

MASTER INVESTIGACIÓN
EN INGENIERÍA PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MASTER

Los procesos de infiltración en una restauración forestal en la
cuenca alta del río Corneja, Ávila.



Universidad de Valladolid

Alumno: Carlos Jiménez Muñoz

Tutor: Joaquín Navarro Hevia

Escuela Técnica Superior de

Ingenierías agrarias

Septiembre, 2012



ÍNDICE

RESUMEN	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MATERIAL Y MÉTODOS	7
2.1. ZONA DE ESTUDIO.....	7
2.2. ENSAYO PILOTO	12
2.3. ENSAYOS DEFINITIVOS	13
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	19
3.1. ENSAYOS DEFINITIVOS	19
3.2. RESULTADOS MEDIOS PARA CADA ZONA.....	44
3.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS ZONAS OBJETO DE ANÁLISIS.	54
3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	58
3.5. COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS PARA LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN A LO LARGO DEL ENSAYO.	60
3.6. COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS PARA LA INFILTRACIÓN ACUMULADA A LO LARGO DEL ENSAYO.....	63
3.7. AJUSTE DE LOS RESULTADOS AL MODELO DE HORTON.	65
4. CONCLUSIONES	73
5. BIBLIOGRAFÍA	74
AGRADECIMIENTOS	76



RESUMEN

El papel que desempeña la vegetación, principalmente los bosques, en la prevención y corrección del fenómeno torrencial, deriva de sus efectos sobre la infiltración y, por tanto, la escorrentía y de su influencia en el control de la erosión hídrica.

En el presente trabajo, se ha evaluado la influencia que tiene la cubierta vegetal sobre uno de los aspectos más importantes del ciclo hidrológico, la infiltración. La zona elegida para llevar a cabo el trabajo ha sido una restauración forestal situada en la cuenca alta del río Corneja, en la provincia de Ávila. Esta restauración, a pesar de ser una de las más importantes de su época, apenas ha sido estudiada y es complicado encontrar bibliografía que haga referencia a ella.

Para llevar a cabo el estudio, se ha seguido un método totalmente empírico en el que las experiencias de campo han sido la base del proceso. Se han realizado doce ensayos de cuatro horas de duración en tres zonas. Estas zonas se encuentran dentro de un mismo área de aproximadamente 400 m², de este modo las características climáticas, edáficas y orográficas serán similares. No obstante, entre las tres zonas existen diferencias notables que permitirán establecer comparaciones entre las mismas. La primera zona se trata de un área arbolada de *Pinus halepensis* y *Cupressus arizonica* con poco sotobosque. La segunda zona es una superficie degradada con poca vegetación, únicamente algunos ejemplares dispersos de *Cistus clusii*, *Cistus laurifolius* y *Lavandula stoechas* y, finalmente, la tercera zona es una cuña de sedimentación de un dique de gaviones.

Los ensayos han consistido en medir la tasa de infiltración utilizando un infiltrómetro de acero de 28,3 cm de diámetro, biselado en su extremo inferior. Las velocidades de infiltración obtenidas no han diferido significativamente de unas zonas a otras, sin embargo, teniendo en cuenta la interacción entre el tiempo y la zona, sí se pueden encontrar diferencias que demuestran la importancia de una cubierta vegetal en buen estado para mejorar la infiltración.



1. INTRODUCCIÓN

El estudio del comportamiento del agua en las laderas, así como su relación con los suelos y la vegetación y las consecuencias erosivas de los procesos hídricos, ha suscitado un gran interés desde el campo de la investigación científica. La infiltración es, además de uno de los componentes principales del ciclo hidrológico, el motor de la vida para la mayor parte de los organismos que habitan en un ecosistema terrestre. La infiltración constituye prácticamente el único camino por el cual el ecosistema retiene y acumula el agua de las precipitaciones que le llegan.

En los procesos de desertificación, la infiltración es probablemente el factor del ciclo hidrológico más influyente ya que la causa primaria y principal de la desertificación es una insuficiente infiltración (Martínez de Azagra *et al*, 1996). Además, en un sentido hidrológico estricto, la infiltración es el proceso determinante de la transformación de lluvia en escorrentía, como consecuencia del control que ejerce sobre los procesos superficiales y subsuperficiales en las cuencas de drenaje (Bras, 1990). La formación de escorrentías puede llevar consigo ciertos riesgos como las avenidas o el arrastre de sedimentos, que pueden ocasionar pérdidas materiales e, incluso, humanas. Por estos motivos, es fundamental el estudio de los procesos de infiltración.

La desertificación implica pérdida de cubierta vegetal que, a su vez, desempeña un papel fundamental en el control de la erosión hídrica. En primer lugar, protege al suelo del impacto de las gotas de lluvia mediante la interceptación de éstas. En segundo lugar, aumenta el poder de infiltración del suelo. En tercer lugar, frena la escorrentía superficial disminuyendo la velocidad que alcanzaría el agua en un terreno desnudo y, por último, mantiene el perfil edáfico por debajo del punto de saturación debido al proceso de transpiración. Además, la cubierta vegetal aporta otros beneficios menos intuitivos como la modificación de los parámetros microclimáticos, regulando la temperatura y la humedad del suelo o la captación de precipitaciones horizontales y ocultas, que supone un aporte hídrico fundamental en zonas áridas.

Las laderas de Tórtoles en los años 60 estaban totalmente degradadas y apenas sostenían vegetación, por lo que se decidió actuar y se proyectó una restauración hidrológico-forestal que fue llevada a cabo un tiempo después. En la actualidad, en el lugar que ocupaban los badlands, aparece un bosque pluriespecífico en un estado de conservación más que aceptable que controla la erosión hídrica y favorece la infiltración. No obstante, aún quedan pequeñas áreas degradadas por la erosión en las que o bien no se plantaron árboles o bien se transformaron en marras por diversos motivos. En lo que se refiere a las infraestructuras, en esta restauración hay más de



cien diques de gaviones que han cumplido su cometido durante más de cuarenta años. En la figura 1 se puede observar una de las laderas repobladas.



Figura 1. Restauración hidrológico-forestal de Tórtoles

En el presente trabajo se pretende comparar la infiltración en tres zonas de la restauración, una zona arbolada, una zona degradada y la cuña de sedimentación de un dique. Estas zonas se encuentran dentro de un mismo área de aproximadamente 400 m², de este modo las características climáticas, edáficas y orográficas serán similares. No obstante, entre las tres zonas existen diferencias notables que permitirán establecer comparaciones entre las mismas. La primera zona se trata de un área arbolada de *Pinus halepensis* y algún pie disperso de *Cupressus arizonica*, con poco sotobosque. La segunda zona es una superficie degradada con poca vegetación, únicamente algunos ejemplares dispersos de *Cistus clusii*, *Cistus laurifolius* y *Lavandula stoechas* y, finalmente, la tercera zona es una cuña de sedimentación de un dique de gaviones.



Dentro de los procesos de infiltración hay numerosos conceptos relacionados con el movimiento del agua en el suelo que no deben confundirse. En primer lugar, es necesario conocer el significado exacto de infiltración, que es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de pequeñas aberturas o poros en sentido descendente desde la superficie (Whittow, 1984). Además, es conveniente comprender el significado de dos conceptos asociados a este proceso:

- Tasa de infiltración: volumen de agua penetrado por unidad de tiempo (Douglas, 1977; citado por Cerdá, 1995).
- La capacidad de infiltración: máxima tasa posible de infiltración en un momento determinado (Gregory y Walling, 1973; Kirkby, 1978; Knapp, 1978 citados por Cerdá, 1995).

Los modelos que intentan predecir el comportamiento del agua en los procesos de infiltración son numerosos, entre ellos podemos destacar Green-Ampt (1911), Kostiakov (1932), Horton (1940), Holtan (1961) o Ahuja (1983). De todos ellos, en el presente trabajo se va a utilizar el modelo de Horton por resultar muy intuitivo y sencillo. Además, se ajusta de un modo aceptable a los resultados experimentales de muchos suelos.

El modelo de Horton (1940) 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 periodo de lluvia suficientemente largo. La expresión de Horton es la siguiente:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t}$$

Los parámetros que aparecen en este modelo y que serán claves en el presente artículo son los siguientes:

- 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 las precipitaciones anteriores (Horton, 1940).
- Tasa de infiltración final estable o Velocidad de infiltración básica o final (f_c): es la tasa constante 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.
- Exponente de decrecimiento: es un parámetro del modelo que se ha de ajustar a los datos experimentales (k).
- Tiempo transcurrido desde el inicio del ensayo de la precipitación (t).



Existen numerosos métodos para calcular la capacidad de infiltración de un suelo, así como la tasa o velocidad de infiltración, en este caso se ha optado por un método de campo para calcular los valores de infiltración *in situ*. En este trabajo, a pesar de no ser conceptos con el mismo significado, se puede considerar la tasa de infiltración equivalente a la capacidad de infiltración ya que durante los ensayos siempre habrá agua en exceso.

En lo referente a los trabajos de campo, existen dos formas de estudiar la infiltración en una zona. Por una parte, están los simuladores de lluvias utilizados en numerosos ensayos y, por otra, los infiltrómetros de cilindro.

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). No obstante, hay autores como Gifford *et al.* (1978) que considera que se obtienen mejores resultados con el simulador de lluvia que con los cilindros, sin embargo, recomienda el infiltrómetro de cilindro por ser un método más simple, rápido y barato, aunque suministra resultados menos fiables. Finalmente, por estos motivos, se decidió trabajar con infiltrómetros de cilindro.

Teniendo en cuenta todo lo anterior, los objetivos fundamentales que se intentan alcanzar en el presente trabajo son:

- Encontrar diferencias en la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada entre tres zonas de la restauración.
- Ajustar los datos experimentales al modelo de Horton y de este modo poder predecir la infiltración para este tipo de suelos en un instante dado.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. ZONA DE ESTUDIO

2.1.1. Situación geográfica

La restauración forestal en la que se han llevado a cabo los ensayos de infiltración se localiza en el término municipal de Tórtoles, en la provincia de Ávila. Esta localidad (figura 3) se encuentra situada en las estribaciones de la Sierra de Villanueva, una parte del Sistema Central, más concretamente en la parte alta del Valle del Corneja, como puede verse en la figura 2.

La restauración ocupa una superficie bastante considerable, sin embargo, la zona de estudio es una superficie de apenas 400 m² que está situada a aproximadamente 1.100 m de Tórtoles a una altitud de 1.360 m sobre el nivel del mar.

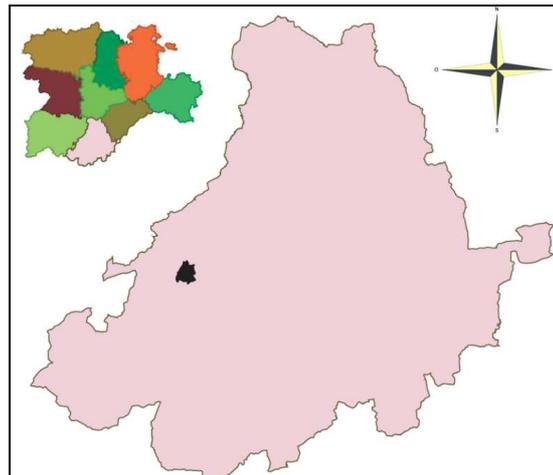


Figura 2. Localización.



Figura 3. Panorámica de Tórtoles.

La distancia desde Ávila hasta la zona de estudio por carretera y, posteriormente, por camino es de aproximadamente 60 km. La forma más sencilla de acceso es a través de la carretera AV-P-639 que une la carretera N-110 con Tórtoles y Cabezas de Bonilla.



Figura 4. Zona de estudio.

La superficie de estudio, que aparece en las figuras 4 y 5, está dividida en tres áreas. La primera es una zona arbolada de *Pinus halepensis* y algún pie disperso de *Cupressus arizonica*, con poco sotobosque. La segunda zona es una superficie degradada con poca vegetación, únicamente algunos ejemplares dispersos de *Cistus clusii*, *Cistus laurifolius* y *Lavandula stoechas* y, finalmente, la tercera zona es la cuña de sedimentación de un dique de gaviones.

Este lugar aparece representado a escala 1:50.000 en la hoja nº 529 (Santa María del Berrocal) del Instituto Geográfico Nacional, más concretamente en el cuarto MTN25 nº 4 (Malpartida de Corneja) a escala 1:25.000. Para ubicar geográficamente el punto central de la zona de estudio es conveniente identificarlo con las siguientes coordenadas UTM en el Datum ED50:

- Coordenada X: 308.063
- Coordenada Y: 4.493.386



Figura 5. Vista aérea de la zona de estudio. Fuente: SIGPAC.

2.1.2. Geología

La restauración forestal de Tórtoles se encuentra situada sobre dos áreas geológicamente diferentes. En la mitad oeste, se asienta sobre una zona de granitoides originados durante la orogenia herciniana a finales del Paleozoico hace aproximadamente 300 millones de años. Por su parte, la mitad este se asienta sobre materiales mucho más modernos, coluviones, esto es, arenas y limos con cantos y bloques.

2.1.3. Edafología

Según el mapa de suelos de España proporcionado por el sistema de información geográfica "SIGmapa" presente en la página web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, el suelo objeto de estudio tiene la siguiente clasificación:

- Orden: Entisol
- Suborden: ORTHENT
- Grupo1: XERORTHENT
- Grupo2: DYSTROXEREPT

En la clasificación del Soil Taxonomy, un Entisol se define como el tipo de suelo que no muestra desarrollo definido de perfiles. Un Entisol no tiene "horizontes", y la mayoría constan básicamente de su material parental regolítico inalterado.

2.1.4. Climatología

La zona de estudio presenta un marcado carácter mediterráneo con máximos de precipitaciones registrados en primavera y otoño y una estación seca durante el verano (figura 6). Posee un índice de Lang de $IL = 32,80$ (zona árida). La clasificación fitoclimática de Allué lo sitúa en la zona VI (IV)₁ (mediterráneo nemoral) y, finalmente, según Rivas Martínez, el índice de termicidad es de $IT=159$ (supramediterráneo medio), con un período de actividad vegetativa de abril a octubre (7 meses), y un ombroclima subhúmedo.

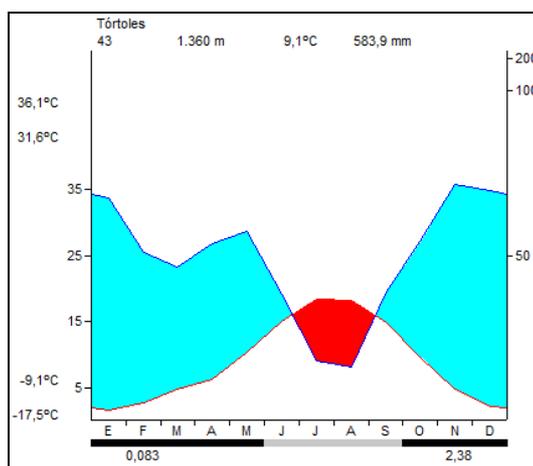


Figura 6. Climodiagrama de Walter y Lieth. Fuente: elaboración propia con PROCLI® con datos de la AEMET.

2.1.5. Vegetación

De acuerdo con lo expresado por Rivas-Martínez (1975), los 8.048 km² de la provincia abulense, que posee una orografía muy variada y compleja, participan de cuatro sectores corológicos peninsulares y tres provincias, que son:

- Luso-Extremadurese: sector toledano-tagano.
- Carpetano-Ibérico-Leonesa: sectores guadarrámico y bejarano-gredense.
- Castellano-Maestrazgo-Manchega: sector castellano duriense.

Dentro de estas variadas teselas corológicas, la zona de estudio se encuadra dentro de la provincia corológica Carpetano-Ibérico-Leonesa, sector Bejarano-gredense, subsector gredense y distrito gredense.

En la restauración forestal llevada a cabo a finales de los años 60 aparecen cuatro especies de pinos: *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* y *Pinus halepensis*. Todas aparecen en grupo, salvo el *Pinus pinaster* que aparece disperso en todo el monte, sin un orden claro preestablecido, y con un porte mayor y apariencia más vieja. Por ello, se puede suponer, que la estación en la que nos encontramos era favorable al *Pinus pinaster*, que permaneció en el monte de una forma espontánea, mientras que el resto de especies fueron introducidas mediante repoblación. En particular resulta llamativo la presencia del *Pinus halepensis*, propio del levante peninsular, y fuera de sus estaciones naturales. Por último, cabe destacar que las repoblaciones se encuentran salpicadas de ciprés de Arizona (*Cupressus arizonica*), fuera de toda duda introducido durante la ejecución de las mismas.

En general, la estructura muy densa del marco de plantación implica la creación de sotobosques muy pobres, donde poco a poco va entrando la encina (figura 7).



Figura 7. Brotes de encina entre los restos de la poda.

Por otro lado esta estructura densa implica la muerte de las ramas bajas, pero no su poda, quizá porque la nieve es incapaz de realizar el efecto de poda natural puesto que difícilmente puede penetrar a las zonas inferiores del pino. Todo esto provoca que los árboles crezcan demasiado esbeltos y frágiles (figura 8) pudiendo ser fácilmente descepaos por rachas de viento un poco más fuertes de lo que se considerarían normales para la zona



Figura 8. Zona repoblada con *Pinus halepensis*.

Las especies vegetales que aparecen en los barrancos y cárcavas compiten directamente con las pináceas allí establecidas. En efecto, la mejora local de las condiciones edáficas (mayor humedad y menor insolación por el sombreado de los propios pinos), permiten el establecimiento de diversas especies más exigentes que los pinos como son *Populus nigra*, *Salix fragilis*, *Salix atrocinerea*, *Salix caprea*, y diversas especies de los géneros *Rosa* y *Rubus*.

La construcción de los gaviones ha supuesto no sólo una mejora de la hidrología de la zona y protección del municipio (acción que se ve aumentada con la repoblación), sino también el establecimiento de especies que de otra forma no lo podrían haber hecho en una zona con tal pendiente e insolación.

Los suelos degradados están cubiertos de especies pioneras como las jaras, (*Cistus laurifolius*, *Cistus monspeliensis* y *Cistus clusii*) o el torvisco (*Daphne gnidium*). Estas dos comunidades vegetales (jara y torvisco), nos están indicando que la estación es especialmente favorable al establecimiento de la encina.

En la zona de los diques, en exposiciones particularmente favorables, podemos encontrar cerezos (*Prunus avium*), cuyo origen pudiera ser tanto natural (la zona del valle del Corneja es lugar de procedencia de semillas de cerezo silvestre) como escapado de cultivo.

2.2. ENSAYO PILOTO

A finales del mes de abril de 2012, antes de comenzar con los ensayos definitivos se llevó a cabo un reconocimiento de la zona para localizar el lugar más adecuado para efectuar los ensayos. Además, se realizó un breve experimento piloto para prevenir posibles errores en los posteriores ensayos definitivos.

En el muestreo piloto se utilizaron dos tipos de infiltrómetro un cilindro de metacrilato de 8 cm de diámetro (figura 9) y otro cilindro de acero de 28,3 cm de diámetro (figura 10).



Figura 9. Infiltrómetro de metacrilato en el ensayo piloto.



Figura 10. Infiltrómetro de acero con flotador.

El ensayo con el infiltrómetro de acero se efectuó utilizando un flotador con una regla en su interior, de modo que al penetrar el agua en el suelo el flotador descendía por gravedad proporcionándonos la medida. En este ensayo se detectó la poca funcionalidad del flotador por varios motivos. En primer lugar, al rellenar después de efectuar las mediciones es complicado no sobrepasar el nivel del flotador, por lo que pasan unos segundos en los que no se registra infiltración ya que el flotador no desciende. En segundo lugar, el flotador recogía agua, acículas o sedimentos en su superficie, introduciéndose en el agua unos pocos milímetros que era necesario corregir. Por estos motivos, se decidió no utilizar el flotador en los ensayos definitivos.

Por otra parte, el ensayo con el infiltrómetro de metacrilato no pudo realizarse de forma satisfactoria, ya que al no estar biselado en ninguno de sus extremos fue prácticamente imposible clavarlo sin deteriorar el suelo. Además, se trata de un material relativamente frágil que no admite golpes fuertes, hecho que dificulta su introducción en el perfil del suelo.

Por consiguiente, y teniendo en cuenta lo anterior, se decidió utilizar el infiltrómetro de acero de 28,3 cm sin flotador para realizar los ensayos definitivos.

