



---

**Universidad de Valladolid**  
**Campus de Palencia**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Titulación: MÁSTER EN INGENIERÍA DE MONTES**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LA  
INFILTRACIÓN EN ÁREAS DEGRADADAS  
Y NATURALES DE LA LOCALIDAD DE  
SALDAÑA (PALENCIA)**

**MEMORIA**

**Alumno: ALBERTO CAMPANO FERNÁNDEZ**

**Tutor: JOAQUÍN NAVARRO HEVIA**

**SEPTIEMBRE DE 2014**



## **AGRADECIMIENTOS**

Doy las gracias a la gente que me ha ayudado durante estos años, como son mi familia y amigos y especialmente a los que me han ayudado en estos meses de ejecución de este trabajo, tanto directamente como a los que me han apoyado indirectamente, en especial a mi tutor Joaquín y a Nuria y como no a esos amigos que se desplazaron conmigo a realizar las mediciones aun sabiendo que no iba a ser el día más divertido de sus vidas, como son Víctor López, Iván Sarmiento y Pablo de Miguel.

Alberto

# ÍNDICE

# ÍNDICE

## MEMORIA

<b>1. RESUMEN</b>	<b>3</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2.1. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>5</b>
<b>2.2. ANTECEDENTES</b>	<b>6</b>
2.2.1. Estudios previos de medición de la infiltración mediante el uso de infiltrómetros de cilindro simple	6
2.2.2. Revisión bibliográfica acerca del papel de los distintos tipos de vegetación en la infiltración	30
<b>3. OBJETIVOS</b>	<b>59</b>
<b>4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO</b>	<b>61</b>
<b>4.1. LOCALIZACIÓN</b>	<b>61</b>
<b>4.2. LA RESTAURACIÓN HIDROLÓGICO-FORESTAL DE SALDAÑA</b>	<b>62</b>
<b>4.3. ESTUDIO CLIMATOLÓGICO</b>	<b>63</b>
<b>4.4. GEOLOGÍA</b>	<b>67</b>
<b>4.5. EDAFOLOGÍA</b>	<b>69</b>
4.5.1. Clasificación de los suelos	69
4.5.2. Características del suelo	69
4.5.3. Factor de erosionabilidad de la U.S.L.E. (Wischmeier y Smith, 1978).	72
<b>4.6. HIDROLOGÍA</b>	<b>73</b>
4.6.1. Cuenca de estudio	73
4.6.2. Morfología de las cárcavas de estudio	74
<b>4.7. VEGETACIÓN</b>	<b>75</b>
4.7.1. Clasificación biogeográfica y bioclimática	75

4.7.2. Vegetación potencial	76
4.7.3. Vegetación actual	77
<b>5. MATERIAL Y MÉTODOS</b>	<b>79</b>
<b>5.1. MATERIAL</b>	<b>79</b>
5.1.1. Infiltrómetro simple	79
5.1.2. Flotador	80
5.1.3. Multímetro Aquaterr EC200	81
5.1.4. Medida de la densidad aparente	81
5.1.5. Malla cuadrada	82
5.1.6. Otro material	82
<b>5.2. DISEÑO EXPERIMENTAL</b>	<b>83</b>
5.2.1. Zonas de estudio	83
5.2.1.1. Primeras zonas de estudio	83
5.2.1.2. Segundas zonas de estudio	85
5.2.2. Descripción de los experimentos	86
5.2.2.1. Introducción	86
5.2.2.2. Protocolo de medida de la infiltración	89
5.2.2.3. Determinación de la densidad aparente	93
<b>5.3. METODOLOGÍA</b>	<b>94</b>
5.3.1. Análisis de las diferencias entre zonas	94
5.3.1.1. Análisis de la varianza (ANOVA)	94
5.3.1.2. Análisis de componentes principales (ACP)	95
5.3.2. Grupo hidrológico de suelo	98
5.3.3. Correlación entre métodos	99
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	<b>101</b>
<b>6.1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>101</b>
<b>6.2. MEDIDAS DE LAS PROPIEDADES DEL SUELO</b>	<b>102</b>
6.2.1. Relación carbono/nitrógeno	102

6.2.2. Contenido en materia orgánica del suelo	102
6.2.3. Densidad del suelo	103
6.2.4. Textura	104
<b>6.3. MEDIDAS DE INFILTRACIÓN</b>	<b>106</b>
6.3.1. Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	106
6.3.2. Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	112
6.3.3. Comparación entre las áreas degradadas de ambas zonas de cárcava (Zonas 1 y 2)	117
6.3.4. Zona 3: Bosque restaurado de pinar	118
6.3.5. Zona 4: Bosque natural de roble	124
6.3.6. Comparación entre los bosques de ambas zonas (Zonas 3 y 4)	129
<b>6.4. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LAS DIFERENTES ZONAS</b>	<b>130</b>
6.4.1. Análisis respecto a la tasa de infiltración final y las propiedades del suelo que influyen en la misma	130
6.4.1.1. Análisis de la tasa de infiltración final	130
6.4.1.2. Factores medidos que afectan a la tasa de infiltración final	139
6.4.1.3. Discusión	150
6.4.2. Análisis de Componentes Principales (ACP)	155
6.4.2.1. Resultados del Análisis de Componentes Principales	155
6.4.2.2. Discusión	166
<b>6.5. COMPARACIÓN ENTRE AMBOS MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN</b>	<b>166</b>
6.5.1. Introducción	166
6.5.2. Resultados del análisis de regresión	167
6.5.3. Discusión	185
<b>6.6. DETERMINACIÓN DEL GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO</b>	<b>187</b>
6.6.1. Introducción	187
6.6.2. Resultados	188
6.6.3. Discusión	190
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>191</b>

<b>7.1. CONCLUSIONES RELATIVAS A LA CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN Y PROPIEDADES QUE AFECTAN A ÉSTA</b>	<b>191</b>
<b>7.2. COMPARACIÓN ENTRE MÉTODOS DE MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN</b>	<b>192</b>
<b>7.3. DETERMINACIÓN DEL GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO</b>	<b>192</b>
<b>7.4. OTRAS CONCLUSIONES</b>	<b>193</b>
<b>8. PERSPECTIVAS FUTURAS Y RECOMENDACIONES</b>	<b>195</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>197</b>
<b>ANEJOS</b>	
<b>ANEJO I. EL PROCESO DE INFILTRACIÓN</b>	<b>209</b>
<b>I.1. EL PROCESO DE INFILTRACIÓN</b>	<b>211</b>
I.1.1. Introducción	211
I.1.2. Definición de algunos términos relacionados con la infiltración	212
I.1.3. Flujo de agua en el suelo	213
I.1.4. Descripción cualitativa del proceso de infiltración	215
I.1.5. Factores que rigen la infiltración (Martínez de Azagra y Navarro, 1996)	216
<b>I.2. UTILIZACIÓN DE MODELOS EN EL ESTUDIO DE LA INFILTRACIÓN</b>	<b>218</b>
I.2.1. Modelos de infiltración	218
I.2.2. Estudios previos de ajuste de modelos de infiltración	223
<b>ANEJO II. TÉCNICAS EXISTENTES DE MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN</b>	<b>233</b>
<b>II.1. MEDIDAS DE LABORATORIO</b>	<b>235</b>
II.1.1. Permeámetros	235
II.1.2. Conductividad hidráulica del sello superficial	236
<b>II.2. MEDIDAS DE CAMPO</b>	<b>237</b>
II.2.1. Medida de la conductividad hidráulica debajo de la capa freática	237
II.2.2. Medida de la conductividad hidráulica encima de la capa freática (zona no saturada)	238

II.2.3. Métodos de medición de la velocidad de infiltración	241
<b>ANEJO III. PROTOCOLO DE MEDICIÓN DE LA INFILTRACIÓN DEL GRUPO DE HIDROLOGÍA Y CONSERVACIÓN DE LA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE ÁVILA</b>	<b>245</b>
<b>ANEJO IV. ESTUDIO CLIMATOLÓGICO</b>	<b>253</b>
<b>IV. 1. DATOS CLIMATOLÓGICOS</b>	<b>255</b>
<b>IV.2. ELECCIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA</b>	<b>255</b>
<b>IV.3. OBTENCIÓN DE LA SERIE DE PRECIPITACIONES DE LA CUENCA</b>	<b>256</b>
IV.3.1. Fiabilidad de las estaciones y relleno de huecos	256
IV.3.2. Series de precipitación de la cuenca	258
IV.3.3. Datos de temperatura	260
IV.3.4. Evapotranspiración potencial	261
IV.3.5. Índices climáticos	262
<b>ANEJO V. DATOS MEDIDOS EN CAMPO</b>	<b>377</b>
<b>V.1. DATOS ZONA 1: ÁREA DEGRADADA DE LA CÁRCAVA RESTAURADA</b>	<b>279</b>
V.1.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro	279
V.1.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro	281
<b>V.2. DATOS ZONA 2: ÁREA DEGRADADA DE LA CÁRCAVA NATURAL</b>	<b>285</b>
V.2.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro	285
V.2.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro	287
<b>V.3. DATOS ZONA 3: ZONA DE BOSQUE RESTAURADO DE PINO</b>	<b>288</b>
V.3.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro	288
V.3.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro	298
<b>V.4. DATOS ZONA 4: ZONA DE BOSQUE NATURAL DE ROBLE</b>	<b>310</b>
V.4.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro	311
V.4.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro	313
<b>ANEJO VI. GLOSARIO</b>	<b>323</b>

# MEMORIA

## 1. RESUMEN

La infiltración es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y, en los ecosistemas terrestres dependientes del agua, un verdadero detonante de las relaciones ecológicas imprescindibles para su funcionamiento. (Martínez de Azagra *et al.*, 2006). Es un proceso complejo, que depende de un buen número de factores, tanto relativos al suelo como a la precipitación, vegetación, etc.

Al depender de tantos factores, el estudio y la modelización de la infiltración se complica de forma considerable. A esto hay que añadir la dificultad para obtener medidas precisas de esta variable. Por estos motivos, el conocimiento de este componente del ciclo hidrológico es insuficiente.

Por ello, y como continuación de un estudio anterior realizado en 2012 por los mismos autores (Campano-Fernández, 2012), en el que se determinaba el comportamiento en cuanto a la capacidad de infiltración de una cárcava restaurada en el municipio de Saldaña (Palencia), se ha realizado una comparación con una cárcava próxima que se ha revegetado naturalmente.

En ambas cárcavas se han comparado dos zonas claramente diferenciadas: las zonas degradadas y las zonas en las que estaba presente el bosque, ya fuera mediante la presencia de pinos de repoblación (*Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*) en la cárcava restaurada o de robles (*Quercus pyrenaica*) en la zona donde no se ha realizado ningún tipo de acción antrópica.

Para la medida de la infiltración se han utilizado dos infiltrómetros de cilindro simple, uno de 30 cm de diámetro y otro de 8 cm, realizándose un total de 4 ensayos con cada tipo de infiltrómetro y en cada una de las 4 zonas, utilizándose una quinta zona para la comparación entre infiltrómetros. Además, se han recogido diversas muestras de suelo, de cara a conocer las características de textura de los mismos, su contenido en materia orgánica y la relación carbono/nitrógeno tras su análisis en laboratorio. La medida en campo se ha completado con las mediciones de densidad con el método del cilindro y de humedad, temperatura y cobertura del terreno.

Los datos de los ensayos de infiltración obtenidos se muestran de forma gráfica y se han comparado estadísticamente mediante análisis de la varianza (ANOVA), con el objetivo de determinar si existen diferencias significativas entre las distintas zonas y métodos, además de si existen diferencias entre las variables que afectan a la infiltración.

Se ha observado que existen diferencias entre las zonas degradadas y las zonas de bosque, de modo que la infiltración es significativamente mayor en las zonas de bosque y menor en las zonas degradadas.

Para analizar el conjunto de las propiedades y poder establecer qué variables tienen un mayor peso en las diferencias entre zonas y qué zonas se diferencian en cuanto a sus características de infiltración, se ha realizado un análisis de componentes principales que nos ha establecido 3 grupos diferenciados: uno para cada zona de bosque y un único grupo para ambas zonas degradadas, al no existir diferencias estadísticamente significativas entre las mismas. Por tanto, podemos determinar que los suelos de las dos cárcavas en origen tenían las mismas propiedades, por lo que las diferencias entre las zonas de bosque se deben claramente a la vegetación establecida.

Se ha estudiado también si existe correlación entre ambos métodos de medición de la infiltración, procediendo a realizar una regresión entre las medias de la tasa de infiltración obtenidas con cada método en cada zona. A pesar de haber usado una quinta zona medida con anterioridad, el número de zonas sigue siendo escaso, por lo que no se ha podido establecer una correlación consistente entre métodos. Por otro lado se ha procedido a determinar si existieran diferencias entre los métodos utilizados en cada zona por separado, observándose diferencias solamente en la zona de bosque natural.

Por último, se han asignado a los distintos suelos estudiados el grupo hidrológico de suelo al que pertenecen según el método del NRCS (2007), y que permitirá conocer el número de curva correspondiente a los distintos suelos, observándose que los suelos con peores características de infiltración se encuentran en las zonas degradadas, mientras que la comparación de las dos zonas de bosque no muestran diferencias significativas en cuanto a las características de infiltración.

Cabe destacar que, mediante el presente estudio de infiltración, se ha constatado el éxito de la restauración llevada a cabo en la cárcava, subrayando que las restauraciones hidrológico-forestales son una técnica eficaz de control de la infiltración y por tanto de la erosión.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. Justificación

La infiltración es uno de los principales componentes del ciclo hidrológico y, en los ecosistemas terrestres dependientes del agua, un verdadero detonante de las relaciones ecológicas imprescindibles para su funcionamiento. (Martínez de Azagra *et al.*, 2006).

Es un proceso complejo, que depende de un buen número de factores, que de forma sintética son (Martínez de Azagra y Navarro, 1996):

- La precipitación (intensidad, duración, tamaño de las gotas).
- Contenido previo de humedad en el suelo.
- Agua (turbidez, contenido en sales, temperatura, carga de agua sobre el suelo).
- Topografía (pendiente y exposición).
- Vegetación (cubierta de plantas superiores y de musgos y líquenes).
- Suelo (estado de la superficie del suelo, profundidad, pedregosidad, textura, estructura, densidad y porosidad, permeabilidad, contenido de humedad, materia orgánica, carbonato cálcico).
- Tratamientos (labores agrícolas, preparación del suelo en repoblaciones forestales, pavimentos).

Al depender de tantos factores, el estudio y la modelización de la infiltración se complica de forma considerable. A esto hay que añadir la dificultad para obtener medidas precisas de esta variable. Por estos motivos, el conocimiento de este componente del ciclo hidrológico es insuficiente.

El presente estudio se apoya en un estudio previo realizado en la misma zona de cárcavas restauradas en Saldaña (Palencia), en el que se midió la diferencia en la tasa de infiltración en tres distintas zonas: la cárcava desnuda, la zona de pinar establecida tras la restauración, y los sedimentos en los diques de control que fueron construidos durante la restauración. En ese estudio, realizado por el mismo alumno y con la ayuda del mismo tutor, se pretendió demostrar, entre otros objetivos, que la restauración había conseguido los fines para los que fue ejecutada: el aumento de la infiltración y, con ello, la reducción de la escorrentía y los problemas que de ello se derivaban. En este estudio, sin embargo, los objetivos son otros, puesto que una vez demostrado que la restauración ha funcionado, se pretende comprender la influencia de cada tipo de vegetación en la infiltración. Y es que en la zona restaurada de la cárcava no solo se implantaron pinos, sino que también existe una zona de roble, similar a la que existía en la zona restaurada antes de su degradación.

Por ello, se pretende comparar la zona de pinar y robledal bajo un mismo suelo de la cárcava, pudiendo así determinar si alguna de las dos especies proporciona una mayor tasa de infiltración y, en caso afirmativo, conocer las posibles diferencias de comportamiento y estudiar a qué puede deberse esta variación.

Por ello, la metodología seguida para la medición de la infiltración ha sido la misma, y se ha determinado, como se hizo anteriormente, las características del suelo. Sin embargo, en este estudio se dispone de un prototipo de infiltrómetro que se halla bajo patente del Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila, junto con la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, de modo que podremos además analizar su funcionamiento.

Cabe destacar, por último, que el presente estudio se enmarca dentro de un estudio general de las cárcavas restauradas de la zona de Saldaña, puesto que se han llevado a cabo otros estudios simultáneos de erosión, control de sedimentos y evaluación morfológica y botánica, al que se unen estos dos estudios de la infiltración.

## **2.2. Antecedentes**

En primer lugar, previo al uso de los infiltrómetros de anillo simple utilizados en la medición de la infiltración, se ha realizado una revisión de la bibliografía existente hasta la fecha relativa al uso de infiltrómetros de anillo para la medición de la infiltración, como se mostró en Campano-Fernández (2012). En esta ocasión se muestra un resumen de esa revisión, centrándonos en los aspectos más importantes de la medición de la infiltración con infiltrómetros de anillo más que en los propios resultados, para después dar parte a una completa revisión de los estudios que relacionan vegetación e infiltración, como se muestra en los dos siguientes apartados:

### **2.2.1. Estudios previos de medición de la infiltración mediante el uso de infiltrómetros de cilindro simple**

⇒ Tricker (1978) afirma que los valores obtenidos de capacidad de infiltración a partir de un cilindro están siempre distorsionados, debido al escape lateral de agua. Sin embargo, este método es comúnmente usado, puesto que es barato de producir y sencillo de utilizar por un único operario.

En este artículo se recogen una serie de recomendaciones de cara a conocer el tamaño de cilindro que consiga una precisión adecuada con una demanda de agua razonable, de cara a optimizar su uso. Con este objetivo, Aronovici, (1955, en Tricker, 1978) presenta datos derivados de ensayos con cilindros que van desde los 2 hasta los 30 cm de diámetro. Para cada cilindro se realizaron ensayos de 4 horas de duración donde se medía la tasa de infiltración.

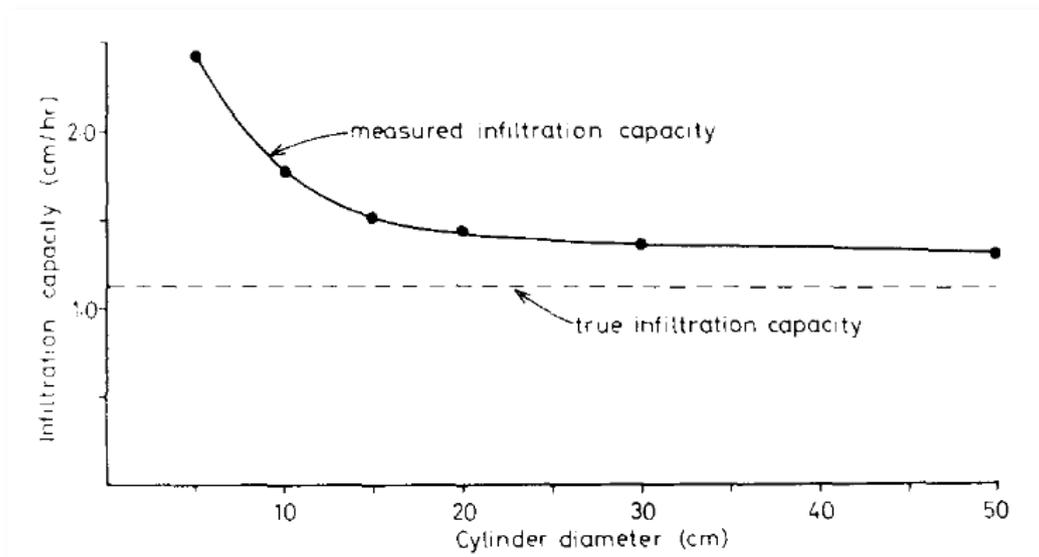


Figura 2.1. Relación entre la tasa de infiltración y el diámetro del cilindro utilizado derivado de los datos de Aronovici (1955) (Tricker, 1978).

Además, construye una relación lineal entre la tasa de infiltración y la inversa del diámetro del cilindro, que responde a la siguiente expresión:

$$y = 6,62 \cdot x + 1,12$$

donde y es la tasa de infiltración y x la inversa del diámetro del cilindro, (1/d).

A partir de esta ecuación sería posible predecir la tasa de infiltración cuando el diámetro del cilindro es infinito (1/d=0). En este punto, el error en la medición de la tasa debido a la pérdida por flujo lateral sería despreciable. (Tricker, 1978).

Tabla 2.1. Error asociado a cilindros de diferentes tamaños. (Modificado de Tricker, 1978).

	Diámetro del cilindro (cm)						
	5	10	15	20	30	50	∞
Tasa de infiltración final medida	2,40	1,75	1,50	1,45	1,35	1,30	1,12
Error (%)	114,2	65,2	33,9	29,5	20,5	16,1	

Por tanto, se deduce que a partir de un cilindro de 15 cm de diámetro se consigue una combinación entre una precisión adecuada y un aporte de agua razonable, lo cual es de suma importancia cuando los ensayos se llevan a cabo en zonas remotas (Tricker, 1975, en Tricker, 1978).

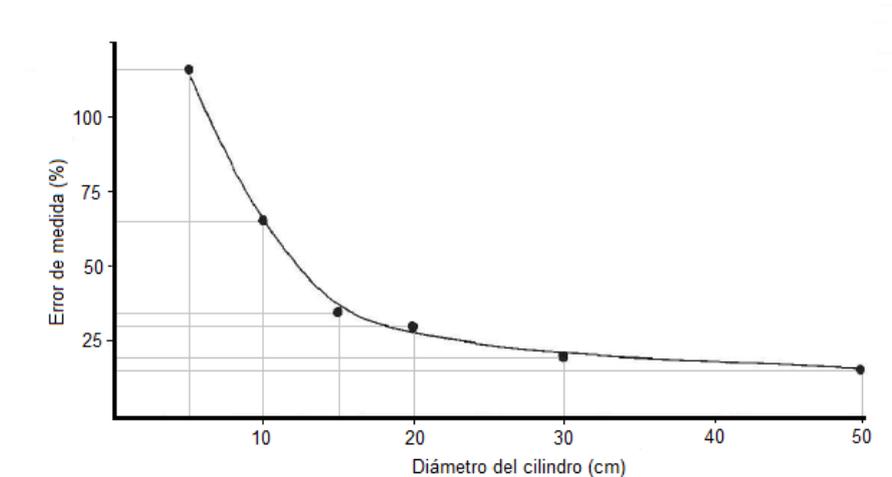


Figura 2.2. Relación entre el diámetro del cilindro y el error en la medida de la infiltración. (Modificado de Tricker, 1978).

En cuanto al problema de la infiltración lateral producida al utilizar un infiltrómetro de anillo simple, cabe destacar que la zona afectada bajo un cilindro de un tamaño dado puede variar en función de varios parámetros de suelo, como la permeabilidad o la distribución de humedades. Para corregir este efecto, se han desarrollado tanto técnicas de campo como de laboratorio. (Marshall & Stirk, 1950, en Tricker, 1978). Muchos de los métodos basados en mediciones en campo tienden a alterar las propiedades del suelo y por ello no siempre son los más correctos para programas de investigación donde se requieran medidas recurrentes en la misma zona. (Marshall & Stirk, 1950, en Tricker, 1978).

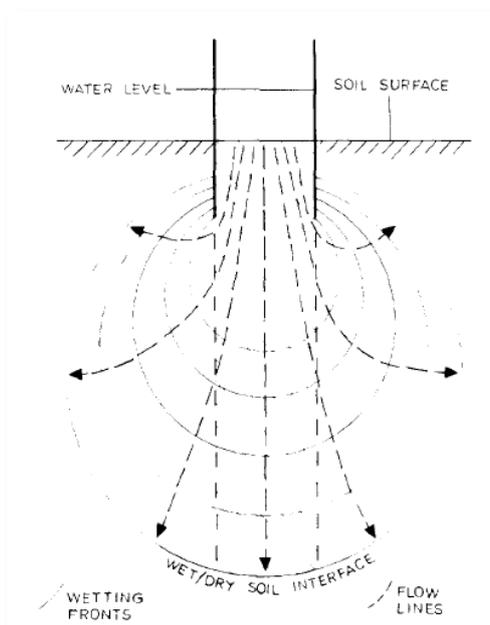


Figura 2.3. Esquema del avance generalizado del frente húmedo bajo un cilindro simple (Tricker, 1978).

En el artículo se propone que una de las posibles correcciones, derivada de la medición de la infiltración en condiciones de laboratorio, consiste en la corrección del volumen del frente húmedo para cada periodo de tiempo en cada experimento. De este modo, la verdadera tasa de infiltración es calculada para cada periodo usando la siguiente fórmula:

$$f_c = f_m \cdot (V_c/V_t)$$

donde  $f_c$  es la verdadera capacidad de infiltración,  $f_m$  es la capacidad de infiltración medida,  $V_c$  corresponde al volumen del frente húmedo bajo el cilindro y  $V_t$  al volumen húmedo total.

La cuestión pendiente es evaluar el rendimiento de la corrección bajo condiciones de campo, donde los suelos poseen horizontes de distinta permeabilidad. (Tricker, 1978). Para ello se experimentó con materiales que simularan los suelos del experimento original, obteniéndose que el error en la estimación parecía no ser mayor de  $\pm 20\%$ , por lo que comparado con otras técnicas de corrección previamente ensayadas le favorece (Hills, 1971, en Tricker, 1978).

Por último, concluye que las medidas de infiltración usando un cilindro tienden a sobrevalorar la capacidad de infiltración, pero que el uso de un cilindro de al menos 15 cm de diámetro, junto con una corrección de la técnica, permite una rápida medición y cómputo de resultados.

⇒ En un estudio anterior más específico, Hills, en 1971, propone una corrección de la infiltración que tenga en cuenta el flujo lateral, de modo que solucione o al menos minimice el principal problema asociado a los infiltrómetros de cilindro. Esta técnica pretende ser más práctica que otras, aunque ello lo convierte en menos precisa (Hills, 1971).

Para desarrollar su corrección lleva a cabo tanto pruebas de campo como de laboratorio con un infiltrómetro simple de 10 cm de diámetro, clavado a una profundidad de 5 cm y asumiendo 3 hipótesis: la primera, que el bulbo húmedo producido en el ensayo es una aproximación razonable del producido en un suelo inalterado con las mismas características de permeabilidad; segundo, que la sección transversal del volumen húmedo se aproxima a cualquier sección transversal en un plano vertical que corte al eje axial del cilindro y, tercero, que el grado de saturación es uniforme a través del bulbo húmedo (Hills, 1971).

Para cada punto temporal de cada test de infiltración es posible obtener un factor de corrección por el que debe ser multiplicada la infiltración medida de cara a obtener la aproximación a la infiltración vertical. En la siguiente Figura se muestran estos factores, representados gráficamente frente al tiempo y la capacidad de infiltración (Hills, 1971).

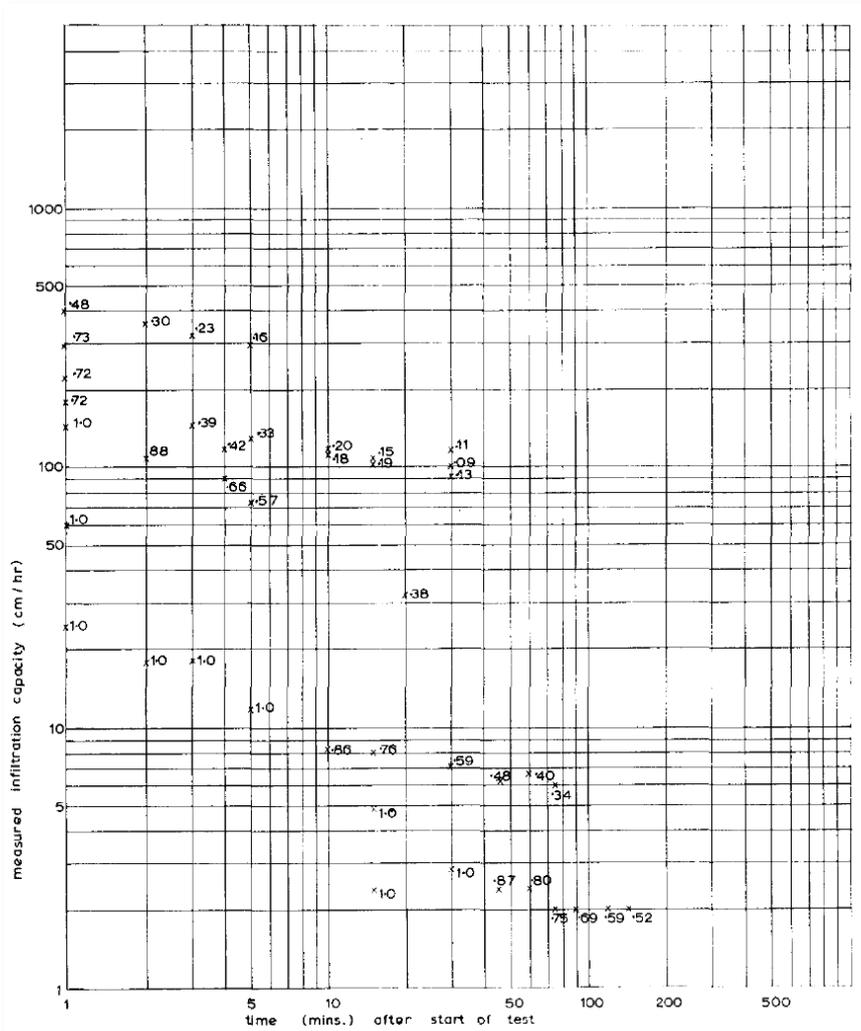


Figura 2.4. Factores de corrección determinados empíricamente y representados gráficamente frente al tiempo y la capacidad de infiltración. (Hills, 1971).

Estos factores representados en la Figura anterior pueden verse generalizados en la Figura siguiente:

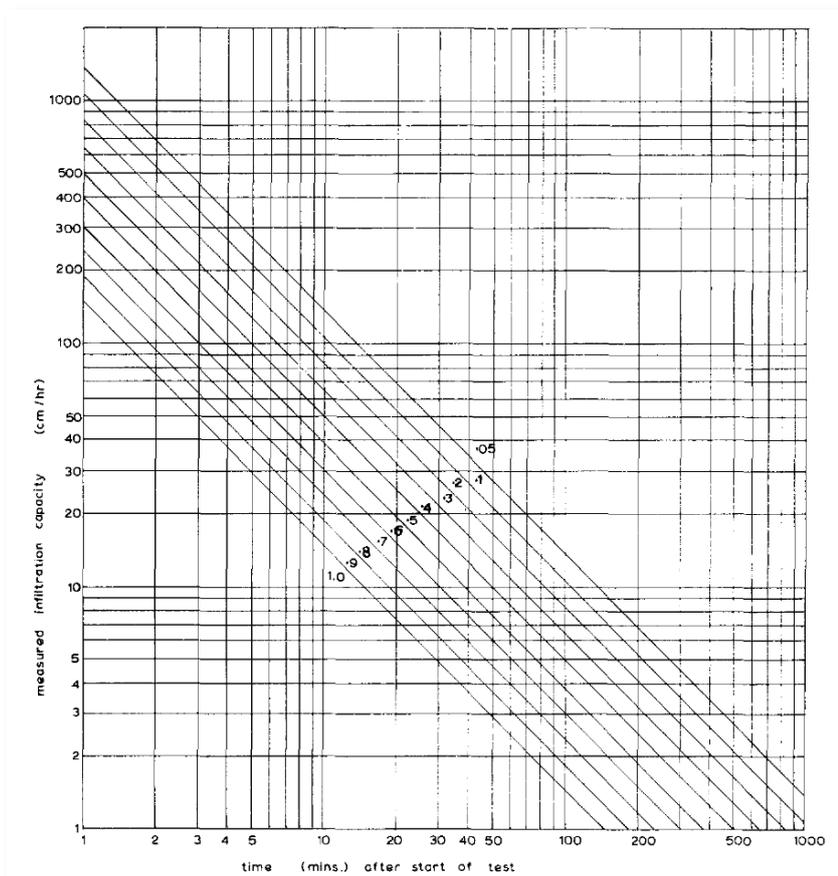


Figura 2.5. Factores de corrección generalizados. (Hills, 1971).

Cabe reconocer que el conjunto de factores de corrección determinado por este procedimiento empírico tendrá varias fuentes de error. Sin embargo, el estrecho rango dentro del cual los factores de corrección disminuyen y la progresión global parece equilibrada sugieren que los límites y órdenes de magnitud son correctos en un  $\pm 20\%$ . (Hills, 1971).

⇒ Por su parte, Bouwer, en 1986, comenta que para usar un infiltrómetro de cara a predecir la tasa de infiltración para un sistema dado, se debe ser cuidadoso con las condiciones de ese sistema, es decir, la calidad del agua, temperatura, condiciones del suelo, de su superficie, longitudes de inundación, etc., de modo que sean las mismas en el cilindro, ya que si no el error en la medición de la tasa de infiltración puede aparecer agrandado.

