cm. se obtienen resultados que varían entre 121,8 y 853,06 mm/hr⁻¹.

La valoración de la precisión de la capacidad de infiltración con un tamaño creciente de muestras, se realiza mediante la representación gráfica de los parámetros de la teoría de la estimación, por una parte, la varianza corregida y el coeficiente de variación de la estimación y, por otra, el error de estimación para un intervalo de confianza del 95%.

En los gráficos 3.1 y 4.1 se representan los resultados de la varianza corregida. Los valores más elevados se registran en la serie del cilindro de 21,4 cm., para n=10, la varianza asciende a 28.423,4; mientras que, para el mismo tamaño muestral, es de 10.095,9 en la serie de 30 cm. El coeficiente de determinación (R²) de la recta de regresión en ambos gráficos no es muy elevado, aunque se aprecia un mayor ajuste en el cilindro de 30 cm.

En los gráficos 3.2 y 4.2 se representan el coeficiente de variación de la estimación de ambas series de ensayos. El coeficiente de determinación es ya muy ajustado, siendo, el de la serie de 30 cm. ligeramente superior. Esta medida de dispersión nos permite seguir corroborando que existe una mayor variabilidad en los resultados obtenidos con el cilindro de 21,4 cm. El coeficiente de variación de la estimación para n = 10 es del 16,8% en el cilindro de 21,4 cm., frente al 8,8% en el de 30 cm.

Los valores del error de la estimación de ambas series, representados en los gráficos 3.3 y 4.3, subrayan el menor error que se obtiene con el cilindro de 30 cm. Para n = 10, el error de la estimación es de 62,27, lo que equivale a decir que los límites de confianza para la media poblacional se encuentran entre $704,01 \pm 62,27$, es decir, entre 766,28 y 641,73. Para n = 10, en la serie de 21,4 cm., el error de la estimación es significativamente más elevado, 104,49, siendo, en este caso, los límites de confianza para la media poblacional de $619,94 \pm 104,49$, es decir, se encuentran entre 724,44 y 515,45. El coeficiente de determinación, en ambas series, es muy ajustado, aunque sigue siendo ligeramente superior en la de 30 cm.

5. CONCLUSIONES.

Las experiencias de campo realizadas con el objetivo de concretar las características técnicas del infiltrómetro de cilindro han sido muy adecuadas. Las características técnicas del infiltrómetro de cilindro elegido son las siguientes.

Se trata de un cilindro cuyo diámetro interior es de 30 cm., debido a que es el que ha mostrado un mejor comportamiento al reducir la variabilidad de los resultados y dar un error de estimación de la tasa de infiltración más bajo, confirmándonos, por tanto, las experiencias de Bouwer (1982) y Youngs (1987) al considerar los cilindros de mayor tamaño como los más adecuados para obtener valores representativos de la realidad. Además, esta elección adquiere una nueva razón de peso si consideramos, por una parte, que, aumentar el tamaño del cilindro reduce los flujos laterales de agua desde el cilindro hacia el exterior, por lo que es más conveniente el cilindro de 30 cm. que el de 21,4 cm.; por otra parte, esos 30 cm. corresponde con el tamaño mínimo que los citados autores aconsejan.

La reflexión que podemos hacer en cuanto a la dimensión del cilindro que hemos elegido es que, aunque se considere que cuanto mayor sea el diámetro del cilindro mejor será la estimación, por razones de manejo se debe buscar un equilibrio adecuado entre efectividad y maniobrabilidad. Instalar cilindros de gran diámetro en zonas de elevada pendiente puede llegar a ser poco operativo, por lo que se debe encontrar el tamaño ideal que permita, por una parte, obtener resultados fiables y, por otra, un manejo apropiado y no engorroso en el campo.

El resto de las características técnicas del método son una profundidad de instalación de 7 cm. y en el sentido perpendicular a la pendiente. El estado de humedad del suelo en el que vamos a realizar nuestro trabajo es a la capacidad de campo, porque en estas circunstancias se consigue, por una parte, alterar menos la estructura y, por otra, la posibilidad de utilizar el procedimiento de carga de agua constante. Nuevamente, las experiencias de campo, acompañadas por criterios de efectividad, han sido las razones en las que ha girado todo el proceso de selección.

BIBLIOGRAFÍA.

- ABRAHAMSON, A.D. y PARSONS, A.J. (1991): "Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, Southern Arizona". *Journal of Hydrology*, 122, 49-59.
- AMERMAN, C.R. (1983): "Infiltration measurement" *Proc. Conf. On Advances in Infiltration*. Chicago. ASAE Publication, 201-214.
- BOIX, C et al. (1996): "Algunos ejemplos de relación entre agregación, capacidad de infiltración y erosión en suelos mediterráneos". *IV Reunión de Geomorfología*, SEG, O Castro (A Coruña), 573-585.
- BOUWER, H. (1986): "Intake rate: cylinder infiltrometer". PAGE, A.L.; MILLER, R.H. y KEENEY, D.R. (ed.): *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. Agronomy 9. Madison. Wisconsin, USA, 825-844.