2.3. ENSAYOS DEFINITIVOS

Para llevar a cabo este trabajo se han efectuado 12 ensayos en un área con tres partes bien diferenciadas: una zona arbolada, una cuña de sedimentación de un dique y una zona degradada. En cada una de estas zonas se efectuaron cuatro ensayos de infiltración siguiendo el procedimiento que se detalla en los siguientes párrafos.



Figura 11. Zona de estudio.

Para realizar cada ensayo se necesitó gran cantidad de agua que fue necesario transportar hasta la zona de estudio. Esta agua se recogía en un abrevadero que se encuentra a la salida del pueblo (figura 12), a 1 km aproximadamente de la zona de estudio. El agua era recogida en bidones y transportada con coche (figura 13) hasta la superficie de estudio que, como se ve en la figura 11, está situada junto a un camino asfaltado en bastante buen estado de conservación.



Figura 12. Abrevadero en el que se recogía el agua.



Figura 13. Bidones con agua.

Una vez llevado el agua a la zona de los ensayos, la primera operación a realizar es introducir el infiltrómetro en el suelo. En este punto es necesario aclarar ciertos aspectos sobre este instrumento.

El material elegido para realizar los ensayos es un infiltrómetro de acero de 28,3 cm. Este método se ha empleado y se sigue empleando en numerosas investigaciones, por su sencillez, bajo coste y fácil manejo, aunque presenta algunas limitaciones que se detallarán más adelante.

En primer lugar, existe la posibilidad de elegir entre dos tipos de infiltrómetro de cilindro, uno compuesto por un solo cilindro, que se conoce como infiltrómetro de cilindro simple, y otro compuesto por dos cilindros dispuestos en forma concéntrica denominado infiltrómetro de cilindro doble. En el infiltrómetro de cilindro doble se toman las mediciones en el cilindro interior y en el exterior se mantiene continuamente una cierta columna de agua. De este modo, la infiltración lateral del cilindro interior queda contrarrestada con el exterior y así los resultados son más precisos. Sin embargo, debido a la poca manejabilidad del cilindro exterior y a la alta dificultad que presenta su clavado en el suelo se decidió no utilizarlo. No obstante, para conseguir el mismo efecto se realizó un pequeño foso alrededor del cilindro que iba a ser rellenado de agua constantemente durante el transcurso de los ensayos (figura 14).



Figura 14. Infiltrómetro de cilindro con foso alrededor imitando el efecto del doble cilindro.



No existen medidas ni materiales estándar para los infiltrómetros y en este sentido cada autor ha propuesto los que ha considerado más convenientes para su investigación. Se han sugerido numerosos materiales de fabricación, además de muy diversas dimensiones. Cerdá (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 varios tamaños, desde 91 cm el de mayor tamaño hasta 2 cm de diámetro el más pequeño; 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.

En el estudio presente, como ya se ha comentado antes, se ha utilizado un cilindro cuyo diámetro interior es de 28,3 cm muy cercano al diámetro de 30 cm que, de acuerdo a Blanco Sepúlveda (1999), 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.

Otro de los aspectos técnicos del método es la instalación del cilindro en el suelo. Este proceso se debe hacer intentando alterar lo menos posible el horizonte superficial. Los suelos de Tórtoles son bastante arenosos y presentan un alto porcentaje de elementos gruesos, por lo que la introducción del cilindro en la mayoría de los casos fue una tarea ardua. Para efectuar esta operación se coloca el extremo biselado en el suelo y, posteriormente, se coloca una placa de hierro sobre el infiltrómetro. Con una maza se golpea la placa obligando así al cilindro a introducirse en el suelo (figura 15). En el caso de que el infiltrómetro no penetre, se deja de golpear ya que probablemente haya material rocoso en la trayectoria y se puede deteriorar el infiltrómetro. En el caso de que no haya penetrado lo suficiente en el suelo se busca otra ubicación.



Figura 15. Infiltrómetro recién clavado y material utilizado en la operación.

Posteriormente al clavado, se realiza un foso para humectar alrededor, tal y como explica Cerdá (1995). Este foso se realizó cavando con una pequeña azada hasta una profundidad de 4 o 5 cm (figura 16).



Figura 16. Foso realizado para imitar el doble anillo y azadilla utilizada.

De acuerdo a Blanco Sepúlveda (1999), 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, este 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. López *et al.* (1986) introduce el infiltrómetro de cilindro simple a 40 o 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 y, por último, Ponce (1989) añade que la profundidad de instalación debe ser de 2 a 5 cm. Con todo lo anterior, para los ensayos de este estudio el cilindro se introdujo a una profundidad de entre 7 y 10 cm. De este modo, al hacer el foso para humectar la zona colindante, como propone Cerdá (1995), no se salía el agua y, además, esta profundidad está de acuerdo a las recomendaciones de Bouwer (1982) y Knoll *et al* (1959).

Posteriormente, para efectuar las mediciones se siguió el procedimiento con carga de agua variable que consiste en rellenar el cilindro hasta rebosar y medir la altura del agua infiltrada a cada intervalo de tiempo. Por tanto, una vez realizado el foso, el siguiente paso es comenzar a llenarlo de agua para posteriormente rellenar el cilindro. Durante el llenado es necesario prestar atención a dos aspectos. En primer lugar, el agua debe echarse lo más rápido posible ya que así será más fiable el primer

valor de infiltración tomado a los 2 minutos de comenzar el ensayo. Para cumplir esta premisa se utilizaron jarras de 2 L de capacidad (figura 17) y, así el infiltrómetro era llenado hasta rebosar en pocos segundos. En segundo lugar, es necesario no deteriorar el suelo o, al menos, hacerlo lo menos posible al verter el agua de las jarras. Para ello, se coloca la placa de hierro sobre el infiltrómetro (figura 18) y se echa el agua encima evitando que impacte directamente en el suelo.



Figura 17. Infiltrómetro y jarras utilizadas para su llenado.



Figura 18. Placa de hierro colocada para evitar el deterioro del suelo.

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 el al., 1993). Estos advierten que la columna de agua debe ser lo más pequeña posible. No obstante, aunque es evidente la importancia de este hecho, no se debe sobredimensionar su significado ya que se considera que una columna de agua de entre 0 y 30 cm no hace variar excesivamente la infiltración. En el caso de los ensayos realizados se trabajó generalmente con una columna de agua de entre 10 y 25 cm, por lo que la influencia no resultó excesiva.

La duración de los ensayos sería otro de los aspectos metodológicos que se han de tener en cuenta. El tiempo de duración de cada ensayo puede ser variable, aunque se considera que es hasta que la infiltración queda 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. De este modo, 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; Cerdá (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 15 a 180 minutos, aunque usualmente se produce entre 30 y 90 minutos. 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 periodo de 2 horas. Valorando todo lo anterior, se ha decidido finalmente hacer ensayos de 4 horas de duración, para ir al caso más extremo. Posteriormente, se ha podido comprobar que es a partir de las 3 horas y media cuando se encuentran diferencias significativas entre unas zonas y otras. Los instantes en los que se han tomado medidas de altura infiltrada han sido a los 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210 y 240 minutos. La forma de tomar las mediciones ha sido utilizando una regla y apoyándola sobre la línea de sutura del cilindro para ver el descenso experimentado por el agua en el último intervalo (figura 19). Posteriormente se anota el dato obtenido en el estadillo (figura 20).



Figura 19. Toma de medidas con regla.



Figura 20. Estadillo.

A modo de conclusión, se puede afirmar que, 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.

En los anteriores párrafos se ha detallado el trabajo de campo, los cálculos del trabajo de gabinete han sido llevados a cabo utilizando dos programas informáticos, Microsoft Excel® y R®.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ENSAYOS DEFINITIVOS

Siguiendo la metodología explicada en el anterior apartado se realizaron doce ensayos de infiltración, cuatro en cada una de las tres zonas del área de estudio.

En este apartado se recogen los resultados de los ensayos. En cada uno de ellos aparece una tabla con el tiempo, la altura de agua infiltrada y la velocidad de infiltración.

El tiempo aparece dividido en dos columnas, la primera es el “Acumulado”, es decir, el tiempo desde que se inició el ensayo, la segunda, “Intervalo”, es el tiempo transcurrido desde la medición previa.

Del mismo modo, la altura de agua infiltrada aparece dividida en dos columnas, “Intervalo” es la cantidad de agua infiltrada medida en mm desde la anterior medición y “Acumulado” indica la cantidad de agua infiltrada también en mm desde el inicio del ensayo.

Por último, la columna de velocidad de infiltración se divide en dos, “Intervalo” que es la velocidad de infiltración en mm/h desde la anterior medición y se calcula en función de la altura de agua infiltrada por intervalo y “Acumulado” que es la velocidad de infiltración media desde el principio del ensayo.

Además de la tabla, en cada ensayo se recogen dos gráficas. En primer lugar, aparece la curva de infiltración que se calcula poniendo en el eje de abscisas los diferentes instantes en los que se mide y en el eje de ordenadas la altura infiltrada en dichos instantes. En segundo lugar, se recoge la gráfica de infiltración acumulada que se realiza poniendo en el eje de abscisas el tiempo del ensayo y en el eje de ordenadas la altura infiltrada en cada instante desde que comenzó el ensayo.

3.1.1. Primer ensayo definitivo

El primer ensayo (figura 21) fue realizado en la zona degradada el día 11 de junio de 2012. El experimento fue iniciado a las 17:40 y finalizó, cuatro horas más tarde, esto es, a las 21:40.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 20°C y a la hora de finalizar era de 10°C. El tiempo meteorológico de esa tarde fue nuboso con algunos claros.



Figura 21. Ensayo 1.

Los resultados obtenidos en el primer ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 1 y representados en las figuras 22 y 23.

TABLA 1. RESULTADOS DEL ENSAYO 1 (ZONA DEGRADADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
Acumulado	Intervalo	Intervalo	Acumulado	Intervalo	Acumulado
2	2	38	38	1140	1140,0
4	2	21	59	630	885,0
6	2	23	82	690	820,0
8	2	23	105	690	787,5
10	2	21	126	630	756,0
15	5	48	174	576	696,0
20	5	46	220	552	660,0
30	10	88	308	528	616,0
40	10	84,5	392,5	507	588,8
50	10	83	475,5	498	570,6
60	10	83	558,5	498	558,5
90	30	246,5	805	493	536,7
120	30	231	1036	462	518,0
150	30	222	1258	444	503,2
180	30	205	1463	410	487,7
210	30	186,5	1649,5	373	471,3
240	30	180	1829,5	360	457,4

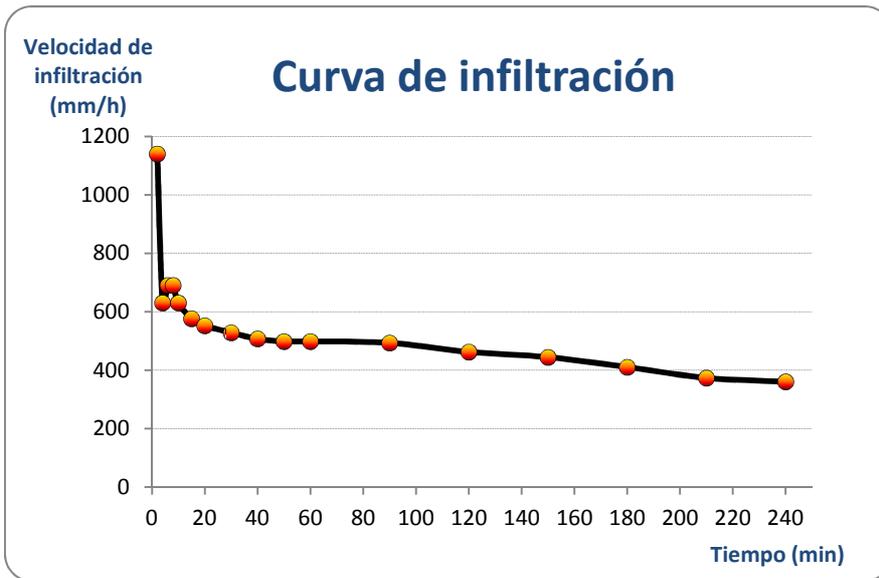


Figura 22. Curva de infiltración del ensayo 1 (zona degradada).

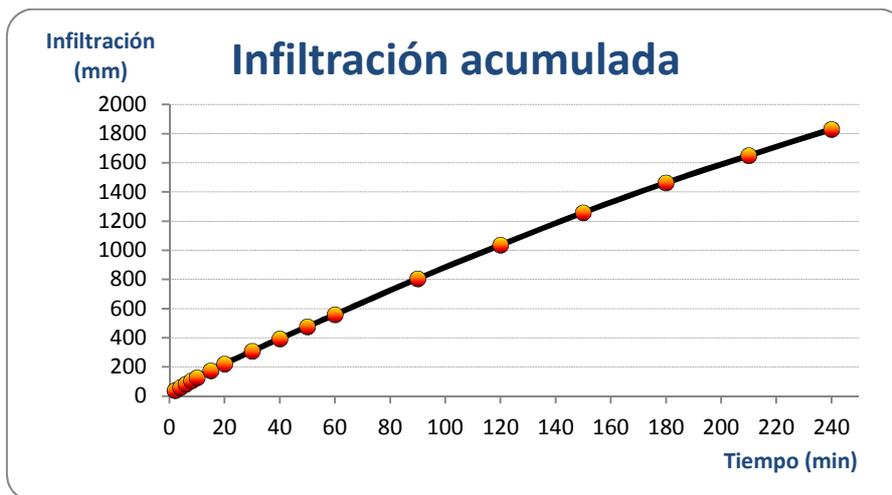


Figura 23. Infiltración acumulada en el ensayo 1 (zona degradada).

3.1.2. Segundo ensayo definitivo

El segundo ensayo (figura 24) fue realizado en la zona degradada el día 12 de junio de 2012. El experimento comenzó a las 17:30 y finalizó, como ya se ha comentado, cuatro horas más tarde, esto es, a las 21:30 horas.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 17°C y a la hora de finalizar era de 13°C. El tiempo meteorológico de esa tarde fue de nubes y claros.



Figura 24. Ensayo 2.

Los resultados obtenidos en el segundo ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 2 y representados en las figuras 25 y 26.

TABLA 2. RESULTADOS DEL ENSAYO 2 (ZONA DEGRADADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	11	11	330	330,0
4	2	6,5	17,5	195	262,5
6	2	5,5	23	165	230,0
8	2	5	28	150	210,0
10	2	6	34	180	204,0
15	5	11	45	132	180,0
20	5	8,5	53,5	102	160,5
30	10	19,5	73	117	146,0
40	10	30,5	103,5	183	155,3
50	10	26	129,5	156	155,4
60	10	25,5	155	153	155,0
90	30	73,5	228,5	147	152,3
120	30	63	291,5	126	145,8
150	30	54,5	346	109	138,4
180	30	48	394	96	131,3
210	30	40	434	80	124,0
240	30	36	470	72	117,5

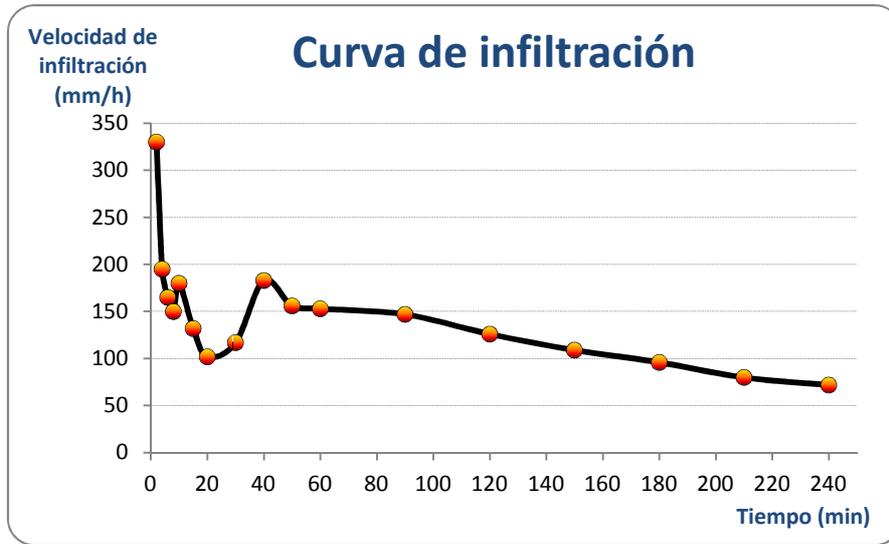


Figura 25. Curva de infiltración del ensayo 2 (zona degradada).

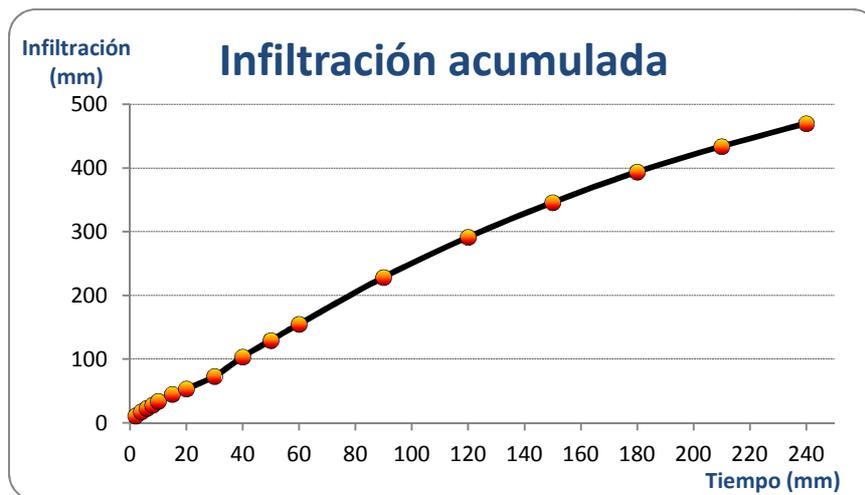


Figura 26. Infiltración acumulada en el ensayo 2 (zona degradada).

3.1.3. Tercer ensayo definitivo

El tercer ensayo (figura 27) se realizó en la zona arbolada el día 17 de junio de 2012. El experimento comenzó a las 11:00 y finalizó cuatro horas más tarde, a las 15:00.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 20°C y a la hora de finalizar era de 29°C. El tiempo meteorológico de esa mañana fue soleado.

Los resultados obtenidos en el tercer ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 3 y representados en las figuras 28 y 29.



Figura 27. Ensayo 3.

TABLA 3. RESULTADOS DEL ENSAYO 3 (ZONA ARBOLADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	26,5	26,5	795	795,0
4	2	26	52,5	780	787,5
6	2	16	68,5	480	685,0
8	2	16	84,5	480	633,8
10	2	17	101,5	510	609,0
15	5	44	145,5	528	582,0
20	5	41	186,5	492	559,5
30	10	81	267,5	486	535,0
40	10	72	339,5	432	509,3
50	10	68,5	408	411	489,6
60	10	65	473	390	473,0
90	30	188	661	376	440,7
120	30	175	836	350	418,0
150	30	167,5	1003,5	335	401,4
180	30	156	1159,5	312	386,5
210	30	147	1306,5	294	373,3
240	30	146,5	1453	293	363,3

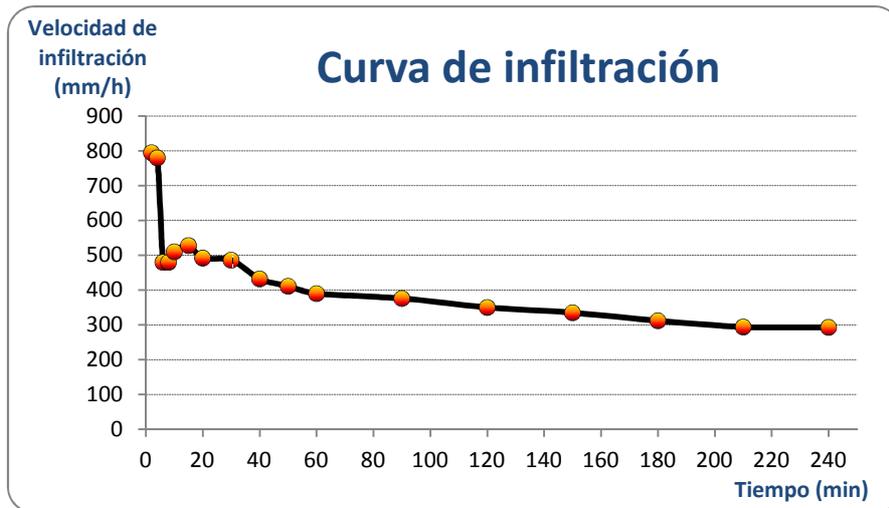


Figura 28. Curva de infiltración del ensayo 3 (zona arbolada).