Al igual que Tricker (1978), Bouwer (1986) hace referencia a los errores debidos al flujo de divergencia lateral. Afirma también que, de este modo, la tasa de infiltración medida puede ser mayor que la real debida al flujo vertical. Esta divergencia lateral puede ser causada por fuerzas capilares, o por capas que reduzcan la conductividad hidráulica en el perfil, así como por la profundidad de agua en el infiltrómetro.

La divergencia lateral debida a las fuerzas capilares es debida al hecho de que la presión en el suelo insaturado adyacente al infiltrómetro es menor que en la zona húmeda inmediatamente bajo el infiltrómetro, creando un gradiente hidráulico radial hacia fuera de la zona húmeda. Esto puede ocurrir tanto en suelos uniformes como estratificados.

La sobreestimación de la infiltración vertical debida a la capilaridad lateral depende del cociente entre el diámetro del anillo y la capacidad de saturación del suelo.

Bouwer (1986) afirma además que cuando los gradientes de capilaridad lateral bajo el cilindro son la causa de que el flujo de agua diverja, no es de ayuda poner un pequeño cilindro concéntrico dentro del grande y medir a tasa de infiltración en él con la esperanza de conseguir una medición de la verdadera tasa de infiltración vertical, ya que al disminuir el diámetro aumentaremos el error cometido. La única forma de medir la verdadera infiltración lateral consiste en usar cilindros de grandes diámetros (1,2 m según el estudio de Swartzendruber & Olson, 1961, en Bouwer, 1986, para que el ratio anteriormente citado sea de cero).

La medición real del flujo vertical bajo un infiltrómetro de un diámetro relativamente pequeño puede esperarse sólo si la infiltración es controlada por una costra u otra capa restrictiva en la superficie del suelo. El flujo a través de una capa restrictiva será entonces vertical, independientemente del diámetro del infiltrómetro. Podría haber alguna divergencia en caso de existir material insaturado bajo esa capa, afectada por el diámetro del cilindro, pero para infiltrómetro de tamaño normal probablemente tenga un efecto minoritario (Bouwer, 1986).

Además, comenta que existen otras fuentes de error, como la perturbación producida en el suelo debido a la inserción del anillo en el suelo. Si lo que se produce es una compactación, la medida de la infiltración se verá disminuida. Si, en cambio, tiene una capa que es rota por la inserción, la medida se verá aumentada. Al igual que otros autores, coincide en que los efectos de esta perturbación pueden disminuirse usando un infiltrómetro de gran diámetro, o cilindros de paredes estrechas con bordes biselados, además de siendo cuidadoso en su instalación (Bouwer, 1986).

El suelo puede además ser perturbado si no se es cuidadoso en la aplicación del agua después de la instalación del infiltrómetro, puesto que las arcillas y partículas finas pueden llevarse temporalmente a suspensión, haciendo que la infiltración sea menor que la verdadera (Bouwer, 1986). Para disminuir este error, lo correcto es evitar el impacto directo del agua en el suelo dentro del cilindro.

En cuanto al uso de infiltrómetro de doble anillo frente a uno simple, la creencia de que éste absorbe el efecto de divergencia y por ello mide la infiltración vertical es errónea desde el punto de vista de Bouwer (1986) basándose en mediciones de campo llevadas a cabo por Burgy & Luthin, en 1956. Ambos afirman que la única forma de evitar este efecto es aumentar el diámetro del cilindro simple, aunque reconocen que el infiltrómetro de anillo doble es útil en caso de que exista una corteza en la superficie o cualquier otra condición que impida una buena adherencia entre el suelo inalterado y la pared del infiltrómetro.

En cuanto al número de mediciones a llevar a cabo, Bouwer (1986) afirma que para obtener un valor preciso de la tasa de infiltración pueden determinarse distintos valores estadísticos, como intervalos de confianza, estimación de la varianza, etc.

⇒ Buttle *et al.* (1997), estudian la variabilidad de la conductividad hidráulica en una cuenca reforestada. Para ello, llevan a cabo tanto medidas de campo como de laboratorio con un infiltrómetro de anillo simple de cara a medir la conductividad hidráulica saturada, ( $K_s$ ) en combinación con la medida de la macroporosidad.

De este modo observaron diferencias en el valor de  $K_s$  según los diferentes suelos. Comentan que, aunque los macroporos representan una pequeña fracción de la porosidad total del suelo, éstos tienen un gran efecto en las propiedades de infiltración, haciendo que la conductividad hidráulica aumente (Watson & Luxmoore, 1986, en Buttle *et al.*, 1997).

Para determinar los puntos de muestreo se eligió un muestreo estratificado aleatorio, con un total de 35 puntos. Para determinar los efectos de los macroporos en la infiltración de cada punto se usaron dos técnicas: por un lado, un permeámetro de carga constante en laboratorio, y por otro lado, un infiltrómetro de anillo simple. Para este último método se mantuvo una carga constante de 0,05 m de agua aplicada sobre un cilindro de 20 cm de diámetro, insertado 10 cm en el suelo (Buttle *et al.*, 1997).

La entrada de flujo en el suelo fue registrada hasta que alcanzaba un valor constante, asumiendo que este valor reflejaba la conductividad hidráulica ( $K_s$ ) del suelo bajo el cilindro.  $K_s$  entonces se calculaba como la pendiente de la regresión de mínimos cuadrados de la infiltración acumulada frente al tiempo.

La tangente de la parte final de la curva de infiltración acumulada fue ajustada gráficamente, y el inicio de la infiltración constante es definido como el tiempo en el que la curva de infiltración acumulada comienza a desviarse de esa tangente (Buttle *et al.*, 1997).

Suponen además que el área ocupada por el infiltrómetro de anillo implica una alta probabilidad de que la zona humedecida bajo el cilindro contenga más de un macroporo. De este modo, el resultado de  $K_s$  podría reflejar las propiedades de un suelo macroporoso (es decir, el flujo laminar a través de los microporos es combinado con el flujo turbulento a través de los macroporos) (Buttle *et al.*, 1997).

Se determinó que los valores medios de los diferentes sitios eran similares para los dos métodos. Afirman que el flujo bajo un infiltrómetro de anillo simple no es unidimensional, puesto que se forma una divergencia del flujo debido a las fuerzas capilares y la presión hidrostática que ejerce el agua en el infiltrómetro (Bouwer, 1986; Reynolds, 1993, en Buttle *et al.*, 1997). Al igual que otros autores, (Tricker, 1978; Fournier *et al.*, 1997; Bouwer, 1986), Buttle *et al.* (1997) afirman que estas divergencias producen una sobreestimación del valor real de  $K_s$ . Sin embargo, ajustan el valor de  $K_s$  obtenido mediante el infiltrómetro usando una aproximación al análisis de flujo tridimensional sugerida por Reynolds (1993):

$$IK_s = \frac{\alpha^* GK_H \pi a^2}{a(\alpha^* H + 1) + G \alpha^* \pi a^2}$$

donde  $\alpha^*$  equivale a un parámetro que representa la textura y estructura del suelo ( $36 \text{ m}^{-1}$  para un suelo macroporoso),  $G$  es un factor adimensional de forma (0,5 veces el radio del infiltrómetro y la profundidad de inserción en el suelo);  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada,  $a$  es el radio del infiltrómetro,  $H$  la profundidad de agua dentro del infiltrómetro, e  $IK_s$  (conductividad hidráulica medida con el infiltrómetro) corresponde aproximadamente a 0,67 veces  $K_s$ .

El aire puede quedarse atrapado en los macroporos cuando se estima  $K_s$  usando un infiltrómetro de anillo, resultando una subestimación de la conductividad hidráulica saturada. Este problema puede minimizarse mediante el uso de un permeámetro de carga constante. El atrapamiento de aire cuando se usa un infiltrómetro de anillo es inevitable (Buttle *et al.*, 1997).

Como conclusiones obtienen que el potencial matricial de los suelos forestales estudiados decrece significativamente con la profundidad, aunque esta relación se ve más claramente en las zonas de valle que en las zonas de pendiente. Además, la conductividad hidráulica de los suelos macroporosos parece independiente del tipo de suelo de la cuenca.

En general, la conductividad hidráulica obtenida en campo mediante el método de infiltrómetro excedía los valores obtenidos usando un permeámetro de carga constante en laboratorio para el mismo suelo, y parece que los macroporos anulan la influencia de las propiedades físicas del suelo en la mayor parte de las mediciones de  $K_s$  en el perfil del suelo.

Además, se utilizó un modelo geoestadístico para comprobar la variación de la conductividad hidráulica a lo largo de la cuenca, observando que es una propiedad anisótropa que muestra una correlación espacial paralela a la corriente del valle (Buttle *et al.*, 1997).

⇒ Cerdá (1997) estudia el ajuste al modelo de Horton de una serie de medidas de infiltración tomadas con un cilindro simple de 15 cm de alto y 7 cm de diámetro, con el objetivo de estudiar la variabilidad estacional de la infiltración.

Tras medir las diferentes propiedades del suelo a varias profundidades muestra los resultados obtenidos de infiltración en cada ensayo.

El valor medio para todo el año es de 325 mm/h. Individualmente varían de 29 a 782 mm/h. Admite  $q$  con el cilindro se observa mucha variabilidad entre zonas y también mucha fluctuación estacional, por lo que se requieren más réplicas para conocer bien la distribución de la infiltración cuando se mide con un cilindro.

Observa que existe correlación entre las medidas de infiltración en cada estación, por lo que cree que los cambios en la tasa se deben a los cambios estacionales en el terreno. Compara además que la infiltración es mayor en la cara norte, y afirma que, aunque no se ha medido la escorrentía, es lógico que en las zonas con mayores tasas de infiltración la escorrentía sea menor.

⇒ Por otro lado, Wu *et al.* (1997), propone una técnica a escala para medir la infiltración axisimétrica en tres dimensiones con un infiltrómetro de anillo simple, de cara a obtener una solución generalizada de infiltración y evaluar los efectos de las condiciones del suelo y la geometría del cilindro en las curvas de infiltración.

Este modelo numérico está basado en la ecuación de Richards, y se ha desarrollado para simular el proceso de infiltración para tres suelos representativos. Al elegir adecuadamente los factores de longitud y el tiempo de escala, las curvas de infiltración de los suelos de las tres pruebas que representan diferentes propiedades hidráulicas se ajustaron con éxito a una sola curva de infiltración adimensional. Las pruebas mostraron que la curva de infiltración adimensional no fue muy sensible a la carga aplicada, el diámetro del anillo, la profundidad de inserción del mismo, y las condiciones iniciales del suelo.

Finalmente, propone una ecuación que proporciona la infiltración adimensional:

$$i^* = a + b/t^{*0,5}$$

donde a y b son coeficientes,  $i^*$  es la tasa de infiltración a escala, y  $t^*$  el tiempo a escala.

A partir de una serie de mediciones de campo, que transforma a un factor adimensional que tiene en cuenta las condiciones iniciales del suelo y la geometría del anillo, determina que estos coeficientes son  $a=0,9084$  y  $b=0,1682$ , con un  $R^2$  del 0,92.

⇒ Fournier *et al.* (1998), en un estudio en el que investigan la unión entre la vegetación y el suelo a pequeña escala, utilizan un infiltrómetro de anillo simple para la medida de la infiltración en el suelo como una variable de gran importancia en la ecología vegetal.

Para su estudio, midieron la infiltración en 156 puntos mediante el uso de un infiltrómetro de anillo simple, de 15 cm de diámetro. También asegura que este tipo de infiltrómetros son normalmente criticados debido a que dan unas medidas sobrevaloradas de la capacidad de infiltración. Afirman que puede deberse a tres razones: que la carga hidráulica en el anillo es mucho mayor que la provocada por la lluvia; que la infiltración no ocurre verticalmente bajo el cilindro; y que en el método clásico el cilindro es clavado en el suelo a 10 cm de profundidad para asegurar la impermeabilidad. Sin embargo, comentan que es un método que permite muchas repeticiones con facilidad, sin necesitar mucho material u operarios.

Además, Fournier *et al.* (1998) muestran una serie de recomendaciones para disminuir estos inconvenientes, como no clavar el infiltrómetro en el suelo y no trabajar con una carga de agua constante, sino más bien medir constantemente la infiltración en una zona de 80 mm a lo largo de la pared interior del cilindro.

Otras consideraciones importantes a tener en cuenta a la hora de medir la infiltración son recortar cuidadosamente la vegetación dejándola a ras del suelo, sin perturbar la superficie del mismo (Fournier *et al.*, 1998).

Las mediciones se fueron tomando en intervalos de tiempo regulares, desde que el suelo empieza a infiltrar agua hasta que el flotador tocaba el suelo. Si esta secuencia duraba más de 20 minutos, el test se daba por concluido. En caso contrario, el cilindro era inmediatamente rellenado con 80 mm de agua, y se realizaba una nueva medida, hasta que se obtenían 20 minutos de medición continua. Se realizaron 4 repeticiones en cada zona. Se procedió más tarde a homogeneizar los datos, eliminando las variaciones más significativas debido a las condiciones experimentales (Fournier *et al.*, 1998).

En cuanto a los resultados, cabe destacar que obtienen una tasa de infiltración media para un suelo arenoso-limoso de 148 mm/h, con un valor mínimo de 13 mm/h y uno máximo de 105 mm/h. Comentan que la varianza es grande y además no es constante.

Compara la tasa de infiltración entre zonas con plantas leñosas y zonas desprovistas de vegetación mediante un t-test. Los valores para las zonas con vegetación leñosa son de  $153,7 \pm 98,1$  y para las que no cuentan con vegetación de  $117 \pm 56,38$ , concluyendo que la presencia de plantas leñosas está claramente ligada a las tasas de infiltración altas.

⇒ Dunkerley (2000) lleva a cabo un estudio sobre los efectos hidrológicos asociados a los arbustos de zonas desérticas de Australia. Para ello, una de las variables que estudia es la capacidad de infiltración, realizando más de 80 ensayos de infiltración mediante el uso de un pequeño infiltrómetro de cilindro simple de 10 cm de diámetro y 5 cm de altura, construidos en PVC. En este caso, en vez de clavar ligeramente el infiltrómetro en el suelo, se aplicó al borde inferior un compuesto comercial que al ser apretado contra el suelo se extrusiona, permitiendo un buen sellado entre el cilindro y el suelo.

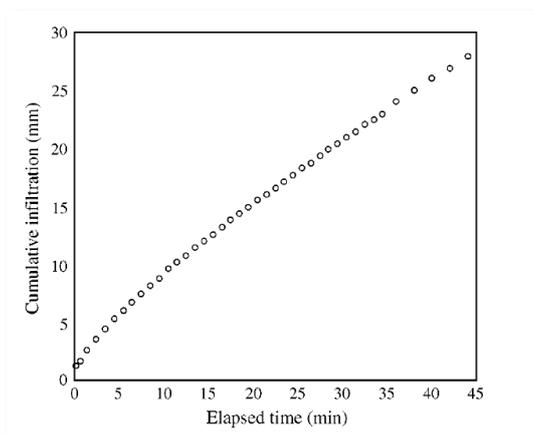


Figura 2.6. Ejemplo del comportamiento de la infiltración en un minicilindro durante un ensayo de 45 minutos de duración. Después de 20 minutos se observa que la infiltración alcanza una tasa estable. (Dunkerley, 2000).

En las zonas de fuerte pendiente se colocaron los infiltrómetros paralelos a la línea de máxima pendiente, de modo que la profundidad en su interior era desigual, aunque puesto que la máxima desviación del infiltrómetro medida fue de 7-8° se considera que el efecto no fue grave (Dunkerley, 2000).

Para medir el nivel de agua infiltrado en el cilindro se utilizaron sondas de nivel, y los ensayos tuvieron una duración de entre 30 minutos y 1 hora.

Una vez realizados los ensayos se procedió a corregir los resultados teniendo en cuenta el flujo lateral. Para ello, asume que el volumen de suelo mojado se compone de la parte de suelo directamente bajo el cilindro, junto con el anillo adicional que rodea a éste surgido de la infiltración lateral. El frente húmedo puede por tanto aproximarse a parte de la superficie de una esfera cuyo diámetro es algo mayor que el de la zona húmeda visible en la superficie del suelo. El volumen de suelo humedecido se puede considerar como una tapa de esta esfera mayor. El diámetro de esta esfera fue estimado dibujando en un gráfico a escala la sección transversal del frente húmedo (a partir de las coordenadas anotadas tras la excavación de la zona de cada experimento) y usando una construcción geométrica estandarizada para encontrar el centro y el diámetro. El volumen de esta "tapa",  $V_{cap}$ , puede hallarse a través de la relación (Dunkerley, 2000):

$$V_{cap} = \pi r^2 \left( r - \frac{h}{3} \right)$$

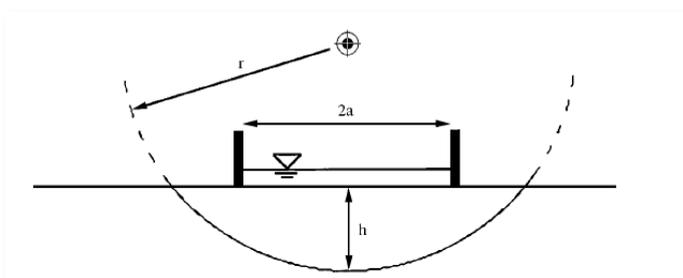


Figura 2.7. Diagrama esquemático del análisis geométrico del área humedecida del suelo bajo un infiltrómetro de cilindro al final de un ensayo. ( $r$  radio de la esfera,  $h$  profundidad del frente húmedo verticalmente bajo el infiltrómetro,  $a$  radio del infiltrómetro). Dunkerley, 2000.

La fracción de este volumen que pertenece a la parte vertical bajo el infiltrómetro,  $V_{cyl}$ , se calcula como:

$$V_{cyl} = \pi a^2 h$$

Una vez corregidos los datos se agruparon en clases según la distancia de detención del frente húmedo, en clases que van de 0 a 20 cm; de 20 a 40 cm y así sucesivamente, hallando la infiltración media para cada clase, realizándose además un análisis de la varianza (Dunkerley, 2000).

Observó que las tasas de infiltración eran mayores en los puntos cercanos a tallos de arbustos, mientras que disminuían cuando aumentaba la distancia hacia ellos. También se constató una gran variabilidad entre las tasas medidas bajo el dosel arbustivo y en espacios intermedios. Las tasas se acercaron a los 40 mm/h en las zonas que distaban menos de 50 cm a los tallos, y se reducía a 5-10 mm/h en los espacios intermedios, a varios metros del arbusto más cercano.

⇒ Harden *et al.* (2003) también utilizan este método en un estudio en el que miden la infiltración en varias zonas con pendiente, estableciendo una comparación de tres ecosistemas. Exponen que el agua como conductor de la erosión no ha recibido el estudio científico que merece dentro de la geomorfología. Por ello, estudian la escorrentía y la infiltración en una zona montañosa de los Andes, en Puerto Rico y en Estados Unidos.

El infiltrómetro de anillo se alimentaba de agua mediante un simulador de lluvia, que aplicaba una carga constante de agua durante la duración de los experimentos. El infiltrómetro se insertó 2-3 cm en suelo y contaba con un diámetro de 15 cm. Cabe destacar que la mayoría de las parcelas en las que midieron se encontraban a capacidad de campo debido a las lluvias que habían tenido lugar recientemente o, en otros casos, se prehumedecieron. De esta manera se facilitaba el clavado del infiltrómetro.

Además, se prepararon las parcelas de medición quitando ramitas y hojas que pudieran frenar la infiltración. La cantidad de agua presente en el infiltrómetro iba midiéndose en intervalos de 5 minutos, para conocer la tasa de infiltración.

Se secaron y pesaron las muestras de suelo de cara a conocer los antecedentes de humedad y los cambios en la misma resultantes de la infiltración, para calcular así la densidad aparente. Como cabía esperar, encontraron que la infiltración variaba considerablemente entre los diferentes lugares de medición.

Para determinar las diferencias estadísticas entre las distintas zonas se llevó a cabo un test de Kruskal-Wallis y se muestran las tasas de infiltración de las distintas zonas en diagramas de caja y bigotes. Además, muestran estos diagramas para la comparación de la tasa de infiltración según las diferentes pendientes, en función de los tipos de vegetación y de la exposición topográfica.

⇒ En el estudio de Bagarello *et al.* (2004) el objetivo fue comparar los cambios temporales en la conductividad hidráulica saturada obtenidos en la capa superficial de un suelo arcilloso con dos procedimientos de aplicación del método de infiltrómetro de cilindro simple. Para ello utilizaron cilindros instalados permanentemente desde el comienzo del estudio y cilindros instalados inmediatamente antes de realizar la medición.

Se utilizaron infiltrómetros con un diámetro interior de 15 cm conectado a un depósito de Mariotte, teniendo en cuenta que un cilindro de este diámetro debe ser más eficaz que uno de diámetro más pequeño al reducirse el efecto borde y la alteración del volumen de suelo muestreado (Bagarello *et al.*, 2004).

El cilindro se inserta 5 cm en el suelo. La inserción del cilindro se llevó a cabo suavemente utilizando un martillo de goma y se aseguró que el borde superior del anillo se mantuviera horizontal durante la inserción. Para minimizar el riesgo de alterar la superficie del suelo al comienzo del proceso de infiltración, se colocó una tela de nylon sobre la superficie del suelo y el agua se vertió cuidadosamente sobre ella hasta alcanzar una altura de agua de aproximadamente 20-30 mm inmediatamente antes de abrir el depósito infiltrómetro.

La velocidad de caída del nivel del agua en el depósito se controló a intervalos de 2 min de tiempo. Se eligió una duración constante del experimento de 3 horas, se determinó que esta duración era adecuada para detectar aparentes condiciones de estado estable.

⇒ Por otro lado, Gómez *et al.* (2005) miden la variación de la infiltración en suelos labrados con una determinada técnica, como una estimación de la variabilidad de la escurrentía. Para ello, miden la conductividad hidráulica en suelo saturado,  $K_s$ , usando un infiltrómetro simple. Se eligió como escala de medición el  $l/m^2$ , de cara a evitar problemas entre la escala de la medición y la del modelo.

Optaron por utilizar un infiltrómetro simple cuadrado, de 1 m de lado, porque consideran que es un infiltrómetro de un tamaño adecuado y de mayor disponibilidad para realizar medidas simultáneas en distintas zonas. Esto permite realizar diversas mediciones en un espacio temporal menor (Gómez *et al.*, 2005). Afirman que una característica de este infiltrómetro es que, debido al estancamiento de agua, tienden a sobreestimar el efecto de la macroporosidad en comparación con las condiciones de lluvia.

El infiltrómetro se clavó 10 cm en el suelo, y el ensayo tuvo lugar durante 3 h, manteniendo una altura constante de agua de 8 cm. Destacan además, al igual que otros autores, la importancia de no perturbar el suelo durante la colocación del instrumento.

Una de las dificultades en la interpretación de estos instrumentos es que el flujo de agua en el suelo es tridimensional. Este problema puede tenerse en cuenta usando la solución generalizada para infiltrómetros de anillo simple propuesta por Wu *et al.*, 1999 (Gómez *et al.*, 2005), puesto que permite el cálculo de  $K_s$  a través de la sección estabilizada en la curva de infiltración.

No se muestran los resultados en el presente estudio, puesto que pertenecen a una situación del suelo muy particular, aunque cabe destacar que complementan los datos de conductividad hidráulica con un generador de modelos de escurrentía para explicar la falta de estabilidad temporal en las mediciones realizadas. Sin embargo, cabe destacar que obtiene un coeficiente de variación del 50%, aun habiendo medido en 113 puntos, comparable a los obtenidos por Gupta *et al.*, 1993 del 50% para un infiltrómetro de anillo doble, o Diiwu *et al.*, 1998, del 68%, y alejado del coeficiente de variación del 172% obtenido por Tsegaye & Hill en 1998 con el mismo método.

⇒ Lassabatère *et al.* (2006) utilizan un infiltrómetro de anillo simple para determinar la infiltración. Para ello, retiran la vegetación del suelo, mientras que dejan las raíces intactas. Además, recogen una muestra del suelo de cara a realizar un análisis de partículas con el que estimar el contenido de agua gravimétrico inicial, así como otra muestra de volumen conocido, para medir la densidad aparente.

Una vez cogidas las muestras colocan el anillo, clavado con una profundidad de 1 cm para evitar la pérdida lateral de agua estancada. Se vierte un volumen fijo de agua en el cilindro al tiempo 0 y se mide el tiempo que transcurre hasta que el volumen conocido se infiltra. Cuando se ha agotado ese volumen por completo, se añade una segunda cantidad de agua conocida, así hasta alcanzar series de 8-15 adiciones.

Finalmente, el conjunto de datos se compone de puntos discretos de tiempo e infiltración ( $t_i, I_i$ ), y se ajustan a una curva exponencial (Lassabatère *et al.*, 2006).

Cabe destacar que una vez finalizada la medida de la infiltración se muestrea el suelo para medir el contenido de agua gravimétrica saturada y el contenido en agua volumétrica saturada, es decir, se mide directamente el contenido de agua saturado in situ. Estudiaron 5 zonas diferentes, que representaban 3 tipos de suelo distintas. Por último, estiman los parámetros del modelo de infiltración de BEST, aunque los resultados obtenidos se alejan del objetivo de este estudio.

⇒ Buczko *et al.* (2006) estudian la infiltración en suelos forestales utilizando un infiltrómetro de campana y uno de anillo con carga constante, con el objetivo de comparar los datos obtenidos mediante los dos métodos.

El infiltrómetro de cilindro tenía 20 cm de diámetro y era introducido 8 cm en el suelo. Las mediciones fueron iniciadas con una profundidad de carga de 20 cm aproximadamente, y se dejaba unos 30 minutos para que se estabilizara, comenzando a anotar la infiltración cada 30 segundos hasta que toda el agua era infiltrada. En ese momento, se volvía a llenar y se repetían las mediciones.

Para el cálculo de  $K_s$  a través de los datos de infiltración se siguió el procedimiento propuesto por Reynolds y Elrick (1990) (Buczko *et al.*, 2006).

El flujo a través de un infiltrómetro de anillo con una profundidad de carga constante  $H$  es dado por:

$$Q = \frac{r}{G} (K_s H + \phi_m) + \pi r^2 K_s$$

donde  $r$  es el radio del anillo,  $\phi_m$  corresponde al potencial matricial ( $m^2 \cdot T^{-1}$ ) y  $G$  es un factor geométrico adimensional, calculado por:

$$G = 0,316 \cdot \frac{d}{r} + 0,184$$

siendo  $d$  la profundidad de inserción del anillo

Basándonos en dos tasas de flujo  $Q_1$  y  $Q_2$  (siendo  $Q_2 > Q_1$ ) y medidas sus correspondientes profundidades de carga  $H_1$  y  $H_2$  ( $H_2 > H_1$ ),  $K_s$  se calcula como:

$$K_s = \frac{G}{r} \cdot \left( \frac{Q_2 - Q_1}{H_2 - H_1} \right)$$

Este procedimiento de cálculo fue desarrollado para una infiltración estacionaria con una profundidad de carga constante, asumiendo además que el suelo es homogéneo, la matriz del suelo es rígida y las propiedades hidráulicas isotrópicas.

Una modificación de este procedimiento para infiltrómetros de carga variable fue llevada a cabo por Elrick *et al.* (1995).

⇒ Chowdary *et al.* (2006) intentan evaluar el efecto de la carga de agua, diámetro del infiltrómetro y profundidad de inserción en el suelo en la infiltración acumulada con un infiltrómetro simple. Además, estudian la efectividad de un infiltrómetro de doble anillo reduciendo el flujo lateral.

Los infiltrómetros de anillo simple que utilizan son de 10, 15, 20, 25 y 30 cm de diámetro con cargas de 6, 13, 20 y 26 cm y 7 cm de inserción en el suelo (excepto el de 10 cm de diámetro, que se insertó 3 cm). Además se usaron combinaciones de éstos para usarlos como cilindros de doble anillo, con una profundidad de inserción de 7 cm.

Cabe destacar que se estimó la conductividad hidráulica saturada para el área de estudio utilizando la ecuación de Darcy.

La medición de la infiltración acumulada está afectada por el diámetro de anillo (D), la carga de agua, (H), la profundidad de penetración (Pe), el tiempo transcurrido (t), la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) y el contenido de humedad inicial ( $\theta_i$ ). Se intentó desarrollar una relación entre los diferentes parámetros usando una técnica de análisis dimensional (Buckingham Pi Theorem), de modo que la infiltración acumulada ( $I_c$ ) quedara definida como:

$$I_c = f(H, P_e, D, g, t, K_s, N, \theta_i)$$

donde g es la aceleración de la gravedad y N es la porosidad del suelo (Chowdary *et al.*, 2006).

De este modo, se ajustó una regresión múltiple usando la técnica de mínimos cuadrados, llegando a expresar la infiltración acumulada a través de otras variables de la siguiente forma:

$$\frac{I_c}{D} = k \left( \frac{K_s \cdot t}{D} \cdot \frac{H}{D} \cdot \frac{1}{\theta_i} \right)^n$$

Para diferentes condiciones experimentales, las constantes k y n se estiman comparando con los datos experimentales (Chowdary *et al.*, 2006).

En su caso, obtienen los coeficientes experimentales para calcular la infiltración acumulada, en metros, mediante la siguiente fórmula:

$$I_c = k \cdot t^\alpha$$

Por otro lado, los datos de infiltración obtenidos de las diferentes combinaciones de diámetro de infiltrómetro fueron usados para estudiar el efecto de los parámetros del avance del frente húmedo, observándose que la longitud de la zona húmeda a lo largo del eje axial central del infiltrómetro crece cuando se incrementa el diámetro del infiltrómetro y la carga de agua.

Los componentes verticales y laterales de la infiltración fueron estimados mediante la medición de la humedad del suelo durante el proceso de infiltración. El componente lateral osciló entre 31,8 a 67,9% en el caso del infiltrómetro simple, observándose que se reducía este componente entre 3 y 6 veces si se utilizaba un infiltrómetro de doble anillo (Chowdary *et al.*, 2006).

Los resultados de los valores  $k$  y  $\alpha$  que toman parte en la ecuación que proponen para obtener la infiltración acumulada en  $m$ , para los diferentes diámetros y profundidades de inserción se encuentran tabulados y pueden consultarse en su artículo.

⇒ Omuto *et al.* (2008) desarrollaron un protocolo para definir y determinar las etapas del desarrollo de la degradación física del suelo. El protocolo ha sido probado en el este de Kenia.

Consideran que la degradación física del suelo comienza con el deterioro de la estructura del suelo y termina con la pérdida de partículas a través de la erosión. En este contexto, una variable importante para determinar la compactación del suelo es la tasa de infiltración.

Para realizar la medida de la tasa de infiltración se utilizaron tres infiltrómetros de anillo simple con un diámetro interno de 30 cm y una altura de 25 cm. Antes de comenzar las mediciones se humedeció el suelo para evitar alteraciones de éste durante la instalación de los infiltrómetros, que se insertaron en el suelo cuidadosamente entre 5 y 10 cm. Para determinar la tasa de infiltración se calculó la tasa de descenso de nivel de agua dentro de los infiltrómetros.

Las propiedades del suelo relativas a las características de infiltración son la conductividad hidráulica saturada y sortividad. La conductividad hidráulica saturada es la capacidad del suelo para transmitir agua en condiciones de saturación, mientras que sortividad es una medida de la absorción de agua por el suelo en condiciones no saturadas. Tanto la capacidad de absorción como la conductividad hidráulica saturada se ven influidas por la disposición y el número de poros del suelo, por lo que reflejan las condiciones estructurales del suelo. Philip (1957, en Omuto *et al.*, 2008) propone una función de la combinación de estas dos propiedades del suelo como se muestra a continuación:

$$i(t) = f_c + 0,5S/\sqrt{t}$$

donde  $i(t)$  es la tasa de infiltración,  $f_c$  es la conductividad hidráulica saturada,  $S$  es la sortividad, y  $t$  es el tiempo.

Este enfoque considera el diseño de muestreo, la variabilidad global e individual de las características de retención de la infiltración y el agua, la interdependencia y cualquier posible parámetro para determinar las propiedades físicas. Por lo tanto, ofrece resultados bastante más precisos y fiables en comparación con otros métodos de estimación de parámetros.

En este estudio, el enfoque se llevó a cabo mediante un paquete estadístico, HydroMe, que es ejecutable en el programa estadístico R ([www.r-project.org/](http://www.r-project.org/)).

⇒ Bedford *et al.* (2007) estudiaron los efectos de la cubierta vegetal, su patrón espacial, y los accidentes geográficos en las propiedades del suelo que afectan a la escorrentía y a la infiltración en matorrales en el National Wildlife Refuge en el centro de Nuevo México, EE.UU. Se estudiaron los patrones de microtopografía y la conductividad hidráulica saturada.