- CERDÀ I COLINCHES, A. (1995): *Factores y variaciones espacio temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Ed. Geoforma, Logroño.
- GIFFORD, G.F. y HAWKINS, R.H. (1978): "Hidrologic impact of grazing on infiltration: a critical review". *Water Resources Research*, 14-2, 305-313.
- HORTON, R.E. (1940): "An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity". *Proc. Soil Sci. Am.*, 5, 399-417.
- KEMPER, W.D. y ROSENAU, R.C. (1986): "Aggregate stability and size distribution".
- PAGE, A.L.; MILLER, R.H. y KEENEY, D.R. (ed.): *Methods of Soil Analysis. Part I. Physical and Mineralogical Methods*. Second Edition. Agronomy 9. Madison. Wisconsin, USA, 425-442.
- KNOLL, G. y HOPKINS, H.H. (1959): "Effects of grazing and trampling upon certain soil properties". *Trans. Kans. Acad. Sci.*, 62, 221-231.
- LÓPEZ CÁDENAS DELLANO, F. y MINTEGUI AGUIRRE, J.A. (1986): *Hidrología de superficie (1ª parte)*. Fundación Conde del Valle de Salazar. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid.
- MARTINEZ BELTRÁN, J. (1986): *Drenaje agrícola. Vol. I*. MAPA, Manual Técnico nº 5. Madrid.
- MARTINEZ FERNÁNDEZ, J. (1992): *Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. Cuenca de la Rambla de Perea (Murcia)*. Universidad de Murcia.
- MARTINEZ FERNANDEZ, J. y LOPEZ BERMÚDEZ, F. (1996): *Métodos para el estudio de las propiedades hídricas de suelos y formaciones superficiales*. Cuaderno Técnico de la SEG nº 9. Geoforma ediciones.
- PONCE, V.M. (1989): *Engineering hydrology. Principles and practices*. Prentice Hall. New Jersey.
- PORTA CASANELLAS, J. et al. (1999): *Edafología. Para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. 2ª edición. Madrid.
- RODRIGUEZ OSUNA, J. (1993): *Métodos de muestreo*. CIS, colección Cuadernos Metodológicos, nº 1. Madrid.
- TOUMA, J. y ALBERGEL, J. (1992): «Determining soil hidrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments: a comparison». *Journal of hidrology*, 135, 73-86.
- VIVAR SANZ, A. et al. (1993): "Aplicación del modelo de Green-Ampt para infiltrometría de doble anillo con carga variable sobre suelos alterados por labores de preparación para la repoblación". *Actas XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo: El estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación*. MAPA. SECS. Salamanca, 142-150.
- YOUNGS, E.G. (1983): "Soil physical theory and heterogeneity". *Agricultural Water Management*, 6, 145-159.
- YOUNGS, E.G. (1987): "Estimating hydraulic conductivity values from ring infiltrometer measurements". *J. Soil Sci.*, 38, 623-632.
- YOUNG, E.G. (1991): «Infiltration measurements. A review». *Hidrological processes*, vol. 5, 309-320.

Gráfico 1.
Curvas de infiltración (cilindro 21,4 cms.)

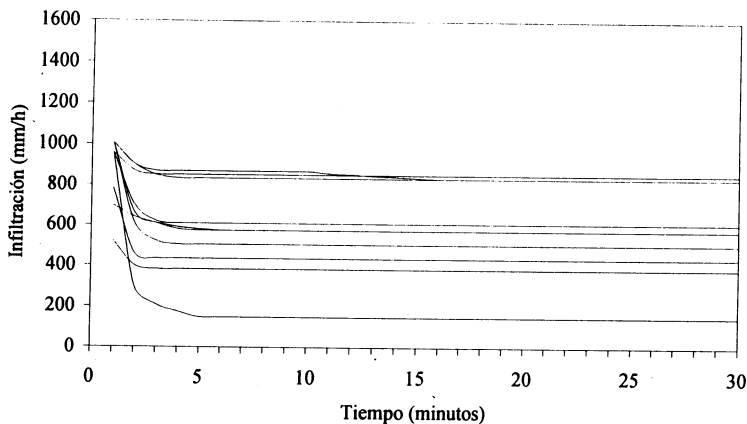


Gráfico 2.
Curvas de infiltración (cilindro 30 cms.)