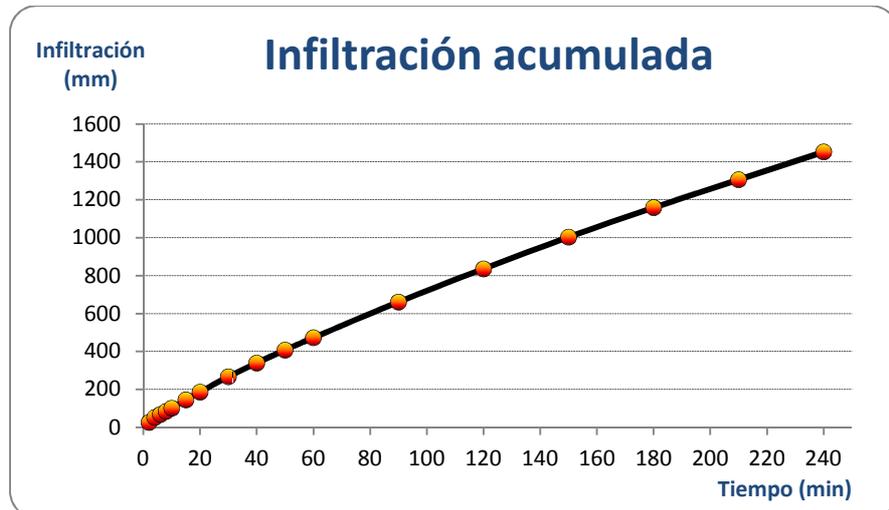


Figura 29. Infiltración acumulada en el ensayo 3 (zona arbolada).

3.1.4. Cuarto ensayo definitivo

El cuarto ensayo (figura 30) fue realizado en la zona degradada el día 23 de junio de 2012. El experimento fue iniciado a las 13:30 aproximadamente y finalizó, como ya se ha comentado anteriormente, cuatro horas más tarde, esto es, a las 17:30.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 25°C y a la hora de finalizar era de 23°C. El tiempo meteorológico de ese día fue nuboso.

Los resultados obtenidos en el cuarto ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 4 y representados en las figuras 31 y 32.



Figura 30. Ensayo 4.

TABLA 4. RESULTADOS DEL ENSAYO 4 (ZONA DEGRADADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	29	29	870	870,0
4	2	21	50	630	750,0
6	2	22	72	660	720,0
8	2	17	89	510	667,5
10	2	19	108	570	648,0
15	5	44	152	528	608,0
20	5	44	196	528	588,0
30	10	89	285	534	570,0
40	10	79	364	474	546,0
50	10	72,5	436,5	435	523,8
60	10	76	512,5	456	512,5
90	30	213,5	726	427	484,0
120	30	187	913	374	456,5
150	30	168,5	1081,5	337	432,6
180	30	148	1229,5	296	409,8
210	30	142	1371,5	284	391,9
240	30	132	1503,5	264	375,9

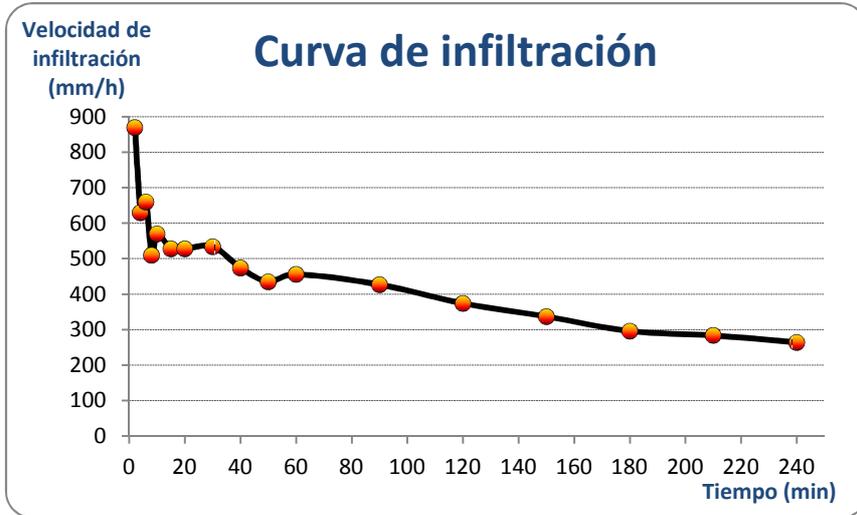


Figura 31. Curva de infiltración del ensayo 4 (zona degradada).

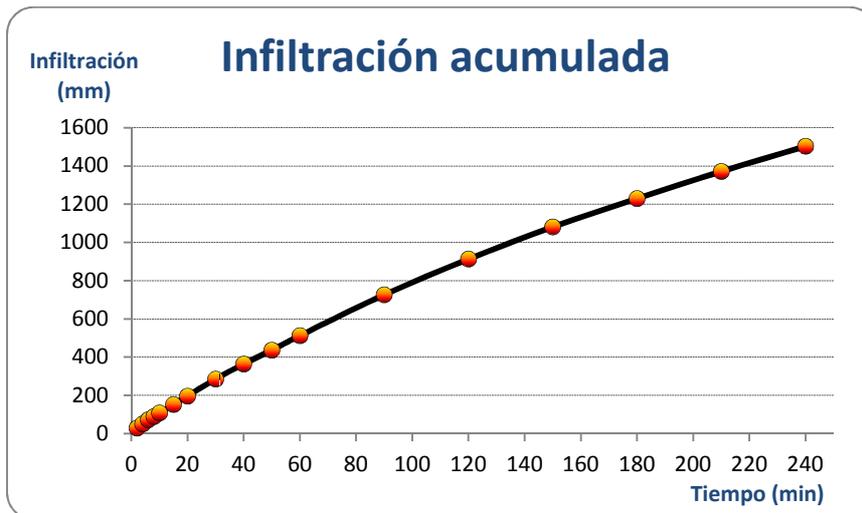


Figura 32. Infiltración acumulada en el ensayo 4 (zona degradada).

3.1.5. Quinto ensayo definitivo

El quinto ensayo (figura 33) fue realizado en la cuña de sedimentación del dique el día 30 de julio de 2012. El experimento se inició a las 17:50 y finalizó cuatro horas más tarde, esto es, a las 21:50.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 29°C y a la hora de finalizar era de 23°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado.

Los resultados obtenidos en el quinto ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 5 y representados en las figuras 34 y 35.



Figura 33. Ensayo 5.

TABLA 5. RESULTADOS DEL ENSAYO 5 (CUÑA DE SEDIMENTACIÓN)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	26	26	780	780,0
4	2	17	43	510	645,0
6	2	22	65	660	650,0
8	2	17	82	510	615,0
10	2	16,5	98,5	495	591,0
15	5	44	142,5	528	570,0
20	5	40	182,5	480	547,5
30	10	83,5	266	501	532,0
40	10	75,5	341,5	453	512,3
50	10	77	418,5	462	502,2
60	10	75	493,5	450	493,5
90	30	210,5	704	421	469,3
120	30	197	901	394	450,5
150	30	188	1089	376	435,6
180	30	185	1274	370	424,7
210	30	171	1445	342	412,9
240	30	158,5	1603,5	317	400,9

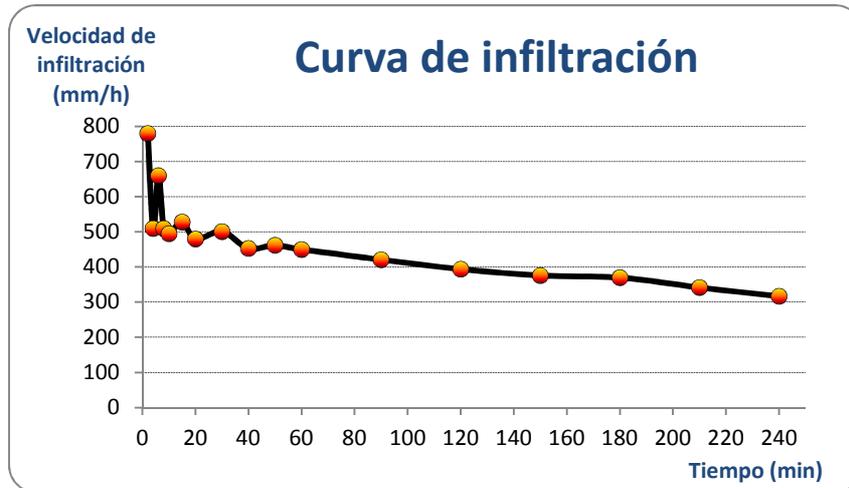


Figura 34. Curva de infiltración del ensayo 5 (cuña de sedimentación).

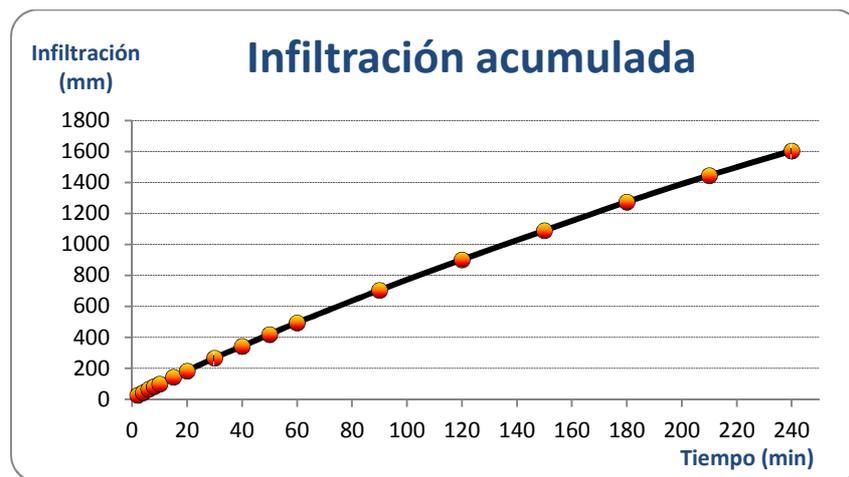


Figura 35. Infiltración acumulada en el ensayo 5 (cuña de sedimentación).

3.1.6. Sexto ensayo definitivo

El sexto ensayo (figura 36) fue realizado en la cuña de sedimentación del dique el día 1 de agosto de 2012. Se inició a las 12:30 y finalizó a las 16:30.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 24°C y a la hora de finalizar era de 27°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado.

Los resultados obtenidos en el sexto ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 6 y representados en las figuras 37 y 38.



Figura 36. Ensayo 6.

TABLA 6. RESULTADOS DEL ENSAYO 6 (CUÑA DE SEDIMENTACIÓN)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	22	22	660	660,0
4	2	14	36	420	540,0
6	2	12	48	360	480,0
8	2	14,5	62,5	435	468,8
10	2	12	74,5	360	447,0
15	5	38,5	113	462	452,0
20	5	41	154	492	462,0
30	10	77,5	231,5	465	463,0
40	10	78	309,5	468	464,3
50	10	79	388,5	474	466,2
60	10	80	468,5	480	468,5
90	30	222	690,5	444	460,3
120	30	197	887,5	394	443,8
150	30	184,5	1072	369	428,8
180	30	194	1266	388	422,0
210	30	196	1462	392	417,7
240	30	179	1641	358	410,3

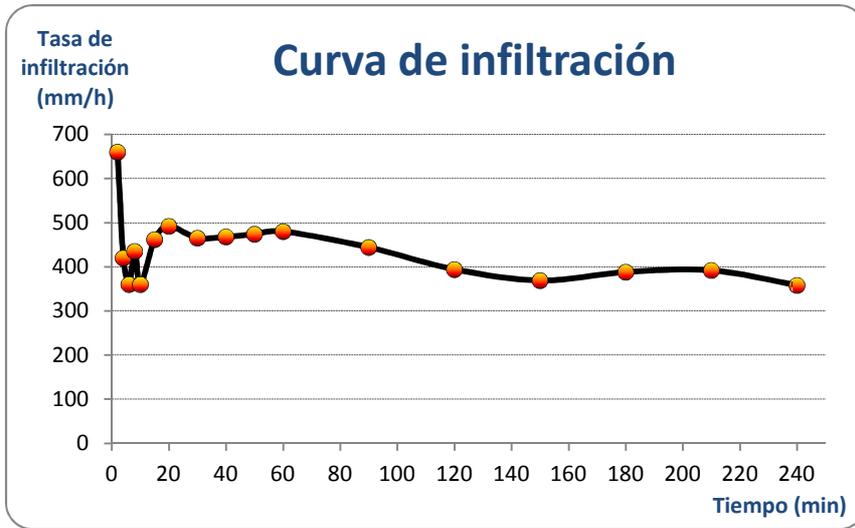


Figura 37. Curva de infiltración del ensayo 6 (cuña de sedimentación).

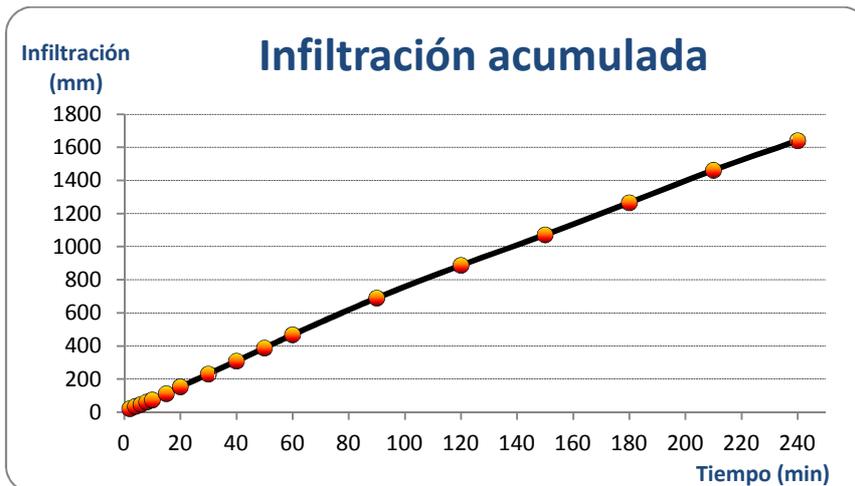


Figura 38. Infiltración acumulada en el ensayo 6 (cuña de sedimentación).

3.1.7. Séptimo ensayo definitivo

El séptimo ensayo (figura 39) fue realizado en la cuña de sedimentación del dique el día 3 de agosto de 2012. Comenzó a las 16:20 y finalizó cuatro horas más tarde, a las 20:20.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 31°C y a la hora de finalizar era de 23°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado.

Los resultados de este ensayo aparecen en la tabla 7 y se representan en las figuras 40 y 41.



Figura 39. Ensayo 7.

TABLA 7. RESULTADOS DEL ENSAYO 7 (CUÑA DE SEDIMENTACIÓN)

Tiempo (min)		Altura infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	31	31	930	930,0
4	2	21	52	630	780,0
6	2	21	73	630	730,0
8	2	21	94	630	705,0
10	2	20	114	600	684,0
15	5	53	167	636	668,0
20	5	53,5	220,5	642	661,5
30	10	99,5	320	597	640,0
40	10	97	417	582	625,5
50	10	95	512	570	614,4
60	10	97	609	582	609,0
90	30	257	866	514	577,3
120	30	242,5	1108,5	485	554,3
150	30	223,5	1332	447	532,8
180	30	214	1546	428	515,3
210	30	201,5	1747,5	403	499,3
240	30	193,5	1941	387	485,3

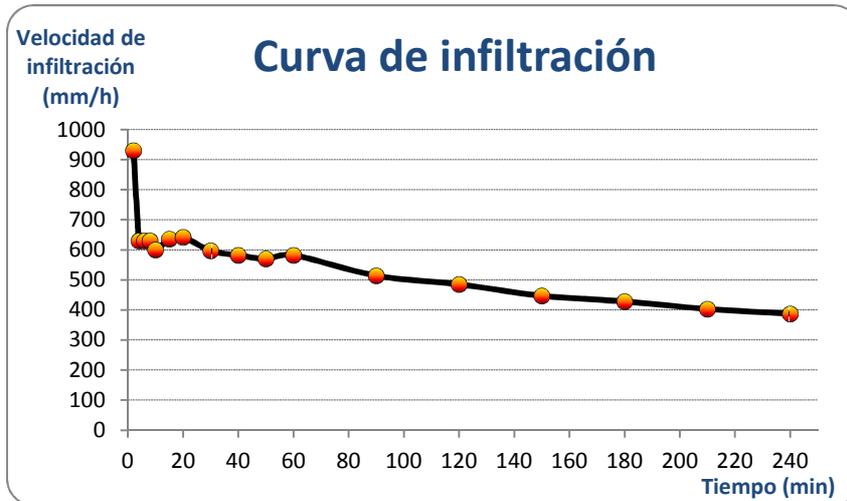


Figura 40. Curva de infiltración del ensayo 7 (cuña de sedimentación).

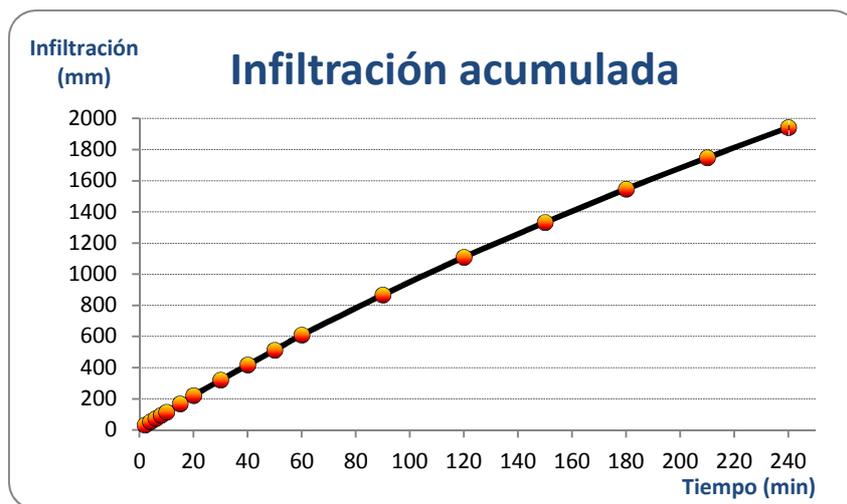


Figura 41. Infiltración acumulada en el ensayo 7 (cuña de sedimentación).

3.1.8. Octavo ensayo definitivo

El octavo ensayo (figura 42) fue realizado en la zona arbolada el día 9 de agosto de 2012. El experimento fue iniciado a las 17:00 y finalizó a las 21:00.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 38°C y a la hora de finalizar era de 27°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado y muy caluroso, en plena ola de calor.

Los resultados obtenidos en el octavo ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 8 y representados en las figuras 43 y 44.



Figura 42. Ensayo 8.

TABLA 8. RESULTADOS DEL ENSAYO 8 (ZONA ARBOLADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	28	28	840	840,0
4	2	24	52	720	780,0
6	2	23	75	690	750,0
8	2	23	98	690	735,0
10	2	24	122	720	732,0
15	5	62	184	744	736,0
20	5	56,5	240,5	678	721,5
30	10	114	354,5	684	709,0
40	10	110	464,5	660	696,8
50	10	107	571,5	642	685,8
60	10	105	676,5	630	676,5
90	30	313	989,5	626	659,7
120	30	311	1300,5	622	650,3
150	30	313	1613,5	626	645,4
180	30	315	1928,5	630	642,8
210	30	316	2244,5	632	641,3
240	30	323	2567,5	646	641,9

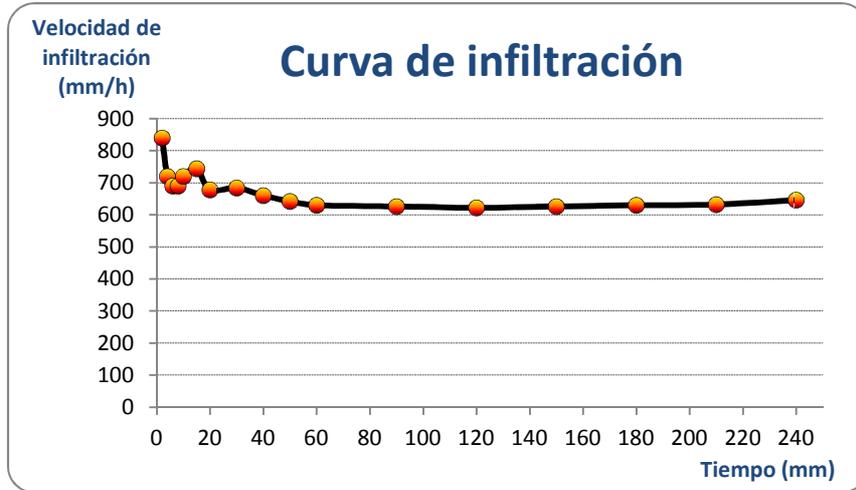


Figura 43. Curva de infiltración del ensayo 8 (zona arbolada).