La velocidad de infiltración es una función compleja de los contenidos de agua del suelo y potenciales a través del tiempo, por lo que se simplificó utilizando la conductividad hidráulica saturada, que es la velocidad de infiltración mínima. Para la medida de la conductividad hidráulica saturada se usaron infiltrómetros de carga constante, que consistían en cilindros de 5 cm de diámetro, y se insertaron hasta una profundidad de 5 cm. La altura constante, que se mantuvo por medio de un tubo de Mariotte, fue de 5 cm y los datos se registraban cada 5 segundos. Se permitió que la infiltración continuase durante 35-45 minutos, de cara a permitir que alcanzase un estado estable aproximado.

⇒ Hatt *et al.* (2008) publican un estudio de la medida in situ de la conductividad hidráulica, recomendando el uso de un infiltrómetro de anillo simple bajo condiciones de carga constante. Aboga por insertar el cilindro 5 cm en el suelo y utilizar cargas de agua de 5 y 15 cm. Para mantener esta carga constante vierte manualmente agua dentro del anillo, con una frecuencia de lectura de la infiltración dependiente de la filtración media, pero que oscila entre 30 segundos y 5 minutos.

El experimento finaliza cuando la tasa de infiltración se considera estable, es decir, cuando el volumen filtrado por intervalo de tiempo es constante durante al menos 30 minutos.

Destacan que este método mide la conductividad hidráulica de la superficie del medio filtrante del suelo, pero que en la mayoría de los casos es esta capa la que controla la conductividad hidráulica del total del sistema (Hatt *et al.*, 2008).

En este caso, utilizan un cilindro de 10 cm de diámetro con una altura de 22 cm, con marcas interiores a las alturas de 5 y 15 cm. Para cada test utiliza 40 l de agua.

Para la colocación del infiltrómetro, en primer lugar retira cuidadosamente el material que cubre la superficie, sin alterar la misma. Para clavar el anillo utiliza un bloque de madera, de modo que absorba la vibración de los golpes y todo el cilindro se clave en el mismo momento. Es importante además verter el agua con cuidado para no alterar la superficie del suelo, por lo que se pueden usar diferentes aparatos.

Para calcular la conductividad hidráulica utiliza las siguientes ecuaciones, asumiendo que el comportamiento del suelo es de tipo "Gardner" (Gardner, 1958, en Hatt *et al.*, 2008):

$$K(h) = K_s \cdot e^{ah}$$

donde K es la conductividad hidráulica, h es la carga de presión negativa. Para hallar  $K_s$  se utiliza la siguiente expresión, como ya propusieron Reynolds y Elrick en 1990 y también usada por Buczko *et al.* (2006):

$$K_s = \frac{G}{r} \cdot \left( \frac{Q_2 - Q_1}{H_2 - H_1} \right)$$

donde r es el radio del infiltrómetro,  $H_1$  y  $H_2$  son la primera y segunda carga de agua (5 y 15 cm respectivamente),  $Q_1$  y  $Q_2$  son los flujos estables para la primera y segunda carga respectivamente, y G es un factor de forma estimado por:

$$G = 0,316 \cdot \frac{d}{r} + 0,184$$

siendo d la profundidad de inserción y r el radio del cilindro.

G es prácticamente independiente de la conductividad hidráulica y de la carga, si esta carga es mayor de 5 cm (Hatt *et al.*, 2008).

Comentan además que este método es relativamente comparable a los desarrollados en laboratorio (Le Costumer *et al.*, 2008, en Hatt *et al.*, 2008), en caso de que los resultados de las réplicas de campo difieran entre sí menos del 50% (Hatt *et al.*, 2008).

⇒ Jiménez-Hernández (2009) caracteriza las propiedades hidráulicas de una parcela agrícola mediante ensayos de campo y laboratorio, enmarcado en un estudio del impacto ambiental del uso de lodos de depuradora en terrenos agrícolas.

Para ello uno de los métodos utilizados consiste en la medición de la capacidad de infiltración con un infiltrómetro de anillo simple de 33 cm de diámetro y 40 cm de altura. Los ensayos de infiltración se realizaron a carga constante, en superficie y a diferentes profundidades mediante la apertura de zanjas con retroexcavadora a 20, 40, 75 y 160 cm de profundidad. Los valores de la conductividad hidráulica saturada se obtuvieron a partir del análisis de la cinética de infiltración experimental mediante el método de ajuste de Wu (1999).

Al representar los datos de los ensayos en forma de gráficos de infiltración (cm/d) frente a tiempo se obtuvieron las curvas características, con un descenso inicial de la infiltración hasta estabilizarse en torno a un valor constante cuando se alcanza la saturación del medio (Jiménez-Hernández, 2009).

Para calcular la conductividad hidráulica saturada empleó las ecuaciones de Wu y Pan (1997) y Wu *et al.* (1999). Estos autores proponen una ecuación generalizada de infiltración para ensayos con infiltrómetro de anillo simple, obtenida a partir de la ecuación de Richards, aplicando los factores de escala apropiados para tiempo y espacio. Cuando se cumple la condición de saturación del medio (estado estacionario), el tramo final de la representación de los valores de infiltración acumulada respecto al tiempo se ajusta a una recta. En la Figura 2.8. se muestra uno de los ajustes llevado a cabo, como ejemplo del análisis realizado en cada uno de los 11 ensayos de infiltración que realizó.

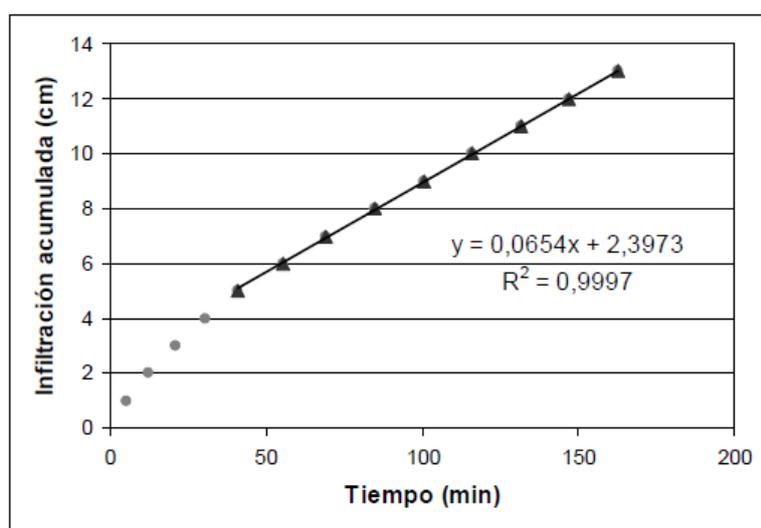


Figura 2.8. Ejemplo de ajuste según el método de Wu sobre el gráfico de la infiltración acumulada frente al tiempo construido con los datos experimentales de uno de los un ensayos de infiltración. (Jiménez-Hernández, 2009).

De acuerdo al modelo, los valores de la conductividad hidráulica saturada,  $K_s$ , pueden calcularse con la siguiente ecuación:

$$K_s = \frac{A}{a \cdot f}$$

donde  $A$  es la pendiente de la recta de ajuste,  $a$  es una constante adimensional determinada empíricamente e igual a 0,9084) y  $f$  un factor que depende de las dimensiones del cilindro y que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$f = \frac{H + 1/\alpha}{d + r/2} + 1$$

siendo  $d$  la profundidad de inserción del cilindro (cm),  $r$  el radio del anillo de infiltración (cm),  $H$  la carga de agua en el cilindro y  $\alpha$  un parámetro que depende del tipo de material. Para los materiales ensayados en este estudio se han los valores de  $\alpha=0,36$ , aplicable a arenas, arena limosa y arena fina,  $\alpha=0,12$ , válido para limo y limo arenosa (Elrick y Reynolds, 1992, en Jiménez-Hernández, 2009).

Los resultados obtenidos muestran que la conductividad hidráulica saturada disminuye ligeramente con la profundidad durante los primeros 40 cm (valores de 32 a 7,4 cm/d, siendo d la profundidad de inserción del cilindro). Sin embargo, a mayores profundidades se observa un incremento en la permeabilidad del medio, con un aumento notable de los valores de  $K_s$  (de 100 a 218 cm/d –siendo d la profundidad de inserción del cilindro- al profundizar desde 75 a 160 cm). Este comportamiento puede explicarse por el efecto del arado del terreno, ya que se favorece que a profundidades próximas a 40 cm se acumulen materiales finos procedentes del lavado desde la superficie (Jiménez-Hernández, 2009).

⇒ Previatti *et al.* (2010) evalúan la eficiencia del almacenamiento de agua de un suelo para el aprovechamiento de las lluvias en una ladera mediante la construcción de microcuencas utilizando mediciones de reflectometría.

Dentro de este estudio toman además mediciones cualitativas de la capacidad de infiltración.

Para ello, utilizan un infiltrómetro de anillo de 11 cm de diámetro insertado ligeramente en el suelo y relleno con 10 cm de altura de agua, que se dejan absorber sin rellenar. El tiempo es registrado cada cm de caída de agua hasta que el agua es completamente infiltrada.

Puesto que los test de infiltración se realizaron tanto dentro como fuera de las microcuencas, se observó que la dinámica de infiltración variaba en función del suelo.

Para comparar los suelos entre sí contrasta el tiempo que tarda cada uno en infiltrar 10 cm de agua, pero no establece tasas de infiltración, como puede observarse en la siguiente Figura:

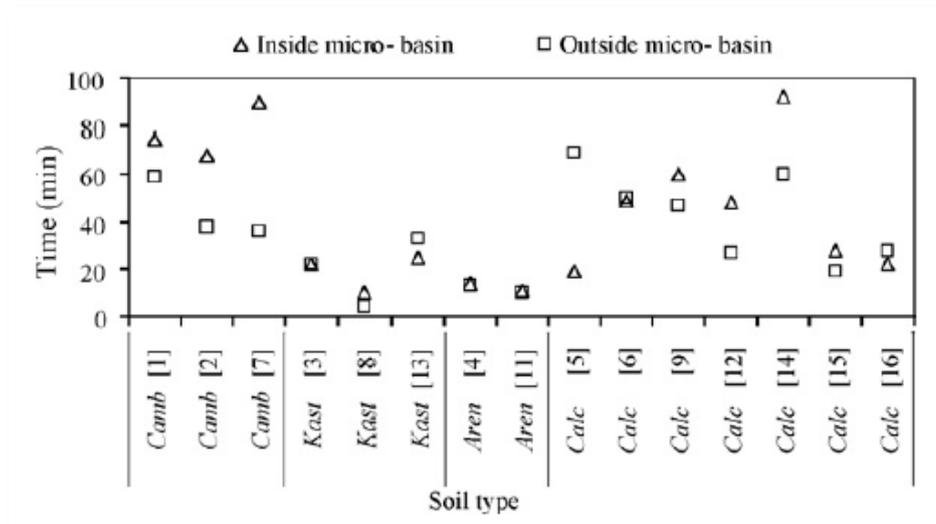


Figura 2.9. Tiempo de infiltración necesario para infiltrar 10 cm de carga de agua medido dentro y fuera de las microcuencas con diferentes suelos. (Previatti *et al.*, 2010).

⇒ Caputo *et al.* (2010) miden la conductividad hidráulica saturada en rocas fracturadas en el sur de Italia, mediante el uso de un infiltrómetro de anillo ajustable.

El principal motivo del uso de un infiltrómetro ajustable es que los cilindros de pequeño diámetro empleados hasta la fecha no eran representativos de la medida a escala en una zona heterogénea. Por ello, se diseñó un infiltrómetro ajustable, que dada su versatilidad podía ser fijado en cada zona. Esto permite una mejora de la representatividad de la heterogeneidad natural del sistema.

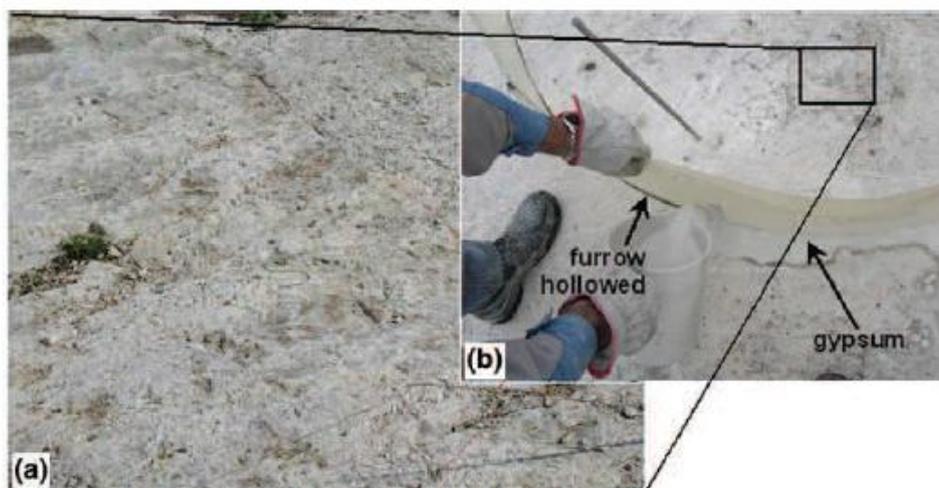


Figura 2.10. (a) Detalle del suelo donde se desarrollaron los experimentos. (b) infiltrómetro de anillo de plástico de 2 cm de grosor, ajustable, utilizado para el experimento por Caputo *et al.* (2010).

Se usó en un afloramiento kárstico de roca caliza. El casi-estable flujo vertical dentro de las fracturas insaturadas se investigó mediante la medición de los niveles de agua durante los test de infiltración y se comprobó la resistividad eléctrica para visualizar la infiltración de agua en el subsuelo.

Se comprobó que el aparato experimental propuesto funciona bien en afloramientos rocosos y permite la repetición de las pruebas de infiltración en muchos lugares, con el fin de reducir la incertidumbre del modelo en medios heterogéneos.

Para la construcción del instrumento se utilizó un material plástico de 30 cm de alto y 0,2 cm de grosor, y se tuvieron que llevar pequeños ajustes en el diámetro del cilindro para asegurar un cierre eficaz, creando in situ dos anillos de 2 y 1,8 m de diámetro interno, cosiendo los extremos con cinta impermeable.

Se utilizaron 2 zonas en las que se observó visualmente diferente grado de fracturación de las rocas. El agua durante los ensayos alcanzó un máximo de 13 cm de altura en el cilindro. Durante los test de infiltración de carga disminuyente

Los flujos de fuga de agua lateral rondaron entre el 3 y el 8 % de la infiltración total. Durante los experimentos, los niveles de agua en el infiltrómetro se controlaron con una sonda de presión sumergible.

En cuanto a los resultados obtenidos, asumiendo que la succión de la carga de agua por el frente húmedo es constante (Modelo de Green-Ampt), la tasa de flujo semi-estable específica  $q_s$  será:

$$q_s = \frac{K_s}{r\pi G_e} \left[ H + \frac{1}{\alpha^*} \right] + K_s$$

donde  $K_s$  es la conductividad hidráulica saturada,  $r$  en radio del cilindro,  $H$  la altura de carga de agua,  $G_e$  el factor de forma efectivo y  $1/\alpha^*$  es la longitud de la capilaridad macroscópica. (Caputo *et al.*, 2010).

Además, se midió la resistividad eléctrica simultáneamente a los test de infiltración, de cara a conocer la profundidad máxima del frente húmedo, como puede verse en la siguiente Figura:

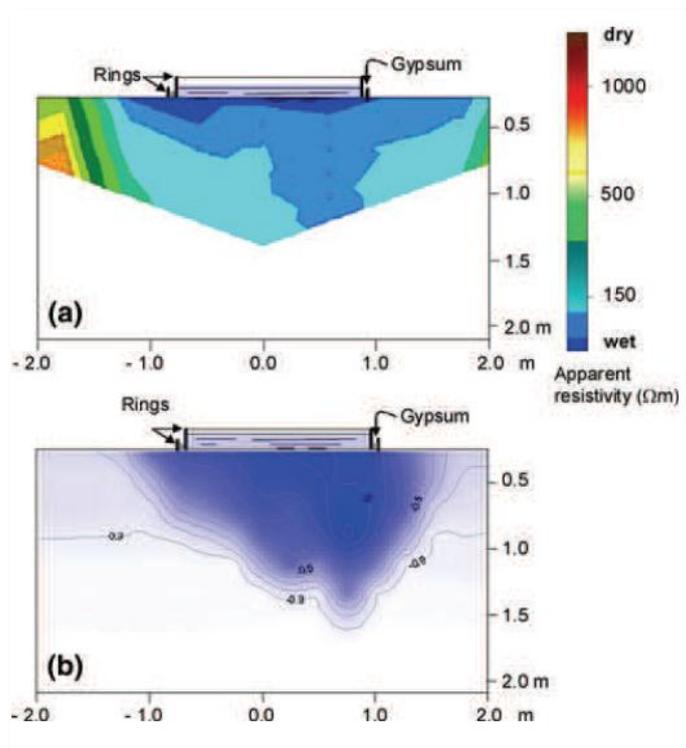


Figura 2.11. Resistividad eléctrica aparente 80 minutos después del comienzo de la infiltración de agua en el anillo. En la Figura inferior puede observarse el modelo de simulación seleccionado de cara al ajuste de la forma y de la máxima profundidad del frente húmedo. Las líneas de contorno representan las salidas del modelo expresado como carga matricial (m) en la fractura. (Caputo *et al.*, 2010).

Concluyen, por tanto, que la combinación de un infiltrómetro de anillo con medidas de la resistividad eléctrica subsuperficial constituyen una técnica simple y no muy cara de medición en campo de la conductividad hidráulica saturada (Caputo *et al.*, 2010).

⇒ Por último, Ingelmo *et al.* (2011) bajo el objetivo de determinar la conductividad hidráulica saturada, miden la tasa de infiltración con un infiltrómetro de anillo simple de acuerdo con el método de Wu *et al.* (1999). El infiltrómetro consistía en un cilindro de 12 cm de diámetro y 6,5 cm de altura con una columna de agua calibrada de cara a mantener una presión de agua constante durante los experimentos. El cilindro en este caso se insertó 5 cm en el suelo. Se anotó la infiltración acumulada a diferentes tiempos anotando la altura del agua en la columna de alimentación. El tiempo durante el cual fueron tomadas las mediciones y que fue lo suficientemente largo como para alcanzar una tasa de infiltración estable, fue de unos 20 minutos de media.

Los cálculos pertinentes para obtener la conductividad hidráulica saturada fueron obtenidos a través de las ecuaciones propuestas por Wu *et al.* (1999) que también muestra Jiménez-Hernández (2009).

Entre los resultados destaca que la conductividad hidráulica saturada sigue una distribución de densidad exponencial. Tomando logaritmos de  $K_s$  en base 10 obtuvieron además un histograma de normalidad y se aplicó un test de Kolmogorov-Smirnov para evaluar la normalidad. A partir de estos resultados se asumió una distribución log-normal para  $K_s$  (Ingelmo *et al.*, 2011).

⇒ Cabe destacar, por otro lado, el uso del infiltrómetro de anillo simple INFILTEST (Mongil *et al.*, 2013) que está en trámite de patente por el Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila, junto con la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia, y que implica uno de los equipos a emplear en el presente estudio. Mongil *et al.* (2013) realizan una revisión bibliográfica de los distintos tipos de infiltrómetros disponibles, afirmando que en resumen existen en el mercado numerosos tipos y modelos de infiltrómetros, de los que los infiltrómetros inundadores más sencillos consisten en un cilindro (infiltrómetro de anillo simple) o dos cilindros (infiltrómetro de doble anillo). El material empleado suele ser acero, aunque también existen infiltrómetros de metacrilato u otros materiales plásticos y, respecto al tamaño de los cilindros, éste oscila entre 2 cm y 1,2 m aproximadamente, según los diferentes autores.

En concreto, el infiltrómetro INFILTEST consiste en un infiltrómetro de anillo simple de carga variable, de metacrilato, de 8,3 cm de diámetro interior y 24,8 cm de altura. El metacrilato, frente al acero, es resistente y transparente, por lo que permite conocer posibles incidencias ocurridas durante el experimento y medir la altura de agua con mayor precisión. Además, al ser de pequeño tamaño, se reduce el consumo de agua y se facilitan el transporte y la instalación. Por otro lado, cuenta con un cilindro de acero de 13 cm de alto, como elemento que facilita la inserción y sujeción del cilindro de metacrilato en el suelo, y evita la compactación del suelo y el levantamiento de los materiales de su superficie durante el vertido de agua en el ensayo, al disponer de una rejilla ajustable que reduce el impacto del agua y evita el movimiento de la hojarasca y otros restos vegetales. El resto de detalles puede consultarse en Mongil *et al.* (2013).

## 2.2.2. Revisión bibliográfica acerca del papel de los distintos tipos de vegetación en la infiltración

⇒ Uno de los primeros estudios de la relación de la vegetación con la infiltración data de 1988. En ese año, Bergkamp lleva a cabo un estudio de escorrentía e infiltración en el sureste de Madrid, con los objetivos de determinar si los parches de vegetación y las distintas escalas de medición afectan a los flujos hidrológicos y, en ese caso, cuál es la mejor escala a tomar para realizar un estudio de estas características y cómo afecta la pendiente en las distintas escalas. Es decir, el estudio tuvo como objetivo comprender las relaciones entre la producción de escorrentía, los patrones de vegetación y la microtopografía a diferentes escalas espaciales dentro de una zona semiárida con escasa vegetación.

Las mediciones de la escorrentía y la infiltración se realizaron en cinco escalas espaciales, terrazas de menos de 1 m<sup>2</sup>, en un montecillo de entre 10 y 20 m<sup>2</sup>, una parte con ligera pendiente de 1000-2000 m<sup>2</sup>, otra con pendiente de 1 ha, y una zona de 50 ha; y en dos zonas distintas: una de encinar y otra de matorral. En ambos casos, para los dos tipos de vegetación, se optó por pendientes similares orientadas al norte.

Las mediciones fueron realizadas con un simulador de lluvia, realizando 5 mediciones en cada escala, con distintos tipos de cobertura vegetal y pedregosidad, y con diferente intensidad de lluvia.

Para controlar la infiltración, se midió la humedad del suelo por análisis gravimétrico de las muestras y por un sistema de TDR y tensiómetros (Bergkamp *et al.*, 1996, en Bergkamp, 1998).

Los resultados del monitoreo de los experimentos de escorrentía y simulación de lluvia mostraron que el escurrimiento no se produjo en la escala de pendientes. Se amortigua al nivel de terraza por infiltración no uniforme en los bordes de las mismas y por la infiltración debajo de arbustos y robles. La pendiente y la captura de la escorrentía no estaban correlacionadas a estas pequeñas escalas.

En cuanto a las tasas de infiltración en la escala más pequeña, los resultados del contenido de humedad del suelo, que cambió de forma secuencial a medida que aumenta la profundidad, indican que la infiltración fue bastante uniforme. Los cambios en la humedad del suelo fueron más lentos en los bordes de la parcela que por debajo de arbustos de tomillo.

En las parcelas de nivel 2 la infiltración resultó muy rápida en las zonas pedregosas. En este caso, aproximadamente entre el 80 y el 90% de la precipitación se percola por debajo de 20 cm en el lecho de roca bajo las encinas. Las excavaciones después de los experimentos mostraron que el agua se había movido en distancias cortas en espacios entre las piedras, situadas debajo de las grietas. La falta de uniformidad de la infiltración se asoció tanto con la repelencia al agua y con la pedregosidad del suelo.

Debajo de las encinas y arbustos situados en suelos más profundos la infiltración era bastante diferente. Las mediciones detalladas con sensores TDR a diferentes profundidades durante una hora y media de experimento indican un incremento secuencial en el contenido de humedad del suelo a profundidades cada vez mayores. En el matorral se obtuvo una infiltración más lenta y homogénea que la acontecida en la encina en suelos poco profundos y pedregosos.

⇒ La infiltración en las dehesas, zonas de robledal abierto típicas del suroeste de España, fueron en primer lugar estudiadas por Joffre, también en 1988. Estas dehesas constan de dos componentes característicos: (1) robles con una vegetación específica de hierba bajo el dosel y (2) vegetación herbácea no sombreada entre las copas de los árboles individuales. Joffre (1988) estudió el movimiento del agua a través de los 150 cm superiores del suelo de una dehesa en tres sitios en Andalucía por medio de una sonda de neutrones entre abril 1984 y julio de 1986, compuesta por las siguientes especies: *Quercus rotundifolia* Lam., *Quercus suber* L. y *Quercus pyrenaica* Willd. Por su parte, entre las herbáceas destacaban especies de gramíneas como *Bromus hordeaceus*, leguminosas como *Trifolium sp.*, y compuestas como *Crepis capillaris*.

Se estudiaron las características del suelo: densidad aparente, textura y capacidad de almacenamiento de agua, tanto en zonas bajo el dosel arbóreo como fuera del mismo, y se observó que las curvas de densidad aparente y de liberación de humedad fueron significativamente diferentes entre los dos componentes de la dehesa. El contenido de agua fue siempre mayor en los árboles que en el área abierta. Las estimaciones de la capacidad de campo y los perfiles más secos medidos proporcionan el límite superior de almacenamiento de agua del suelo. Bajo los árboles se mejoró siempre la capacidad de almacenamiento. Este almacenamiento fue de 215 a 266 mm bajo los árboles y de entre 137-172 mm en la zona abierta.

Al conectar gráficamente los puntos de igual contenido en agua en un plano de profundidad-tiempo, se obtiene una gran herramienta para las comparaciones de flujo de agua en los lugares contrastados. Los diferentes contenidos de agua conducen a un retraso importante en el agotamiento de la humedad en la superficie bajo los árboles. La mayoría de los sistemas de raíces de la vegetación herbácea se encuentran en esta superficie cerca del horizonte. La "eficiencia de lluvia" para la recarga de otoño, que se define como el ratio precipitación/almacenamiento, es más grande bajo los árboles.

Los árboles indujeron cambios en las propiedades del suelo y por lo tanto en los flujos de agua en el mismo. Se observó además que la dinámica del agua en estos sistemas de vegetación depende de factores físicos y biológicos.

⇒ En el 2007 Cubera *et al.*, también llevaron a cabo un estudio en dehesas, donde destacaron que los efectos positivos de los árboles en las propiedades físicas del suelo son una mayor capacidad de retención de agua del suelo y la macroporosidad, que es favorable a la infiltración y redistribución de agua en el suelo más allá de la cobertura del dosel. Esto puede explicar, por lo tanto, los incrementos observados en el contenido de agua del suelo bajo la cobertura arbórea de robles y encinas en la dehesa estudiada por estos autores en Extremadura, en comparación con las áreas adyacentes de pasto.

⇒ Van Schaik (2009) igualmente mide la infiltración y el flujo preferencial en una zona de dehesa en Cáceres. Este flujo preferencial es un aumento del flujo de agua y solutos a través de ciertos canales en medios porosos, de manera que una pequeña fracción del volumen de los suelos participa en la mayor parte del flujo. Por lo tanto, el flujo preferencial es de importancia para la comprensión de la variabilidad espacial en la infiltración y percolación, que afectan a la generación de escorrentía y a las aguas subterráneas. Sin embargo, este flujo preferencial es difícil de medir y cuantificar, debido a su alta variabilidad espacial y temporal.

No existe ningún parámetro de aceptación general para cuantificar el flujo preferencial. Sin embargo, este flujo de agua de los macroporos está fuertemente determinado por la capacidad de infiltración de la matriz: una vez se supera la capacidad de infiltración de la matriz el flujo preferencial se vuelve importante. Por lo tanto la separación del flujo de infiltración uniforme y flujo en los macroporos es importante. También para la influencia del flujo preferencial sobre la hidrología es necesario conocer la capacidad máxima de infiltración del suelo, la matriz y los macroporos en conjunto.

⇒ Volviendo a estudios anteriores, una biosecuencia de los suelos tras un establecimiento de 50 años de monocultivos de pino Coulter (*Pinus coulteri*), robles (*Quercus dumosa*) y chamizo (*Adenostoma fasciculatum*) se utilizó por Johnson-Maynard *et al.* (2002) para determinar la influencia relativa del tipo de vegetación y los organismos asociados del suelo en el desarrollo de las características estructurales del suelo y el flujo de agua en el mismo.

Para ello, en primer lugar, se midieron las características de cada tipo de suelo. La porosidad total oscilaba entre un máximo del 51% en los horizontes de roble, trabajados por lombrices, mientras que se observó un mínimo del 39 % dentro de los 35 a 50 cm de profundidad debajo de los pinos, donde las lombrices estaban ausentes. La macroporosidad (poros con diámetros > 300  $\mu\text{m}$ ) fue más alta en el horizonte bajo el roble (15,6 %) y la más baja, en el pino (9,5 %).

Más tarde, se midió la conductividad hidráulica saturada, Ks, colocando celdas Tempe en muestras de suelo y midiendo Ks por el método de la caída de presión (Klute y Dirksen, 1986, en Johnson-Maynard *et al.*, 2002). Los mismos núcleos eran posteriormente preparados para mediciones de retención de agua.

La conductividad hidráulica saturada de los suelos superficiales osciló entre 10,8 cm/h en suelos de roble a 3,2 cm/h en suelos de pino. El suelo bajo chamizo, que tenía menos lombrices de tierra que el roble, tenía una  $K_s$  y una densidad aparente con valores intermedios entre el roble y el pino.

Por otro lado, se estudió la distribución de las raíces de cada especie y la presencia o ausencia de fauna (tanto microfauna como macrofauna). El pino tenía más raíces > 2 mm de diámetro en los primeros 20 cm de suelo que el roble o el chamizo. La mayor densidad de raíces > 2 mm de diámetro bajo el roble fue encontrada a la profundidad de 35 a 50 cm, mientras que el pino y chamizo tenían más raíces de este tamaño por encima de 20 cm. Las distribuciones de las raíces y la macrofauna sugieren que las raíces son el factor dominante en el desarrollo de macroporosidad en suelos de pino, mientras que las lombrices de tierra han tenido el mayor efecto en suelos de roble.

La porosidad se ha incrementado a una tasa promedio de 0,22 % por año a entre 0 y 7 cm de profundidad bajo el roble (de 41% a 56 %), pero no ha sido significativamente alterada dentro de la misma profundidad en el caso del pino. Por debajo de la profundidad de 7 cm, los valores de porosidad son similares para cada tipo de vegetación.

La capacidad disponible de agua dentro del primer horizonte de 0 a 7 cm de profundidad se ha incrementado desde los valores originales (alrededor de 0,11  $m^3/m^3$ ) hasta 0,17  $m^3/m^3$  bajo roble, 0,16  $m^3/m^3$  bajo chamizo, y 0,13  $m^3/m^3$  bajo el pino.

Los datos muestran que dependiendo de la palatabilidad de cada tipo de vegetación, las poblaciones de macrofauna pueden diferir en tamaño y composición bajo cada tipo de vegetación. Indirectamente, a través de su capacidad de apoyar las lombrices de tierra, las especies que componen este ecosistema de chaparral tienen significativamente incrementado la tasa así como la expresión de la estructura del suelo, la porosidad total y la distribución del tamaño de poro. Durante el período de 50 años de formación del suelo, la alteración de sus propiedades físicas resulta en diferencias mensurables en las propiedades hidráulicas, como lo demuestra la mayor  $K_s$  y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

⇒ Harden *et al.* (2003) también utilizan un simulador de lluvia en un estudio en el que miden la infiltración en varias zonas con pendiente, estableciendo una comparación de tres ecosistemas, mediante el uso de un simulador de lluvia portátil en las tres áreas, y un infiltrómetro de anillo simple en la zona de los Andes.

Exponen que el agua como conductor de la erosión no ha recibido el estudio científico que merece dentro de la geomorfología. Por ello, estudian la escorrentía y la infiltración en una zona montañosa de los Andes, en Puerto Rico y en Estados Unidos.

Para determinar las diferencias estadísticas entre las distintas zonas se llevó a cabo un test de Kruskal-Wallis y se muestran las tasas de infiltración de las distintas zonas en diagramas de caja y bigotes. Además, muestran estos diagramas para la comparación de la tasa de infiltración según las diferentes pendientes, en función de los tipos de vegetación y de la exposición topográfica.

Los resultados detallados de cada zona se muestran a continuación:

Tabla 2.2. Resultados de las mediciones de infiltración obtenidas con el infiltómetro de anillo en la primera zona de medición, en Ecuador. Modificado de Harden *et al.* (2003).