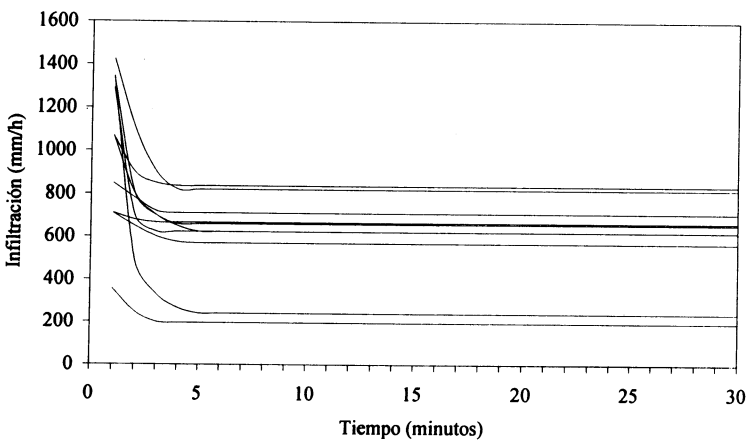


Gráfico 3.1.
Análisis de la varianza corregida (cilindro 21,4 cms.)

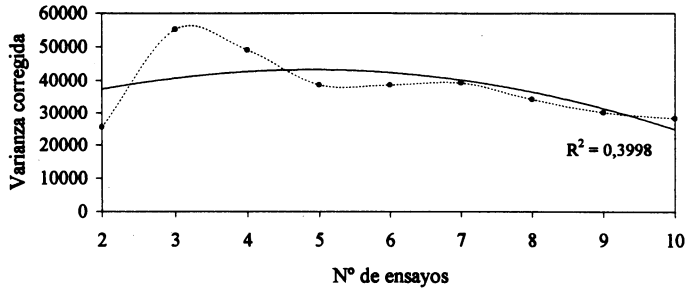


Gráfico 3.2.
Análisis del coeficiente de variación de la estimación (cilindro 21,4 cms.)

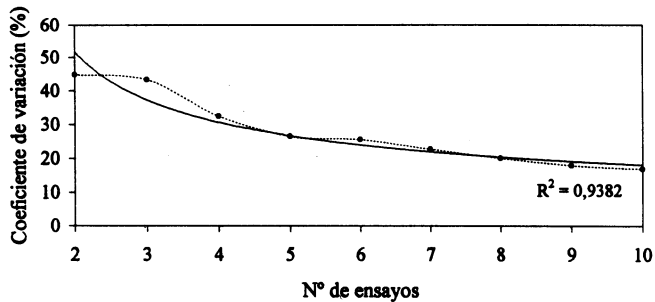


Gráfico 3.3.
Error de estimación para un intervalo de confianza del 95%
(cilindro 21,4 cms.)

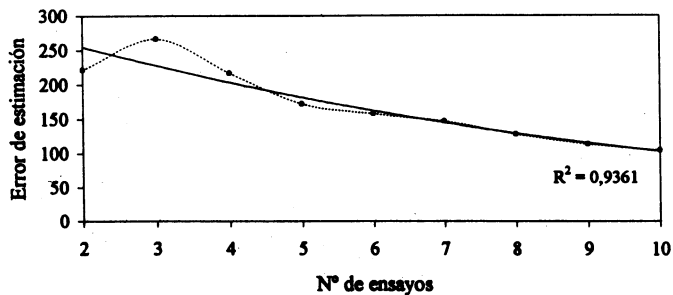


Gráfico 4.1.
Análisis de la varianza corregida (cilindro 30 cms.)

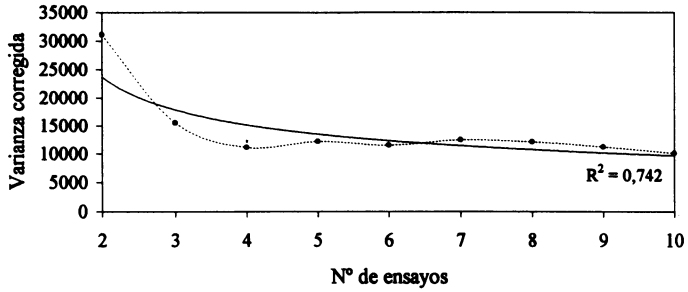


Gráfico 4.2.
Análisis del coeficiente de variación de la estimación (cilindro 30 cms.)

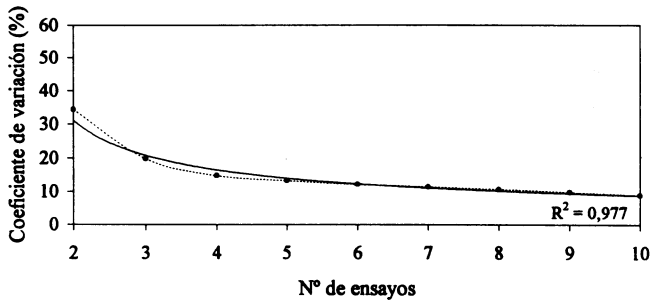


Gráfico 4.3.
Error de estimación para un intervalo de confianza del 95% (cilindro 30 cms.)