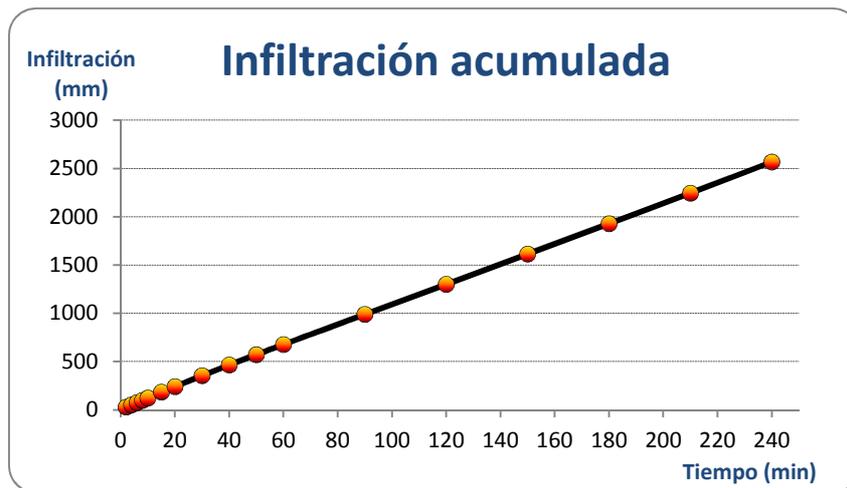


Figura 44. Infiltración acumulada en el ensayo 8 (zona arbolada).

3.1.9. Noveno ensayo definitivo

El noveno ensayo (figura 45) se llevó a cabo en la zona arbolada el día 10 de agosto de 2012. Comenzó a las 14:00 y finalizó cuatro horas más tarde, a las 18:00.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 37°C y a la hora de finalizar era de 35°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado, con calima y muy caluroso.

Los resultados obtenidos en el noveno ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 9 y representados en las figuras 46 y 47.



Figura 45. Ensayo 9.

TABLA 9. RESULTADOS DEL ENSAYO 9 (ZONA ARBOLADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	23	23	690	690,0
4	2	14	37	420	555,0
6	2	17	54	510	540,0
8	2	14	68	420	510,0
10	2	13,5	81,5	405	489,0
15	5	38	119,5	456	478,0
20	5	35	154,5	420	463,5
30	10	70	224,5	420	449,0
40	10	66	290,5	396	435,8
50	10	65	355,5	390	426,6
60	10	65	420,5	390	420,5
90	30	190	610,5	380	407,0
120	30	178	788,5	356	394,3
150	30	174	962,5	348	385,0
180	30	171	1133,5	342	377,8
210	30	168	1301,5	336	371,9
240	30	161	1462,5	322	365,6

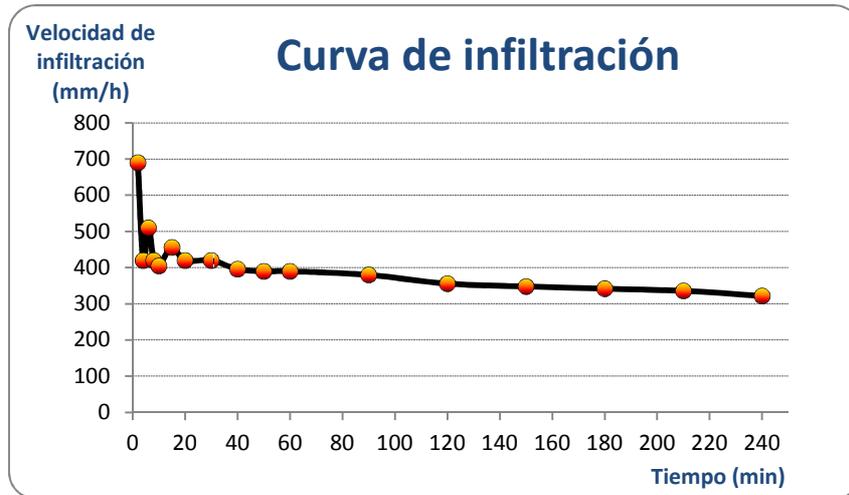


Figura 46. Curva de infiltración del ensayo 9 (zona arbolada).

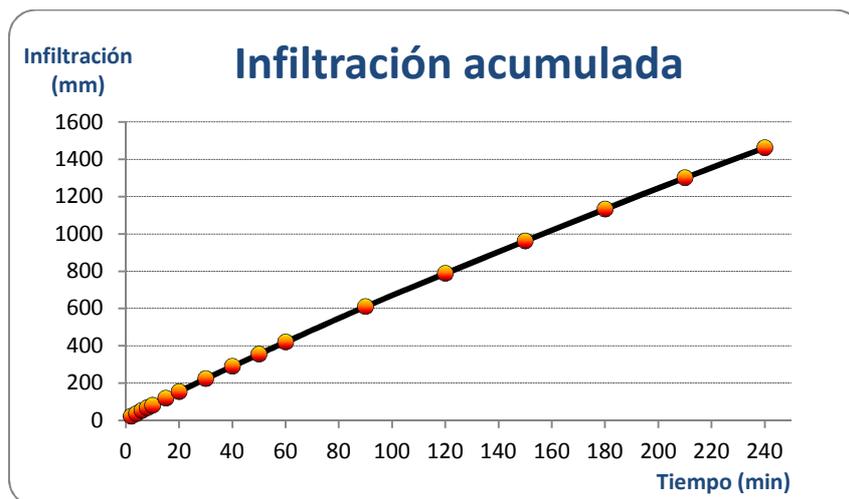


Figura 47. Infiltración acumulada en el ensayo 9 (zona arbolada).

3.1.10. Décimo ensayo definitivo

El décimo ensayo (figura 48) fue realizado en la zona degradada el día 13 de agosto de 2012. El experimento fue iniciado a las 17:15 aproximadamente y finalizó a las 21:15.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 28°C y a la hora de finalizar era de 20°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado y caluroso.

Los resultados obtenidos en el decimo ensayo de infiltración aparecen recogidos en la tabla 10 y representados en las figuras 49 y 50.



Figura 48. Ensayo 10.

TABLA 10. RESULTADOS DEL ENSAYO 10 (ZONA DEGRADADA)

Tiempo (min)		Altura infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	47	47	1410	1410,0
4	2	24	71	720	1065,0
6	2	21,5	92,5	645	925,0
8	2	24	116,5	720	873,8
10	2	21	137,5	630	825,0
15	5	56	193,5	672	774,0
20	5	54	247,5	648	742,5
30	10	111	358,5	666	717,0
40	10	98	456,5	588	684,8
50	10	102	558,5	612	670,2
60	10	115	673,5	690	673,5
90	30	283	956,5	566	637,7
120	30	255	1211,5	510	605,8
150	30	230	1441,5	460	576,6
180	30	220,5	1662	441	554,0
210	30	208	1870	416	534,3
240	30	188	2058	376	514,5

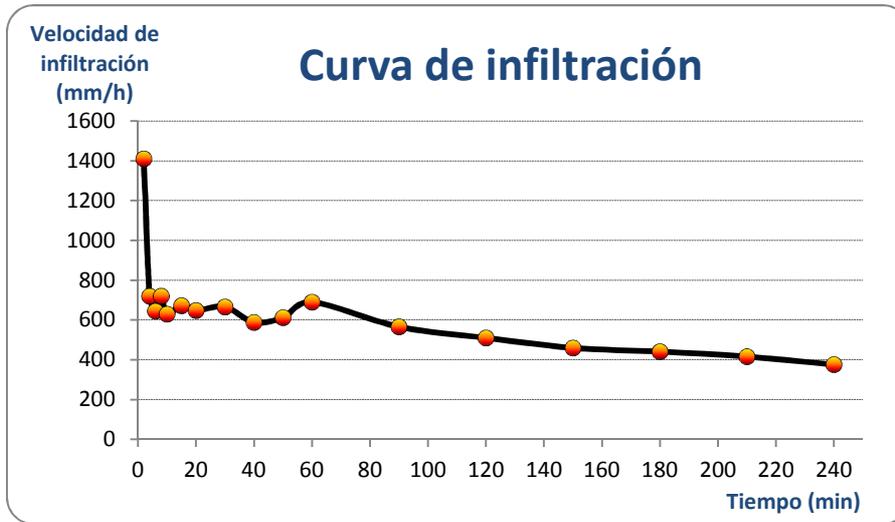


Figura 49. Curva de infiltración del ensayo 10 (zona degradada).

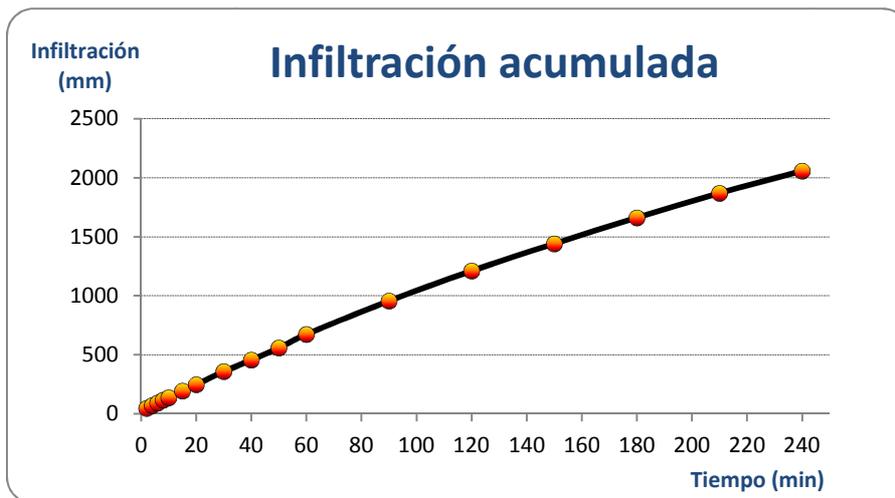


Figura 50. Infiltración acumulada en el ensayo 10 (zona degradada).

3.1.11. Undécimo ensayo definitivo

El undécimo ensayo (figura 51) fue realizado en la zona arbolada el día 16 de agosto de 2012. El experimento fue iniciado a las 11:10 y acabó a las 15:10.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 18°C y a la hora de finalizar era de 28°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado y templado.

Los resultados obtenidos en este ensayo de infiltración aparecen en la tabla 11 y están representados en las figuras 52 y 53.



Figura 51. Ensayo 11.

TABLA 11. RESULTADOS DEL ENSAYO 11 (ZONA ARBOLADA)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	25	25	750	750,0
4	2	17	42	510	630,0
6	2	16	58	480	580,0
8	2	16	74	480	555,0
10	2	16,5	90,5	495	543,0
15	5	41	131,5	492	526,0
20	5	40	171,5	480	514,5
30	10	83	254,5	498	509,0
40	10	81	335,5	486	503,3
50	10	79	414,5	474	497,4
60	10	80	494,5	480	494,5
90	30	246	740,5	492	493,7
120	30	262	1002,5	524	501,3
150	30	264	1266,5	528	506,6
180	30	250	1516,5	500	505,5
210	30	257,5	1774	515	506,9
240	30	260	2034	520	508,5

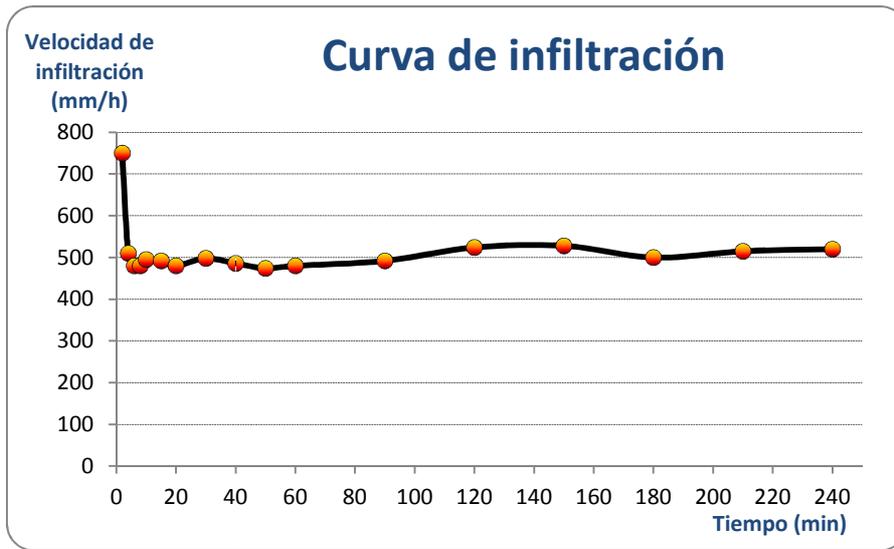


Figura 52. Curva de infiltración del ensayo 11 (zona arbolada).

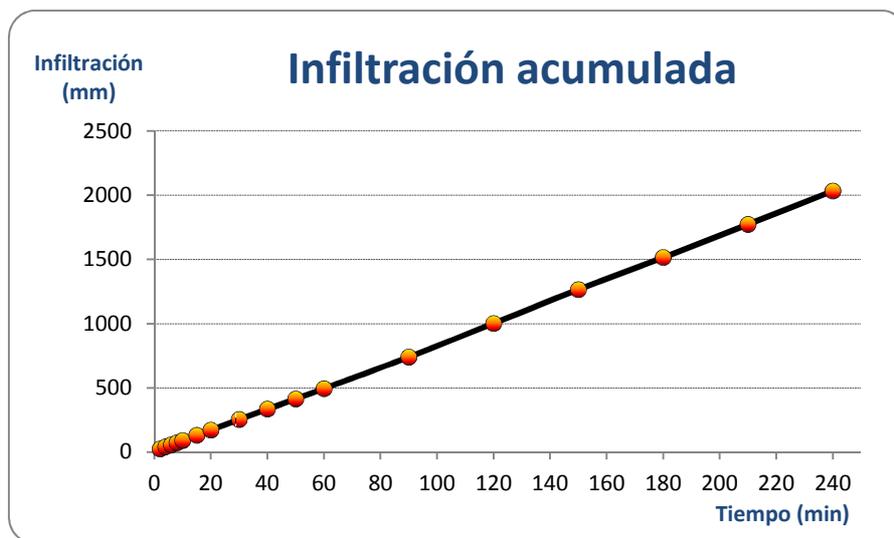


Figura 53. Infiltración acumulada en el ensayo 11 (zona arbolada).

3.1.12. Duodécimo Ensayo definitivo

Este ensayo (figura 54) fue realizado en la cuña de sedimentación del dique el día 17 de agosto de 2012. Se inició a las 11:50 y finalizó cuatro horas más tarde, esto es, a las 15:50.

La temperatura ambiente cuando se inició el ensayo era de 26°C y a la hora de finalizar era de 32°C. El tiempo meteorológico de ese día fue soleado y caluroso.

Los resultados obtenidos en el ensayo aparecen recogidos en la tabla 12 y representados en las figuras 55 y 56.



Figura 54. Ensayo 12.

TABLA 12. RESULTADOS DEL ENSAYO 12 (CUÑA DE SEDIMENTACIÓN)

Tiempo (min)		Altura de agua infiltrada (mm)		Velocidad infiltración (mm/h)	
<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Acumulado</i>
2	2	27	27	810	810,0
4	2	19	46	570	690,0
6	2	12	58	360	580,0
8	2	9	67	270	502,5
10	2	9,5	76,5	285	459,0
15	5	28	104,5	336	418,0
20	5	28	132,5	336	397,5
30	10	55	187,5	330	375,0
40	10	53	240,5	318	360,8
50	10	52	292,5	312	351,0
60	10	52	344,5	312	344,5
90	30	146	490,5	292	327,0
120	30	129	619,5	258	309,8
150	30	113	732,5	226	293,0
180	30	107	839,5	214	279,8
210	30	110	949,5	220	271,3
240	30	113	1062,5	226	265,6

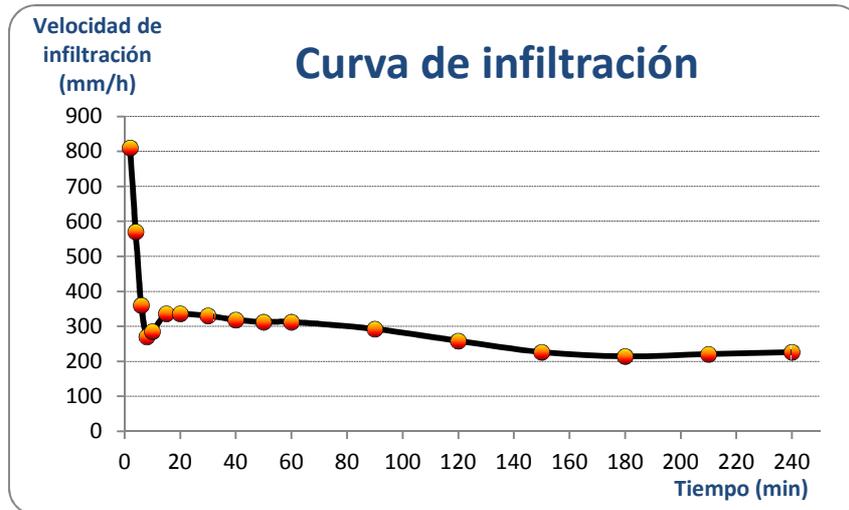


Figura 55. Curva de infiltración del ensayo 12 (cuña de sedimentación).

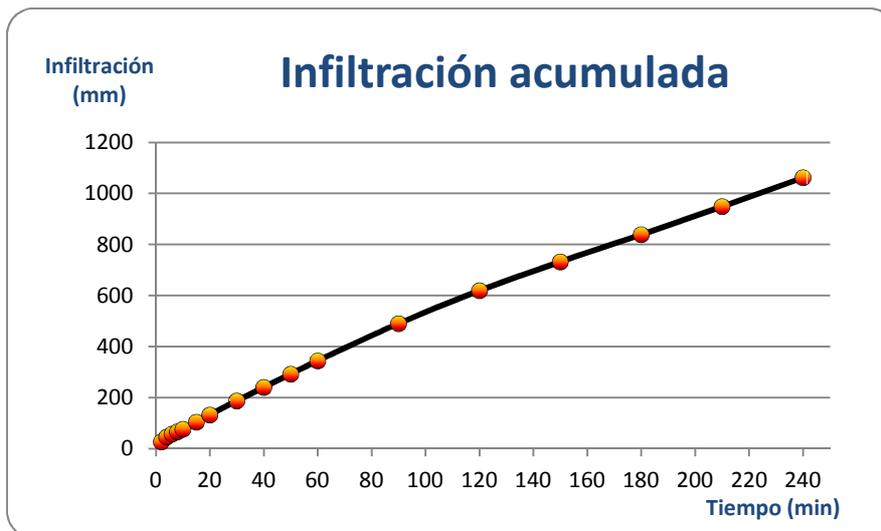


Figura 56. Infiltración acumulada en el ensayo 12 (cuña de sedimentación).



3.2. RESULTADOS MEDIOS PARA CADA ZONA

3.2.1. Resultados medios para la zona degradada

En la tabla 13 aparecen los valores de velocidad de infiltración, tomados en mm/h, de los cuatro ensayos realizados sobre la superficie degradada. Además, se recoge la media para cada instante en que se efectuó medición de altura infiltrada. Posteriormente, se incluye una imagen en la que se pueden observar las cuatro curvas de infiltración comparadas (figura 57).