Sitio	Tasas de infiltración mm/h	Rango	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	Tipo de suelo
1	20,23,36,38,41,55,79,120	20-120	0,91	Meseta
2	27,35,47,70,127	27-127	0,96	Meseta
3	8,88,98,59	8-98	0,78	Meseta
4	82,125,136,156,156	0-156	0,65	Meseta
5	77,86,175,206	77-206	0,87	Meseta

Tabla 2.3. Resultados de las mediciones de infiltración obtenidas con el infiltómetro de anillo en la segunda zona de medición, en EEUU. Modificado de Harden *et al.* (2003).

Sitio	Tasas de infiltración mm/h	Rango	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	Posición en la pendiente	Vegetación y geología
1	>41,98,66,>36,73,74	>36-98	1,08-2,18	Medio	Bajo dosel de bosque caduco
2	76,109,93,59	59-109	0,96-1,17	Abajo	Bajo dosel de bosque caduco
3	>45,>80,>42,>32,>82	>32->82	-	Arriba	Bajo dosel de bosque caduco
4	>88,44,84,>91,26,>81,61,56	26->91	0,92-1,29	Abajo	Bajo dosel de bosque caduco
5	84,91,>79,>52,>51,75	>51-91	0,85-1,26	Arriba	Bajo dosel de bosque caduco
6	89,40,27,>62,33	27-89	1,10-1,23	Medio	Pastizal abierto
7	107,95,71,68	68-107	1,01-1,27	Arriba	Bajo dosel de bosque caduco
8	>79,>70,94,>48	>48-94	1,03-1,27	Arriba	Bajo dosel de bosque caduco
9	97,75,>69,>52	>52-97	0,47-1,32	Medio	Bajo dosel de bosque caduco
10	>89,>92,>58,>66	>58->92	0,70-1,17	Arriba	Bajo dosel de bosque caduco

Tabla 2.3. Continuación. Resultados de las mediciones de infiltración obtenidas con el infiltrómetro de anillo en la segunda zona de medición, en EEUU. Modificado de Harden et al. (2003).

Sitio	Tasas de infiltración mm/h	Rango	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>	Posición en la pendiente	Vegetación y geología
11	>87,16,61,>68,72,84	16->87	0,90-1,18	Arriba	Bajo dosel joven de bosque caduco
12	24,23,31,56	23-56	1,10-1,71	Arriba	Pinar
13	>94,>93,72,48	48->94	1,09-1,24	Medio	Pinar
14	80,50	50-80	1,20-1,72	Medio	Abierto, compactado por vehículos
15	>86->117	>86->117	1,0-1,28	Abajo	Bajo dosel de bosque caduco
16	>86,>113,>109,>60,43,>36	43-113	0,81-1,27	Medio	Bajo dosel de bosque caduco

Tabla 2.4. Resultados de las mediciones de infiltración obtenidas con el infiltrómetro de anillo en la tercera zona de medición, en Puerto Rico. Modificado de Harden et al. (2003).

Sitio	Densidad g/cm <sup>3</sup>	Pendiente °	Tasa de infiltración mm/h	Rango
1	0,41-1,17	7-36	83,1,>105,>75,82,29,8,51	1->105
2	0,3-0,77	2-22	6,21,7,42,6,32,39	6-42
3	0,57-0,71	9-25	83,18,81,60,71	18-83
4	0,56-0,78	2-10	4,0,69,11,41	0-69
5	0,62-0,71	2-40	5,3,>78,>62,>106,>81	3->106
6	0,56-0,71	3-36	>78,>99,76,>69	76->99
7	0,28-0,64	5-46	77,21,>88,94,10,83,>60	10-94
8	0,24-0,81	0-53	>83,>85,99,74,>96,>92	74-99

Con base a los resultados obtenidos, se analizó la variabilidad espacial de la infiltración, la relación de la escorrentía y la infiltración con la posición horizontal, la influencia de la vegetación en las tasas de infiltración en las laderas, y las implicaciones de esta investigación para mejorar la comprensión de los procesos erosivos y el cambio del paisaje.

Las tasas de infiltración oscilaron entre 6 y 206 mm/h en las laderas bajas de los Andes, desde 16 hasta 117 mm/h en los montes Apalaches meridionales, y de 0 a 106 mm/h en la Sierra de Luquillo. Estas tasas son superiores a las de la mayoría de los eventos de lluvia naturales, lo que confirma que la escorrentía de superficie es poco frecuente en los bosques montanos con profundos mantos de suelo.

La investigación llevada a cabo por Harden *et al.* (2003), proporciona la evidencia adicional de la capacidad de los bosques y sus suelos para preservar las características geomorfológicas superficiales, documenta la importancia de un flujo subterráneo en los bosques de montaña, y apoya la necesidad de cautela en la extrapolación de las tasas de infiltración.

⇒ El trabajo de Bruijnzeel (2004) revisa una amplia gama de los artículos científicos disponibles que evidencian la influencia ejercida por la presencia o ausencia de una buena cobertura forestal en el clima regional, el total de agua de cada estación, así como en las diferentes formas de erosión y producción de sedimentos bajo condiciones de trópico húmedo en general y en el sureste de Asia, en particular.

Desde los años 70 se han llevado a cabo una serie de simulaciones cada vez más sofisticadas para evaluar las consecuencias climáticas de la conversión de bosques a pastos en gran escala.

Los resultados de los esfuerzos de modelado respectivos varían considerablemente, dependiendo, entre otras cosas, del esquema de parametrización utilizado en la superficie terrestre

Existen diversidad de modelos con distintos resultados en cuanto a erosión, precipitaciones, temperaturas, etc. que se discuten en el artículo, pero centrándonos en lo que al presente estudio refiere, una de las simulaciones más sofisticadas que existen (Lean *et al.*, 1996, en Bruijnzeel, 2004), derivada de un aumento medio de la temperatura de 2,3 °C y una reducción en la precipitación anual del 7 % (0,43 mm por día o 150 mm al año) para la zona del sudeste asiático pero que, por el contrario, prevé un aumento en las precipitaciones para América del Sur, observa una reducción de cinco veces en la capacidad de infiltración del suelo después de su conversión de bosque a pastizales, con las consecuencias que ello conlleva.

Lal (1996) en Bruijnzeel (2004) demostró cómo cinco años de barbecho después de una cosecha tradicional en Nigeria produjeron un aumento de 10 veces en la capacidad de infiltración del suelo.

⇒ Por su parte, Benegas *et al.* (2005), prueban la hipótesis de que los árboles tienen un efecto medible en la infiltrabilidad, la macroporosidad y el flujo preferencial en los sistemas agrosilvopastoriles.

Crean que esto es de vital importancia puesto que la conservación del agua es un componente crítico de los sistemas sostenibles; sin embargo, los efectos en los regímenes de recarga de aguas subterráneas de los árboles aislados o en pequeños grupos en los sistemas agroforestales no se han estudiado extensamente, exceptuando un estudio reciente realizado en esta área en el que se encontró que el nivel de infiltración de agua en un sistema agroforestal de café era mucho mayor que en un monocultivo de café (Cannavo *et al.*, 2011, en Benegas *et al.*, 2005).

Para ello, investigaron la relación entre infiltrabilidad y la distancia al árbol más cercano, y si las diferencias en la macroporosidad pueden dar cuenta de las diferencias en infiltración, en dos sistemas distintos que representan dos situaciones extremas en la infiltración: una plantación de café bajo un sistema agroforestal en el clima tropical de Costa Rica y un paisaje de pasto con una estación seca prolongada en Honduras.

Estudiaron las características de cada suelo y la densidad de árboles por hectárea en cada sistema, así como el régimen de precipitaciones y la infiltración mediante un protocolo de medición con un infiltrómetro de doble anillo, realizando una serie de mediciones de la misma a distintas distancias de cada árbol. De este modo pueden comparar el comportamiento de la infiltración según se van alejando de los árboles. En ambos sistemas estudiados, los flujos de agua preferenciales en el suelo eran dominantes en comparación con el flujo de la matriz. Se observó que los árboles, dentro del paisaje de pastos, mejoraban la infiltrabilidad y el flujo preferencial, pero no tenían un efecto significativo en uno de los sistemas estudiado.

Después de comparar la intensidad de las precipitaciones y los datos de frecuencia de los valores de infiltración medidos, llegaron a la conclusión de que los árboles en el sistema de pasto reducen la escorrentía superficial incluso en las zonas de mayor intensidad de lluvia observada, (> 50 mm/h).

Concluyen, por tanto, que los árboles aumentan las características hidrológicas en las tierras de pastoreo, y por lo tanto pueden ser una opción viable para mitigar algunos de los impactos negativos que tienen estos sistemas, como desmontes de tierra para conseguir tierras llanas o la cría de animales. Sin embargo, en las prácticas de gestión de tierras donde la vegetación de sotobosque perenne constituye una gran proporción de la cubierta, como los que estudian en este trabajo Benegas *et al.* (2005), el efecto de los árboles sobre las características de infiltración puede ser menos pronunciado.

⇒ Para Buczko *et al.* (2006) la repelencia al agua del suelo está muy extendida en los suelos forestales y tiene importantes implicaciones hidrológicas, y la relación de la repelencia al agua del suelo con las propiedades hidráulicas es de interés para evaluar el comportamiento hidrológico general de un ecosistema forestal. Tanto la repelencia al agua del suelo como las propiedades hidráulicas dependen de las especies de árboles y de su edad, las prácticas de manejo forestal, así como la estación del año.

En este estudio, Buczko *et al.* (2006) estudian la variación de la repelencia al agua del suelo y las propiedades hidráulicas durante la estación del año y entre las diferentes masas forestales para una cronosecuencia de bosque mixto de pino y haya en Alemania.

La repelencia al agua del suelo se evaluó con una serie de pruebas de tiempo de penetración, mediante un test de tensión superficial crítica y mediante el método de contacto angular de gota sésil.

La conductividad hidráulica se mide con infiltrómetros de capucha, una forma especial de infiltrómetro de tensión, combinado con mediciones con un infiltrómetro de anillo.

La repelencia al agua en el suelo durante los 10 cm superiores del suelo mostró una variabilidad estacional pronunciada, tanto para las muestras húmedas del terreno como para las secadas al horno, mientras que la variabilidad entre las diferentes etapas de transformación forestal parecía ser menos significativa. Para los parámetros hidráulicos, las diferencias entre las masas forestales en las mismas fechas de medición fueron inferiores a las variabilidades dentro de los mismos rodales y entre fechas, y también las conductividades hidráulicas revelaron una tendencia estacional con valores más altos durante los meses de verano.

La conductividad hidráulica saturada determinada con el infiltrómetro de capucha fue 10 veces más baja que la estimada con un infiltrómetro de anillo.

Presumiblemente, los valores de  $K_s$  estimados con el infiltrómetro de capucha se subestiman debido a una humectación incompleta del suelo debajo de los infiltrómetros. Esto limitaría la idoneidad de este dispositivo para la medición en suelos repelentes al agua, a menos que el suelo se humedezca a fondo antes de las mediciones de la infiltración.

⇒ Van Dijk *et al.* (2007) coincide con otros autores en que las propiedades del suelo ejercen una importante influencia sobre el equilibrio del agua en las cuencas agrícolas. A nivel mundial, muchas áreas agrícolas han dañado los suelos, exponiéndolos a un reducción de la infiltración y de la capacidad de retención de agua, lo que lleva a un aumento de la generación de escorrentía superficial y la erosión (Bruijnzeel, 2004, en Van Dijk *et al.*, 2007). La forestación de esos paisajes degradados puede dar lugar a una mejora en la infiltrabilidad del suelo (Ilstedt *et al.*, 2007, en Van Dijk *et al.*, 2007), pero sólo si los suelos son suficientemente elásticos:

Cuando se recupera la función hidrológica de suelos, la generación de escorrentía superficial, el daño del agua de tormentas y la movilización de contaminantes pueden ser reducidos, y la recarga de agua subterránea puede aumentar si el aumento de la infiltración es mayor que el aumento de la utilización del agua.

En general, los caudales bajos se reducirán después de una reforestación, lo que a veces se interpreta como una amenaza grave a los ecosistemas fluviales. Esto parece ignorar que en la mayoría de los casos, la cobertura arbórea habrá existido históricamente (con la excepción de los sistemas de pastizales naturales, por ejemplo, a grandes altitudes).

Varios estudios más han encontrado una disminución de la infiltrabilidad, la entrada de agua en el suelo, después del establecimiento de los pastos (Alegre y Cassel, 1996; Malmer, 1996; Hanson y otros, 2004.; Martínez y Zinck, 2004; Ziegler *et al.*, 2004, en Hasslera *et al.*, 2011).

Por lo tanto, para Van Dijk *et al.* (2007), la forestación puede dar lugar a condiciones hidrológicas que están más cerca de los que prevalecen bajo la cubierta original del suelo.

Por supuesto, existen ecosistemas nuevos o modificados que pueden haberse desarrollado bajo el nuevo régimen hidrológico, o los recursos hídricos pueden ser necesarios para el mantenimiento del patrimonio ecológico en sistemas regulados, en particular los que dependen de las inundaciones estacionales (Van Dijk *et al.*, 2007).

⇒ El trabajo de Jordán *et al.* (2008) reporta los resultados del análisis de la respuesta hidrológica del suelo tras una lluvia simulada en un bosque de alcornoques en el Parque Natural de los Alcornocales (SW España). Cuatro diferentes unidades de suelo/vegetación fueron seleccionadas para los experimentos de campo: bosques de alcornoques, brezales, pastizales, y bosque mixto de alcornoque/olivo.

Las pruebas de simulación de precipitación, que en total fueron 10, se realizaron en parcelas circulares de 1256,6 cm<sup>2</sup> a una intensidad de 56,5 mm/h durante 30 min.

Jordán *et al.* (2008) consideran que debe tenerse en cuenta que existe una alta presión ganadera y de ciervos en la zona.

Se estudiaron las diferencias observadas en el comportamiento hidrológico de los tipos de vegetación después de las simulaciones de lluvia.

Se utilizó un simulador de lluvia similar a la descrita por Navas *et al.* (1990). La estructura, en forma de una pirámide truncada, se sujeta con patas de metal. Los simuladores se cubrieron con una cortina de plástico para proteger los experimentos contra el viento. Las patas son telescópicas, de modo que el simulador se puede colocar a nivel en una superficie inclinada. En la parte superior de la estructura (3,5 m de altura) hay una única boquilla (Lechler 460.608), que está conectada a través de un tubo de goma a una bomba automática móvil (1.8 kg cm<sup>-2</sup> de presión). El agua de la boquilla cae sobre un área circular de 1256,6 cm<sup>2</sup> que está delineada por un anillo de acero (40 cm de diámetro), de modo que a intensidad de lluvia media era, como se ha dicho anteriormente, de 56,5 mm/h.

La tasa de infiltración de la lluvia varía con el contenido de agua en el suelo y con la intensidad de la lluvia. La infiltración se calculó como la diferencia entre la intensidad de precipitación y la tasa de escorrentía. Las tasas de escorrentía aumentaron a un valor constante a partir del cual se calcularon las tasas de infiltración constante (esto es posible sólo cuando los valores de escurrimiento son constantes en el tiempo).

Por otro lado, se tomaron muestras de suelo en las que se midió la textura, densidad aparente, carbón orgánico, humedad y resistencia a la penetración para conocer la hidrofobicidad del suelo.

Tras el análisis estadístico con ANOVA y test de regresión, se obtuvieron los siguientes resultados en los distintos tipos de vegetación:

**Table 3**  
Soil response to simulated rainfall

		Tp (s)	Tr (s)	Pr (mm)	Runoff rate (mm h <sup>-1</sup> )	Runoff coef. (%)	Infiltration rate (mm h <sup>-1</sup> )	SSIR (mm h <sup>-1</sup> )
C	Mean	83 <sup>a</sup>	257 <sup>a</sup>	4.0 <sup>a</sup>	11.6 <sup>a</sup>	20.6 <sup>a</sup>	45.0 <sup>a</sup>	41.3 <sup>a</sup>
	SD	17.20	20.35	0.32	1.93	3.41	1.93	2.54
H	Mean	28 <sup>b</sup>	79 <sup>b</sup>	1.2 <sup>b</sup>	25.4 <sup>b</sup>	45.0 <sup>b</sup>	31.2 <sup>b</sup>	21.1 <sup>b</sup>
	SD	9.06	6.48	0.1	4.56	8.07	4.56	6.37
G	Mean	75 <sup>a</sup>	109 <sup>b</sup>	1.6 <sup>b</sup>	28.3 <sup>b</sup>	50.0 <sup>b</sup>	28.3 <sup>b</sup>	12.7 <sup>c</sup>
	SD	22.67	32.69	0.25	5.02	8.88	5.02	7.90
O	Mean	77 <sup>a</sup>	250 <sup>a</sup>	3.9 <sup>a</sup>	10.3 <sup>a</sup>	18.1 <sup>a</sup>	46.3 <sup>a</sup>	42.6 <sup>a</sup>
	SD	16.24	42.44	0.65	1.09	1.93	1.09	1.36
ANOVA, p		0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

Tp: time-to-ponding; Tr: time-to-runoff; Pr: amount of precipitation necessary for runoff; SSIR: steady-state infiltration rate; C: plots under cork oaks; H: plots under heathland; G: plots under grassland; O: plots under cork oaks and olive trees. Within-a-column means followed by the same letter are not significantly different.

**Figura 2.12. Resultados de escorrentía e infiltración obtenidos por Jordán et al. (2008). (Jordán et al., 2008).**

En cuanto a la correlación entre escorrentía, infiltración y las propiedades del suelo, los p-valores obtenidos fueron los siguientes:

**Table 4**  
Significant ( $p < 0.05$ ) R-Spearman coefficients between site variables and hydrological parameters

	Tp	Tr	Pr	Runoff rate	Runoff coef.	Infiltration rate	SSIR	Tr-Tp
Litter	-0.48	-	-	-	-	-	-	-
Plant cover	-0.48	-0.45	-0.47	-	-	-	-	-
Soil depth	0.56	0.35	0.36	-	-	-	-	-
Organic C	-0.44	-	-	-	-	-	-	-
Coarse elements	-0.54	-0.38	-0.39	-	-	-	-	-
Sand	-	0.73	0.74	-0.77	-0.77	0.77	0.78	0.84
Clay	-	-	-	0.40	0.40	-0.40	-0.43	-0.54
Bulk density	0.50	0.68	0.68	-0.63	-0.63	0.63	0.67	0.54
M0	-	-	-	-	-	-	-	-
WDPT	-0.43	-0.79	-0.78	0.70	0.70	-0.70	-0.73	-0.73

Tp: time-to-ponding; Tr: time-to-runoff; Pr: amount of precipitation necessary for runoff; SSIR: steady-state infiltration rate.

**Figura 2.13. P-valores de la correlación entre variables obtenidos por Jordán et al., 2008. (Jordán et al., 2008).**

Se ha observado que las diferentes coberturas de vegetación influyen en el comportamiento hidrológico del suelo de diferentes maneras. El primer cambio detectado después del comienzo de las lluvias simuladas es en el horizonte de encharcamiento, dependiente en gran medida de la vegetación existente, probablemente debido a la acumulación de materia orgánica en la superficie del suelo. La repelencia al agua fue mucho mayor en los brezales y en las parcelas de pastizales.

Por su parte, la generación de escorrentía es más rápida en estas parcelas que en los bosques. Se ha demostrado que la alta repelencia al agua conduce a altas tasas de escorrentía (McGhie, 1980; Cerdà et al, 1998, en Jordán et al., 2008). Esta repelencia al agua del suelo es muy variable en el tiempo y en el espacio (Dekker, 1998, en Jordán et al., 2008), y se ha sugerido que la repelencia al agua del suelo se puede aumentar después de un largo período seco (Cerdà et al., 1998, en Jordán et al., 2008). Por otra parte, la humedad inicial del suelo también puede afectar a la generación de escorrentía.

Los suelos bajo alcornoque y la zona mixta de alcornoque/olivo, con un sotobosque estable de arbustos y plantas herbáceas, muestran los niveles más bajos de generación de escorrentía. La capa orgánica de su superficie contribuye a retrasar el encharcamiento y la generación de escorrentía. Bajo brezales y pastizales, la repelencia al agua aceleró el encharcamiento y la escorrentía, reduciendo la infiltración durante las primeras etapas de las simulaciones de lluvia. En el brezal, la infiltración aumentó ligeramente cuando se estancaba la superficie del suelo y la repelencia al agua del suelo se redujo considerablemente. En las parcelas de pasto, sin embargo, no se observó este fenómeno. Esto posiblemente pueda explicarse por la reducción de agregados arcillosos en los primeros centímetros del suelo, lo que contribuye a la impermeabilización del suelo.

En cuanto al contenido de arena en el suelo, la tasa de infiltración en estado estacionario en las parcelas de pasto debería ser mucho más bajo. Aunque la presencia de grietas no se ha cuantificado en este trabajo, sí que fueron observadas, y algunas persistieron incluso después de 30 minutos de lluvia simulada.

La generación de escorrentía en parcelas sin cobertura arbórea fue muy rápida. Se cree, sin embargo, que la cubierta vegetal herbácea y la hojarasca podrían desempeñar un papel más importante: una alta proporción de restos vegetales puede causar hidrofobicidad en el suelo y demora en la infiltración. Según Imeson *et al.* (1992), en Jordán *et al.* (2008), los patrones de flujo discontinuo en las pendientes no son al azar. Los procesos hidrológicos son discontinuos y dependen de las propiedades del suelo y la vegetación. El agua de escorrentía se genera en determinados sitios de las laderas y puede que se dejen atrapar fácilmente por suelos con una capacidad de infiltración profunda.

Para resumir, por tanto, cabe destacar que los suelos bajo bosques mostraron bajas tasas y coeficientes de escorrentía. Las tasas de escorrentía más altas medidas fueron en el brezal y en las laderas cubiertas de hierba. Se observó que la repelencia al agua del suelo, medida a partir de pruebas de penetración de gotas de agua, redujo la infiltración (especialmente bajo el brezal), y parece ser la causa del encharcamiento rápido y la generación de escorrentía durante las primeras etapas de la tormenta. El mosaico de diferentes patrones de respuesta hidrológica de las precipitaciones, como la escorrentía o la generación de infiltración, es gobernada por la distribución espacial de la vegetación y su influencia en la superficie del suelo.

⇒ Chandler *et al.* (2008), afirman que en general se acepta que la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$  o coeficiente de permeabilidad: Bear, 1972) de los suelos forestales es mayor que el de los suelos que cuentan con otros tipos de vegetación (Pritchett y Fisher, 1987; McCulloch y Robinson, 1993, en Chandler *et al.*, 2008); Sin embargo, una búsqueda de la literatura científica realizada por Chandler *et al.* (2008), revela que hay pocos estudios que prueben esta hipótesis.

El concepto de “un solo árbol puede influir en su círculo” primero introducido por Zinke, 1962, está bien establecido en estudios de las propiedades del suelo (por ejemplo, Hornung, 1985; Boettcher y Kalisz, 1990; Amiotti *et al.*, 2000; Graham *et al.*, 2004, en Chandler *et al.*, 2008). La influencia de los árboles individuales en la humedad del suelo también ha sido investigado (Ziemer, 1968), así como la interceptación de la lluvia (David *et al.*, 2006, en Chandler *et al.*, 2008) y la abundancia de lombrices (Boettcher y Kalisz, 199, en Chandler *et al.*, 2008). El trabajo de Chandler *et al.*, 2008, busca determinar la influencia de los árboles individuales en la conductividad saturada,  $K_s$ , del horizonte A de un Gleysol, con un enfoque en robles aislados. Se estudió concretamente la influencia de seis robles (*Quercus robur*) aislados en el noroeste de Inglaterra.

**Table 1**  
Ratio of saturated hydraulic conductivity of the A soil horizon under trees to that under adjacent pasture

F/G	Soil type <sup>a</sup>	Tree type <sup>b</sup>	Reference
2.0	Luvisol	<i>Eucalyptus</i> spp.	Lorimer and Douglas (1995)
2.5	nk	<i>Eucalyptus</i> spp.	Burch <i>et al.</i> (1987)
3.4 <sup>c</sup>	Gleysol	<i>Quercus robur</i>	This study
4.8	nk	<i>Pinus insularis</i>	Costalles (1979)
5.2	nk	<i>Pinus halepensis</i>	Berglund <i>et al.</i> (1981)
4.5–7.2	Cambisol	<i>Quercus robur</i>	Burt <i>et al.</i> (1983)
2.3–12	Ferralsol	<i>Eucalyptus/Gravillea</i> spp.	Wood (1977)
14	Nitisol	<i>Hibiscus elatus</i>	Ternan <i>et al.</i> (1987)
20	Andosol	Podocarp	Jackson (1973)
23–41	nk <sup>d</sup>	<i>Quercus</i> spp.	Molchanov (1960)
50 <sup>e</sup>	Ultisol	<i>Quercus</i> spp.	Hoover (1949)
17–140	Cambisol	<i>Eucalyptus</i> spp.	Wood (1977)

F/G = ratio of the topsoil saturated hydraulic conductivity under trees to that under pasture (ranked by magnitude). (nk) not known.

<sup>a</sup> FAO-UNESCO classification.

<sup>b</sup> Dominant or representative tree species.

<sup>c</sup> At 3 m from Tree No. 1.

<sup>d</sup> Reported as ‘dark grey soils’.

<sup>e</sup> 0.1 m depth.

**Figura 2.14.** Ratio de conductividad hidráulica saturada en el horizonte A bajo árboles de distintas especies comparado con la conductividad en el pasto adyacente. (Chandler *et al.*, 2008).

La  $K_s$  fue medida dentro del horizonte de 0,10-0,25 m de profundidad del suelo con un permeámetro de pozo de nivel constante. En total, se obtuvo un conjunto de 119 valores de  $K_s$ , compuestos de 55 mediciones alrededor de uno de los árboles a distancias de entre 1 y 13 m de su tronco; 45 datos alrededor de otros 5 robles y 19 pruebas en pastizales abiertos.

Para el árbol intensamente muestreado, la prueba de la suma de rangos de Wilcoxon mostró una diferencia significativa ( $p < 0,05$ ) entre la  $K_s$  media a los 3, 5, 7 y 11 m desde el tronco y en el prado circundante. A los 3 m de este árbol, la mediana y la media geométrica de  $K_s$  fueron un 2,3 y 3,4, respectivamente, más grande que en los pastizales. Además, la media geométrica de los valores de  $K_s$  se redujo a una tasa de  $4 \cdot 10^{-7} \text{ ms}^{-1} \text{ m}^{-1}$  desde los 1 a los 9 m del tronco, aunque aumentó a los 11 m, para después volver a descender. Se encontró un patrón similar de la media geométrica de  $K_s$  en los 45 valores obtenidos alrededor de los otros 5 árboles de roble.

La consideración de por qué  $K_s$  puede ser diferente cerca de árboles de roble individuales plantados dentro de pastizales requiere, desde el punto de vista de Chandler *et al.*, 2008, una nueva y posiblemente única revisión de una amplia gama de literatura científica, por lo que llevaron a cabo una revisión de la literatura sobre el potencial positivo y los efectos negativos de los árboles en  $K_s$  de cara a proveer una explicación tentativa para los patrones observados y para poner de relieve los nuevos datos necesarios para apoyar una interpretación más robusta. Esta revisión sugiere que hay varios mecanismos que podrían aumentar  $K_s$  cerca de los árboles de roble aislados, y que también existen un número similar de mecanismos que podría reducirla.

En cuanto a los mecanismos que pueden tener un efecto positivo en  $K_s$ , tanto las raíces vivas como las podridas pueden crear poros bien conectados en la capa superior del suelo llamados "macroporos" (Gaiser, 1952; Aubertin, 1971; Beven y Germann, 1982, en Chandler *et al.*, 2008). El flujo a través de los macroporos puede llegar a ser hasta varios cientos de veces más rápido que el flujo a través de la matriz del suelo, lo que hace que  $K_s$  sea muy sensible a pequeños cambios en el número de macroporos (Aubertin, 1971; Buttle y House, 1997, en Chandler *et al.*, 2008). Como el sistema de raíces de los árboles de roble se extiende mucho más allá del diámetro de copa (Hocker, 1979; Cutler y Richardson, 1989; Lucot y Bruckert, 1992, en Chandler *et al.*, 2008), el aumento de macroporos, por tanto, podría explicar el aumento de  $K_s$  más allá del radio de copa.

En comparación con los pastos abiertos, la disminución de las precipitaciones recibidas debajo de las copas de los árboles, debido a una mayor evaporación de la humedad sobre el dosel (David *et al.*, 2006, en Chandler *et al.*, 2008) combinada con una mayor absorción de las raíces para apoyar esa transpiración, puede provocar un secado considerablemente mayor de la capa superior del suelo durante períodos sin lluvia (Ziemer, 1968; Katul *et al.*, 1997, en Chandler *et al.*, 2008). Un secado extremo del suelo puede abrir grietas estructurales en suelos que no se cierran, con la subsiguiente rehumidificación y en consecuencia mantenimiento de niveles elevados de  $K_s$  (Holden y Burt, 2003, en Chandler *et al.*, 2008).

El aumento de los insumos orgánicos por debajo de los árboles o el decaimiento de la raíz (Berglund *et al.*, 1981, en Chandler *et al.*, 2008) pueden tener un impacto positivo en la estructura de los agregados (Chaney y Swift, 1984; Graham *et al.*, 1995; Chappell *et al.*, 1999; Lehmann *et al.*, 2001, en Chandler *et al.*, 2008), que también pueden resultar en un aumento de la  $K_s$  (Wood, 1977, en Chandler *et al.*, 2008).

Por otro lado, los efectos negativos de los árboles en  $K_s$  se basan en que por ejemplo, el peso de un árbol, combinado con el movimiento de las raíces durante condiciones de viento, pueden comprimir los suelos en escalas de centímetros, lo que puede reducir  $K_s$ . (Chappell *et al.*, 1996, en Chandler *et al.*, 2008).

La acidificación del suelo debido a un aumento en la velocidad de disolución de los minerales del suelo debajo de los árboles (Quideau *et al.*, 1996; Augusto *et al.*, 2000, en Chandler *et al.*, 2008), los ácidos de la hojarasca caída (Satchel y Lowe, 1967; Muys *et al.*, 1992, en Chandler *et al.*, 2008) o exudados ácidos (Nilsson *et al.*, 1982, en Chandler *et al.*, 2008) se ha demostrado que reducen la estabilidad estructural del suelo (Ranger y Nys, 1994, en Chandler *et al.*, 2008). Esta reducción de la estabilidad puede conducir a una reducción de la porosidad y, por lo tanto, a que colapse Ks (Baumgartl y Horn, 1991, en Chandler *et al.*, 2008). Las altas tasas de lixiviación por la infiltración del flujo de tallos pueden exacerbar el efecto de la acidificación (Nys, 1981, en Chandler *et al.*, 2008). La acidez del suelo también afecta a la presencia y abundancia de la fauna del suelo, tales como las lombrices de tierra (Boettcher y Kalisz, 1991; Neiryck *et al.*, 2000, en Chandler *et al.*, 2008). Como la actividad de las lombrices crean agregados del suelo más estables (Graham *et al.*, 1995) y añade macroporosidad (Beven y Germann, 1982, en Chandler *et al.*, 2008), la reducción de la abundancia haría que se esperase una reducción de Ks.

En escala milimétrica, el crecimiento de las raíces del árbol puede localmente aumentar la densidad del suelo y tener un efecto negativo muy localizado con un ligero impacto en Ks (Blevins *et al.*, 1970; Whalley *et al.*, 2004).

Los árboles aislados dentro de pastizales naturales o en parques pueden tener un impacto indirecto sobre Ks. Los animales salvajes y domesticados utilizan los árboles aislados de refugio durante las tormentas de lluvia o para tener sombra. Esta congregación de animales, en particular en momentos en los que el suelo está húmedo, puede compactar el suelo y por lo tanto reducir también el Ks del horizonte A del suelo (Drewry *et al.*, 2000).

⇒ Para Li *et al.* (2008), los fragmentos de rocas y la vegetación tienen un profundo impacto en la generación de escorrentía en las dolinas de la Sierra de Gádor, en el sureste de España. En el estudio llevado a cabo por Li *et al.* (2008), se investigó el efecto de la vegetación y las rocas en la conductividad hidráulica insaturada [K(h)] en tres dolinas calcáreas y examinó si la variación en K(h) fue consistente con las diferencias en el escurrimiento de las lluvias simuladas.

Para ello, utilizaron Infiltrómetros de tensión con tres alturas de presión (h) de -30, -60 y -120 mm en 70 zonas dentro de tres dolinas. En general, las tendencias de K(h) fueron consistentes con la simulación de datos de precipitación y representaron las diferencias en la escorrentía de las superficies con vegetación.