Lo primero que llama la atención es la gran diferencia que hay entre el ensayo 2 y los otros tres ensayos efectuados. A simple vista no hay motivos aparentes que expliquen este hecho. Calvo Cases (1998) afirma que en una misma ladera, por la configuración de los factores bióticos o abióticos, la generación de escorrentía atendería a un modelo mixto de áreas infiltradoras y contribuyentes, que podríamos denominar hortoniano discontinuo. Por tanto, los ensayos 1, 4 y 10 probablemente se realizaron sobre zonas infiltradoras, mientras que el ensayo 2 se llevó a cabo en una zona contribuyente.

TABLA 13. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA DEGRADADA

Tiempo (min)	Ensayo 1 (mm/h)	Ensayo 2 (mm/h)	Ensayo 4 (mm/h)	Ensayo 10 (mm/h)	Media (mm/h)	Desviación típica
2	1140	330	870	1410	937,50	461,11
4	630	195	630	720	543,75	236,34
6	690	165	660	645	540,00	250,70
8	690	150	510	720	517,50	261,96
10	630	180	570	630	502,50	216,85
15	576	132	528	672	477,00	237,66
20	552	102	528	648	457,50	242,60
30	528	117	534	666	461,25	238,17
40	507	183	474	588	438,00	176,62
50	498	156	435	612	425,25	193,87
60	498	153	456	690	449,25	222,22
90	493	147	427	566	408,25	183,19
120	462	126	374	510	368,00	170,88
150	444	109	337	460	337,50	161,82
180	410	96	296	441	310,75	156,15
210	373	80	284	416	288,25	149,32
240	360	72	264	376	268,00	139,71

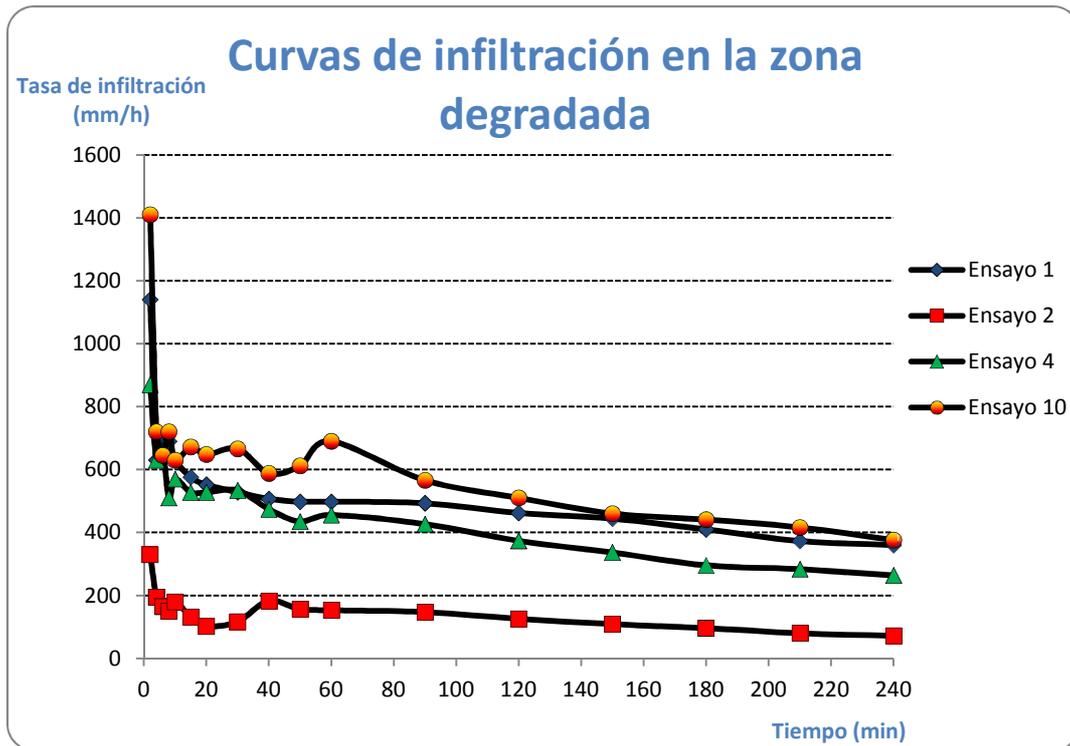


Figura 57. Curvas de infiltración para los cuatro ensayos realizados en la superficie degradada.

En la figura 58 se observa la gran diferencia en la tasa de infiltración que se produce entre la primera medición a los dos minutos después de haber comenzado el ensayo (capacidad de infiltración inicial en el modelo de Horton) y las siguientes mediciones. Esto se debe probablemente a que son suelos arenosos con alto contenido en gravas en los que el agua penetra rápidamente en las grietas; una vez saturadas, el agua entra en los poros edáficos de una forma más lenta.

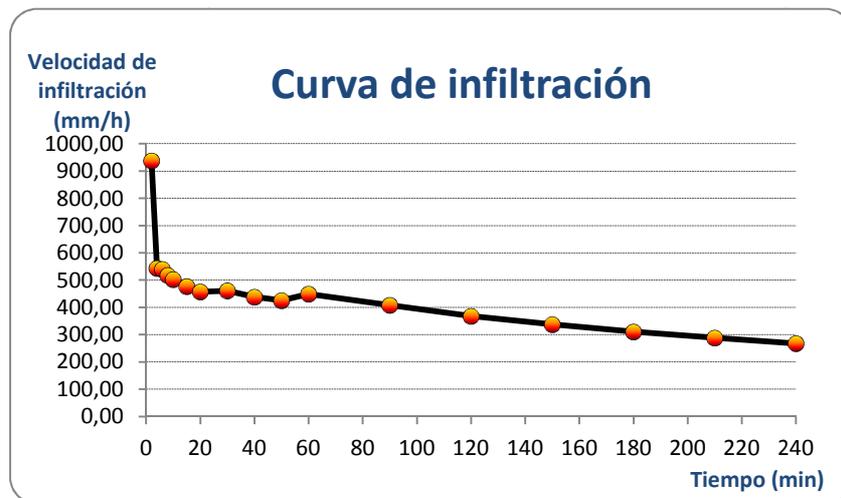


Figura 58. Curva de infiltración media para la zona degradada.



En la tabla 14 aparece la infiltración acumulada. En esta tabla también puede apreciarse la gran diferencia entre la cantidad de agua infiltrada en el ensayo 2 y en los otros ensayos.

TABLA 14. INFILTRACIÓN ACUMULADA EN LA ZONA DEGRADADA

Tiempo (min)	Ensayo 1 (mm)	Ensayo 2 (mm)	Ensayo 4 (mm)	Ensayo 10 (mm)	Media (mm)	Desviación típica
2	38	11	29	47	31,25	15,37
4	59	17,5	50	71	49,38	22,93
6	82	23	72	92,5	67,38	30,74
8	105	28	89	116,5	84,63	39,40
10	126	34	108	137,5	101,38	46,53
15	174	45	152	193,5	141,13	66,29
20	220	53,5	196	247,5	179,25	86,43
30	308	73	285	358,5	256,13	125,88
40	392,5	103,5	364	456,5	329,13	155,31
50	475,5	129,5	436,5	558,5	400,00	187,37
60	558,5	155	512,5	673,5	474,88	223,74
90	805	228,5	726	956,5	679,00	315,19
120	1036	291,5	913	1211,5	863,00	400,21
150	1258	346	1081,5	1441,5	1031,75	480,21
180	1463	394	1229,5	1662	1187,13	557,51
210	1649,5	434	1371,5	1870	1331,25	631,98
240	1829,5	470	1503,5	2058	1465,25	701,43

En la figura 59 puede observarse que en el plazo de cuatro horas el suelo de la superficie degradada ha sido capaz de infiltrar casi 1.500 mm por término medio. Con toda seguridad, el comportamiento de este suelo sería totalmente diferente ante una precipitación por varios motivos. En primer lugar, la regularidad del flujo de agua varía durante un proceso de precipitación, por lo que sería menos predecible su comportamiento. Por otra parte, en los ensayos el agua se encuentra retenida en el cilindro, por tanto, se ve forzado en cierta medida a infiltrarse. Por último, no se debe obviar la influencia de la presión hidrostática que fuerza a las capas inferiores del líquido a introducirse en el suelo.

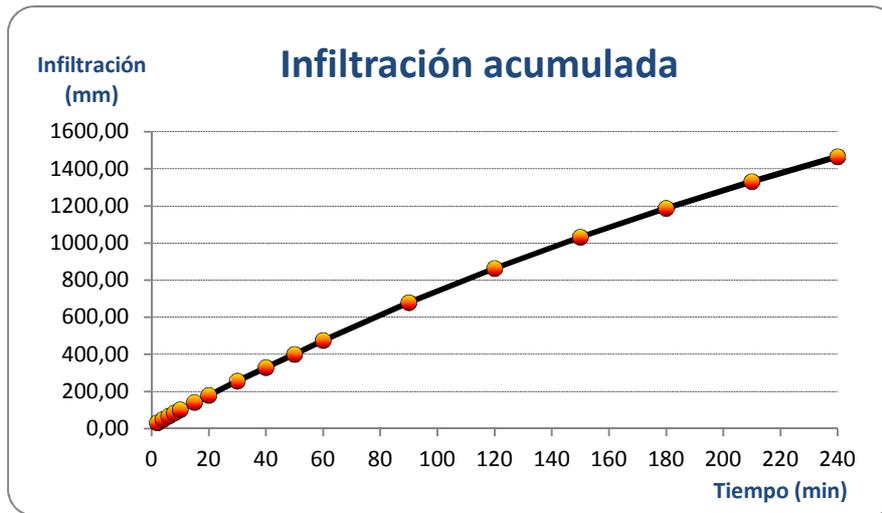


Figura 59. Infiltración acumulada media en la zona degradada.

3.2.2. Resultados medios para la zona arbolada.

En la tabla 15 aparecen los valores de la velocidad de infiltración en mm/h de los cuatro ensayos realizados sobre la superficie arbolada. Además, se recoge la media para cada instante en que se efectuó medición de altura infiltrada. Por otra parte, en la figura 60 se observan las cuatro curvas de infiltración obtenidas.

A diferencia de lo que sucede en la superficie degradada, los valores de infiltración en la zona arbolada son bastante similares entre ellos. Por otra parte, a la hora de hacer los ensayos resultaron especialmente llamativos el ensayo 8 y el 11. Las velocidades de infiltración en estos ensayos se estabilizaron a los pocos minutos y permanecieron prácticamente constantes durante las cuatro horas que duró el experimento.



TABLA 15. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN LA ZONA ARBOLADA

Tiempo (min)	Ensayo 3 (mm/h)	Ensayo 8 (mm/h)	Ensayo 9 (mm/h)	Ensayo 11 (mm/h)	Media (mm/h)	Desviación típica
2	795	840	690	750	768,75	64,08
4	780	720	420	510	607,50	170,37
6	480	690	510	480	540,00	101,00
8	480	690	420	480	517,50	118,43
10	510	720	405	495	532,50	133,32
15	528	744	456	492	555,00	129,38
20	492	678	420	480	517,50	111,54
30	486	684	420	498	522,00	113,31
40	432	660	396	486	493,50	117,00
50	411	642	390	474	479,25	114,22
60	390	630	390	480	472,50	113,25
90	376	626	380	492	468,50	117,96
120	350	622	356	524	463,00	133,19
150	335	626	348	528	459,25	141,83
180	312	630	342	500	446,00	147,81
210	294	632	336	515	444,25	157,64
240	293	646	322	520	445,25	167,59

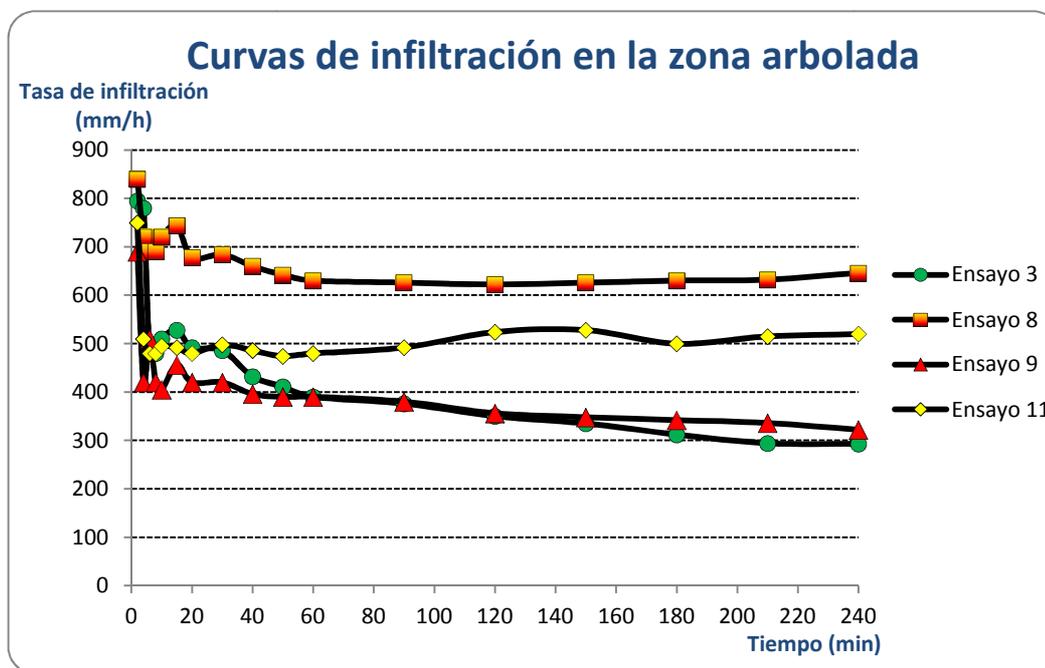


Figura 60. Curvas de infiltración para los cuatro ensayos realizados en la zona arbolada.

En la figura 61 se puede observar la curva de infiltración media para la zona arbolada. Resulta especialmente llamativo el hecho de que a los 60 minutos de haber comenzado el ensayo la velocidad de infiltración se estabiliza. Esta estabilización indica que se ha alcanzado la saturación del suelo y, a partir de ese momento, la velocidad de infiltración coincide con la velocidad de infiltración en suelo saturado o, lo que es lo mismo, la permeabilidad.

Otro aspecto que merece la pena destacar de la figura 61 es la menor diferencia que se produce entre la tasa de infiltración inicial (f_0) y la tasa de infiltración en la siguiente medida. A diferencia de lo que ocurría en la zona degradada, en este caso es de menos de 200 mm de diferencia. En este caso los suelos están más evolucionados por la presencia del arbolado y presentan una estructura más compacta, con menos grietas que la zona degradada.

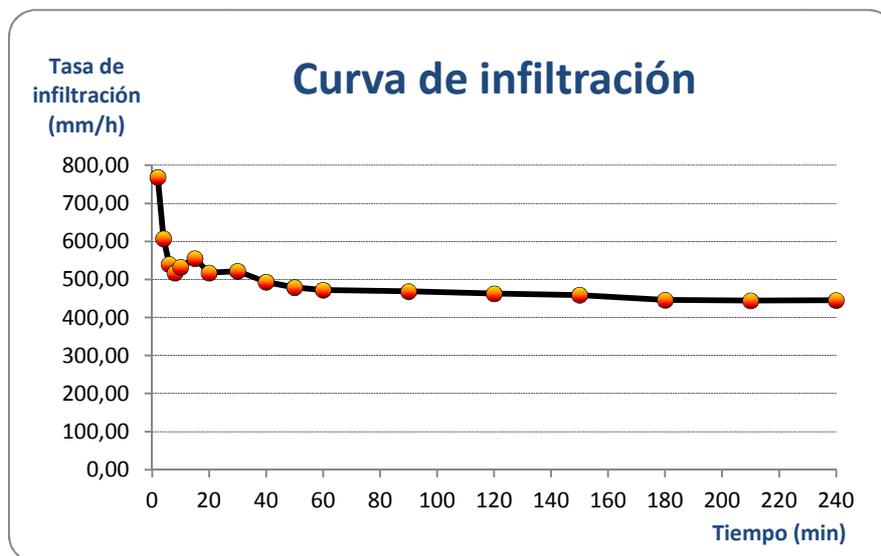


Figura 61. Curva de infiltración media para la zona arbolada. Fuente: elaboración propia.

En la tabla 16 aparecen los resultados de infiltración acumulada a lo largo del ensayo en la zona arbolada. El ensayo 8 fue el que mayor infiltración acumulada registró de los doce realizados con más de 2.500 mm en 4 horas. Si se compara este dato con la precipitación anual media en la zona de estudio (583,9 mm) se aprecia que en cuatro horas este suelo es capaz de infiltrar más de cuatro veces la precipitación caída durante un año.

**TABLA 16. INFILTRACIÓN ACUMULADA EN LA ZONA ARBOLADA**

Tiempo (min)	Ensayo 3 (mm)	Ensayo 8 (mm)	Ensayo 9 (mm)	Ensayo 11 (mm)	Media (mm)	Desviación típica
2	26,5	28	23	25	25,63	2,14
4	52,5	52	37	42	45,88	7,64
6	68,5	75	54	58	63,88	9,61
8	84,5	98	68	74	81,13	13,16
10	101,5	122	81,5	90,5	98,88	17,45
15	145,5	184	119,5	131,5	145,13	28,01
20	186,5	240,5	154,5	171,5	188,25	37,21
30	267,5	354,5	224,5	254,5	275,25	55,82
40	339,5	464,5	290,5	335,5	357,50	74,71
50	408	571,5	355,5	414,5	437,38	93,24
60	473	676,5	420,5	494,5	516,13	111,34
90	661	989,5	610,5	740,5	750,38	168,16
120	836	1300,5	788,5	1002,5	981,88	231,39
150	1003,5	1613,5	962,5	1266,5	1211,50	299,94
180	1159,5	1928,5	1133,5	1516,5	1434,50	372,82
210	1306,5	2244,5	1301,5	1774	1656,63	450,21
240	1453	2567,5	1462,5	2034	1879,25	533,23

En la figura 62 puede verse que la infiltración acumulada en la zona arbolada, por término medio, es casi 400 mm mayor que en la zona degradada. Este es uno de los hechos que se pretendía demostrar, sin embargo, el reducido número de ensayos realizados sumado a la poca homogeneidad registrada en los resultados de la zona degradada no han hecho posible confirmar este hecho de una forma estadística. No obstante, los resultados obtenidos parecen indicar que si suponemos que la infiltración en zonas arboladas es superior a la infiltración en zonas degradadas estamos en lo cierto.

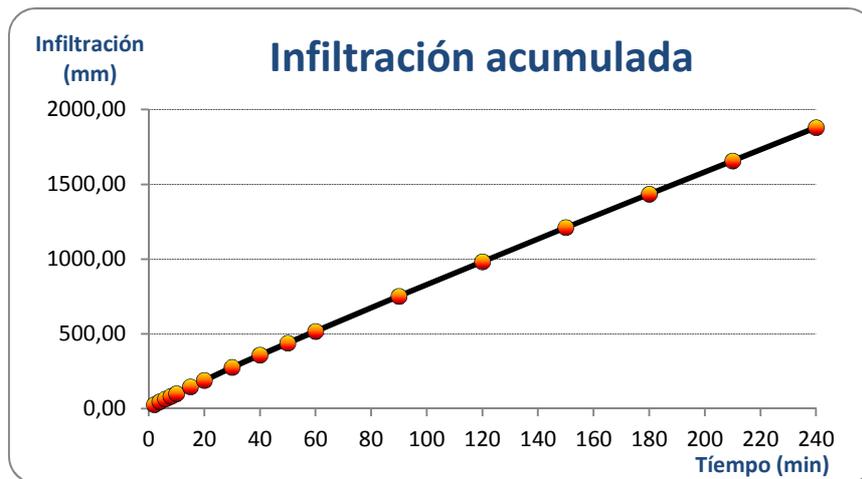


Figura 62. Infiltración acumulada media en la zona arbolada.

3.2.2. Resultados medios para la cuña de sedimentación del dique.

En la tabla 17 aparecen los valores de la velocidad de infiltración en mm/h de los cuatro ensayos realizados sobre la cuña de sedimentación del dique. Además, se recoge la media para cada instante en que se efectuó medición de altura infiltrada.

A diferencia de lo que sucede en la superficie degradada y de forma similar a la zona arbolada, los cuatro ensayos de infiltración tomaron valores bastante homogéneos, no habiendo ningún ensayo que destaque por exceso o defecto, como puede verse en la figura 63.