La vegetación, con la siguiente composición: *Festuca scariosa*, *Festuca capillifolia* (14–20%), *Thymus serpylloides* (4–17%), *Genista pumila* (7–13%), *Phlomis lychnitis* (3–5%) y *Hormathophylla spinosa* (2–6%), provocó una elevada infiltración con conductividades hidráulicas insaturadas en -30 y -60 mm significativamente mayores para la superficie vegetal que para la superficie con fragmentos de roca y el suelo desnudo. Los fragmentos de roca no tuvieron un efecto evidente sobre la conductividad hidráulica del suelo en comparación con los suelos desnudos. La K(h) del suelo sin costra fue de entre 2-5 veces mayor que en suelos con costra.

La amplia variación en los valores de  $K(h)$  entre plantas individuales es interesante, tal vez en parte porque refleja la distribución de las raíces para diferentes plantas o la heterogeneidad del suelo. Estos resultados sugieren que la conductividad hidráulica del suelo puede ser uno de los factores determinantes para la alta infiltración en superficies con vegetación de esa región. Otros factores que pueden implicar este aumento son la intercepción de la precipitación por las hojas del dosel y la retención de la humedad por la capa de hojarasca debajo de él. Algunos estudios también han indicado que los canales de las raíces pueden causar movimiento rápido de corrientes de agua (por ejemplo, Gaiser, 1952; Beven y Germann, 1982; Wilson y Luxmoore, 1988, en Li *et al.*, 2008).

Por otro lado,  $K(h)$  disminuyó con el aumento de las tensiones,  $K(60)$  y  $K(120)$  fueron sólo el 8,4 y el 0,89 %, respectivamente, de  $K(30)$  para las superficies con vegetación, y fueron unos 30 y 8,7 %, respectivamente, de  $K(30)$  para las superficies cubiertas de fragmento de roca y desnuda. La diferencia en la conductividad hidráulica a diferentes cabezales de presión, por tanto, es un indicador de la magnitud relativa del flujo de agua potencial a través de diferentes clases de tamaño de poro, lo que sugiere, en este caso, que el caudal en los poros en el rango de 0,5 a 1 mm de diámetro domina en condiciones no saturadas. Hubo diferencias significativas en  $K(h)$  entre las diferentes unidades topográficas de las dolinas, y  $K(h)$  tendió a ser mayor en las posiciones superiores que en las inferiores de la dolina. Tal patrón es consistente con la distribución del contenido de materia orgánica y la composición de tamaños de partículas en las dolinas (Li *et al.*, 2007, en Li *et al.*, 2008): en la posición superior había mayor contenido de materia orgánica y menor contenido de arcilla que en la posición inferior de las dolinas.

⇒ Ilstedt *et al.* (2009), llevan a cabo un estudio de cara a probar la teoría de que la reducción en el contenido de materia orgánica de los suelos como resultado del uso intensivo de la tierra afecta a la estructura del suelo y reduce su infiltrabilidad.

En este artículo, el objetivo de Ilstedt *et al.* (2007), es sintetizar y analizar los hechos que se pueden extraer de los estudios científicos anteriores relacionados con los efectos de la repoblación forestal en los trópicos como una de las claves para determinar los procesos del suelo, en concreto, la infiltrabilidad. Para ello, utilizan el meta-análisis para obtener una base de datos combinada.

Tras quedarse con los artículos apropiados tras el meta-análisis y juntar catorce experimentos que se habían realizado bajo condiciones similares, los resultados obtenidos fueron que la infiltración aumentó aproximadamente tres veces después de la forestación o la utilización de árboles en los campos agrícolas para un intervalo de confianza del 95%. Se encontró un p-valor significativo de heterogeneidad, lo que significa que había una variación entre los experimentos individuales que debe ser considerada, por lo que se utilizó el modelo al azar.

Las plantaciones forestales y los sistemas agroforestales no fueron significativamente diferentes, pero se observó una tendencia por parte de los sistemas agroforestales a exhibir menos mejoría en la capacidad de infiltración que las plantaciones forestales: había una media de un aumento de la capacidad de 1,9 para los sistemas agroforestales en comparación con 3,8 para los sistemas puramente forestales.

Table 1  
Description of the data and experiments used for a meta-analysis of the effect on infiltration of afforestation and agroforestry on former deforested land

Source	Infiltration (mm/h)		Standard deviation		N		Country	Latitude	Rainfall (mm)	Texture	Soil	Vegetation	
	Before	After	Before	After	Before	After						Before	After
1. Mapa (1995)	26	57	12	12	15	15	Sri Lanka	7 N	2500	Clay	Ultisol	Grass	<i>Tectonia grandis</i> (12 years)
2. Mapa (1995)	29	57	12	12	15	15	Sri Lanka	7 N	2500	Clay	Ultisol	Crops	<i>Tectonia grandis</i> (12 years)
3. Hulugalle and Ndi (1993)	3	5.5	1.0	1.0	3	3	Cameroon	3 N	1522	Clay	Ultisol	Crops	<i>Cassia spectabilis</i> + crops (1 year)
4. Hulugalle and Ndi (1993)	3.3	5.5	1.0	1.0	3	3	Cameroon	3 N	1522	Clay	Ultisol	Crops	<i>Cassia spectabilis</i> + crops (1 year)
5. Chirwa et al. (2003)	13	95	6.8	6.8	3	3	Zambia	14 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Sesbania sesban</i> (3 years)
6. Chirwa et al. (2003)	13	44	6.8	6.8	3	3	Zambia	15 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Gliricidia sepium</i> (3 years)
7. Chirwa et al. (2003)	13	37	6.8	6.8	3	3	Zambia	16 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Leucaena leucocephala</i> (3 years)
8. Chirwa et al. (2003)	13	55	6.8	6.8	3	3	Zambia	17 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Acacia angustissima</i> (3 years)
9. Chirwa et al. (2003)	13	71	6.8	6.8	3	3	Zambia	18 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Acacia + Sesbania</i> (3 years)
10. Chirwa et al. (2003)	13	119	6.8	6.8	3	3	Zambia	19 S	850	Clay	Alfisol	Crops	<i>Gliricidia + Sesbania</i> (3 years)
11. Hulugalle and Kang (1990)	47	152	127	127	3	3	Nigeria	7 N	1250	Loamy	Alfisol	Crops	<i>Gliricidia sepium</i> (8 years) + crops
12. Hulugalle and Kang (1990)	47	118	127	127	3	3	Nigeria	8 N	1250	Loamy	Alfisol	Crops	<i>Alchornea cordifolia</i> (8 years) + crops
13. Hulugalle and Kang (1990)	47	95	127	127	3	3	Nigeria	9 N	1250	Loamy	Alfisol	Crops	<i>Leucaena leucocephala</i> (8 years) + crops
14. Hulugalle and Kang (1990)	47	172	127	127	3	3	Nigeria	10 N	1250	Loamy	Alfisol	Crops	<i>Acacia barterii</i> (8 years) + crops

The mean infiltration, standard deviation and number of replicates (N) before and after treatment is reported, as well as the country of the study, the mean annual rainfall, soil texture, soil type and vegetation before and after treatment. The age of the trees at the time of study is indicated in parenthesis.

Figura 2.15. Infiltración antes y después de la reforestación con distintas especies y características de suelos. (Ilstedt et al., 2007).

Table 2  
Summary of the meta-analysis of the effect (response ratio) on infiltration of afforestation and agroforestry on former deforested land

	Studies	Experiments	Response ratio (after/before)		
			Mean	Lower CI	Upper CI
Afforestation	2	8	3.8	2.7	5.5
Agroforestry	3	6	1.9	1.7	2.8
Subtotal	4	14	3.2	2.4	4.7

Means and confidence intervals (CI) are reported for afforestation and agroforestry studies combined and separately, as well as the number of studies for each group and the number of experiments used within each study.

Figura 2.16. Resumen del meta-análisis del efecto de la respuesta de infiltración entre zonas desnudas y forestadas. (Ilstedt et al., 2007).

Este estudio confirma el efecto beneficioso de la plantación de árboles en la infiltrabilidad del suelo en un amplio rango de niveles de humedad. Sin embargo, Ilstedt et al. (2007), destacan que el segundo hallazgo más importante es la escasez de estudios que examinan los efectos de la repoblación forestal en las propiedades físicas del suelo en general, y en particular con una metodología lo suficientemente robusta para realizar una síntesis estadística.

Del mismo modo, el pequeño número de estudios pone de relieve la falta de datos de referencia relativos a la infiltración, y la creciente demanda de estos con el fin de modelar los efectos hidrológicos de los cambios de uso del suelo (Ranieri et al., 2004, en Ilstedt et al., 2009), no menos importante desde la perspectiva del cambio climático (Bonell, 1998, en Ilstedt et al., 2009).

Por otra parte, los resultados generales que indican un aumento de dos a cinco veces en la infiltrabilidad subrayan la importancia de incluir la calidad física de los suelos en cualquier modelo de relaciones hídricas forestales. Con niveles de infiltrabilidad antes de la deforestación en el rango que se encuentra en esta revisión (3,47 mm/h), la intensidad de precipitaciones normales (Bonell *et al.*, 2005, en Ilstedt *et al.*, 2009) proporcionan el potencial para tener reducida escorrentía superficial y aumento de la entrada a las aguas subterráneas.

Otro problema asociado con el modelado hidrológico de los suelos es la amplia serie de cambios de la infiltrabilidad sobre suelos deforestados. Como se indicó anteriormente, no hay información suficiente para explicar esta variación. Consideran que se debe tener precaución incluso en la toma de datos ya publicados.

⇒ En ese mismo año, 2009, Moreno-de las Heras *et al.*, llevan a cabo un estudio de la escorrentía e infiltración en suelos restaurados sobre una antigua mina de carbón en el noreste de España, mediante la distribución de 75 parcelas de ensayo a lo largo de diferentes fechas del año, para registrar así, además, la variabilidad estacional. Se utilizaron simuladores de lluvia para los ensayos, con colectores de sedimentos y escorrentía. La infiltración se estimó como el balance de la precipitación (intensidad de las simulaciones de lluvia) y la escorrentía medida cada minuto.

Dos parámetros descriptores del fenómeno de infiltración (la tasa de infiltración final y el coeficiente de forma de la curva de infiltración aparente, k) se obtuvieron por ajuste, de los valores de infiltración estimados de cada minuto, con la ecuación de tipo Horton propuesta por Borselli *et al.* (1996):

$$I_t = I_f + (I_0 - I_f) \exp^{-pt/K}$$

donde  $I_t$  es la tasa de infiltración instantánea,  $I_f$  la tasa final de infiltración,  $I_0$  la tasa de infiltración inicial, todas en mm/h, y p es la intensidad de la lluvia en mm/h, t el tiempo en h, y K el coeficiente que describe la forma de la curva aparente de infiltración.

Los suelos mineros recientemente recuperados muestran comúnmente un comportamiento hidrológico desequilibrado caracterizado por una baja infiltración y una alta capacidad de erosión del suelo. En este estudio obtienen los siguientes resultados:

- En general, todas las respuestas se vieron afectadas por las variaciones inter-estacionales. De esta manera, el tiempo necesario para iniciar la escorrentía y llegar a una tasa de infiltración constante (descrita por parámetros  $T_r$  y K) fue en general más bajo en verano y otoño que durante la transición entre el invierno y la primavera.
- Como era de esperar, la tasa de infiltración y la escorrentía presentan una tendencia inversa.

- A pesar de las intensas fluctuaciones estacionales, la cubierta vegetal tenía una fuerte influencia sobre cómo los parámetros de respuesta se vieron afectados por los cambios estacionales. Esto es especialmente relevante en el caso de la tasa final de infiltración, ya que las altas variaciones registradas en las laderas con menos vegetación contrastan con las bajas variaciones registradas en la vertiente más densamente cubierta. De hecho, la cubierta vegetal tuvo una influencia directa en la tasa de infiltración constante, reduciendo su variabilidad temporal. Esto es probablemente debido a los cambios inducidos por la vegetación en la estructura de los macroporos y la protección del suelo contra la formación de costra superficial.

Por tanto, los resultados presentados por Moreno de las Heras *et al.* (2009), muestran la fuerte influencia de la cobertura vegetal de herbáceas en la respuesta hidrológica de los suelos de minas restaurados en un ambiente mediterráneo – continental. Cantidades mayores de cubierta vegetal se asociaron con un retraso generalizado de la escorrentía y un aumento de la capacidad de infiltración del suelo y la reducción de su erosionabilidad. Las reducciones adicionales en la influencia de las fluctuaciones climáticas estacionales en las tasas de infiltración fueron impulsadas por la influencia biológica de la cubierta vegetal.

Se encontró que las diferencias mayores entre las zonas con menos del 30% y más del 50 % de cobertura de la vegetación, destacando la transición de la prevalencia de los factores abióticos al control biótico. Se ha obtenido, por tanto, un umbral práctico para la restauración de la cubierta vegetal: un mínimo del 50 % de la cubierta vegetal herbácea permite respuestas satisfactorias en el control hidrológico del suelo.

⇒ Vásquez-Méndez *et al.* (2010) estudian la erosión y la escorrentía en diferentes parches de vegetación en zonas semiáridas del centro de Méjico, mediante la instalación de cuatro parcelas de tipo USLE en los parches de vegetación representativa con las distintas especies predominantes de *Acacia sp*, *Prosopis sp* y *Opuntia sp*.

También se evaluó una condición de superficie desnuda comparativa (de control). El dosel vegetal y la cubierta del suelo se calcularon utilizando imágenes digitales y se determinaron los parámetros de los suelos seleccionados.

Indican que las tierras áridas climáticamente se caracterizan por condiciones de temperaturas extremas (D'Odorico y Porporato, 2006, en Vásquez-Méndez *et al.*, 2010) y los eventos de precipitaciones torrenciales con corta duración y alta intensidad (Wei *et al.*, 2007, en Vásquez-Méndez *et al.*, 2010), lo que causa baja infiltración y en consecuencia la erosión del agua y grandes cantidades de escorrentía.

Aunque el estudio se centra en la escorrentía y erosión, en este estudio midieron la infiltración con un infiltrómetro de doble anillo, además de una serie de propiedades del suelo.

De las especies estudiadas, encuentran que la estructura aérea de *Opuntia sp* intercepta gran cantidad de precipitaciones, lo que es posteriormente translocado como flujo de vapor hacia el suelo, incrementando la infiltración y disminuyendo el potencial de escorrentía y erosión.

En cuanto a la infiltración en estado estacionario a 2 h de iniciar la prueba con el infiltrómetro de doble anillo, según lo estimado por el modelo propuesto por Kostiakov-Lewis (Kostiakov, 1932), fue mayor para *Prosopis sp*, *Acacia sp* y *Opuntia sp* (08,21, 11,04 y 21,60 mm/h, respectivamente) que para el punto de control (5.23 mm/h).

La infiltración de la lluvia se relaciona inversamente con la escorrentía. Los resultados obtenidos por Vásquez-Méndez *et al.*, 2010, son prueba del efecto positivo de los parches de vegetación de estas tres especies en el aumento de la infiltración y, con ello, la reducción de la escorrentía y la erosión potencial del suelo.

⇒ Ya en 2012, Neris *et al.*, afirman que en condiciones naturales, los andisoles son ampliamente reconocidos por tener altas tasas de infiltración de agua (Harden, 1991; Nanzyo *et al.*, 1993.; Orradottir *et al.*, 2008.; Perrin *et al.*, 2001, Neris *et al.*, 2012), gracias a su alto desarrollo estructural y estabilidad de los agregados, así como su alto contenido de materia orgánica y propiedades mineralógicas singulares, que están dominadas por los productos de rango-corto (Fernández Caldas y Tejedor Salguero, 1975; Meurisse, 1985; Quantin, 1994; Warkentin y Maeda, 1980, en Neris *et al.*, 2012). Neris *et al.* (2012), llevan a cabo un estudio de infiltración bajo diferentes tipos de vegetación y usos del suelo en estos suelos en la Isla de Tenerife. Además estudiaron la influencia en las propiedades físicas del suelo y su relación con la infiltración en función de la cobertura.

Se estudiaron 3 zonas: una de pinar (*Pinus canariensis*), una de bosque verde (*Laurus azorica*, *Apollonias barbujana*, *Persea indica*, *Ilex canariensis*) y suelos en áreas agrícolas ya cosechados. Se recogieron muestras de suelo en cada una de ellas, cogidas de entre la capa de 0 a 20 cm de espesor, y se analizaron sus propiedades químicas y físicas: contenido en carbono orgánico, nitrógeno, aluminio, hierro y fosfatos, distribución de partículas por tamaños, curvas de retención de agua, densidad aparente, repelencia al agua, agregación de partículas, estabilidad del suelo húmedo y estabilidad de agregados.

Para medir la infiltración utilizaron un infiltrómetro de doble anillo de 25 y 50 cm de diámetro y 25 cm de altura. Se asumió que se había alcanzado el estado estacionario tras tres medidas iguales a los 90 minutos del inicio del experimento, y tomando tres réplicas del mismo a una distancia de entre 5 y 10 m.

Los resultados se trataron estadísticamente mediante el método de análisis de componentes principales, para relacionar las propiedades del suelo con los datos de infiltración.

En cuanto a las propiedades del suelo, se muestran en la Figura 2.17.:

**Table 2**  
Soil characteristics of Udands.

Udands	SOC %	C:N	BD Mgm <sup>-3</sup>	P-Ret %	Al <sub>o</sub> + 1/2Fe <sub>o</sub> %	-33 kPa %	-1500 kPa %	SA %	WSS %	WAS %	WDPT s
<i>Green forest</i>											
$\bar{x}$	11.6	14.7	0.54	84.9	3.2	56.4	31.5	73.4	68.8	81.8	5185.0 (24.7)
$\sigma$	3.6	2.7	0.13	4.7	1.1	10.3	10.0	10.4	8.0	5.1	8829.4 (20.2)
<i>Pine forest</i>											
$\bar{x}$	9.6	20.8	0.60	92.0	4.3	55.4	26.3	54.7	40.6	64.6	20.8
$\sigma$	3.6	4.1	0.1	4.3	1.3	6.7	2.6	8.5	12.5	13.9	46.2
<i>Cropped</i>											
$\bar{x}$	6.8	13.4	0.78	78.9	4.3	47.2	28.2	48.9	34.0	62.0	4.2
$\sigma$	1.8	3.3	0.08	16.5	1.2	5.8	5.8	5.2	9.6	13.7	2.7
<i>Statistical significance</i>											
Pine-green forest		**						**	**	*	*
Cropped-green forest			*					*	**	*	*
Cropped-pine forest		**	*	*							

$\bar{x}$ : Average value;  $\sigma$ : Standard deviation; SOC: Soil organic carbon; C:N: carbon-nitrogen ratio; BD: Bulk density; P-Ret: Phosphate retention; Al<sub>o</sub>, Fe<sub>o</sub>: Oxalate-extractable Al and Fe; SA: Soil aggregation; WSS: Water soil stability; WAS: Water aggregate stability; WDPT: Water Drop Penetration Time; \*: p<0.05; \*\*: p<0.01.

**Figura 2.17. Propiedades del suelo estudiado por Neris et al. (2012).**

El cambio en el uso del suelo para el cultivo tiene una marcada influencia sobre estas propiedades, produciendo un aumento significativo de la densidad aparente en comparación con el pino y los suelos forestales verdes y la reducción de la retención de fosfato.

Esta diferencia se refleja también en otras propiedades del suelo que pueden tener implicaciones importantes para la infiltración. Si bien sigue siendo alto, el carbono orgánico cae en los suelos cultivados en un 70 % y 41 %, respectivamente, en comparación con el bosque y con la zona de pinos, aunque las diferencias no son estadísticamente significativas. Por otra parte, la relación carbono- nitrógeno muestra su valor máximo en los sitios de bosques de pinos.

El impacto de la modificación del uso del suelo es mayor en el caso de los parámetros asociados con la estructura y la estabilidad. La estabilidad estructural de los Andisoles es evidente mayor en los suelos del bosque verde, reduciéndose en 18 puntos en los suelos de los bosques de pinos y en 24 puntos en los suelos cultivados. Por otro lado, la estructura de los suelos de los bosques de pino se conserva mejor que en los suelos cultivados aunque las diferencias no son estadísticamente significativas.

No se encuentran diferencias entre los distintos usos de la tierra en términos de propiedades tales como la textura, la agregación y la estabilidad estructural, o la capacidad de retención de agua.

Ya que es una de las características de los Andisoles, todos los suelos del estudio tienen altas tasas de infiltración, aunque se observan diferencias en función del tipo de vegetación y uso del suelo (ver tabla siguiente). Los valores más altos se encuentran en el bosque verde (796 mm/h), la cifra cae por casi el 75% de los bosques de pino (188 mm/h) y el 90% en los suelos cultivados (67 mm/h). En ambos casos, las diferencias son estadísticamente significativas.

**Table 4**  
Steady-state infiltration rate (SIR) for different soil types, vegetation and land use.

Soil classification	Steady-state infiltration rate (mmh <sup>-1</sup> )											
	Green forest				Pine forest				Cropped			
	$\bar{x}$	Max.	Min.	$\sigma$	$\bar{x}$	Max.	Min.	$\sigma$	$\bar{x}$	Max.	Min.	$\sigma$
Udands	796	1224	480	279	188	380	80	106	67	110	40	32
Ustands					150	205	108	47	68	105	21	28

$\bar{x}$ : Average value; Max: Maximum value; Min.: Minimum value;  $\sigma$ : Standard deviation.

**Figura 2.18.** Tasa de infiltración en estado estacionario para cada tipo de suelo y vegetación. (Neris *et al.*, 2012).

Los resultados del presente estudio muestran que las propiedades relacionadas con la infiltración de los suelos cultivados experimentan modificaciones considerables en comparación con los suelos forestales: concretamente, una reducción de la materia orgánica, la agregación, la estabilidad estructural y capacidad de retención de agua, así como un aumento en la densidad aparente.

Uno de los principales efectos de la utilización de los suelos para el cultivo es una reducción de estabilidad de los agregados (Hartemink *et al.*, 2008; Imeson, 1995, en Neris *et al.*, 2012). Esto se puede atribuir a varios factores: a) una disminución en la materia orgánica y la modificación de su dinámica, lo que repercute negativamente en su formación global (Cerdà *et al.*, 1998; Hartemink *et al.*, 2008, en Neris *et al.*, 2012); b) la destrucción de complejos orgánicos minerales y la liberación de materia orgánica, que se vuelve más expuesta a la oxidación (Green *et al.*, 2004, en Neris *et al.*, 2012), y de los productos de rango- corto, que se vuelven menos protegidos (Nanzyo *et al.*, 1993, en Neris *et al.*, 2012); c) modificación de la humedad del suelo y de sus regímenes de temperatura (Cerdà, 1998, en Neris *et al.*, 2012). Los contrastes térmicos aumentan, al igual que los períodos húmedos y secos. Esto favorece un secado con la modificación de tamaño de poro irreversible (Nanzyo *et al.*, 1993, en Neris *et al.*, 2012).

Las correlaciones establecidas indican que los parámetros asociados con la agregación y la estabilidad son los principales factores que determinan la infiltración. Como era de esperar, por lo tanto, las modificaciones en relación con un cambio en el uso de la tierra tienen consecuencias negativas para la infiltración.

Los resultados también muestran que el uso de la tierra afecta a la repelencia al agua del suelo, cuyos valores son más altos en los sitios de bosques. Es bien conocido que tanto la cantidad como el tipo de materia orgánica afectan directamente a la hidrofobicidad (Martínez-Zavala *et al.*, 2009, en Neris *et al.*, 2012). Los suelos forestales muestran contenidos de materia orgánica más grandes que los suelos cultivados. Además, algunos géneros tales como *Pinus* o *Erica* presentes en el bosque de pinos y bosque verde se enumeran entre las especies de plantas asociadas a los valores más altos de repelencia al agua en el suelo. (Doerr *et al.*, 2000, en Neris *et al.*, 2012). Esto puede explicar estas diferencias.

Por otra parte, se observó una correlación positiva entre la repelencia al agua del suelo y la infiltración. Hillel (1980), en Neris *et al.* (2012), observa que los terrones hidrófobos de la capa superior no se ven afectados por procesos de humectación y actúan como un bypass, promoviendo la infiltración de agua entre ellos a las capas más profundas. Sin embargo, este resultado contradice la correlación negativa reportada por la mayoría de los autores (véase, por ejemplo DeBano, 1971; Robichaud y Waldrop, 1994; Doerr *et al.*, 2000, en Neris *et al.*, 2012). La repelencia al agua es una propiedad inversamente proporcional a la humedad del suelo (DeBano, 1971; Doerr y Thomas, 1998, en Neris *et al.*, 2012). En consecuencia, cuando el suelo se satura y se alcanza la velocidad de infiltración en estado estacionario, la hidrofobicidad debe tener una influencia menor en la infiltración, la cual es controlada principalmente por otras propiedades del suelo como su agregación y su estabilidad. Por otro lado, la repelencia al agua muestra también correlaciones positivas con el contenido de carbono orgánico, la agregación del suelo y el índice de estabilidad. Por lo tanto, la correlación positiva entre la repelencia al agua del suelo y la infiltración en realidad puede reflejar la relación entre hidrofobicidad y la agregación inducida de materia orgánica.

En cuanto al efecto de las diferentes cubiertas forestales en la infiltración del suelo, los resultados de Neris *et al.* (2012), muestran que el cultivo no es el único tipo de uso del suelo que puede afectar a la infiltración en Andisoles. Como un amplio número de autores han demostrado, el tipo de vegetación y su grado de cobertura también juega un papel importante en el proceso de infiltración del agua (Cerdà, 1998b; Jiménez *et al.*, 2006.; Molina *et al.*, 2007, en Neris *et al.*, 2012).

En este estudio, los valores de la tasa de infiltración constante de los suelos de los bosques de pino, aunque no son bajos, son más bajos que los que se encuentran en el bosque verde.

Al igual que en los suelos cultivados, las diferencias en los valores de infiltración entre el pino y los suelos de los bosques verdes parecen estar determinados por las diferencias de desarrollo estructural y de porosidad.

Las variaciones observadas en la tasa de infiltración constante entre los suelos de los bosques forestales de pino y bosque verde son mayores en magnitud que las que se encuentran entre estos últimos y los suelos cultivados. Los resultados del análisis de componentes principales y el gráfico de dispersión indican que las propiedades estructurales (agregación del suelo y estabilidad) juegan un papel importante en la infiltración. Este resultado es consistente con lo reportado por la mayoría de los autores y subrayan la importancia de la estabilidad estructural en los procesos de infiltración de agua del suelo, particularmente en Andisoles (Jiménez *et al.*, 2006; Nanzyo *et al.*, 1993; Rodríguez *et al.*, 2002; Warkentin y Maeda, 1980, en Neris *et al.*, 2012).

En general, el tipo de vegetación afecta a la estabilidad estructural del suelo debido a su influencia en la cantidad y naturaleza de la materia orgánica incorporada en el mismo (Mills *et al.*, 1992; Molina *et al.*, 2007, en Neris *et al.*, 2012). Aunque no se encontraron diferencias en el contenido de materia orgánica entre el bosque verde y el de pino, los valores de la relación carbono-nitrógeno pueden explicar las discrepancias en su estabilidad estructural. Los resultados sugieren la prevalencia de formas lábiles de la materia orgánica en los sitios de bosques verdes, mientras que en los bosques de pino la materia orgánica sigue estando menos procesada. Según Tisdall y Oades, 1982, en Neris *et al.*, 2012, las formas lábiles de carbono tienen una gran influencia en la cantidad y la estabilidad de los macroagregados (> 0,25 mm). Por lo tanto, esta diferencia en la relación C/N puede explicar la mayor estabilidad estructural de los bosques verdes. Las correlaciones estadísticas obtenidos confirman esta relación.

⇒ Neris *et al.* (2013) llevaron a cabo un estudio de investigación de la infiltración de agua en Andisoles en diez rodales, seis de los cuales contaban con bosque de pino y cuatro en selva tropical en las Islas Canarias.

Las simulaciones de lluvia se llevaron a cabo tras una suave, moderadamente empinada y pronunciada pendiente (10, 30 y 50 %) para determinar la infiltración, escorrentía y pérdida de suelo en función de las características del suelo del bosque y se utilizó un simulador de lluvia para medir la infiltración, así como la escorrentía y las pérdidas de suelo, con eventos de 35 minutos y una intensidad de lluvia de 60 mm/h, llevándose a cabo un total de 75 simulaciones. Como es lógico, además se analizaron distintas muestras del suelo de cara a conocer sus propiedades.

El mantillo de los suelos de los bosques de pino consisten en material orgánico moderadamente poroso, extremadamente hidrofóbico y semi-descompuesto, rico en hifas de hongos (asociadas a una alta hidrofobidad). El mantillo del suelo en la selva tropical está formado por un material orgánico altamente poroso, suelto, semi-descompuesto.

Las diferencias entre las propiedades de los suelos se encuentran en su granulometría, la agregación y estabilidad de agregados y la repelencia al agua. Todos los suelos son franco-limosos o francos en la textura. Sin embargo, los sitios de selva tienen significativamente mayor contenido de arcilla y los sitios de bosques de pino significativamente más arena.

Todos los suelos tienen una alta estabilidad estructural de los agregados, aunque añaden que se observan diferencias de acuerdo con la cubierta vegetal: los valores de agregación media del suelo de los suelos de la selva tropical están por encima del 75 %, en comparación con alrededor del 50 % en los suelos de los bosques de pino. Estas diferencias son estadísticamente significativas.

No hay grandes diferencias según la vegetación en el caso de otras propiedades que pueden tener influencia en la infiltración, como el carbono orgánico, la densidad aparente y la capacidad de retención de agua.

Los resultados del estudio ponen de manifiesto el influyente papel que desempeña el suelo del bosque en la infiltración y la escorrentía. La infiltración apenas alcanza los 20 mm/h en el pinar, en comparación con los 50 mm/h en el bosque lluvioso. Como consecuencia, la escorrentía del pinar es el doble que lo registrado en los sitios de selva tropical.

En comparación, los valores se encuentran alrededor de 30 mm/h inferiores en el bosque de pinos para ambas pendientes de estudio, siendo estas diferencias estadísticamente significativas.

La comparación de las propiedades minerales de la superficie del suelo muestra la evidencia del menor desarrollo estructural y una mayor repelencia al agua de los suelos del bosque del pino. Estas diferencias pueden dar cuenta del diferente comportamiento exhibido por la infiltración de los dos tipos de bosque.

Además, el frente de humectación en pendientes suaves y moderadamente empinadas evidencia la influencia del mantillo sobre la infiltración. En el bosque de pinos, la mayor parte del agua de lluvia permanece en el mantillo y la infiltración depende poco, por tanto, de las propiedades subyacentes del suelo mineral. En la selva, el frente húmedo se extiende por debajo de la capa de mantillo y la estructura del suelo bien desarrollado es un factor importante en la infiltración del agua. Las diferencias observadas en los dos parámetros no se encuentran en las laderas escarpadas. No hay diferencias en la pérdida de suelo se entre las distintas cubiertas de vegetación a pesar de la mayor escorrentía en el bosque de pinos. Los resultados demuestran el efecto protector de la cubierta orgánica y cómo la estabilidad de los Andisoles ayuda a los procesos de combate de la erosión del agua.

⇒ Por otro lado, uno de los usos de la tierra particularmente asociado con las tasas más altas de erosión en España son los viñedos extensos. Ruiz-Colmenero *et al.* (2013), examinaron la efectividad de dos tipos de cobertura vegetal para mejorar las propiedades físicas del suelo y reducir la erosión en un viñedo ubicado en la cuenca sureste de Río Henares, en Madrid. Se evaluó la erosión de tres parcelas de 2 m<sup>2</sup> cada una con tres tratamientos que comprendieron: laboreo tradicional de la cubierta, cubierta permanente de *Brachypodium distachyon* y cereal de secano de cosecha en primavera. Las parcelas con labranza tradicional arrojaron sustancialmente más erosión (5,88 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) que las de *Brachypodium* (0,78 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) o cereal de secano (1,27 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>).

En cuanto a la infiltración, al final del estudio, la tasa de infiltración estacionaria en los tratamientos de cobertura fue un 45% mayor que sin ella, con el mayor aumento de las tres cubiertas en la zona de *Brachypodium*. Ruiz-Colmenero *et al.* (2013) atribuyen la mayor infiltración en las zonas tratadas debido a la mayor abundancia de poros más grandes en comparación con las parcelas labradas.

La cobertura vegetal aumenta el carbono derivado de las plantas, esencial para restaurar suelos degradados (Lal, 2009, en Ruiz-Colmenero *et al.*, 2013). El carbono orgánico del suelo estabiliza los macro-agregados, (Verchot *et al.*, 2011, en Ruiz-Colmenero *et al.*, 2013), haciendo que aumente la infiltración mediante la reducción de la formación de costras en la superficie del suelo.

En este estudio la infiltración se midió mediante el uso de un infiltrómetro de doble anillo, realizando dos ensayos en cada tipo de cobertura vegetal utilizada. Debido a la amplia pedregosidad del suelo (20-25% de cobertura de piedras) fue complicado colocarlos en el suelo, por lo que se volvió a medir la infiltración mediante un test simplificado de infiltración, utilizando anillos más pequeños, de 5 cm de diámetro, de más fácil colocación, y en este caso realizando 10 repeticiones.

Se tomaron muestras del suelo a fin de conocer el porcentaje de raíces, tras ser secado al aire, y se midió la estabilidad de los agregados, textura y densidad.

En cuanto a los resultados referentes a la infiltración, tras tres años de tratamiento con las tres diferentes coberturas, se observó que la tasa de infiltración constante fue mayor bajo *Brachypodium* ( $p < 0.001$ ,  $42 \text{ mm h}^{-1}$ ) que bajo el cereal de secano ( $18 \text{ mm h}^{-1}$ ) y bajo el tratamiento de labranza ( $16 \text{ mm h}^{-1}$ ).

Aunque los valores fueron significativamente más altos para el test de infiltración simplificado que para la medición con el infiltrómetro de doble anillo, las tendencias generales fueron idénticas. De este modo, en el cuarto año de tratamiento, se obtuvieron infiltraciones aún mayores y con la misma tendencia. Además, y directamente relacionado con este aumento de la infiltración, también fueron aumentando la estabilidad de los agregados y el contenido de carbono orgánico del suelo.

⇒ Liu *et al.* (2013), utilizaron un infiltrómetro de tensión para determinar los efectos de los patrones de vegetación en las propiedades hidráulicas de los suelos de superficie en una unidad de captación alpina en China utilizada anteriormente como tierras agrícolas de secano, pero que en la actualidad exhibe un patrón de vegetación significativamente auto-organizado, con una superficie cubierta de arbustos en la cara norte y una superficie cubierta de hierba en la ladera orientada al sur. La hipótesis de partida fue que los suelos de superficie en la unidad de captación tendrían un patrón aleatorio con una varianza relativamente uniforme de la conductividad hidráulica saturada, debido a la labranza y la producción agrícola a largo plazo anterior, y se encontraron con un patrón poco organizado y al parecer heterogéneo de esta conductividad después del período de recuperación de la tierra.

Se seleccionaron un total de 67 puntos de medición en esta unidad de captación a lo largo del gradiente de altitud y las líneas de contorno y se recogieron muestras de suelo a distintas profundidades para el análisis de laboratorio de la densidad aparente, capacidad de campo, contenido de materia orgánica, nitrógeno total, fósforo disponible y pH.

Todas las pruebas de infiltración se llevaron a cabo mediante el uso de un infiltrómetro de tensión con una membrana de disco de 20 cm de diámetro, quitando las grandes rocas de la zona y recortando ligeramente la vegetación de la superficie con unas tijeras. Para reducir al mínimo el flujo lateral cerca de la superficie, se colocó un anillo de metal delgado en el suelo a 1 cm de profundidad.

Las diferencias significativas entre los tipos de sitios y laderas en la unidad de captación sugieren que los patrones de vegetación pueden afectar los patrones espaciales de las propiedades hidráulicas de la superficie del suelo. Como muchos estudios anteriores han informado (Casanova *et al.*, 2000; Cerdà, 1997; Hanna *et al.*, 1982, en Liu *et al.*, 2013), también se encontró que la pendiente orientada al norte tenía ligeramente tasas más altas de infiltración que las orientadas hacia el sur y el contenido de agua disponible también era obviamente más grande en los suelos en la ladera orientada al norte que en los suelos en la orientada hacia el sur. Sin embargo, la diferencia no fue estadísticamente significativa. El patrón de la conductividad hidráulica en el suelo en la unidad de captación fue controlado principalmente por los procesos relacionados con el terreno, tales como el sellado de la escorrentía y la compactación, y los patrones de vegetación no contribuyeron tanto como se esperaba a su desarrollo. Aunque las evaluaciones positivas entre la vegetación y el suelo que postularon en este trabajo no se han observado, una retroalimentación positiva puede existir en el perfil del suelo en la zona de la raíz, tal como se indica por las diferencias significativas en los parámetros físicos y químicos de los perfiles de suelos en diferentes posiciones de pendiente, por ejemplo: densidad, capacidad de campo, el total de C, N y P disponible, etc. Sin embargo, sigue siendo objeto de debate debido a la escasez de datos, y merece la investigación y la investigación mucho más detallada en el futuro.

⇒ Por último, Zhao *et al.* (2013), afirman que la infiltrabilidad del suelo juega un papel crítico en el control de la erosión del suelo y la mejora del almacenamiento de agua en las zonas áridas y semiáridas. En la actualidad, el conocimiento es deficiente con respecto al mecanismo y las características dinámicas de la infiltración del suelo durante una restauración de vegetación natural a largo plazo. Este estudio evaluó cómo cambia la infiltrabilidad del suelo a lo largo de una cronosecuencia de 79 años en una restauración natural de tierras de cultivo a pastizales permanentes.

Se utilizó una tierra de cultivo en pendiente como zona de control y cinco praderas de clases de edad sucesivas (6, 16, 36, 56, y 79 años de tratamientos de restauración naturales) para establecer una cronosecuencia en China.

La infiltrabilidad del suelo se midió en condiciones de lluvia simulada bajo tres intensidades (20, 40, y 60 mm/h) usando un método "run-off-on-out". La tasa de infiltración constante del tratamiento de control disminuyó con el aumento de intensidad de la lluvia, mientras que las parcelas de la restauración natural mostraron una tendencia contraria. Con la extensión del periodo de restauración, la tasa de infiltración constante fue gradualmente aumentando. Esta tasa tenía una relación exponencial negativa significativa con el periodo de restauración bajo diferentes condiciones de precipitaciones ( $p < 0,01$ ).

La infiltrabilidad del suelo mostró un rápido incremento en 16 años de restauración natural y ligeros cambios a partir de entonces. Los parámetros de los suelos como la tasa de infiltración constante, el contenido de los macroagregados (>0,25 mm) y la materia orgánica se correlacionaron significativamente entre sí ( $p < 0,01$ ).

La restauración natural de pastizales a largo plazo, especialmente a los 16 años, mejora de forma significativa la infiltrabilidad del suelo y reduce la erosión del mismo a través de la acumulación de materia orgánica y la consiguiente mejora de las propiedades estructurales.

### 3. OBJETIVOS

Los principales objetivos que se pretende alcanzar con este estudio son los siguientes:

- Medir la infiltración en una cárcava restaurada, de modo que:
  - Se pueda comparar la infiltración entre la zona de cárcava sin vegetación y una zona de robledal sobre la misma, de modo que, junto con los datos disponibles de un estudio anterior llevado a cabo por el mismo alumno en la misma zona (Campano-Fernández, 2012), pero esta vez con ensayos de infiltración en la cárcava y bajo pinar, se pueda comparar la influencia del pinar y el robledal en la tasa de infiltración.
  - Al disponer de más datos, se complete el estudio de correlación llevado a cabo en el proyecto citado anteriormente entre dos infiltrómetros de anillo de distinto tamaño, uno de 30 cm de diámetro y otro de 8 cm de diámetro, y de este modo conocer si los infiltrómetros de 8 cm permiten hacer una evaluación precisa de la infiltración, facilitando el trabajo de campo y el manejo de agua.
- Utilizar el infiltrómetro INFILTEST (Mongil *et al.*, 2013), pendiente de patente por parte del Grupo de Hidrología y Conservación de la UCAV y de la U.D. de Hidráulica e Hidrología de la ETSIIAA de Palencia.
- Establecer si existen diferencias entre las variables relacionadas con la infiltración.
- Determinar el grupo hidrológico de los suelos estudiados según el NRCS (2007).

## 4. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

### 4.1. Localización

La zona de estudio, se localiza en el término municipal de Saldaña, municipio y villa española de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, situado en la provincia de Palencia, perteneciente a la comarca de paramos y valles, situada en la margen izquierda del río Carrión, cuya red hidrográfica pertenece a la Confederación Hidrográfica del Duero.

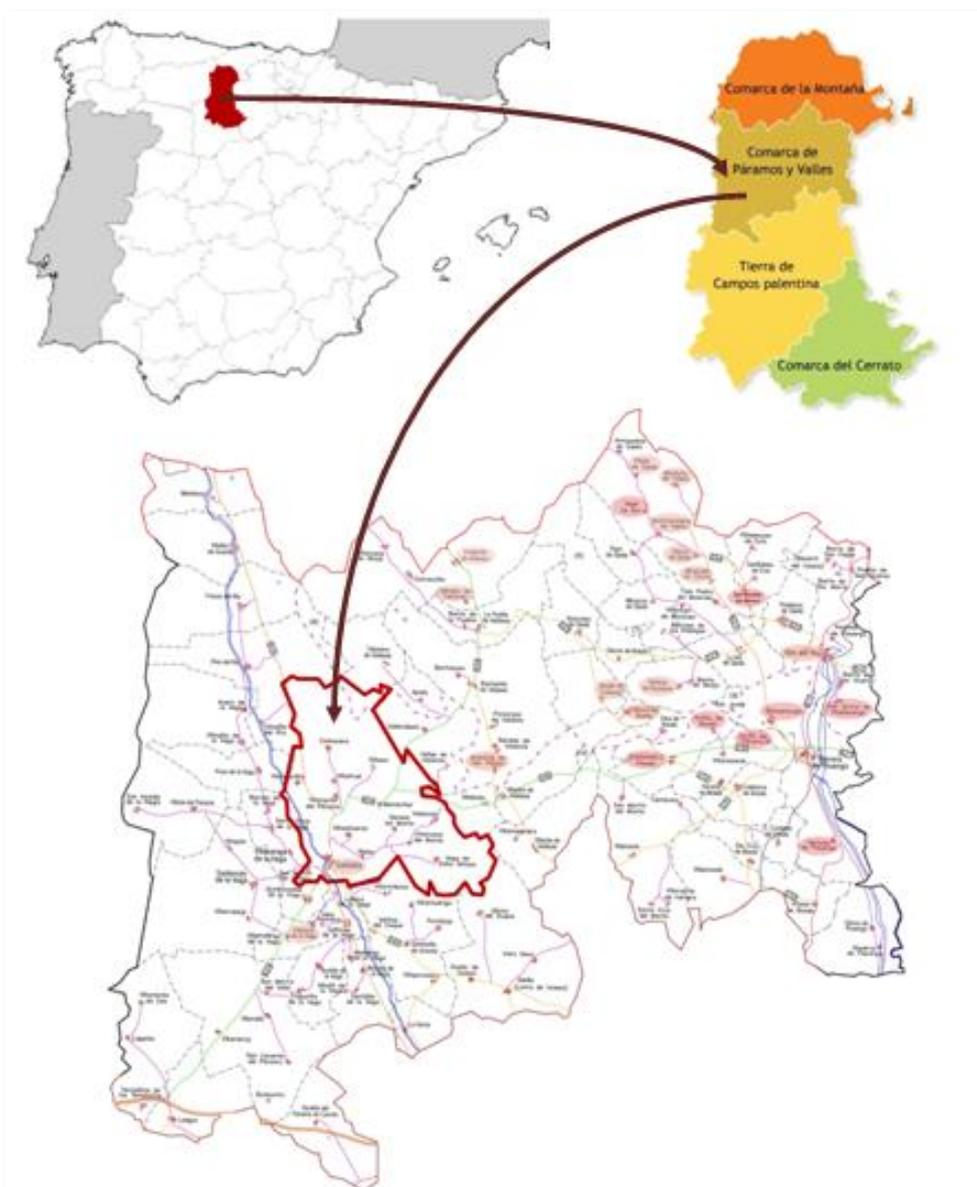


Figura 4.1. Localización de la zona de estudio (Campano-Fernández, 2012).

Los estudios se han desarrollado en dos zonas próximas entre sí: la cárcava nº 20, denominada así en los proyectos de restauración llevados a cabo (Ayerbe, 1930), y una zona degradada cercana y perteneciente al mismo sistema de cárcava que contaba con un robledal cercano, similar a las formaciones naturales presentes antes de la restauración.

La primera cárcava se encuentra en el paraje “Cardo de los Valles”, situado al sureste del municipio de Saldaña, en la margen izquierda del río Carrión, y muy cercana al mismo. La segunda de las cárcavas se encuentra al noreste de Saldaña, cercana a la localidad de Villalafuente, en el paraje conocido como “Los puentes”.

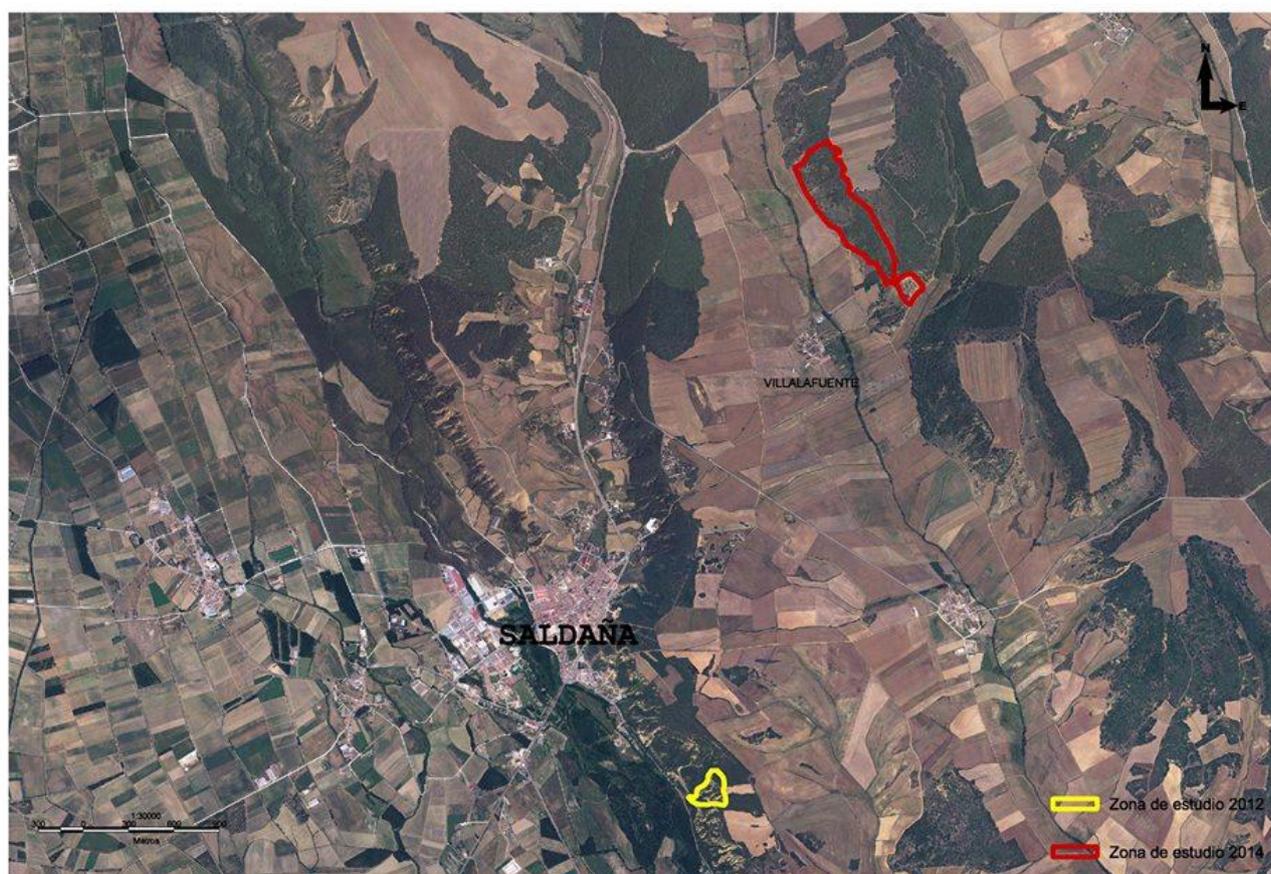


Figura 4.2. Situación de las cárcavas respecto a la localidad de Saldaña.

## 4.2. La restauración hidrológico-forestal de Saldaña

La restauración hidrológico-forestal llevada a cabo en los años 30 surgió de la necesidad de frenar los procesos erosivos que se generan en la zona. Debido a la acción humana se había producido la pérdida de la cubierta vegetal, causa que, añadida al sobrepastoreo, había agravado los procesos erosivos provocando cortes de tráfico en la carretera Saldaña-Osorno por desprendimientos, problemas en canales de riego y en el municipio por coladas de barro y problemas de turbidez en las aguas del río Carrión como consecuencia de la continua producción de sedimentos de estos parajes acarcavados (Navarro *et al.*, en preparación, en Campano-Fernández, 2012).

La restauración hidrológico-forestal en las cárcavas de Saldaña se llevó a cabo mediante la ejecución de dos proyectos de restauración, los cuales englobaban una zona más amplia de la provincia de Palencia. Estos proyectos fueron realizados y ejecutados por la Confederación Hidrográfica del Duero, dentro de las labores para la mejora de la calidad de las aguas.

Uno de los proyectos consistió en la restauración de 304,3 hectáreas dentro del municipio de Saldaña. La restauración se llevó a cabo mediante un programa de consorcios con beneficios en función de las rentas aportadas, incluyendo la construcción de 256 diques forestales de mampostería gavionada y 680 palizadas con el objetivo de fijar el terreno y así permitir la implantación de una cubierta vegetal. (Ayerbe, 1930). Para restaurar la vegetación se optó por la repoblación de los terrenos con *Pinus pinaster* y *Pinus sylvestris*.

El otro proyecto (Azcarretazabal, 1963) consistía en la repoblación de 154,9 hectáreas del mismo término municipal, de propiedad comunal. Para ello se propuso, al igual que en el proyecto anterior, un programa de consorcios con beneficios en función de las rentas aportadas. El proyecto planteaba la construcción de 251 diques forestales de mampostería gavionada en 20 modelos diferentes, con los mismos objetivos que en el caso anterior: permitir la fijación del terreno, disminuir de los procesos erosivos e instalar una cubierta vegetal. En este caso también se proyectó la repoblación de los terrenos con especies del género *Pinus*.

En la actualidad pueden verse los efectos de ambos proyectos de restauración en la cárcava, observándose una cubierta vegetal totalmente establecida.

### 4.3. Estudio climatológico

Para el estudio climático de Saldaña se han empleado los datos aportados por Ramos (2012) a partir de las estaciones meteorológicas de Saldaña (Palencia) 2370 y 2370<sup>a</sup> y que ya se utilizaron en Campano-Fernández (2012).

Los datos pertenecen a la estación 2370, debido a su situación y a que posee una serie más amplia de datos (1945 – 2009 en temperaturas y 1945 – 2006 en precipitaciones). De cara a completar y comparar datos se ha utilizado la estación 2370A.

Las características climáticas principales se resumen en que, en cuanto a la precipitación, la media anual es de 528,1 mm que se distribuyen de la siguiente manera: 150,7 mm en otoño, 150,5 mm en invierno, 142,2 mm en primavera y 84,7 mm en verano. Su distribución anual se puede observar en la siguiente Figura (Figura 4.3.).

Los datos y cálculos pueden observarse de forma detallada en Campano-Fernández, 2012.

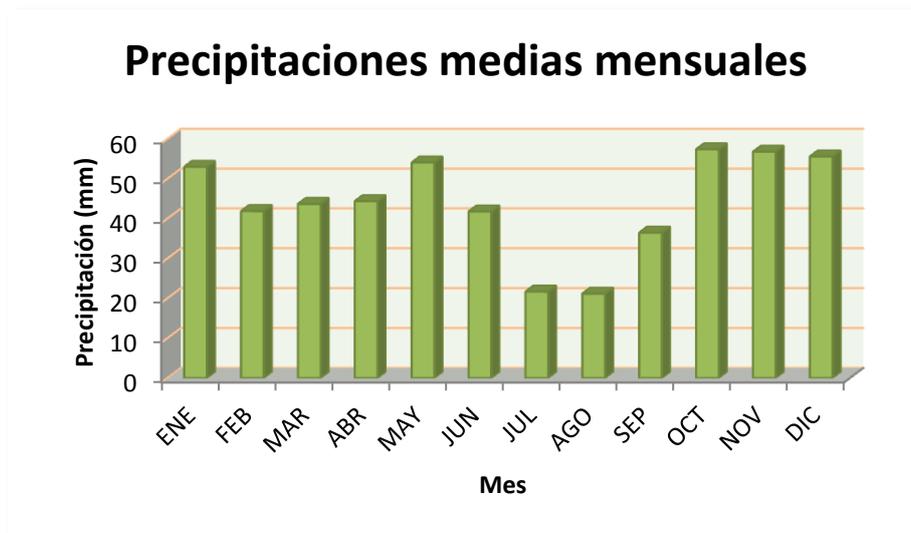


Figura 4.3. Precipitaciones medias mensuales en Saldaña (Campano-Fernández, 2012).

Por su parte, la temperatura media anual es 9,5°C, la media de las máximas 14,9°C y la media de las mínimas 4°C. El periodo de meses en los cuales la temperatura media es <7°C, es decir, el periodo frío, es de octubre a mayo. El periodo cálido, con meses con temperatura media >30°C, es nulo. El resumen de las temperaturas de la zona de estudio puede verse en la Figura 4.4.:

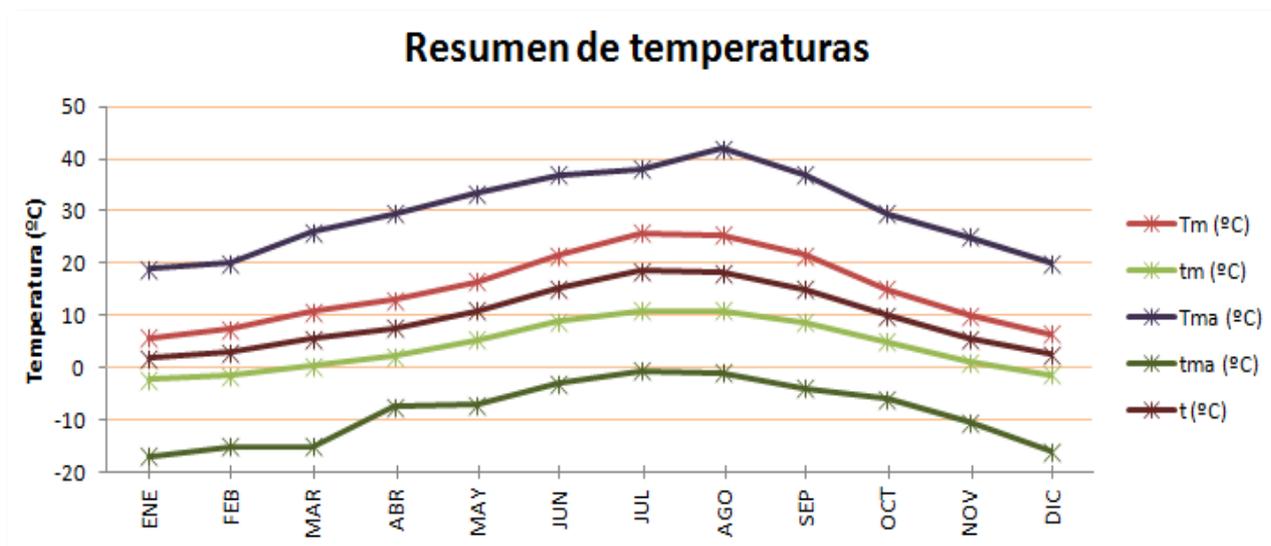


Figura 4.4. Resumen de temperaturas en la zona de Saldaña (Campano-Fernández, 2012).

Donde:

- Tma (°C): media de las temperaturas máximas absolutas.
- Tm (°C): temperatura media de las máximas.
- t (°C): temperatura media mensual.
- tm (°C): temperatura media de las mínimas.

- tma (°C): media de las temperaturas mínimas absolutas.

La evapotranspiración potencial (ETP) para la zona de estudio, calculada según el método de Thornthwaite (1948) es de 618,6 mm. Por otro lado, del climodiagrama de Walter y Lieth (1960) para Saldaña (Figura 4.5.) podemos observar que el periodo libre de heladas se extiende por los meses de verano siendo la intensidad de la sequía de 2,5 meses centrados en esta época.

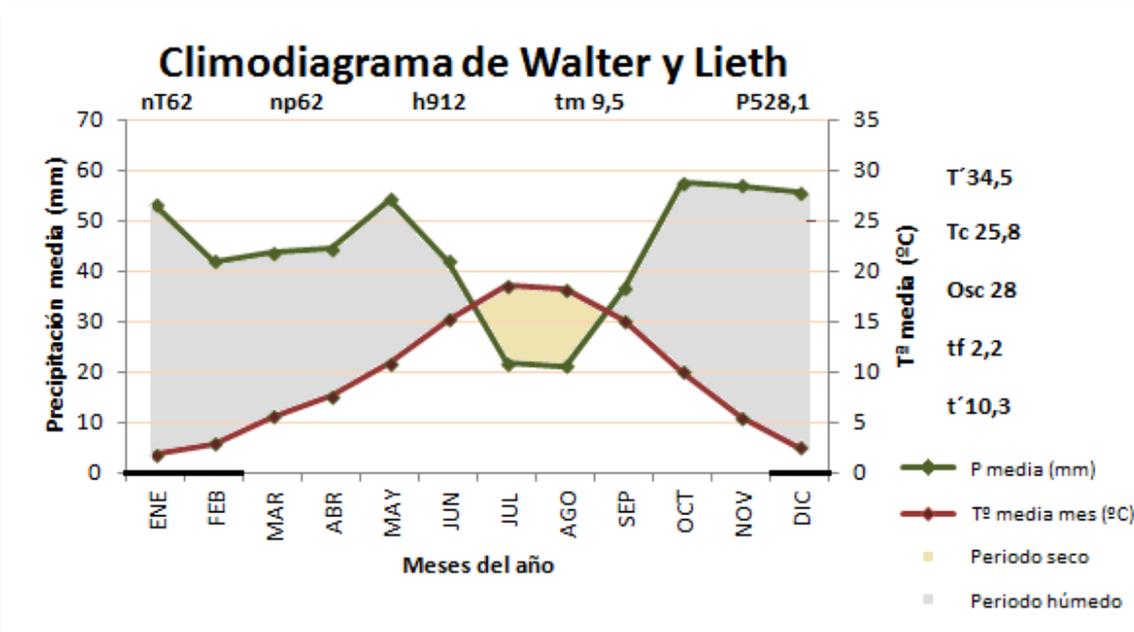


Figura 4.5. Climodiagrama de Walter y Lieth (Campano-Fernández, 2012).

Donde:

- T': T<sup>a</sup> media anual de máximas absolutas anuales.
- Tc: T<sup>a</sup> media de las máximas del mes más cálido.
- Osc: Oscilación (Tc -tf).
- tf: T<sup>a</sup> media de las mínimas del mes más frío.
- t': T<sup>a</sup> media anual de las mínimas absolutas anuales.
- nT: Número de años de la serie de temperaturas.
- nP: Número de años de la serie de precipitaciones.
- h: Altitud en metros.
- tm: T<sup>a</sup> media anual de las medias (° C).
- P: Precipitación media anual (mm).
- Hs: Periodo de helada segura. = 3 (Negro)
- Hp: Periodo de helada probable. = 9 (Gris)
- d: Periodo libre de heladas = 0

Además, para caracterizar el clima, se han calculado diferentes índices climáticos, pluviométricos y bioclimáticos, que reflejan las principales características del clima de Saldaña (Palencia). Los resultados de los índices climáticos analizados se pueden observar en la siguiente Tabla:

Tabla 4.1. Índices climáticos estudiados (Campano-Fernández, 2012).

Parámetro	Valor	Clasificación
Índice de Pluviosidad de Lang (1915)	55,60	Zona húmeda de estepas o sabanas
Índice de Aridez de Martonne (1906)	27,08	Zona subhúmeda
Índice de Emberger (1932)	79,74	Clima mediterráneo húmedo con inviernos fríos de heladas muy frecuentes
Índice de Dantin y Revenga (1941)	1,80	Zona húmeda
Índice de aridez de la UNEP (1997)	0,85	Clima húmedo
Índice de Vernet (1996)	-3,57	Submediterráneo
Índice de continentalidad de Gorezynski (1920)	21,78	Clima continental
Clasificación climática de Turc (1961)	603,7	Clima húmedo

De los índices pluviométricos analizados (Tabla 4.2) observamos que el índice de irregularidad pluviométrico es 3,3, lo que representa una acusada irregularidad pluviométrica. El índice de agresividad del clima de Fournier (1960) es 27,69 mm y el factor R de Erosividad de la Lluvia (Wischmeier y Smith, 1978) es  $62 \text{ hJ}\cdot\text{cm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$  ( $620 \text{ MJ}\cdot\text{mm}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ ) lo que refleja una erosión baja a moderada. Estos valores reflejan un clima mediterráneo continental con inviernos largos y veranos cortos donde las precipitaciones no son importantes repartiéndose regularmente a lo largo del año (Navarro *et al.*, en preparación, en Campano-Fernández, 2012).

Tabla 4.2. Índices pluviométricos estudiados (Campano-Fernández, 2012).

Parámetro	Valor	Clasificación
Índice de agresividad del clima (Índice de Fournier medio)	27,69 mm	Moderado
Índice de Agresividad o Erosividad de la lluvia	$62 \text{ hJ}\cdot\text{cm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	Erosividad baja a moderada
Índice de Irregularidad Pluviométrica	3,3	Acusada irregularidad pluviométrica

En cuanto a la clasificación bioclimática de la zona el índice de Mediterraneidad de Rivas-Martínez (1987) clasifica Saldaña en la Región Mediterránea.

Analizando el índice de termicidad propuesto por Rivas-Martínez (1987), cuyo valor es de 130,3, nos indica que estamos situados en un piso supramediterráneo medio.

Según la clasificación fitoclimática de Allué (1990), Saldaña se encuentra en el subtipo VI (IV)<sub>1</sub> cerca de los límites del VI (IV)<sub>1</sub>, siendo ambos nemoromediterráneos genuinos. El subtipo VI (IV)<sub>1</sub> puede existir en diferentes litologías predominando los grupos planicaducifolios marcescentes.

Por otro lado el índice de Gandullo y Serrada (1977) o Índice de Productividad Potencial Forestal (IPPF) toma un valor de 5,38 m<sup>3</sup>/ ha-año, lo cual equivale a tierras que tienen limitaciones moderadas para el crecimiento de los bosques.

En definitiva, podemos concluir que la zona de estudio se enmarca dentro de un clima mediterráneo continentalizado con precipitaciones suficientes repartidas a lo largo de todo el año y temperaturas frías, condicionadas por inviernos largos y fríos con frecuentes heladas.

#### 4.4. Geología

La zona objeto de estudio se localiza en una ladera comprendida entre los terrenos aluviales del Cuaternario, junto al río Carrión, y la cobertera de sedimento arcilloarenoso y acarreo cuarcíticos que constituyen el Páramo de Raña de finales del Terciario principios del Cuaternario. Esta ladera presenta un relieve profundamente abarrancado como consecuencia de la naturaleza de los materiales, la actividad antrópica y el efecto del clima (Martínez de Azagra *et al.*, 1997, en Campano-Fernández, 2012).

Dos grandes conjuntos de materiales pueden distinguirse: el Mioceno, integrado por conglomerados y fangos esencialmente y el Cuaternario, constituido en general por recubrimientos de gravas silíceas (IGME, 1982, en Campano-Fernández, 2012). Estas formaciones geológicas se desarrollan a continuación:

- *Aluviones actuales (Q2 A1)*:

Son los aluviones funcionales de los ríos Carrión y Valdavia. Están formados por gravas y arenas cuarcíticas, y presentan estructura en barras típica de río trezado.

- *Fangos ocreos con suelos calcimorfos y paleocanales de arena (Bc Tc11)*:

Suelos desarrollados durante el Terciario, periodo Neógeno (Mioceno), facies Vallesiense. La litología dominante está constituida por limos arcillosos ocreos con nódulos de carbonatos. Es característica la presencia de canales de arena poco cementada y base de grava silícea; localmente, tales cuerpos arenosos presentan una anchura del orden de los 100 m y una potencia de unos 2 m; base poco erosiva y estructura interna masiva, a veces con estratificación cruzada.

El tamaño medio de la arena varía entre 0,15 y 0,06 mm, pudiendo alcanzar la grava los 10 cm ocasionalmente. Otras veces el depósito de fondo de canal está formado por gravilla y arena gruesa, de 0,5 a 1 mm. Las facies finas son fangos y fangos arenosos. Los análisis de arcillas han revelado la presencia mayoritaria de Illita, siendo la Caolinita minoritaria, a veces con trazas de interestratificados (10-14 M) y de Pirofilita.