TABLA 17. VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN EN LA CUÑA DE SEDIMENTACIÓN

Tiempo (min)	Ensayo 5 (mm/h)	Ensayo 6 (mm/h)	Ensayo 7 (mm/h)	Ensayo 12 (mm/h)	Media (mm/h)	Desviación típica
2	780	660	930	810	795,00	110,91
4	510	420	630	570	532,50	89,58
6	660	360	630	360	502,50	165,00
8	510	435	630	270	461,25	150,69
10	495	360	600	285	435,00	140,18
15	528	462	636	336	490,50	125,51
20	480	492	642	336	487,50	125,03
30	501	465	597	330	473,25	110,56
40	453	468	582	318	455,25	108,12
50	462	474	570	312	454,50	106,59
60	450	480	582	312	456,00	111,39
90	421	444	514	292	417,75	92,69
120	394	394	485	258	382,75	93,58
150	376	369	447	226	354,50	92,63
180	370	388	428	214	350,00	93,85
210	342	392	403	220	339,25	83,81
240	317	358	387	226	322,00	70,15

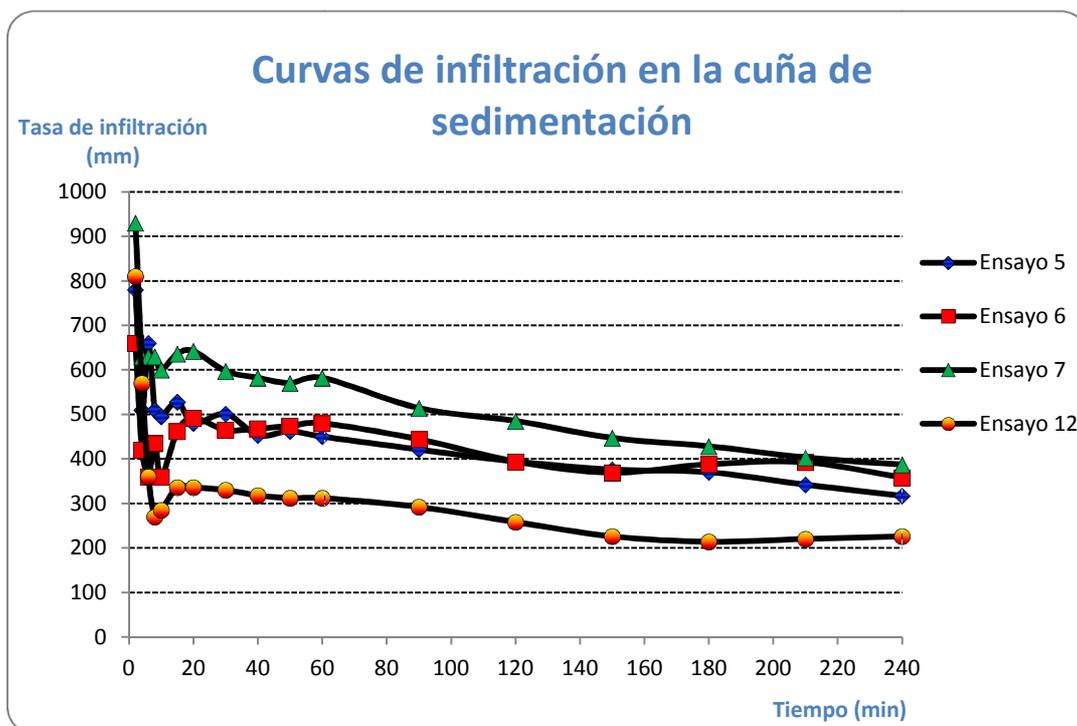


Figura 63. Curvas de infiltración para los cuatro ensayos realizados en la cuña de sedimentación.

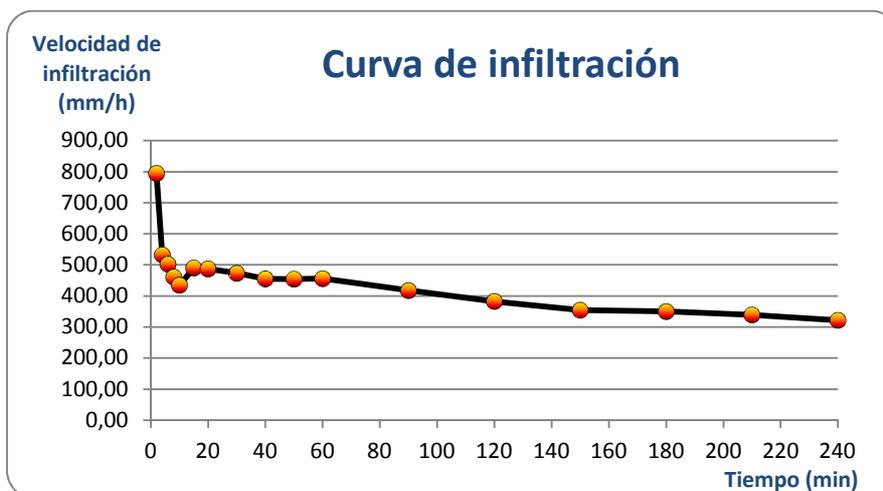


Figura 64. Curva de infiltración media para la cuña de sedimentación. Fuente: elaboración propia.

TABLA 18. INFILTRACIÓN ACUMULADA EN LA CUÑA DE SEDIMENTACIÓN

Tiempo (min)	Ensayo 5 (mm)	Ensayo 6 (mm)	Ensayo 7 (mm)	Ensayo 12 (mm)	Media (mm)	Desviación típica
2	26	22	31	27	26,50	3,70
4	43	36	52	46	44,25	6,65
6	65	48	73	58	61,00	10,61
8	82	62,5	94	67	76,38	14,41
10	98,5	74,5	114	76,5	90,88	18,87
15	142,5	113	167	104,5	131,75	28,59
20	182,5	154	220,5	132,5	172,38	38,06
30	266	231,5	320	187,5	251,25	55,97
40	341,5	309,5	417	240,5	327,13	73,25
50	418,5	388,5	512	292,5	402,88	90,45
60	493,5	468,5	609	344,5	478,88	108,49
90	704	690,5	866	490,5	687,75	153,79
120	901	887,5	1108,5	619,5	879,13	200,47
150	1089	1072	1332	732,5	1056,38	246,42
180	1274	1266	1546	839,5	1231,38	291,87
210	1445	1462	1747,5	949,5	1401,00	331,45
240	1603,5	1641	1941	1062,5	1562,00	365,65

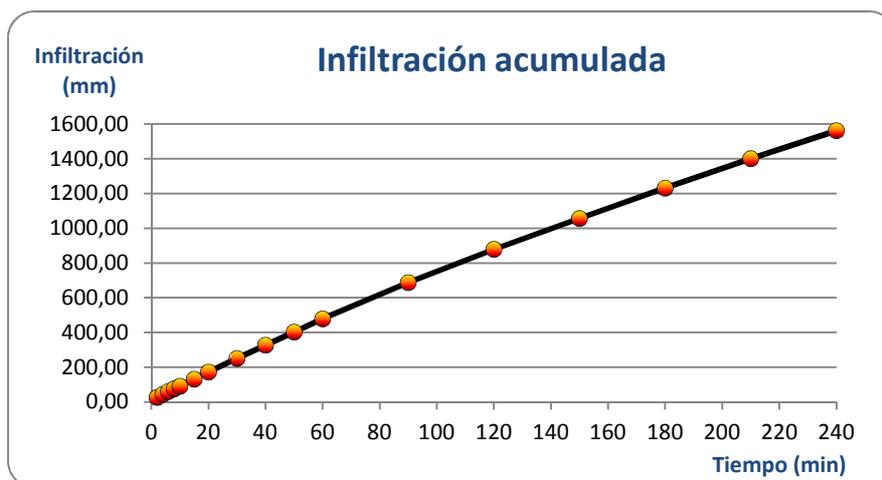


Figura 65. Infiltración acumulada media en la cuña de sedimentación.

3.3. COMPARACIÓN ENTRE LAS ZONAS OBJETO DE ANÁLISIS.

En el presente apartado hay una serie de tablas y figuras cuyo objetivo es mostrar las diferencias en los procesos de infiltración que se han producido entre las tres zonas objeto de análisis.

En la tabla 19 aparecen las velocidades medias expresadas en mm/h de las zonas objeto de análisis. Como ya se ha explicado, la superficie que presenta una mayor infiltración inicial (f_0 en el modelo de Horton) es la zona degradada debido a la disgregación de los materiales de la superficie. Por el contrario, la zona cuya tasa de infiltración inicial media es más baja es la zona arbolada debido a una mayor estabilidad de los agregados. Por otra parte, en el caso de la tasa de infiltración final (f_c en el modelo de Horton) ocurre lo contrario, es decir es superior en la zona arbolada.

Por otra parte, en la figura 67 se puede apreciar como la curva de infiltración de la zona arbolada tiende a permanecer constante, mientras que tanto en la zona degradada como en la cuña de sedimentación del dique va disminuyendo progresivamente, no llegando a estabilizarse por completo. Este hecho es de suma importancia en aguaceros de larga duración ya que al ser menos permeables al cabo de unas horas de haber comenzado el aguacero, se originará mayor cantidad de escorrentía y, además, al estar los suelos en peor estado, ésta arrastrará más sedimentos, por lo que la erosión hídrica en estas superficies será mucho más grave.

Otro aspecto que merece la pena destacar es el hecho de que en los ensayos de las zonas arboladas el agua del cilindro permanecía transparente las cuatro horas de duración del ensayo. Por el contrario, tanto en la cuña de sedimentación del dique como en la zona degradada el agua tenía un alto grado de turbidez (figura 66). Este

hecho puede servir para demostrar que las zonas boscosas cohesionan los suelos, los ayudan a evolucionar más rápidamente y, además, evitan, o al menos reducen, la erosión hídrica producida por fuertes aguaceros.



Figura 66: Izquierda: ensayo de infiltración en zona arbolada. Derecha: ensayo de infiltración en zona degradada. Puede observarse la diferencia de turbidez en el agua durante los ensayos.

TABLA 19. COMPARACIÓN DE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Tiempo	Zona arbolada (mm/h)	Zona degradada (mm/h)	Cuña de sedimentación (mm/h)
2	768,75	937,50	795,00
4	607,50	543,75	532,50
6	540,00	540,00	502,50
8	517,50	517,50	461,25
10	532,50	502,50	435,00
15	555,00	477,00	490,50
20	517,50	457,50	487,50
30	522,00	461,25	473,25
40	493,50	438,00	455,25
50	479,25	425,25	454,50
60	472,50	449,25	456,00
90	468,50	408,25	417,75
120	463,00	368,00	382,75
150	459,25	337,50	354,50
180	446,00	310,75	350,00
210	444,25	288,25	339,25
240	445,25	268,00	322,00

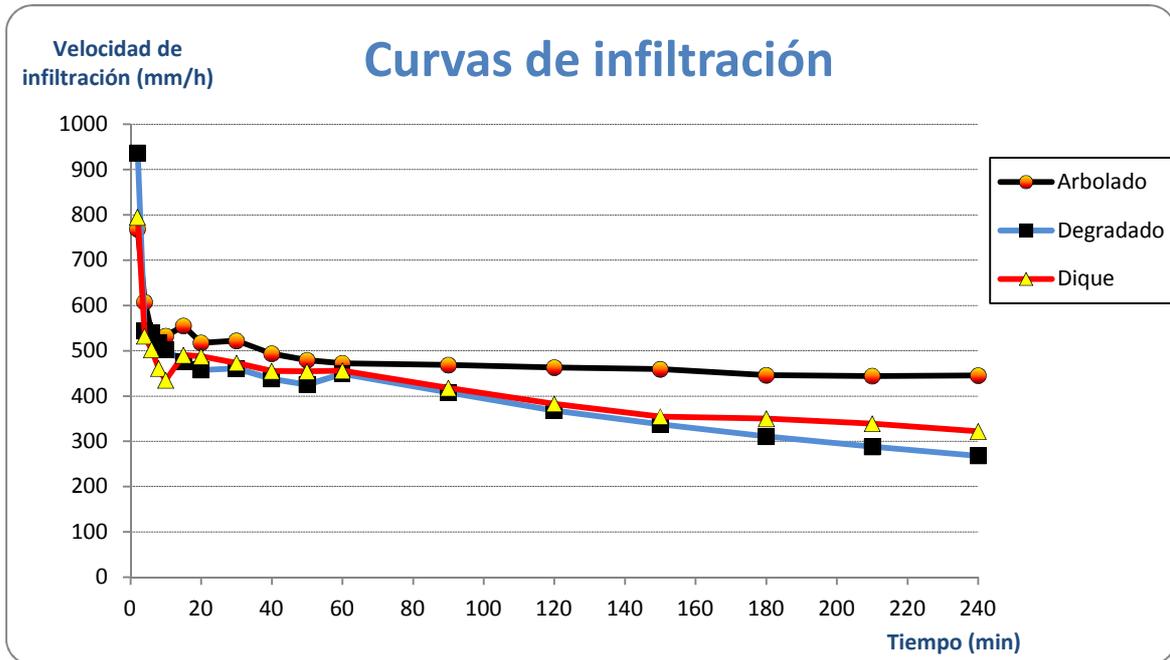


Figura 67. Comparación de las curvas de infiltración medias en las tres superficies estudiadas.

La velocidad de infiltración está calculada a partir de la altura infiltrada en cada intervalo, por lo que los aspectos que se han destacado para la velocidad de infiltración también se pueden observar en la infiltración acumulada. Tanto en la tabla 20 como en la figura 68 se observa que la infiltración acumulada tras cuatro horas de ensayo es mayor en la zona arbolada.



TABLA 20. COMPARACIÓN DE LA INFILTRACIÓN ACUMULADA

Tiempo (min)	Zona arbolada (mm)	Zona degradada (mm)	Cuña de sedimentación (mm)
2	25,62	31,25	26,50
4	45,87	49,37	44,25
6	63,87	67,37	61,00
8	81,12	84,62	76,37
10	98,87	101,37	90,87
15	145,12	141,12	131,75
20	188,25	179,25	172,37
30	275,25	256,12	251,25
40	357,50	329,12	327,12
50	437,37	400,00	402,87
60	516,12	474,87	478,87
90	750,37	679,00	687,75
120	981,87	863,00	879,12
150	1211,50	1031,75	1056,37
180	1434,50	1187,12	1231,37
210	1656,62	1331,25	1401,00
240	1879,25	1465,25	1562,00

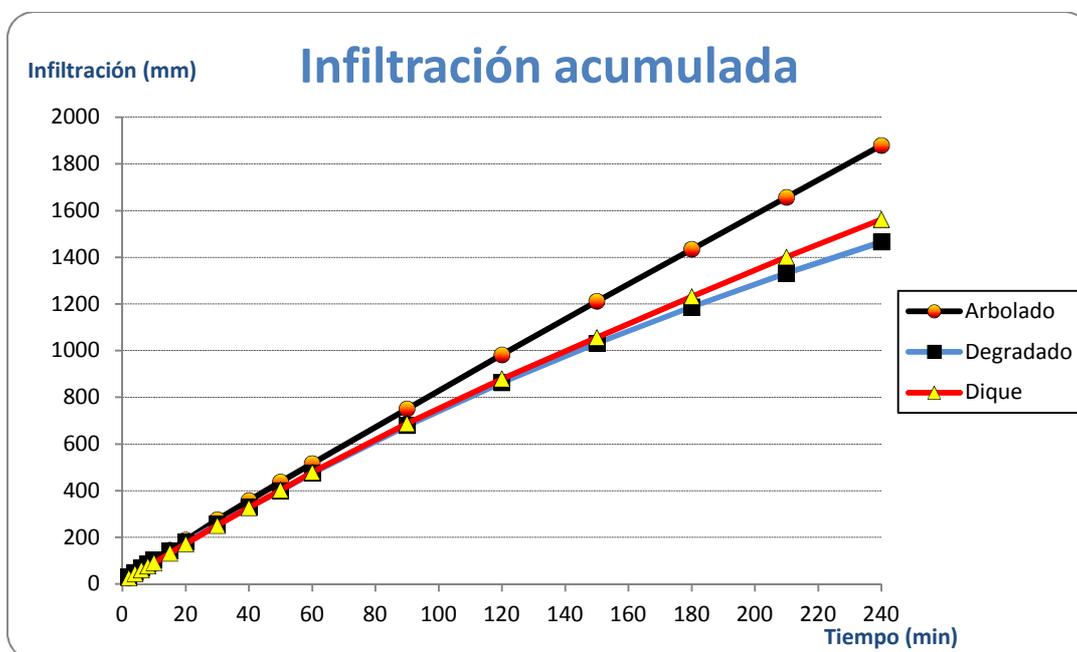


Figura 68. Comparación de la infiltración acumulada media en las tres superficies estudiadas.



3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS

Para llevar a cabo este apartado se ha realizado un análisis de la varianza de manera que se pretendía comprobar que factores influían sobre la velocidad de infiltración de una forma significativa. Para ello se ha efectuado un análisis de la varianza con medidas repetidas ya que son datos tomados en el mismo lugar a lo largo de 4 horas.

El principal objetivo que perseguimos con esta técnica es, al igual que con el Análisis de la Varianza, el contrastar la igualdad de los efectos medios de los niveles del factor en estudio.

En la tabla 21 aparece la ANOVA efectuada para comprobar la influencia de la zona sobre el valor de la velocidad de infiltración. Este análisis, a pesar de que, tras lo visto en los anteriores apartados, todo parece indicar que las zonas arboladas poseen una mayor capacidad de infiltración, no permite afirmar este hecho de un modo estadístico, ya que el p-valor obtenido dista mucho de alcanzar un nivel de significación aceptable (0,1).

TABLA 21: ANOVA PARA COMPROBAR LA INFLUENCIA DE LA ZONA SOBRE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Zona	2	160820	80410	0,2060	0,8176
Residuales	9	3513549	390394		

En la tabla 22 se han evaluado dos factores, el tiempo y la interacción tiempo-zona. En cuanto al tiempo, se puede afirmar con toda seguridad, por el p-valor obtenido, que tiene influencia sobre la velocidad de infiltración, hecho que estaba completamente confirmado *a priori*. Por otra parte, el p-valor para la interacción tiempo-zona es lo suficientemente bajo como para poder afirmar que existe algún tipo de influencia entre este factor y la velocidad de infiltración.

La explicación más probable que puede darse está relacionada con lo explicado en el anterior apartado. Al transcurrir el tiempo, las curvas de infiltración medias para cada zona se van separando hasta llegar a un máximo de diferencia a las 4 horas. Esta tendencia es la que queda recogida en los resultados de la ANOVA que aparece en la tabla 22.

**TABLA 22: ANOVA PARA COMPROBAR LA INFLUENCIA DEL TIEMPO Y LA RELACIÓN TIEMPO-ZONA SOBRE LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN**

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Tiempo	16	2388712	149295	32,5588	$2 \cdot 10^{-16}$
Tiempo:zona	32	212660	6646	1,4493	0,07373
Residuales	144	660295	4585		

En la tabla 23 aparece la ANOVA efectuada para comprobar la influencia de la zona sobre el valor de la infiltración acumulada. Este análisis, al igual que ocurría con la ANOVA para la velocidad de infiltración, no permite afirmar de un modo estadístico que la zona influye sobre la cantidad de infiltración acumulada, ya que el p-valor obtenido dista mucho de alcanzar un nivel de significación aceptable (0,1).

TABLA 23: ANOVA PARA COMPROBAR LA INFLUENCIA DEL TIEMPO Y LA RELACIÓN TIEMPO-ZONA SOBRE LA INFILTRACIÓN ACUMULADA

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Zona	2	300738	150369	0,287	0,7571
Residuales	9	4715286	523921		

En la tabla 24 se han evaluado dos factores, el tiempo y la interacción tiempo-zona. En primer lugar, el tiempo presenta una influencia significativa (0,1) sobre la infiltración. Por otra parte, el p-valor para la interacción tiempo-zona en este caso parece indicar que no existe influencia entre la zona de estudio y la infiltración acumulada.

TABLA 24: ANOVA PARA COMPROBAR LA INFLUENCIA DEL TIEMPO Y LA RELACIÓN TIEMPO-ZONA SOBRE LA INFILTRACIÓN ACUMULADA

Factor	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Media cuadrática	F-valor	p-valor
Tiempo	16	55790081	3486880	106,0538	$2 \cdot 10^{-16}$
Tiempo:zona	32	582486	18203	0,5536	0,9738
Residuales	144	4734491	32878		

3.5. COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS PARA LA VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN A LO LARGO DEL ENSAYO.