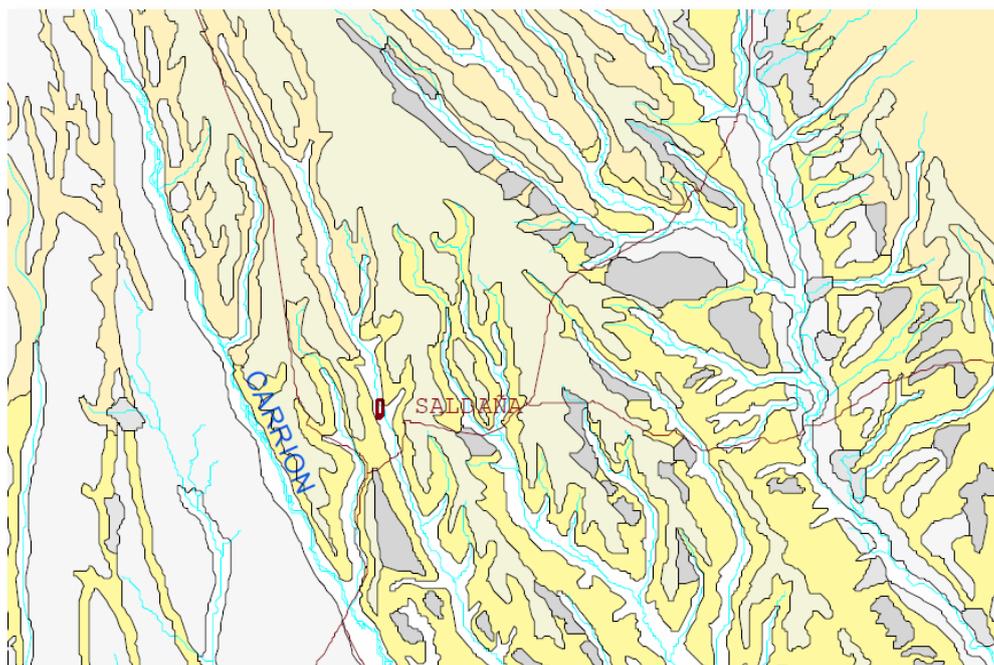


Figura 4.6. Mapa geológico de la zona de Saldaña (Modificado de IGME, 1982, en Campano-Fernández, 2012).

CUATERNARIO	48	49	50	51	52
PLIOCENO (TERCIAR)	47				

		TERCIARIO												
		DOC			DC			DCf						
		DOC	E	N	C	S	NE	C	SE					
Ma	1.94	PIBOS MANSIROS		DOCTRIN										
	5.2	PLIOCENO												
		SUPERIOR	ALFAMB											
			TURDOL											
MICENO	VALLER	45	45	45	45	45	45	45	45	45				
MEDIO	ARAGON	42	43	44	41	42	44	41	42	44				
	INFERIOR	RAMBIL	39		39	40		39	40	39				
23.3	ELIGOCENO													
PALEOGENO	ECCENO	SUPERIOR	HEADON	36	36		36	36	36	36				
		MEDIO	RHENAN	37			37		37	37				
	INF	YPRES	NEUBSTR											
PALEOCENO	THAN	DANIEIN												
9.6	MAASTRICHT (MESOZ)		34	33		34	32	32	33	33				

- 52. Aluvial y fondos iacustres: cantos, arenas, limos, arcillas y travertinos
- 51. Terrazas fluviales: conglomerados, gravas, arenas, limos y arcillas
- 51. Arenas eólicas arcosas
- 49. Abanicos aluviales, glaciés y superficies complejas, gravas, arenas, limos y arcillas
- 48. Coluviales y depósitos glaciales: gravas, limos y arcillas.
- 47. Raña: conglomerados silíceos, arenas y lutitas
- 46. Serie detrítico-carbonatada del Páramo superior: lutitas, areniscas y calizas a techo.
- 45. Serie conglomerática silícea finimiocena: conglomerados, arenas silíceas y lutitas.
- 44. Calizas inferiores del Páramo: calizas, dolomias y margas con niveles arcillosos.
- 43. Facies de las Cuentas: margas, calizas, dolomias, arcillas y yesos.
- 42. Facies Dueñas: margas y arcillas con niveles carbonatados y yesíferos localmente glauberita.
- 39. Series Rojas lutitas, arenas lutíticas y conglomerados silíceos rojos.
- 38. Serie paleógena se Santo Domingo de Silos: calizas, lutitas, areniscas y conglomerados.
- 37. Serie carbonatada eo-oligocena: conglomerados, areniscas y lutitas.
- 36. Serie detrítica eo-oligocena: conglomerados, areniscas y lutitas.
- 35. Serie carbonatada marina de Villarcayo: dolomias, margas y calcarenitas.
- 34. Series Siderolíticas: conglomerados, arenas y lutitas.
- 33. Serie finicretácica: calizas, areniscas y lutitas.

Figura 4.7. Leyenda del mapa geológico de la zona de Saldaña (Modificado de IGME, 1982, en Campano-Fernández, 2012).

- Limos y arcillas con algunos paleocanales y suelos calcimorfos ( Bc Tl c11 ) :

Suelos desarrollados durante la era Terciaria, periodo Neogeno (Mioceno), facies Vallesiense. Se desarrolla sobre el estrato anterior y se diferencia por la presencia de intercalaciones rojas arcillolimosas, de canales de fango con gravas y cantos fangosos tapizando la base de éstos y un menor desarrollo de suelos calcimorfos.

En la zona de Saldaña-Relea los paleocanales son de carácter arenoso, con base de grava silíceo y arena fina media con laminación cruzada de tipo festón.

El ambiente sedimentario es similar al del nivel anterior destacando la presencia de canales de fango y coladas de arcillas rojas.

- *Raña* (1 13 Tc21 -Q):

Se formó a finales del Terciario (Plioceno) y principios del Cuaternario (Pleistoceno Inferior). Esta formación constituye una zona de muy baja pendiente, inferior al 1,5%, que recubre los depósitos miocenos. Se trata de un conjunto de abanicos aluviales anteriores al sistema fluvial actual. Su formación parece estar ligada a periodos más áridos pero con lluvias estacionales fuertes. Litológicamente se compone de gravas cuarcíticas con matriz arcilloarenosa. La mayoría de los cantos son cuarcitas y limolitas cuarcíticas paleozoicas, subredondeados en general. Algunos están arenizados y otros caolinizados. El tamaño de grano varía de 10-20 cm.

## 4.5. Edafología

### 4.5.1. Clasificación de los suelos

Según el Mapa de Suelos de España y de acuerdo con los criterios del USDA (1999), en la cuenca de estudio los suelos predominantes se corresponden con entisoles del suborden orthent. Estos suelos se corresponderían con los leptosoles descritos por la IUSS (2006). Se trata de suelos poco evolucionados generalmente en fuertes pendientes con propiedades similares a la roca madre. Presentan un alto grado de degradación como consecuencia de los procesos erosivos.

Para realizar el estudio edáfico del suelo de las zonas donde se ha estudiado la infiltración se han recogido muestras de suelo bajo cada ensayo de infiltración, como puede verse en el punto 5. *Material y métodos*.

### 4.5.2. Características del suelo

Las propiedades del suelo que se consideran importantes para el estudio de la infiltración se recogen en la siguiente tabla:

#### - Textura

La textura se ha analizado mediante el sistema ISSS por el laboratorio del Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (Itagra c.t.), y se han transformado al sistema USSS mediante el paquete "soiltexture" para R (<http://cran.r-project.org/web/packages/soiltexture/index.html>). El método empleado para la determinación de la textura ha sido el Densímetro Bouyoucos. Los resultados obtenidos pueden verse en la Tabla 4.3.

Los datos referentes al área degradada de la cárcava restaurada y la zona de bosque de pinar (zonas 1 y 3, respectivamente) fueron tomados en 2012, como se explica más adelante en el punto 5. *Material y Métodos* (Campano-Fernández, 2012).

Tabla 4.3. Textura del suelo según los sistemas ISSS y USDA.

Zona	ISSS			USDA			Textura USDA
	arcilla	limo	arena	Arcilla	Limo	Arena	
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	40,31	25,76	33,93	40,31	36,01	23,68	Arcillosa
	43,68	24,00	32,32	43,68	30,43	25,89	
	41,68	29,00	29,32	41,68	34,03	24,29	
	55,68	22,00	22,32	55,68	31,25	13,07	
	41,68	28,00	30,32	41,68	34,83	23,49	
	43,68	24,00	32,32	43,68	30,43	25,89	
	55,68	28,00	16,32	55,68	26,44	17,88	
	55,68	22,00	22,32	55,68	31,25	13,07	
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	44,84	22,16	33,00	44,84	28,73	26,43	Arcillosa
	48,84	21,88	29,28	48,84	27,71	23,45	
	48,84	21,88	29,28	48,84	27,71	23,45	
	37,84	27,88	34,28	37,84	34,70	27,46	
	44,84	22,16	33,00	44,84	28,73	26,43	
	31,84	30,16	38,00	31,84	37,72	30,44	
	37,84	27,88	34,28	37,84	34,70	27,46	
	38,32	25,68	36,00	38,32	32,84	28,84	
Zona 3: Bosque restaurado de pinar	30,88	18,28	50,84	30,88	28,40	40,72	Franco-arcillosa
	24,88	15,28	59,84	24,88	27,19	47,93	
	29,88	17,28	52,84	29,88	27,79	42,33	
	27,68	18,00	54,32	27,68	28,81	43,51	
	34,88	18,28	46,84	34,88	27,60	37,52	
	26,88	15,28	57,84	26,88	26,79	46,33	
	43,88	17,28	38,84	43,88	25,01	31,11	
	27,68	18,00	54,32	27,68	28,81	43,51	
Zona 4: Bosque natural de roble	13,36	37,88	48,76	13,36	47,58	39,06	Franca
	15,28	31,88	52,84	15,28	42,39	42,33	
	15,36	30,88	53,76	15,36	41,58	43,06	
	22,36	27,68	49,96	22,36	37,62	40,02	
	16	32,68	51,32	16,00	42,89	41,11	
	15,46	25,68	58,86	15,46	37,39	47,15	
	13,34	28,88	57,78	13,34	40,38	46,28	
	12,36	24,44	63,2	12,36	37,01	50,63	

### - Materia orgánica

El contenido de materia orgánica es variable según la situación de los suelos. Puesto que el contenido en materia orgánica influye directamente sobre el suelo mejorando su estructura, tiene una implicación en la infiltración y se ha determinado su contenido en las distintas muestras de suelo por el laboratorio del centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario (Itagra c.t.), mediante volumetría redox. Del mismo modo que la textura, los datos del área degradada 1 y la zona de pinar (zonas 1 y 3, respectivamente) fueron tomados en 2012. (Campano-Fernández, 2012).

Los resultados medios de este análisis se muestran en la Tabla 4.4.

### - Densidad

Además de las propiedades anteriores se ha medido la densidad de los suelos de estudio como se explica en el apartado posterior 5. Material y Métodos, obteniéndose los valores medios que se muestran en la Tabla 4.4.

### - Relación Carbono/Nitrógeno

Dada la influencia de la relación carbono/nitrógeno en la estabilidad de agregados y por ende en la infiltración (Mills *et al.*, 1992; Molina *et al.*, 2007, en Neris *et al.*, 2012), y debido a su facilidad de medición, se ha obtenido esta relación para los suelos de estudio. Los análisis fueron realizados, al igual que la textura y materia orgánica, en los laboratorios de Itagra. Los resultados medios de este parámetro se muestran en la Tabla 4.4.

Tabla 4.4. Valores medios de densidad aparente, materia orgánica y relación carbono/nitrógeno para las distintas zonas de estudio. Los valores detallados se muestran en el punto 6. Resultados y Discusión.

Zona	Densidad aparente	Materia orgánica	C/N
1. Cárcava restaurada	1,71	0,03	8,22
3. Cárcava natural	1,95	0,00	20,20
2. Bosque restaurado	1,63	1,19	4,65
4. Bosque natural	1,41	2,25	13,56

A continuación se incluyen una serie de parámetros que, aunque ejerzan una inferior influencia sobre la capacidad de infiltración del suelo, también son interesantes desde el punto de vista de la caracterización general del mismo, y que han sido estudiados en la zona por Ramos (2012), en Campano-Fernández (2012).

#### **- Cationes de cambio**

Del análisis realizado por Ramos (2012) se observa que el calcio se presenta en cantidades muy altas para todas las muestras de suelo analizadas. Por el contrario el potasio y el magnesio se encontraban de forma deficiente, encontrándose en cantidades muy pequeñas, puesto que estos cationes se mueven en valores bajos o muy bajos.

#### **- Permeabilidad**

El cálculo de la permeabilidad se realizó a través de la determinación de la conductividad hidráulica de saturación obtenida mediante el triángulo para su cálculo propuesto por Rawls y Brakensiek (1989). Los valores de clase de permeabilidad obtenidos oscilaron entre 6 (muy lenta) de 5 (lenta).

#### **-Capacidad de retención de agua en el suelo**

La determinación de la capacidad de retención de agua del suelo se realizó a través de la fórmula de Gandullo (1985) (Ramos, 2012). Los resultados obtenidos mostraron que los suelos de la cárcava presentan una capacidad de retención de agua baja (48,28 y 21,44 mm), aunque aumenta en suelos donde las pendientes no son tan limitantes (351,38 mm).

#### **- Reacción del suelo**

El valor del pH obtenido para los diferentes tipos suelos analizados por Ramos (2012) los sitúa como fuertemente básicos según la clasificación propuesta por el USDA (2003).

#### **- Salinidad**

Se evaluó a partir de la conductividad eléctrica del suelo en extracto de agua 1:2,5 a 25 °C. Los valores obtenidos variaron entre 0,10 y 0,30 dS/m situando los suelos de la cuenca como no salinos según la clasificación del USDA (2003).

#### **- Abundancia de calcio**

La cantidad de carbonatos fue muy baja para todos los horizontes analizados, por lo que se determinó que estamos ante suelos totalmente descarbonatados y desafectados de caliza activa.

#### **4.5.3. Factor de erosionabilidad de la U.S.L.E. (Wischmeier y Smith, 1978).**

Este factor, representa la susceptibilidad de los suelos de la cuenca de estudio a la erosión. Los resultados obtenidos para este factor en la misma zona por Ramos (2012) se presentan en la siguiente tabla, donde se observa que los suelos presentan un grado de susceptibilidad moderado a alto.

Tabla 4.5. Valores del factor K de la U.S.L.E. (Modificado de Ramos, 2012, en Campano-Fernández, 2012).

Muestra	Factor K	Grado de susceptibilidad
1	0,43	Medio
2	0,54	Medio-alto
3	0,39	Medio

## 4.6. Hidrología

### 4.6.1. Cuenca de estudio

La cuenca de estudio donde se localiza la cárcava donde se han realizado las mediciones de infiltración se localiza en la margen izquierda del río Carrión. Ésta se sitúa a su vez en la cuenca del Duero (Figura 4.8.), siendo el afluente número 14 por la derecha del río Pisuerga, afluente, a su vez, del río Duero.

El río Carrión, discurre de norte a sur por la provincia de Palencia. Su nacimiento se encuentra dentro del Parque Natural de Fuentes Carrionas y Fuente Cobre, en la Montaña Palentina.



Figura 4.8. Cuenca del Duero (www.chduero.es).

La aportación media del río Carrión, en el último año con datos disponibles (2009-2010) de acuerdo con los datos que aporta la Confederación Hidrográfica del Duero en la estación de aforos de Celadilla del Río (Palencia) es de 448,66 hm<sup>3</sup>, con una caudal medio anual de 14,2 m<sup>3</sup>/s. El caudal instantáneo máximo registrado es de 377,2 m<sup>3</sup>/s registrado en el año hidrológico 1978 - 1979.

#### 4.6.2. Morfología de las cárcavas de estudio

Como se ha comentado anteriormente y se verá en detalle en el apartado 5. Material y Métodos, se ha desarrollado el estudio en dos zonas diferenciadas pero próximas entre sí y pertenecientes al mismo sistema de cárcavas. La primera de ellas, localizada en el término municipal de Saldaña, se corresponde con una cuenca exorreica que presenta una superficie de 27650,82 m<sup>2</sup> y un perímetro de 718,08 m. Su longitud de cuenca es de 246,71 m y la amplitud de relieve es de 51,1 m.



Figura 4.9. Primera de las cárcavas de estudio, cuyos ensayos fueron realizados en 2012.

La pendiente media de la cuenca toma valores elevados (52,61%) siendo su relieve pronunciado, por lo que el cauce formado se trata de un cauce de tipo torrencial. El tiempo de concentración es de 0,15 horas lo que supone que la cárcava es susceptible a crecidas relámpago.

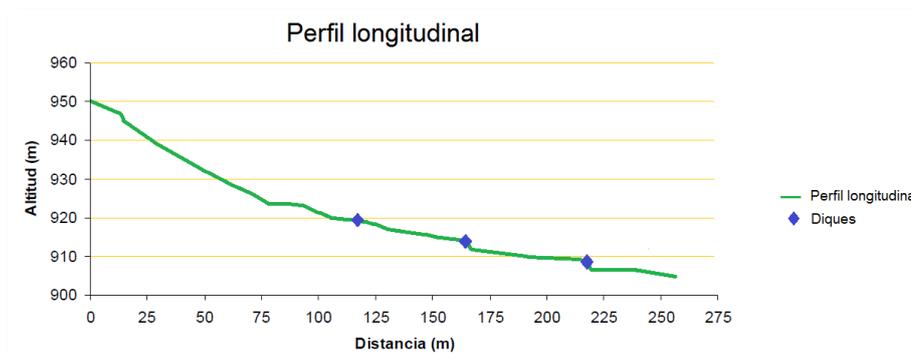


Figura 4.10. Perfil longitudinal del cauce principal de la cárcava 20 (Basado en datos de Ramos, 2012, en Campano-Fernández, 2012).

El perfil longitudinal del cauce principal es el característico de una cárcava corregida mediante diques en el que se observa una reducción de la pendiente original como consecuencia de la pendiente de compensación generada mediante la cuña de sedimentación.

La segunda zona de estudio se corresponde con una zona acarcavada menos encajada que la anterior y próxima a ella, perteneciente al término municipal de Villalafuente. Esta cárcava no se ha restaurado, y cuenta en la parte superior con un rebollar natural. La pendiente en la zona es pronunciada, con zonas de 45% de pendiente en la zona degradada y pendientes más suaves en la zona correspondiente al roble.



Figura 4.11. Segunda de las cárcavas de estudio, cuyos ensayos fueron realizados en 2014.

## 4.7. Vegetación

Como se ha comprobado en los antecedentes, la vegetación es un factor muy influyente en la capacidad de infiltración (Martínez de Azagra y Navarro, 1996; Omuto *et al.*, 2008; Bedford *et al.*, 2007, en Campano-Fernández, 2012) ya que realiza una función protectora del suelo, aumentando la infiltración y evitando el avance erosivo.

### 4.7.1. Clasificación biogeográfica y bioclimática

El municipio de Saldaña de acuerdo con Rivas-Martínez (2007) se ubica en las siguientes unidades biogeográficas:

- Reino: Holártico.
- Región: Mediterránea.
- Subregión: Mediterránea Occidental.
- Provincia: Mediterránea Ibérica Occidental.
- Subprovincia: Carpetano Leonesa.
- Sector: Planileones.
- Distrito: Valdaviés.

A partir de los valores de temperaturas medias mensuales, media de las mínimas del mes más frío, media de las máximas del mes más frío e índice de termicidad, Rivas-Martínez, (1987) determina los pisos bioclimáticos correspondientes a la Región Mediterránea que se pueden observar en la siguiente Tabla:

Tabla 4.6. Pisos bioclimáticos de la Región Mediterránea (Rivas-Martínez, 1987, en Campano-Fernández, 2012).

Región mediterránea	
Crioromediterráneo	T<4°; m<-7°; M<0°; It<-30
Oromediterráneo	T 4 a 8°; m -7 a -41; M 0 a 2°, It -30 a 60
Supramediterráneo	T 8 a 13°; m -4 a -1°; M 2 a 9°; It 60 a 120
Mesomediterráneo	T 13 a 17°; m -1 a 4°; M 9 a 14°; It 210 a 350
Termomediterráneo	T 17 a 19°, m 4 a 10°; M 14 a 18°; It 350 a 740
Inframediterráneo	T>19°; m>10°; M>18°; It>470

Por tanto, se puede concluir que, en base a los datos climatológicos de la zona, ésta se encuentra en la región supramediterránea.

#### 4.7.2. Vegetación potencial

Se denomina vegetación potencial a la comunidad vegetal estable en un área dada, que representa la etapa última de la sucesión progresiva (Rivas-Martínez, 2007, en Campano-Fernández, 2012).

La vegetación está condicionada por diversos factores como las condiciones climáticas, la orografía, el suelo o el factor humano. Se denomina serie de vegetación a la unidad geobotánica sucesionista y paisajista que expresa todo el conjunto de comunidades vegetales o estadios que pueden hallarse en espacios teselares afines como resultado del proceso de la sucesión, lo que incluye lo mesológico, lo geográfico y lo florístico, tanto de la asociación representativa de la etapa clímax o cabeza de serie, como la vegetación correspondiente a las asociaciones iniciales o subseriales que puedan reemplazarla (Rivas-Martínez, 2007).

Las series de vegetación se diferencian atendiendo a su tipología y al paisaje que generan en varios grupos: climatófilas (aquellas que se encuentran en terrenos que sólo reciben agua procedente de las precipitaciones), las edafoxerófilas (desarrolladas sobre suelos xerofíticos) y las edafohigrófilas (desarrolladas sobre suelos azonales).

Cada región y piso bioclimático, anteriormente señalados, llevan asociados unas series de vegetación. Según el Mapa de series de vegetación de Rivas-Martínez (1987), la zona de estudio presenta como vegetación potencial la serie 18a: Serie supramediterránea carpetano-ibérica-alcarreña subhúmeda silicícola de *Quercus pyrenaica*. *Luzulu forsteri-Querceto pyrenaicae sigmetum*.

Las especies características de estas series son, entre otras: *Quercus pyrenaica*, *Genista florida*, *Genista cinerea*, *Adenocarpus complicatus*, *Pterospartum tridentatum*, *Erica australis* var. *aragonensis*, etc.

La etapa madura o clímax de estas series corresponde a robledales densos, bastante sombríos, creadores de tierras pardas con mull (*Quercus pyrenaica*).

Las etapas de regresión correspondientes a fases degradadas se corresponden a matorrales retamoides o piornales (*Genista florida*), que prosperan todavía sobre suelos mulliformes bien conservados y los brezales o jarales (*Erica australis* var. *aragonensis*, *Cistus laurifolia*), donde los suelos tienden a podzolizarse en mayor o menor medida por la influencia de una materia orgánica sin descomponer.

En los ombroclimas húmedos aparecen los brezales y la podsolización, que está muy amortiguada en los subhúmedos bajo jarales (Rivas- Martínez, 1987).

### 4.7.3. Vegetación actual

La vegetación actual en la zona restaurada es la desarrollada a partir de las repoblaciones forestales realizadas en la zona. Se trata fundamentalmente de coníferas del género *Pinus*, destacando fundamentalmente *Pinus sylvestris* en las laderas y cauces de las cárcavas. Por su parte *Pinus pinaster* y *Pinus radiata*, aparecen en zonas fundamentalmente de páramo, donde los procesos erosivos son menores. En cuanto a especies de hoja caduca, cabe destacar especies como *Populus nigra* y *Robinia pseudoacacia*, que se asientan fundamentalmente en cauces y cuñas de sedimentación. También aparecen especies como *Populus x euramericana*, *Ulmus minor* y *Ulmus laevis*, además de rebrotes de *Quercus pyrenaica*. Este último se presenta de forma natural en la segunda de las cárcavas de estudio, sobre un sotobosque de *Calluna vulgaris* y especies herbáceas.

En el estrato arbustivo de la zona restaurada aparecen especies como *Rubus ulmifolius*, *Crataegus monogyna*, *Cytisus scoparius* y *Prunus spinosa*. En cuanto al estrato herbáceo, se encuentra representado por numerosas especies que recubren el suelo formando un manto tupido en los cauces y disminuyendo su cobertura en las paredes de las cárcavas al empeorar las condiciones edáficas para su instalación.



Figura 4.12. Detalle de las zonas del estudio. Izquierda: Zona de bosque de pinar. Derecha: Zona de bosque de roble.

## 5. MATERIAL Y MÉTODOS

### 5.1. Material

#### 5.1.1. Infiltrómetro simple

El principio de funcionamiento de un infiltrómetro consiste en un cilindro abierto que se introduce suavemente en el suelo. Se somete a una carga de agua y se mide el volumen de este líquido que es drenado por unidad de tiempo, lo que constituye el término que se conoce como capacidad de infiltración (Martínez *et al.*, 1992).

En este estudio se utilizaron dos tipos de infiltrómetro:

- Un infiltrómetro construido en acero con los bordes del extremo inferior biselados para facilitar el clavado. Este cilindro presenta un diámetro de 30 cm y una altura de 25 cm.

Blanco (1999) establece que el cilindro de 40 cm no es aconsejable por los problemas que se derivan de su instalación. Sin embargo, los que dieron mejores resultados fueron los cilindros de 15,2 - 21,4 y 30 cm. De todos ellos elige los 2 últimos, por su mayor tamaño, para realizar un ensayo experimental con el objetivo de caracterizar la variabilidad de los resultados y estimar la precisión de las estimaciones en función del tamaño de los cilindros.



Figura 5.1. Infiltrómetro de acero.

- Un cilindro de metacrilato al que se le acopló una escala graduada con una precisión de 1mm, con el objetivo de establecer una correlación entre ambos cilindros. Este cilindro presenta unas dimensiones de 8 cm de diámetro y 22 cm de altura. El cilindro de metacrilato es resistente y transparente, por lo que permite conocer posibles incidencias ocurridas durante el experimento y medir la altura de agua con mayor precisión (Mongil *et al.*, 2012a, en Campano-Fernández, 2012).

Para proceder a su clavado en el suelo sin provocar roturas en el infiltrómetro, se acopla a un cilindro de metal de menor altura con el borde biselado, que se clava en primer lugar en el suelo y más tarde se acopla el cilindro de metacrilato. Este cilindro se encuentra en proceso de patente bajo el nombre de INFILTEST, por el Grupo de Hidrología y Conservación de la UCAV y la Unidad Docente de Hidráulica e Hidrología de la ETSIAA de Palencia. Se puede ver un detalle del mismo en la Figura 5.2.:



Figura 5.2. Infiltrómetro de metacrilato INFILTEST.

Las dimensiones y detalles del mismo pueden consultarse en Mongil *et al.* (2013).

### 5.1.2. Flotador

Para la toma de datos en el infiltrómetro de acero de 30 cm de diámetro se le acopló un flotador con una escala de precisión milimétrica que se sustenta con un puente que presenta un orificio en el punto medio de éste. De este modo, el flotador va bajando a la par que el agua se infiltra, proporcionando una lectura en la regla graduada que nos permite conocer la cantidad de agua que se va infiltrando a lo largo del tiempo.



Figura 5.3. Flotador y puente.

### 5.1.3. Mutímetro Aquaterr EC200:

Es un instrumento digital que mide la humedad, temperatura y salinidad. Está formado por una carcasa resistente y se monta sobre una piqueta de acero inoxidable de 75 cm, en la que se sitúa el sensor. El sensor tiene una longitud de 10 cm, de modo que la lectura que observamos en la pantalla nos muestra una media de los datos apreciados en toda la superficie del mismo.

Cabe destacar que este instrumento establece la medida de la humedad en función de la proporción de aire/agua del suelo, por ello, la compactación del suelo afecta a la lectura. El instrumento tiene un código de colores que da una aproximación del estado del suelo teniendo en cuenta el tipo de suelo que nos encontramos (arcilloso, limoso o arenoso).



Figura 5.4. Multimetro Aquaterr EC-200.

### 5.1.4. Medida de la densidad aparente

El material necesario para la medida de la densidad aparente fue:

- Anillos de un diámetro de 5,6 cm y una altura de 4 cm.
- Muestreador de acero en el que se introducen los cilindros para clavarlos en el terreno.
- Martillo.
- Estufa con termostato a 105°C.



Figura 5.5. Material necesario para la toma de muestras de densidad aparente.

### 5.1.5. Malla cuadrada

Para conocer el grado de cobertura, tanto vegetal como de elementos gruesos, se utilizó una malla de acero de 50x50 cm dividida en cuatro cuadrantes, de modo que al colocarla en el suelo nos facilita determinar el porcentaje de cobertura.



Figura 5.6. Malla cuadrada para medir la cobertura herbácea.

### 5.1.6. Otro material

- Maza y maderas:

La introducción del cilindro en el suelo se llevó a cabo con una maza con la cual se golpeaba una madera de 50 cm de largo, 20 cm de ancho y 10 cm de espesor.



Figura 5.7. Madera y maza.

- Mordaza:

Para la extracción de los cilindros una vez clavados se utilizó una mordaza.



Figura 5.8. Mordaza.

- Otro material:

- Tijeras.
- Cronómetro.
- Clinómetro.

## 5.2. Diseño experimental

### 5.2.1. Zonas de estudio

Puesto que uno de los principales objetivos de este estudio es completar el estudio anterior de infiltración realizado en 2012, van a describirse dos zonas de estudio en la misma zona de cárcavas: la primera zona, estudiada en 2012, y la segunda, estudiada en 2014.

#### 5.2.1.1. Primeras zonas de estudio

Aunque se estudió la infiltración también en una cuña de sedimentación, en este presente estudio nos centraremos en las áreas que vamos a comparar con las zonas medidas recientemente. Estas zonas son las siguientes:

- **Área degradada de la cárcava restaurada**

Se corresponde con la parte superior de las cárcavas. Cabe destacar que la pendiente de esta zona es muy alta, superando en muchos casos el 100%. El suelo se presenta prácticamente desnudo, pudiendo observar elementos vegetales muy aislados.



Figura 5.9. Zona degradada, en la parte superior de la cárcava.

Esta zona, en el presente estudio y de cara a los resultados, se llamará **ZONA 1: Área degradada de la cárcava restaurada.**

#### - Zona de Pinar

Esta zona restaurada dentro de la cárcava presenta unas pendientes pronunciadas que rondan el 70% (medidas con un clinómetro), fue medida en 2012 como parte del estudio de infiltración dentro de la cárcava restaurada. Además de la pendiente, otro factor que caracteriza la zona es la presencia de un abundante estrato arbóreo, cuya fracción de cubierta cubierta ronda el 100%. El suelo está cubierto por un tapiz herbáceo fuertemente mezclado con restos de hojarasca y otros tipos de materia orgánica procedentes del estrato superior.



Figura 5.10. Ladera en la que se desarrollaron los experimentos de la zona de pinar.

Esta zona, en el presente estudio y de cara a los resultados, se llamará **ZONA 3: Zona de bosque restaurada de pinar.**

### 5.2.1.2. Segundas zonas de estudio

Las segundas zonas de estudio han sido medidas en este año 2014, a lo largo de los meses de mayo y junio. En concreto, se ha medido la infiltración en las dos siguientes áreas:

- **Área degradada de la cárcava natural**

Esta zona se corresponde con el área degradada contigua a la zona restaurada con roble, de modo que pueda compararse la infiltración y las características del suelo entre las dos zonas degradadas y así poder establecer una comparación fiable entre la zona de pinar y roble. Al no encontrarse esta zona restaurada y para poder diferenciarla de la cárcava anterior, se ha decidido llamar a esta zona como **ZONA 2: Área degradada de la cárcava natural**.

En esta ocasión, la zona degradada cuenta también con una gran pendiente, pero en este caso algo menor que la de la primera zona.



Figura 5.11. Zona degradada contigua al robledal.

- **Robledal**

En la zona de robledal encontramos zonas de suave pendiente, cubiertas por roble melojo (*Quercus pyrenaica*) de baja altura con un sotobosque de regenerado de roble y *Calluna vulgaris*, así como especies herbáceas. La fracción de cabida cubierta ronda el 100%.



Figura 5.12. Zona de robledal.

A esta última zona se le ha designado como **ZONA 4: Zona de bosque natural de roble.**

## 5.2.2. Descripción de los experimentos

### 5.2.2.1. Introducción

Los experimentos se desarrollaron en dos partes. Por un lado, se resumirán los experimentos desarrollados en 2012 en el estudio anterior y cuyos datos van a volver a ser utilizados en este estudio y, por otro, se describirán los nuevos experimentos realizados en la nueva área degradada y en la zona de robledal.

En la primera parte realizada en 2012, se realizaron 4 ensayos pareados en cada zona (con ambos infiltrómetros), obteniendo 8 series de datos por zona. Todos los ensayos fueron realizados siguiendo la misma metodología, variando ciertos detalles entre los realizados con el infiltrómetro de acero (grande) y el de metacrilato (pequeño).