En este apartado se recogen las comparaciones entre las medias para la velocidad de infiltración en determinados instantes de los ensayos.

En primer lugar, en la figura 69 aparecen los diagramas de comparación de medias al comenzar el ensayo (f_0) y al finalizar el mismo (f_c). En el diagrama de comparación para f_0 llama especialmente la atención la amplitud del intervalo de medias para la zona degradada que va desde algo menos de 300 mm/h hasta más de 1.500 mm/h. Por el contrario, el intervalo para la zona arbolada es mucho más pequeño lo que hace ver una mayor homogeneidad en las medidas. Por su parte, en el diagrama de comparación de medias para f_c pueden apreciarse diferencias significativas entre la media para la zona arbolada y las medias para la cuña de sedimentación del dique y la zona degradada. De este modo, estas gráficas coinciden con los resultados obtenidos en la ANOVA que indica que la interacción tiempo-zona tiene una cierta influencia sobre la velocidad de infiltración.

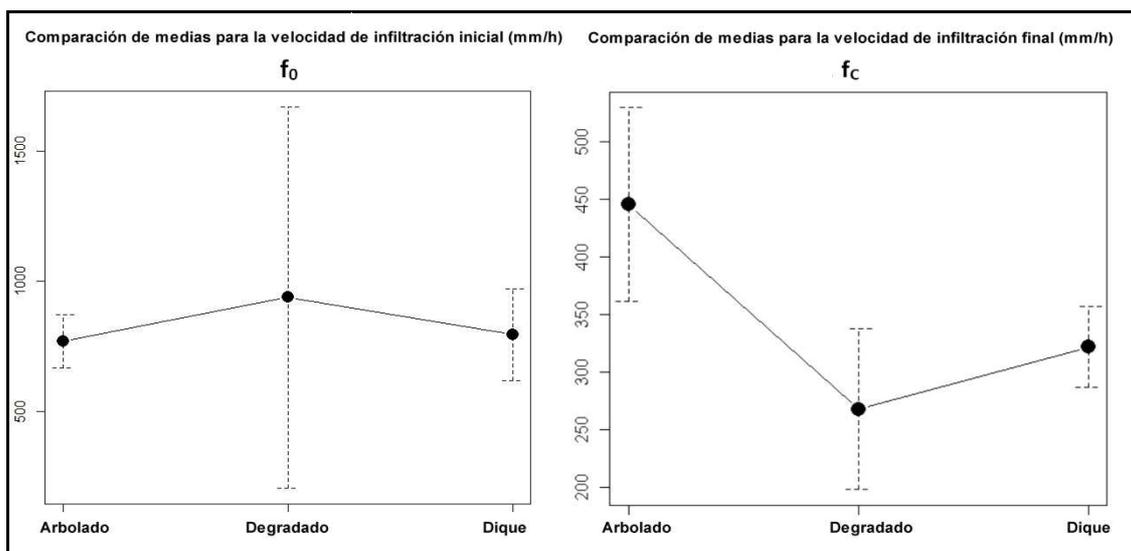


Figura 69. Izquierda: comparación de las medias para la velocidad de infiltración inicial, f_0 en el modelo de Horton. Derecha: comparación de las medias para la velocidad de infiltración final, f_c en el modelo de Horton.

En las figuras 70 y 71 aparecen los diagramas de medias para la velocidad de infiltración calculados cada 30 minutos. Puede verse una tendencia ascendente de la media de los ensayos en la zona arbolada con respecto a los ensayos en las otras dos zonas. El máximo de diferencia aparece a los 240 minutos; además los intervalos de medias en este instante entre la zona arbolada y las otras dos zonas analizadas no coinciden, por lo que podemos afirmar que son significativamente diferentes.

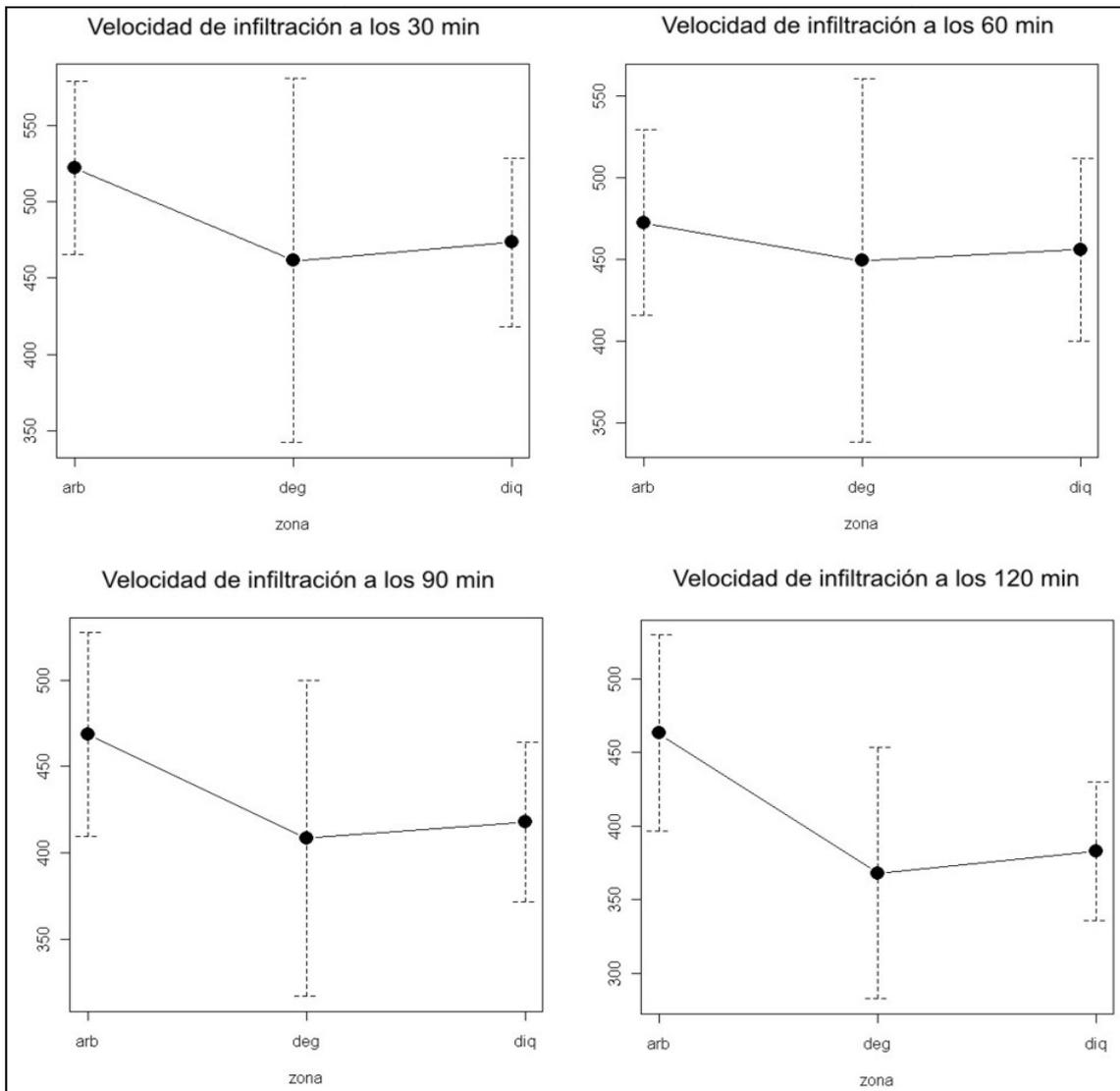


Figura 70. Comparación entre las medias de velocidad de infiltración en los minutos 30, 60, 90 y 120.

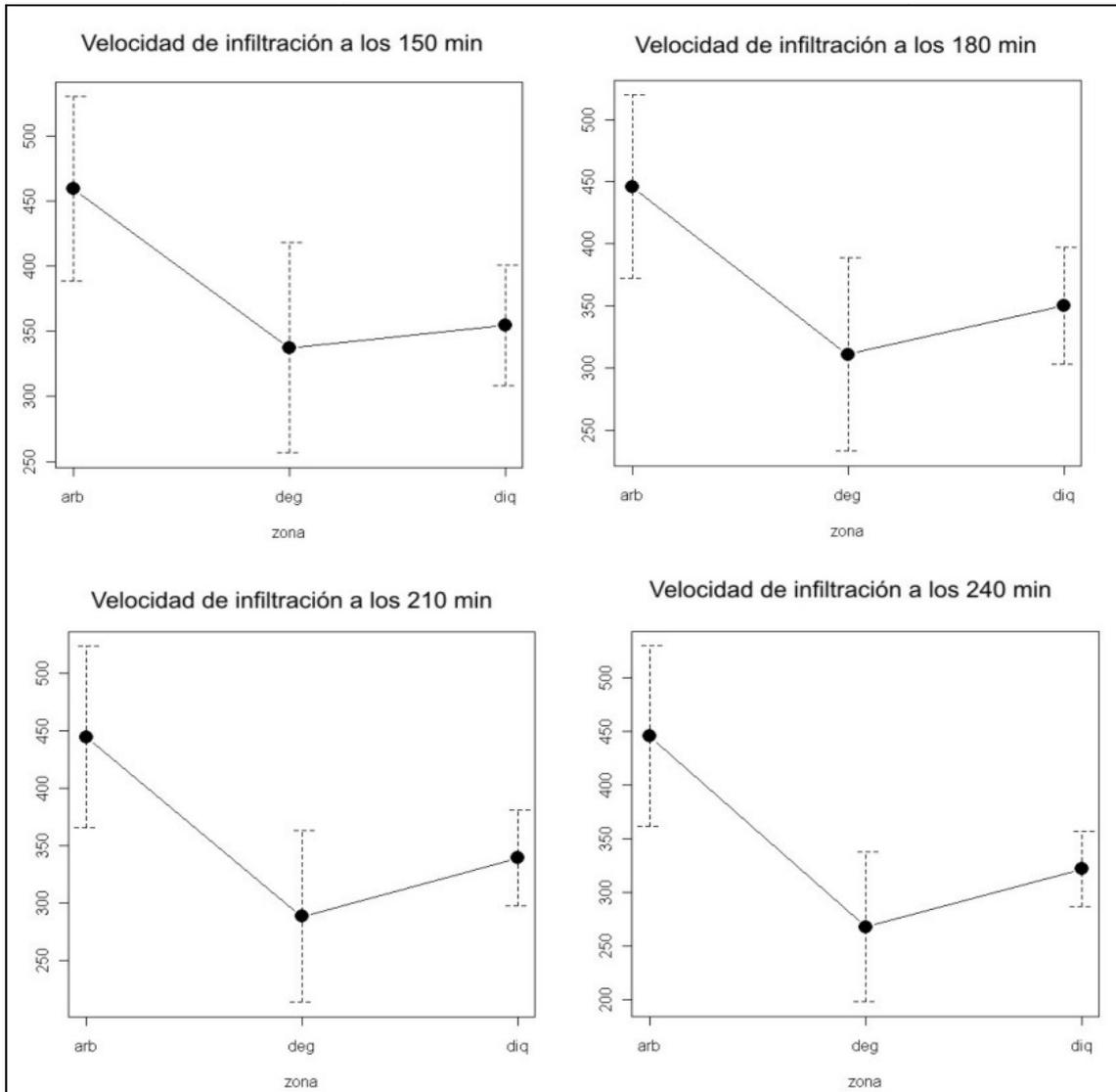


Figura 71. Comparación entre las medias de velocidad de infiltración en los minutos 150, 180, 210 y 240.

3.6. COMPARACIÓN ENTRE MEDIAS PARA LA INFILTRACIÓN ACUMULADA A LO LARGO DEL ENSAYO.

En este apartado aparecen las comparaciones de infiltración acumulada en varios instantes del ensayo. En este caso, a diferencia de lo que sucede con la velocidad de infiltración, no se registra una tendencia que muestre ninguna diferencia significativa entre unas superficies y otras. Además, en los ocho instantes en los que se han efectuado los diagramas comparativos no se aprecia ninguna diferencia significativa.

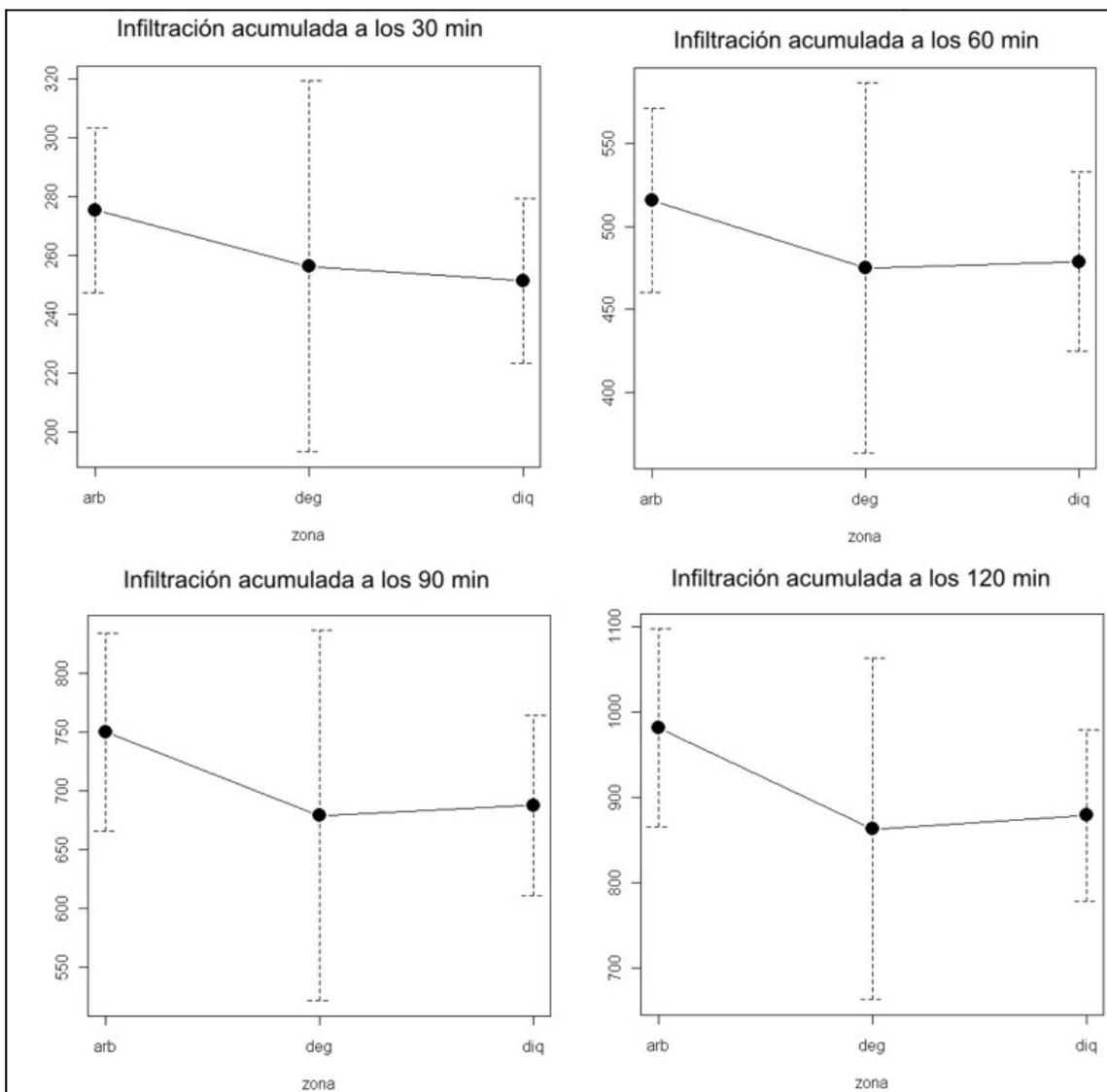


Figura 72. Comparación de las medias de infiltración acumulada en los minutos 30, 60, 90 y 120.

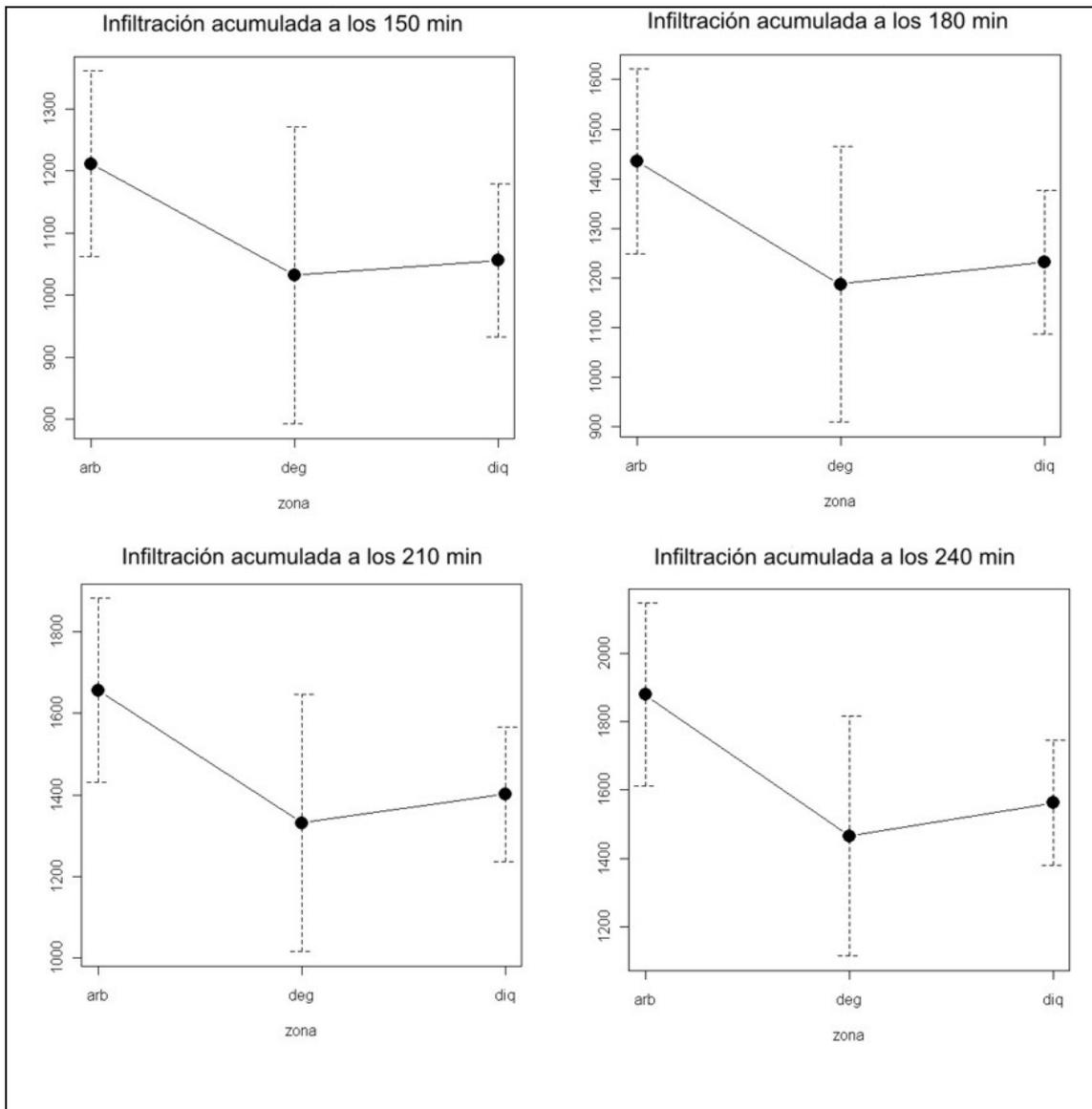


Figura 73. Comparación de las medias de infiltración acumulada en los minutos 150, 180, 210 y 240.

3.7. AJUSTE DE LOS RESULTADOS AL MODELO DE HORTON.

El modelo de Horton permite simular la curva de capacidad de infiltración del suelo. Es un modelo de tipo empírico, que se basa en conceptos simplificados que permiten expresar la capacidad de infiltración como una función del tiempo, de constantes empíricas y parámetros del suelo.

La expresión de Horton es la siguiente:

$$f = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-k \cdot t}$$

En el presente apartado se han llevado a cabo tres ajustes a la ecuación de Horton. El primer ajuste, para la zona degradada, aparece en la figura 74 y para realizarlo se ha seguido la metodología propuesta por Martínez de Azagra & Navarro (1995). En primer lugar, hay que conocer dos valores empíricos, f_0 y f_c , que será la media aritmética de la velocidad de infiltración inicial de los cuatro ensayos en zona degradada y f_c que será la media aritmética de la velocidad de infiltración final. Para obtener k , se tiene que elegir un instante del ensayo en el que se tengan datos, en este caso el minuto 30. Con los datos del minuto 30 se despeja k y se utiliza ese valor para toda la curva. De este modo, la curva de Horton y la curva de infiltración obtenida en los ensayos coincidirán en ese punto.

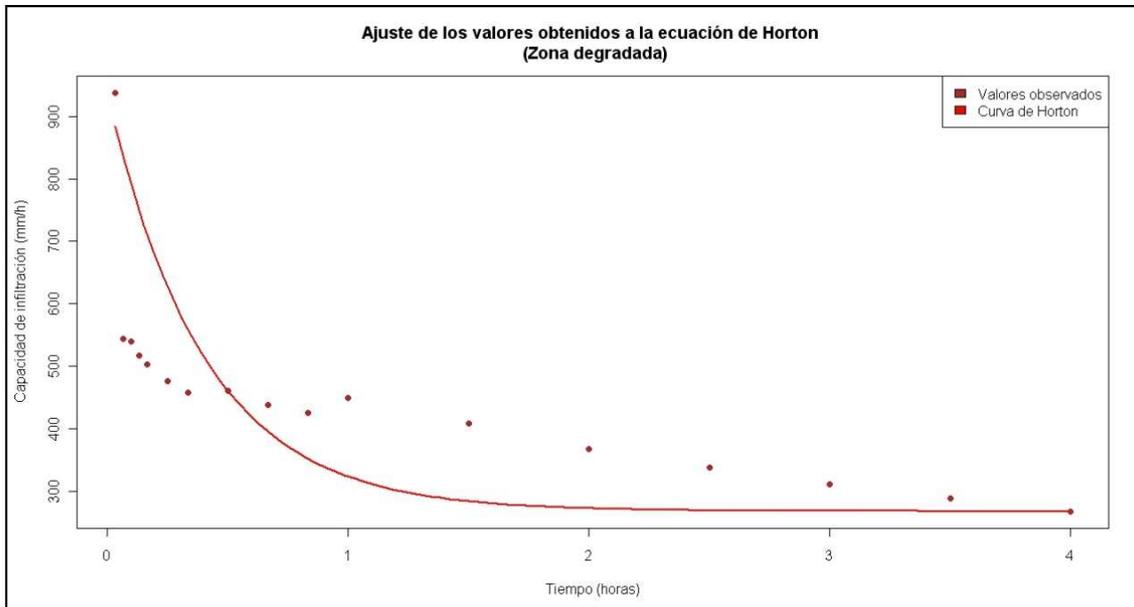


Figura 74. Curva de Horton para la zona degradada.



En las figuras 75 y 76 se ha ajustado la curva de Horton para la zona arbolada y la cuña de sedimentación del dique respectivamente. Estas figuras han sido realizadas de forma análoga a la figura 74.

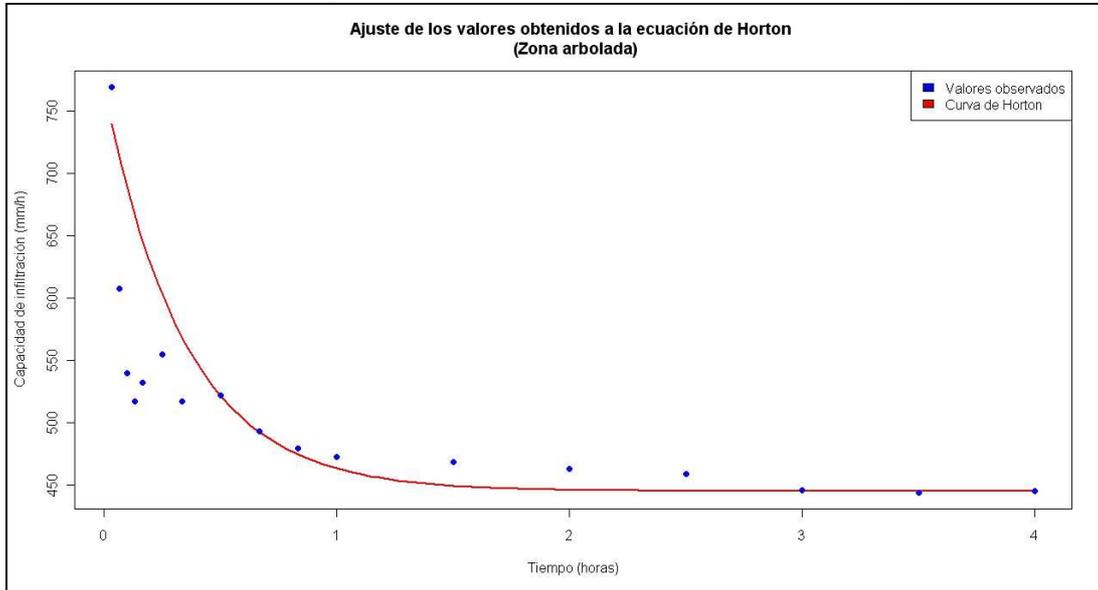


Figura 75. Curva de Horton para la zona arbolada.

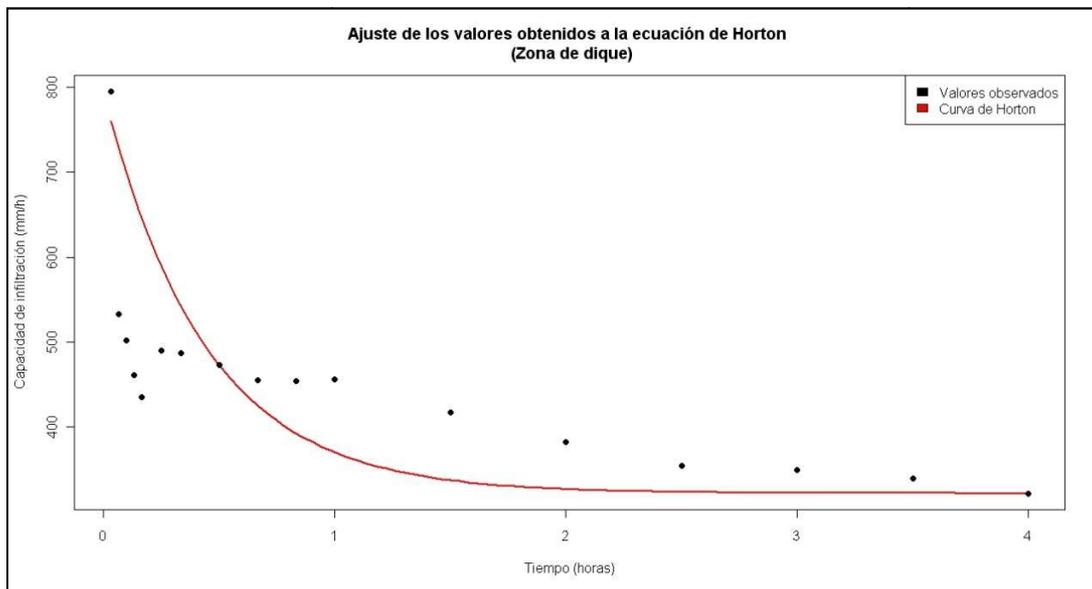


Figura 76. Curva de Horton para la cuña de sedimentación del dique.



3.6.1. Bondad del ajuste

A continuación, se trata de comprobar de una forma matemática la bondad del ajuste, esto es, si los datos obtenidos de forma experimental siguen en mayor o menor medida la distribución teórica de Horton.

Para ello se han utilizado dos metodologías. La primera, más intuitiva pero menos precisa desde el punto de vista estadístico, consiste en hallar un coeficiente de correlación que indique la relación que existe entre ambas matrices de puntos, los teóricos y los observados en las diferentes zonas objeto de ensayo.

En las tablas 25, 26 y 27 aparecen los datos utilizados para ajustar la curva de Horton a los datos experimentales en las tres zonas objeto de estudio. En los tres casos, los resultados en los coeficientes de correlación obtenidos no son excelentes, sin embargo, si se puede considerar un ajuste aceptable.

TABLA 25. DATOS PARA AJUSTAR A LA CURVA DE HORTON EN LA ZONA ARBOLADA

Tiempo (min)	Velocidad de infiltración medida (mm/h)	Velocidad de infiltración teórica de Horton hallando k en el min 30 (mm/h)
2	768,75	730,43
4	607,50	696,65
6	540,00	666,88
8	517,50	640,63
10	532,50	617,49
15	555,00	570,93
20	517,50	536,95
30	522,00	494,07
40	493,50	471,24
50	479,25	459,09
60	472,50	452,62
90	468,50	446,36
120	463,00	445,42
150	459,25	445,28
180	446,00	445,25
210	444,25	445,25
240	445,25	445,25

Coeficiente de correlación 0,8475



TABLA 26. DATOS PARA AJUSTAR A LA CURVA DE HORTON EN LA ZONA DEGRADADA

Tiempo (min)	Velocidad de infiltración medida	Velocidad de infiltración teórica de Horton hallando k en el min 30
2	937,50	884,22
4	543,75	835,19
6	540,00	790,05
8	517,50	748,51
10	502,50	710,27
15	477,00	627,46
20	457,50	560,16
30	461,25	461,00
40	438,00	395,50
50	425,25	352,22
60	449,25	323,64
90	408,25	284,04
120	368,00	272,62
150	337,50	269,33
180	310,75	268,38
210	288,25	268,11
240	268,00	268,03
Coefficiente de correlación		0,8502

**TABLA 27. DATOS PARA AJUSTAR A LA CURVA DE HORTON EN LA CUÑA DE SEDIMENTACIÓN DEL DIQUE**

Tiempo (min)	Velocidad de infiltración medida	Velocidad de infiltración teórica de Horton hallando k en el min 30
2	795,00	760,38
4	532,50	728,29
6	502,50	698,56
8	461,25	670,99
10	435,00	645,45
15	490,50	589,47
20	487,50	543,18
30	473,25	473,25
40	455,25	425,43
50	454,50	392,73
60	456,00	370,37
90	417,75	337,47
120	382,75	326,95
150	354,50	323,58
180	350,00	322,51
210	339,25	322,16
240	322,00	322,05

Coefficiente de correlación **0,7639**

La otra metodología consiste en efectuar un contraste de bondad del ajuste que pretende averiguar si puede admitirse o no la hipótesis nula H_0 de seguir la variable aleatoria en observación una determinada distribución modelo F_0 . Expresando dicha hipótesis nula de la forma $H_0: F(x) = F_0(x)$.

Para efectuar este análisis es necesario recurrir al estadístico de Pearson

$$\lambda = \sum_{i=1}^k \frac{(n_i - np_i)^2}{np_i}$$

Una vez que se conoce el valor numérico del estadístico de Pearson es posible contrastar a un nivel de significación $\alpha = 0,05$ la hipótesis nula $H_0: F(x) = F_0(x)$ frente a la alternativa de que los datos no se ajustan al modelo F_0 , el test óptimo a utilizar es:

- ✘ Se acepta H_0 si $\lambda < \chi_{n-1;\alpha}^2$
- ✘ No se acepta H_0 si $\lambda \geq \chi_{n-1;\alpha}^2$



De este modo, ya conocido el proceso, se va a pasar a analizar los resultados obtenidos en los ensayos de infiltración realizados que aparecen en las tablas 28, 29 y 30.

TABLA 28. BONDAD DEL AJUSTE PARA LA ZONA ARBOLADA

Tiempo (min)	n_i	np_i	λ
2	768,750	732,374	1,807
4	607,500	700,089	12,245
6	540,000	671,434	25,728
8	517,500	646,001	25,561
10	532,500	623,427	13,262
15	555,000	577,483	0,875
20	517,500	543,386	1,233
30	522,000	499,302	1,032
40	493,500	475,021	0,719
50	479,250	461,647	0,671
60	472,500	454,281	0,731
90	468,500	446,759	1,058
120	463,000	445,502	0,687
150	459,250	445,292	0,438
180	446,000	445,257	0,001
210	444,250	445,251	0,002
240	445,250	445,250	0,000
Total			86,050

Al obtener λ un valor mayor que el proporcionado por la distribución χ^2 para un nivel de significación de 0,05 y 16 grados de libertad (26,3) no se acepta la hipótesis nula. Esto es, el ajuste a la curva de Horton con los datos obtenidos en los ensayos realizados en la zona arbolada no es satisfactorio.

**TABLA 29. BONDAD DEL AJUSTE PARA LA ZONA DEGRADADA**

Tiempo (min)	n_i	np_i	λ
2	937,500	884,223	3,210
4	543,750	835,186	101,696
6	540,000	790,051	79,141
8	517,500	748,508	71,295
10	502,500	710,270	60,778
15	477,000	627,465	36,081
20	457,500	560,163	18,815
30	461,250	461,002	0,000
40	438,000	395,497	4,568
50	425,250	352,224	15,140
60	449,250	323,638	48,753
90	408,250	284,039	54,317
120	368,000	272,624	33,367
150	337,500	269,333	17,253
180	310,750	268,384	6,688
210	288,250	268,111	1,513
240	268,000	268,032	0,000
Total			552,614

Al obtener λ un valor mayor que el proporcionado por la distribución χ^2 para un nivel de significación de 0,05 y 16 grados de libertad (26,3) no se acepta la hipótesis nula. Esto es, el ajuste a la curva de Horton con los datos obtenidos en los ensayos realizados en la zona degradada no es satisfactorio.

**TABLA 30. BONDAD DEL AJUSTE PARA LA CUÑA DE SEDIMENTACIÓN DEL DIQUE**

Tiempo (min)	n_i	np_i	λ
2	795,000	760,380	1,576
4	532,500	728,293	52,637
6	502,500	698,555	55,025
8	461,250	670,994	65,563
10	435,000	645,450	68,618
15	490,500	589,473	16,618
20	487,500	543,184	5,708
30	473,250	473,252	0,000
40	455,250	425,430	2,090
50	454,500	392,728	9,716
60	456,000	370,366	19,800
90	417,750	337,466	19,100
120	382,750	326,946	9,525
150	354,500	323,581	2,954
180	350,000	322,506	2,344
210	339,250	322,162	0,906
240	322,000	322,052	0,000
Total		332,180	

Al obtener λ un valor mayor que el proporcionado por la distribución χ^2 para un nivel de significación de 0,05 y 16 grados de libertad (26,3) no se acepta la hipótesis nula. Esto es, el ajuste a la curva de Horton con los datos obtenidos en los ensayos realizados en la cuña de sedimentación del dique no es satisfactorio.



4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas están en función de los objetivos marcados al comenzar la investigación.

Los objetivos marcados han sido dos. En primer lugar se pretendía encontrar diferencias en la velocidad de infiltración y la infiltración acumulada entre tres zonas de la restauración. En este sentido, se puede afirmar que, con el trabajo realizado, la zona no influye significativamente ni en la velocidad de infiltración ni en la infiltración acumulada. No obstante, si al factor zona se le añade la variable tiempo, la interacción de ambos factores influye de una forma significativa sobre la velocidad de infiltración, pero no sobre la infiltración acumulada. Esto es, la velocidad de infiltración en la zona arbolada es significativamente superior a la velocidad de infiltración en la superficie degradada y la cuña de sedimentación del dique, no habiendo diferencias entre las dos últimas. Por último, cabe destacar que las mayores diferencias entre la velocidad de infiltración se producen a las cuatro horas de comenzar los ensayos.

El segundo objetivo consistía en ajustar los datos experimentales al modelo de Horton y de este modo poder predecir la infiltración para este tipo de suelos en un instante dado. Se han utilizado dos métodos y ninguno nos permite decir que el ajuste de los resultados a la curva de Horton es excepcional, sin embargo, los coeficientes de correlación obtenidos nos permiten utilizar este modelo para intuir la velocidad de infiltración en un instante dado sin cometer un error excesivo.



5. BIBLIOGRAFÍA

AMERMAN, C.R. (1983). *Infiltration measurements*. Proc. Conf. on advances in infiltration. Chicago. ASAE Publication, 201-214.

BLANCO, R.; 1999. *El infiltrómetro de cilindro simple como método de cálculo de la conductividad hidráulica de los suelos. Experiencias de campo en ámbitos de montaña*. Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia. Universidad de Málaga. Málaga. España.

BOUWER, H.; 1996. *Intake Rate: Cylinder Infiltrometer*. U.S. Water Conservation Laboratory. Phoenix. United States.

BRAS, R.L.; 1990. *Hydrology: an introduction to Hydrology science*. Addison Wesley, New York.

CALVO CASES, A; BOIX-FAYOS, C; IMESON, A.C.; SORIANO SOTO, M.D. & TIEMESSEN, I.R. (1998). *Spatial and short-term temporal variations in runoff, soil agregation and other soil properties along a mediterranean climatological gradient*. Catena. 123-138.

CERDÀ, A.; 1995. *Factores y variaciones espacio-temporales de la infiltración en los ecosistemas mediterráneos*. Geoforma Ediciones. Logroño. España.

GARCÍA, A.; 2008. *Estadística aplicada: conceptos básicos*. UNED, Colección Educación Permanente. Madrid. España.

GARCÍA, A.; 2011. *Métodos avanzados de estadística aplicada*. UNED, Colección Educación Permanente. Madrid. España.

HORTON, R.E.; 1940. *An approach toward a physical interpretation of infiltration capacity*. Soil Science Society of America Journal. 399-417.

KNOLL, G. & HOPKINS, H.H. (1959). *Effects of grazing and trampling upon certain soil properties*. Trans. Kans. Acad. Sci, 221-231.

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. & NAVARRO, J.; 2007. *Hidrología Forestal. El ciclo hidrológico*. Universidad de Valladolid. Valladolid. España.

MARTÍNEZ DE AZAGRA, A.; PANDO, V.; DEL RÍO, J. & NAVARRO, J.; 2006. *Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional*. Ecología nº20. 471-491. Palencia. España.

MOLINA, D.M.; 1993. *Efectos del fuego controlado en la velocidad de infiltración del agua en suelos forestales: un caso de estudio en la costa norte de California*. Dept. of Forestry and Resource Management, University of California. Berkeley. USA.



NAVE, R.; PEDRANI, A.; VICH, A & MARIANI, A.; 1994. *Ajuste del modelo de Horton mediante datos de infiltración obtenidos en el piedemonte mendocino*. INIGEA. Mendoza. Argentina.

PALACIO, E.; 1999. *La restauración hidrológico-forestal en España*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. España.

PONCE, V.M. (1989). *Engineering hydrology. Principles and practices*. Prentice-Hall. New Jersey.

PORTA, J. ET AL. (1999). *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. 2º edición. Madrid.

RIVAS MARTÍNEZ, S.; 1975. *Mapa de vegetación de la provincia de Ávila*. Anales Institución Botánica Cavanilles. 1493-1556.

RUIZ, J.D.; DELGADO, J.J.; GALÁN, O; MARTÍNEZ, J.F.; NÚÑEZ, A; BUENO, F.E.; CALVO, L; GALLEGOS, A.; LUCAS, B.; MÁRQUEZ, C.; NAVARRO, M.; NOGUERA, M.J.; RAMÍREZ, G.; ROMERO, A.R. & RUÍZ, E.J.; 2002. *Métodos para la estimación de la escorrentía en vertientes de litología no acuífera en ámbitos mediterráneos*. Baetica. Estudios de Arte, Geografía e Historia. Universidad de Málaga. Málaga. España.

WHITTOW, J.; 1984. *Dictionary of Physical Geography*. Penguin. London.

YOUNGS, E.G. (1983). "Soil physical theory and heterogeneity". *Agricultural Water Management*. 145-159.



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mis profesores Joaquín Navarro de la Universidad de Valladolid y Jorge Mongil de la Universidad Católica de Ávila su ayuda y estímulo a la hora de efectuar el presente trabajo.

Por otra parte, quiero dar las gracias también a todas las personas que me han ayudado durante la realización de los ensayos de campo, José Ángel Jiménez, Laura Velayos, Ángela Muñoz, Miguel Muñoz y Ángela Jiménez.

Por último, quiero agradecer a Luis Pedro Martín su ayuda y consejos en la realización del estudio estadístico.