El tiempo de duración de cada ensayo puede ser variable, aunque se considera éste hasta que la infiltración quede estabilizada. Puesto que el tiempo de duración de cada ensayo no se rige por reglas, dependiendo ésta principalmente del tipo de suelo, los autores no se ponen de acuerdo en este aspecto, ya que mientras unos recomiendan una duración de 3 a 4 horas, otros reducen este tiempo a tan sólo 30 ó 40 minutos (Blanco, 1999).

Vivar (1993) prolonga sus ensayos con infiltrómetro de doble cilindro durante aproximadamente 3 horas; Bouwer (1982) considera que la duración de las mediciones se deben prolongar hasta que la tasa de infiltración llegue a ser constante y no expresa ningún tiempo mínimo para efectuar los ensayos; Cerdà (1995) utiliza este mismo criterio; Horton (1940) considera que se llega a la capacidad de infiltración constante o fija después de un intervalo de tiempo determinado, normalmente de 15 minutos a 3 horas, aunque usualmente se produce entre media hora y hora y media; Knoll *et al.* (1959) llena los cilindros con agua durante 48 horas para cerrar las grietas provocadas por la sequía y después realiza el ensayo durante un período de 2 horas.

En nuestro caso cada ensayo concluía al término de 4 horas, o cuando la tasa de infiltración final se estabilizaba en torno a un valor constante, es decir:

- Hay tres mediciones consecutivas en las que la tasa de infiltración es constante o,
- Durante la última media hora de medición la tasa de infiltración ha mostrado una dinámica estable, dejando de descender y estableciéndose una velocidad constante.

Cerdà (1995) determina la tasa de infiltración final como la media de las mediciones de los últimos 5 minutos de ensayo. En su estudio los ensayos tenían una duración de 60 minutos, por lo que en nuestro caso se ha determinado esta tasa como la media entre las mediciones de la última media hora de ensayo, teniendo en cuenta que la duración de nuestro ensayo es mucho mayor y con el objetivo de tomar en consideración un número mayor de puntos en los que la tasa de infiltración ya se ha estabilizado.

Los ensayos de cada zona se realizaron a una distancia menor de 10 metros entre infiltrómetros del mismo tamaño y menor de 1 metro entre infiltrómetro grande y pequeño.



Figura 5.13. Colocación de los infiltrómetros para la realización de un ensayo de infiltración en la zona de robledal.

Para la elección del punto de ensayo se localizaron pequeñas zonas donde poder introducir los infiltrómetros que presentaran una pendiente menor del 5%.



Figura 5.14. Realización de un ensayo de infiltración en la zona degradada de la cárcava natural.



Figura 5.15. Detalle de colocación de los infiltómetros por pares en el terreno de la cárcava natural.

En las mediciones específicas realizadas para este estudio, se han llevado a cabo los mismos experimentos y bajo las mismas premisas para estas dos nuevas zonas: el área degradada contigua al robleal y el robleal en sí. Del mismo modo, se han llevado a cabo 4 ensayos con cada tipo de infiltómetro, que unidos a los ensayos ya realizados anteriormente, suman el total de ensayos que puede verse en el esquema de la Figura 5.16.:



Figura 5.16. Esquema en el que se muestran los ensayos realizados.

### 5.2.2.2. Protocolo de medida de la infiltración

El protocolo de infiltración seguido se encuentra basado en el establecido por el Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad de Ávila, que puede verse en el *Anejo III: Protocolo de medida de infiltración del Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila*.

Los pasos a seguir fueron los siguientes:

- En primer lugar se procedió a la medida de al menos 5 puntos de humedad y temperatura de la zona colindante para determinar una media de la situación inicial del terreno. Para la medida de la humedad y de la temperatura se utilizó un multímetro Aquaterr EC-200.

- El infiltrómetro de acero se introdujo en el suelo 10 cm, mientras que el de metacrilato se introdujo entre 5-10 cm debido a la dificultad que se produce a la hora de clavarlo, derivada del material y la anchura del borde, al no encontrarse éste biselado. El eje del cilindro debe estar colocado perpendicular a la horizontal y no perpendicular al suelo, de modo que éste quede nivelado y la lámina de agua en su interior quede paralela al borde del mismo. Para la inclusión del cilindro se utilizó una madera apoyada en el cilindro, la cual se golpeó cuidadosamente con una maza, sobre todo en el de metacrilato al ser más frágil. La utilización de esta madera, además de no deformar el cilindro, nos permitió clavar de manera uniforme toda la superficie del anillo.



Figura 5.17. Clavado del cilindro.

- En zonas con elevada cobertura herbácea se eliminó parcialmente la parte superior de la cubierta vegetal para impedir que el flotador se sienta perturbado por ésta. Para ello se corta con unas tijeras la parte superior con cuidado de no alterar la estructura del suelo.



Figura 5.18. Eliminación parcial de la cobertura herbácea.

- Se realiza una pequeña zanja circular con ayuda de una azada alrededor del cilindro, de 10 cm de ancho y de 5 a 3 cm de alto, según la profundidad a la que se encuentre clavado el infiltrómetro. Esta zanja servirá para humedecer el contorno del infiltrómetro, con el fin de reducir el flujo lateral, como aconseja, por ejemplo, Harvey (1982).



Figura 5.19. Zanja alrededor del cilindro.

- A continuación se procede a la humectación de la zanja y al llenado de los infiltrómetros. Éstos se llenarán hasta dónde nos permita el flotador en los cilindros de acero y hasta el extremo superior en los de metacrilato. Se utilizó agua libre de sedimentos que fue transportada en garrafas de 5 litros. El llenado interior del cilindro se procedió a realizarlo de una manera rápida, para comenzar lo antes posible a tomar mediciones, pero intentando no modificar la estructura original del suelo por la interacción del chorro de agua.



Figura 5.20. Humectación de la zona contigua al cilindro.

- Se tomaron medidas del descenso de la lámina de agua dentro del cilindro cada 1 mm o cada 5 mm, dependiendo de la velocidad de infiltración observada. Puesto que el objetivo era obtener un número de puntos alto con un error del observador mínimo, se optó por anotar cada medición tomando como base 1 ó 5 mm de agua infiltrada y no un intervalo de tiempo concreto, como establece el protocolo propuesto por la Universidad de Ávila, porque de esta forma se comete un error menor: podemos conocer el tiempo en el cual se han infiltrado 5 mm, parando el cronómetro en el momento en que esto ocurre, pero si observamos la regla graduada cada x minutos, puede que ésta se encuentre en un punto intermedio entre dos graduaciones, cometiendo un error del observador mayor. Esta afirmación se apoya en que el error del instrumento de medición era de 0,5 mm y en el ensayo piloto quedó demostrado que esta altura de lámina de agua podía tardar varios minutos en descender esos 0,5 mm.



Figura 5.21. Detalle del flotador colocado en el puente.

- Al finalizar el ensayo se procede al vaciado del agua que haya podido quedar en el infiltrómetro para impedir la alteración de las zonas colindantes por el aporte descontrolado de agua del interior, modificando así la estructura del bulbo húmedo.

- Más tarde, se extrae el anillo con la ayuda de una mordaza para no modificar la estructura del suelo.

- Una vez extraído el anillo se hacen una serie de medidas de humedad en el bulbo húmedo, a 10 cm, 20 cm y 30 cm de profundidad y en la zona final del bulbo. Para realizar las mediciones fue necesario calibrar el instrumento. La calibración consistió en la introducción del sensor en un recipiente con agua y ajustar en la pantalla la humedad al 100%. A continuación se seca el sensor y se procede a la medición. En cada punto de medida se limpió y calibró el instrumento de cara a minimizar errores.



Figura 5.22. Detalle de la zona en la que se ha realizado el ensayo de infiltración tras retirar el cilindro, en un ensayo en la zona de bosque de pino (izquierda) y en la degradada de la cárcava restaurada (derecha).



Figura 5.23. Medición con Aquaterr EC-200.

-Terminado lo anterior se comienza a seccionar el bulbo húmedo. Se realiza con una azada un corte perpendicular al suelo que pase por el centro del círculo que ha dejado el cilindro. Las dimensiones del corte dependerán de la superficie del suelo que se ha humedecido por la presencia del anillo, pretendiendo alcanzar las zonas secas lateral y verticalmente, para poder observar la marca de humedad en la pared vertical. Esta marca nos proporciona información del comportamiento del agua en el suelo y, a través de ella, podemos determinar la distancia de penetración del agua durante el ensayo.

- Se recogen muestras de suelo de cada ensayo en las que se determinará la textura y el contenido de materia orgánica en laboratorio. Esto nos permitirá tener información detallada de cada ensayo.

- Por último, se procede a la recogida de una muestra de densidad aparente mediante el método de los cilindros.



Figura 5.24. Toma de una muestra de densidad aparente.

### 5.2.2.3. Determinación de la densidad aparente

La densidad aparente ( $\rho_a$ ) expresa la relación de la masa de suelos seca (partículas minerales y materia orgánica) por unidad de volumen total ( $V_t$ ) (volumen ocupado por los sólidos y volumen ocupado por poros).

La determinación de la densidad aparente del suelo está basada en dos mediciones:

- La masa de suelo seco ( $M_s$ ) de una muestra;
- El volumen total ( $V_t$ ) que ocupa la muestra.

El método utilizado es el del cilindro, tomando una muestra de suelo de volumen conocido. La técnica consiste en utilizar un muestreador, dentro del cual se encajan anillos de acero de un diámetro de 5,6 cm y una altura de 4 cm. Se golpea el muestreador con un martillo suavemente, a continuación se retira del suelo procurando que el anillo esté completamente lleno y se enrasa el cilindro con una navaja con el propósito de obtener una muestra de suelo de volumen conocido, tal como se encuentra en el campo (no disturbada). Esta muestra se seca en estufa a 105°C durante 24 h para obtener la masa de suelo seco ( $M_s$ ) (Lampurlanés y Cantero, 2002).

Los análisis se hacen a partir de la siguiente expresión

$$\partial a = M_s/V_t$$

Donde:

$\partial a$  es la densidad aparente en  $g/cm^3$ .

$M_s$  es la masa del suelo seca a 105°C.

$V_t$  es el volumen del cilindro donde se tomo la muestra del suelo en  $cm^3$ .

## 5.3. Metodología

### 5.3.1. Análisis de las diferencias entre zonas

#### 5.3.1.1. Análisis de la varianza (ANOVA)

Este punto consiste en realizar una serie de análisis de varianza y análisis multifactorial de la varianza (ANOVA) para las variables de estudio (zona, textura, contenido en materia orgánica, relación C/N, humedad), con el fin de determinar qué factores tienen un efecto estadísticamente significativo en la tasa de infiltración.

También se analizan las interacciones significativas entre los factores tomados dos a dos.

Las tablas ANOVA descomponen la variabilidad de las variables de estudio en las aportaciones debidas al factor tasa de infiltración. Los p-valores determinan la importancia estadística de cada uno de los factores para un nivel de confianza del 95,0%. Estas tablas y su interpretación se recogen en los resultados del estudio.

Sobre los factores que se manifiesten estadísticamente significativos, se podrá realizar un Test de Rango Múltiple, que estudiará las diferencias existentes entre pares de medias de los valores de cada variable en cada uno de los valores que adopta el factor (método utilizado para discernir entre las medias es el procedimiento de las menores diferencias significativas de Fisher LSD). Esta diferencia corroborará que el factor es significativo y proporcionará una clasificación en grupos más o menos homogéneos de los distintos valores del factor. Con este método, existe un 5 % de riesgo de considerar cada par de medias como significativamente diferentes cuando la diferencia real es igual a 0.

### 5.3.1.2. Análisis de componentes principales (ACP)

Mediante el Análisis de Componentes Principales podrán establecerse clases de infiltración en función de las características del suelo, de modo que sea posible predecir el comportamiento de un suelo frente a la infiltración conociendo propiedades del mismo tales como su densidad, contenido en materia orgánica o textura.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística que pretende sintetizar la información aportada mediante la denominada reducción de las dimensiones (número de variables). Es decir, ante una base de datos con muchas variables, el objetivo será reducirlas a un menor número perdiendo la menor cantidad de información posible (Terrádez, 2014).

Los nuevos componentes principales, que se denominarán factores, serán una combinación lineal de las variables originales, y además serán independientes entre sí. Un aspecto clave en ACP es la interpretación de los factores, que vendrá determinada por la relación de los factores con las variables iniciales a través de la magnitud de las correlaciones.

La tarea Análisis de Componentes Principales consiste en realizar una transformación lineal que selecciona un nuevo sistema de coordenadas para el conjunto original de datos, en el cual, la varianza de mayor tamaño del conjunto de datos es representada en el primer eje (Primer Componente Principal o Factor 1), la segunda varianza más grande en el segundo eje (Segundo Componente Principal o Factor 2), y así sucesivamente (Terrádez, 2014).

Para llevar a cabo esta transformación lineal debe construirse la matriz de covarianzas o matriz de coeficientes de correlación, donde se representa la relación lineal entre cada una de las variables consideradas (variables activas), expresada con valores que varían de 0 (ninguna relación) a 1 (diagonal principal, indica la relación de cada variable consigo misma). Se considera que dos variables están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores equivalentes de la otra.

Una vez construida la matriz de coeficientes de correlación y tomándola como base, se determinarán los valores propios, que permitirán contemplar de una manera global la precisión de los cálculos. Debido a la simetría de esta matriz, se conocen todos los vectores propios de la misma (aquellos en los que se puede variar su magnitud sin modificar su dirección). Modificar la magnitud supone multiplicar la magnitud inicial de los vectores propios por un factor, que se denominará valor propio.

En función de los valores propios se determinará cuántos Componentes Principales o Factores son necesarios para explicar los datos de partida con una probabilidad determinada.

Mientras mediante la tarea anterior se establece el número de Componentes Principales o Factores que van a explicar la información existente con una probabilidad determinada, la siguiente tarea consiste en caracterizar dichos Factores, es decir, describir qué variables son las que mejor caracterizan los datos.

Para ello hay que analizar las coordenadas, que tomarán valores entre 1 y -1, de cada una de las variables (principalmente de las variables activas) sobre los ejes, o lo que es lo mismo, sobre los Factores. Coordenadas próximas a 1 o a -1 indican que las variables describen perfectamente dicho Factor, mientras que coordenadas próximas a 0, indican lo contrario, que no existe relación entre variable y Factor. Una vez conocidas las variables que caracterizan a la muestra inicial de datos, iremos agrupando de forma jerárquica estos elementos de modo que se minimice una determinada función objetivo. Esta función objetivo, en este caso, corresponde a las distancias euclídeas al cuadrado.

Este sistema de jerarquización busca grupos homogéneos con la varianza intergrupual grande y la varianza intragrupal pequeña. En el proceso de creación de grupos hay que tener en consideración que a medida que se van formando grupos, estos son menos homogéneos, es decir, las distancias para las que se forman los grupos iniciales son menores que las de los grupos finales, pero la estructura en conjunto se va mostrando más clara. Los grupos finales que se van a considerar en el estudio se denominarán clases.

El sistema de representación de este método jerárquico de carácter aglomerativo es el gráfico clúster, que permite visualmente diferenciar los distintos grupos que se van formando. A continuación, en la Figura 5.25. se muestra un ejemplo de gráfico clúster.

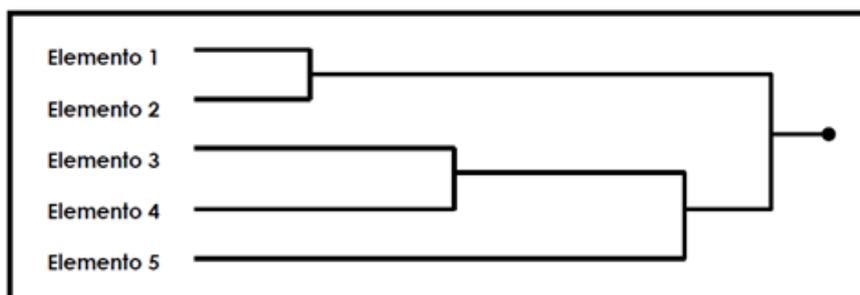


Figura 5.25. Ejemplo de gráfico clúster (Modificado de Ruiz-Legazpi, 2010).

El gráfico clúster es una herramienta muy eficaz para la determinación de las clases, pues muestra claramente el punto a partir del cual las distancias entre grupos crecen exponencialmente. Ese punto es el que marcará la división, y determinará las clases finales, que serán aquellas que quedan por debajo de la línea de corte.

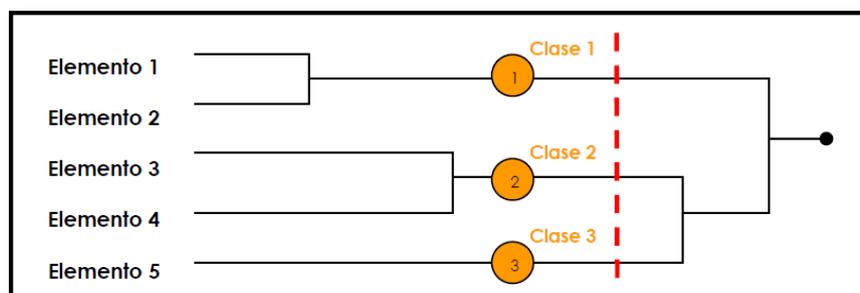


Figura 5.26. Determinación de clases mediante gráfico clúster (Modificado de Ruiz-Legazpi, 2010).

Determinadas las clases, se podrán definir sus centros (centros de clase o centros de gravedad) que caracterizan al prototipo de infiltración de dicha clase.

Una vez fijadas las clases y sus centros, se recomienda realizar un reajuste de los grupos mediante el procedimiento de análisis de K-medias (centros móviles), que consiste en, basándose en los centros ya determinados, y de manera iterativa, ir recalculando grupos en función de la distancia entre ellos hasta que llegue un punto en que en cualquier reasignación de los grupos se produzca un incremento de la variabilidad interna (intragrupal) o un descenso de la diferenciación externa (intergrupal). En ese preciso momento se detiene la iteración y los grupos serán los definitivos sobre los que se calculen las clases y las coordenadas de sus centros de gravedad (Terrádez, 2014).

Reajustados los grupos, se tienen las clases definitivas, de manera que se podrá proceder a caracterizar cada una de ellas tanto cuantitativa como cualitativamente. Dicha caracterización consiste en definir qué datos conforman cada clase, y qué variables las identifican. Finalmente toda esta información se reúne y se muestra en el diagrama de clases.

De modo resumido, las tareas a realizar en esta parte se muestran en el esquema de la Figura 5.27.:

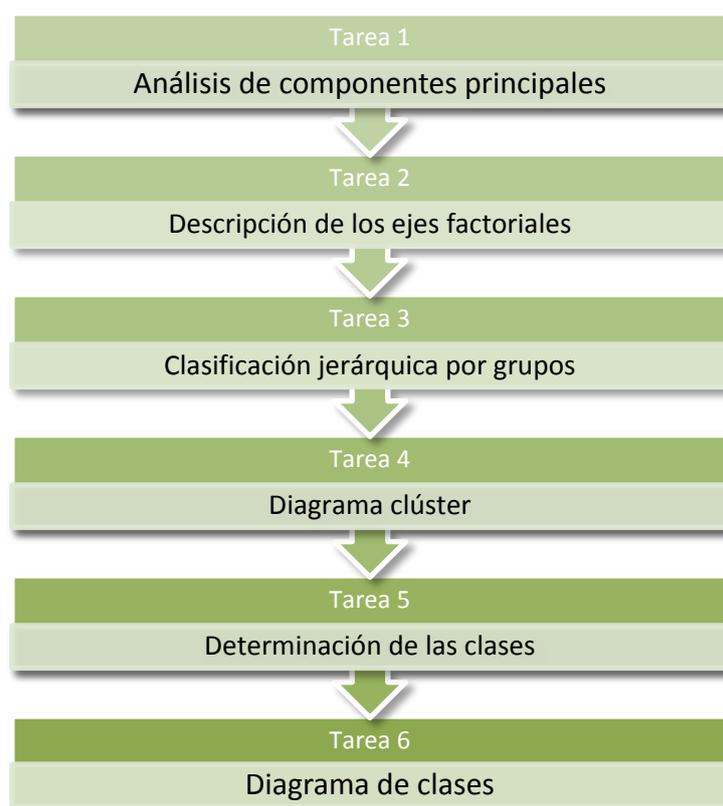


Figura 5.27. Tareas a realizar para la determinación de clases de infiltración en función de las distintas variables de las que depende.

### 5.3.2. Grupo hidrológico del suelo

Para la aplicación práctica del método del Número de Curva (SCS, 1956), se establecen cuatro tipos o grupos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico. La clasificación original de los suelos se debe a Musgrave (1955), y posteriormente se han ido modificando las definiciones y delimitaciones (entre otros: NRCS, 1985; SSDS, 1993; NRCS, 2002; NRCS, 2007).

A partir de la tasa de infiltración medida, se asignará a cada suelo de estudio un grupo hidrológico de suelo, que podrá ser (Mongil *et al.*, 2012b):

- **Grupo A.-** Suelos con bajo potencial de escurrimiento aún cuando estén húmedos. Tienen menos del 10% de arcilla y más del 90% de arena y/o gravas. De texturas arenosas o de gravas, pueden tener texturas más finas si el suelo presenta una buena estructura de agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos. La conductividad hidráulica a saturación de todos los horizontes es mayor de 144 mm/h, si la capa impermeable se halla a más de 50 cm o el nivel freático se halla a más de 60 cm. Suelos de más de 100 cm de profundidad deben tener una conductividad hidráulica a saturación mayor de 36,1 mm/h.
- **Grupo B.-** Suelos con moderada capacidad de infiltración cuando están saturados. Tienen de un 10 a un 20% de arcilla y de un 50 a un 90% de arena. Son de texturas franco-arenosa o arenoso-franca, y con texturas más finas si la estructura presenta buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos. La conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable en una profundidad hasta 50 cm está entre 36,1 y 144 mm/h. La profundidad a una capa impermeable es mayor de 50 cm o el nivel freático se halla a más de 60 cm. Suelos de más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación mayor de 14,5 mm/h en todo el perfil, pero menor de 36,1 mm/h.
- **Grupo C.-** Suelos con escasa capacidad de infiltración una vez saturados. Tienen de un 20 a un 40% de arcilla y menos de 50 % de arena. Son de textura franca, franco-limosa, franco-arcillo-arenosa, franco-arcillosa y franco-arcillo-limosa; con texturas arcillosas, arcillo-limosas y arcillo-arenosas, si la estructura presenta buenos agregados, baja densidad aparente y/o más del 35% de fragmentos rocosos. La conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable en una profundidad hasta 50 cm está entre 3,6 y 36,1 mm/h. La profundidad a una capa impermeable es mayor de 50 cm o el nivel freático se halla a más de 60 cm. Suelos de más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación mayor de 1,5 mm/h en todo el perfil, pero menos de 14,5 mm/h.

- **Grupo D.**- Los suelos de este grupo tienen un elevado potencial de escorrentía cuando están completamente saturados de humedad. El movimiento del agua a través del suelo es limitado o muy limitado. Tienen más de un 40% de arcilla y menos de un 50 % de arena. Son de textura arcillosa. Pueden tener un alto potencial de expansión-contracción. Tienen una profundidad menor de 50 cm a la capa impermeable o menos de 60 cm al nivel freático. Para suelos con una capa impermeable a una profundidad entre 50 y 100 cm la conductividad hidráulica a saturación del horizonte más impermeable está por debajo de 3,6 mm/h. Suelos de más de 100 cm de profundidad hasta el nivel freático o la capa impermeable deben tener una conductividad hidráulica a saturación menor de 1,5 mm/h en todo el perfil.

### 5.3.3. Correlación entre métodos

Para el estudio de la correlación entre métodos se aplicará un análisis de regresión, de cara a estudiar si es posible predecir una medida basándonos en el conocimiento de otra.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 6.1. Introducción

Como se ha comentado anteriormente, los ensayos fueron llevados a cabo en dos años diferentes. Por un lado, en un estudio anterior realizado por el mismo alumno y bajo la supervisión del mismo tutor, se estudiaron, entre otras, dos zonas, correspondientes a una zona de cárcava donde se había llevado a cabo una restauración con la introducción de pinar. Estas dos primeras zonas, medidas en el año 2012, se corresponden con la cárcava restaurada y con el bosque restaurado con pinar. Cabe destacar que durante ese estudio se midió en una tercera zona, una cuña de sedimentación de un dique construido para la restauración, que se usará en el apartado 6.5. *Comparación entre ambos métodos de medición de la infiltración.*

Por otro lado, en este presente estudio y por tanto en el año 2014, se ha procedido a la realización de distintos ensayos en una zona próxima a la anterior, midiendo la infiltración en una zona de cárcava que llamaremos “natural” para diferenciarla de la cárcava restaurada y en una zona de bosque natural de roble situado sobre la misma.

En ambos casos se ha procedido a la realización de ensayos de infiltración como se muestra en el protocolo que puede verse en el punto 5.2.2.2, utilizando dos tipos de infiltrómetros de anillo: de 30 cm de diámetro y de 8 cm de diámetro.

Los primeros ensayos fueron realizados entre el 20 y el 29 de junio de 2012, y en el segundo caso se procedió a la medición entre el 30 de mayo y el 15 de junio de 2014. En ambos casos, en el tiempo transcurrido entre los últimos cuatro días de mediciones no existió una variación climática importante, por lo que se obtuvieron unos rangos de humedad del suelo similares dentro de cada zona.

La fecha elegida debía estar comprendida entre los meses en los que las heladas no fueran muy fuertes, ya que la temperatura edáfica afecta a la infiltración (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Otro factor que se tuvo en cuenta a la hora de determinar las fechas fue la ausencia de lluvia en los días de ensayo, ya que ésta puede perturbar la lámina de agua del cilindro durante el ensayo.

Las condiciones previas del terreno donde se desarrollaron los ensayos se muestran a continuación:

Tabla 6.1. Condiciones previas de cada zona de estudio. Se han calculado la humedad (en porcentaje) y temperatura (en grados centígrados) medias con un intervalo de confianza del 95%.

Zona	Humedad	Temperatura edáfica	Pendiente	Cobertura
1.Cárcava restaurada	21,78±1,46%	26,30±0,37°C	120%	Desnudo, herbácea < 5%
2.Cárcava natural	23,40±2,10%	24,15±0,56 °C	100%	Desnudo, herbácea < 5%
3.Bosque restaurado	28,94±0,78%	20,20±0,47°C	70%	Herbácea y restos vegetales 100%
4.Bosque natural	31,15±1,35%	19,25±0,16 °C	55%	Herbácea y matorral bajo 100%

Podemos observar que en todas las zonas la humedad edáfica presentó valores muy bajos, por lo que cabía esperar que la tasa de infiltración inicial medida fuera muy aproximada a la real.

Además, a pesar de que se ha medido en dos años diferentes, como se explica en 5. *Material y Métodos*, se ha buscado que las fechas de medición fuesen similares y bajo condiciones de tiempo atmosférico parecidas, de modo que los valores de Temperatura y Humedad edáfica fueran análogos entre las zonas de cárcava y entre las zonas de bosque, permitiéndonos así establecer comparaciones entre las mismas.

## 6.2. Medidas de las propiedades del suelo

En cada zona se han determinado las propiedades del suelo tales como densidad aparente, textura, contenido en materia orgánica y relación carbono/nitrógeno. La forma de obtención de estos datos se ha mostrado en material y métodos.

Los resultados de estos parámetros se muestran a continuación:

### 6.2.1. Relación carbono/nitrógeno

Tabla 6.2. Relación carbono/nitrógeno de cada zona de estudio.

Zona	Relación C/N
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	8,22
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	4,65
Zona 3: Bosque restaurado de pinar	20,20
Zona 4: Bosque natural de roble	13,56

### 6.2.2. Contenido en materia orgánica del suelo

Los resultados del contenido en materia orgánica del suelo se muestran en la Tabla 6.3.:

Tabla 6.3. Contenido de materia orgánica en porcentaje del suelo en cada ensayo de infiltración.

Zona	Ensayo	Infiltrómetro 8cm	Infiltrómetro 30cm
		Mat. orgánica	Mat. orgánica
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	1	0,26	0,00
	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	1	0,00	0,00
	2	0,00	0,00
	3	0,00	0,00
	4	0,00	0,00
Zona 3: Bosque restaurado de pinar	1	3,45	0,62
	2	1,18	1,14
	3	1,23	0,29
	4	0,82	0,82
Zona 4: Bosque natural de roble	1	2,21	2,61
	2	2,54	1,74
	3	1,75	2,79
	4	1,81	2,55

### 6.2.3. Densidad del suelo

Los valores de densidad obtenidos en el suelo tras cada ensayo de infiltración se muestran en la Tabla 6.4.:

Tabla 6.4. Mediciones de densidad de los suelos bajo los distintos ensayos de infiltración.

Zona	Ensayo	Infiltrómetro	Densidad aparente g/cm <sup>3</sup>
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	1	30 cm	1,56
	2	30 cm	1,85
	3	30 cm	1,51
	4	30 cm	1,71
	1	8cm	1,65
	2	8cm	1,85
	3	8cm	1,80
	4	8cm	1,73
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	1	30 cm	1,89
	2	30 cm	1,96
	3	30 cm	1,89
	4	30 cm	2,00
	4	8cm	2,02
	2	8cm	1,96
	3	8cm	2,00
	4	8cm	2,02
Zona 3: Bosque restaurado de pinar	1	30 cm	1,58
	2	30 cm	1,86
	3	30 cm	1,62
	4	30 cm	1,56
	1	8cm	1,53
	2	8cm	1,78
	3	8cm	1,56
	4	8cm	1,56
Zona 4: Bosque natural de roble	1	30 cm	1,51
	2	30 cm	1,23
	3	30 cm	1,56
	4	30 cm	1,32
	1	8cm	1,51
	2	8cm	1,23
	3	8cm	1,56
	4	8cm	1,32

#### 6.2.4. Textura

Los valores de textura, que se mostraron en la descripción del suelo, son los siguientes:

Tabla 6.5. Textura del suelo según los sistemas ISSS y USDA. Valores en porcentaje.

Zona	ISSS			USDA			Textura USDA
	arcilla	limo	arena	Arcilla	Limo	Arena	
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	40,31	25,76	33,93	40,31	36,01	23,68	Arcillosa
	43,68	24,00	32,32	43,68	30,43	25,89	
	41,68	29,00	29,32	41,68	34,03	24,29	
	55,68	22,00	22,32	55,68	31,25	13,07	
	41,68	28,00	30,32	41,68	34,83	23,49	
	43,68	24,00	32,32	43,68	30,43	25,89	
	55,68	28,00	16,32	55,68	26,44	17,88	
	55,68	22,00	22,32	55,68	31,25	13,07	
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	44,84	22,16	33,00	44,84	28,73	26,43	Arcillosa
	48,84	21,88	29,28	48,84	27,71	23,45	
	48,84	21,88	29,28	48,84	27,71	23,45	
	37,84	27,88	34,28	37,84	34,70	27,46	
	44,84	22,16	33,00	44,84	28,73	26,43	
	31,84	30,16	38,00	31,84	37,72	30,44	
	37,84	27,88	34,28	37,84	34,70	27,46	
	38,32	25,68	36,00	38,32	32,84	28,84	
Zona 3: Bosque restaurado de pinar	30,88	18,28	50,84	30,88	28,40	40,72	Franco-arcillosa
	24,88	15,28	59,84	24,88	27,19	47,93	
	29,88	17,28	52,84	29,88	27,79	42,33	
	27,68	18,00	54,32	27,68	28,81	43,51	
	34,88	18,28	46,84	34,88	27,60	37,52	
	26,88	15,28	57,84	26,88	26,79	46,33	
	43,88	17,28	38,84	43,88	25,01	31,11	
	27,68	18,00	54,32	27,68	28,81	43,51	
Zona 4: Bosque natural de roble	13,36	37,88	48,76	13,36	47,58	39,06	Franca
	15,28	31,88	52,84	15,28	42,39	42,33	
	15,36	30,88	53,76	15,36	41,58	43,06	
	22,36	27,68	49,96	22,36	37,62	40,02	
	16	32,68	51,32	16,00	42,89	41,11	
	15,46	25,68	58,86	15,46	37,39	47,15	
	13,34	28,88	57,78	13,34	40,38	46,28	
	12,36	24,44	63,2	12,36	37,01	50,63	

### 6.3. Medidas de infiltración

En este apartado se muestran los resultados de las medidas de infiltración tomadas en campo, para cada ensayo e infiltrómetro.

De forma gráfica pueden verse, para cada uno de los 4 ensayos con cada infiltrómetro en las 4 zonas, la tasa de infiltración para cada intervalo, la tasa de infiltración media y acumulada para cada ensayo, y una comparación de los ensayos realizados en la misma zona. Además, se han comparado las zonas similares entre sí.

La presentación de resultados se estructura como puede verse en el siguiente esquema:

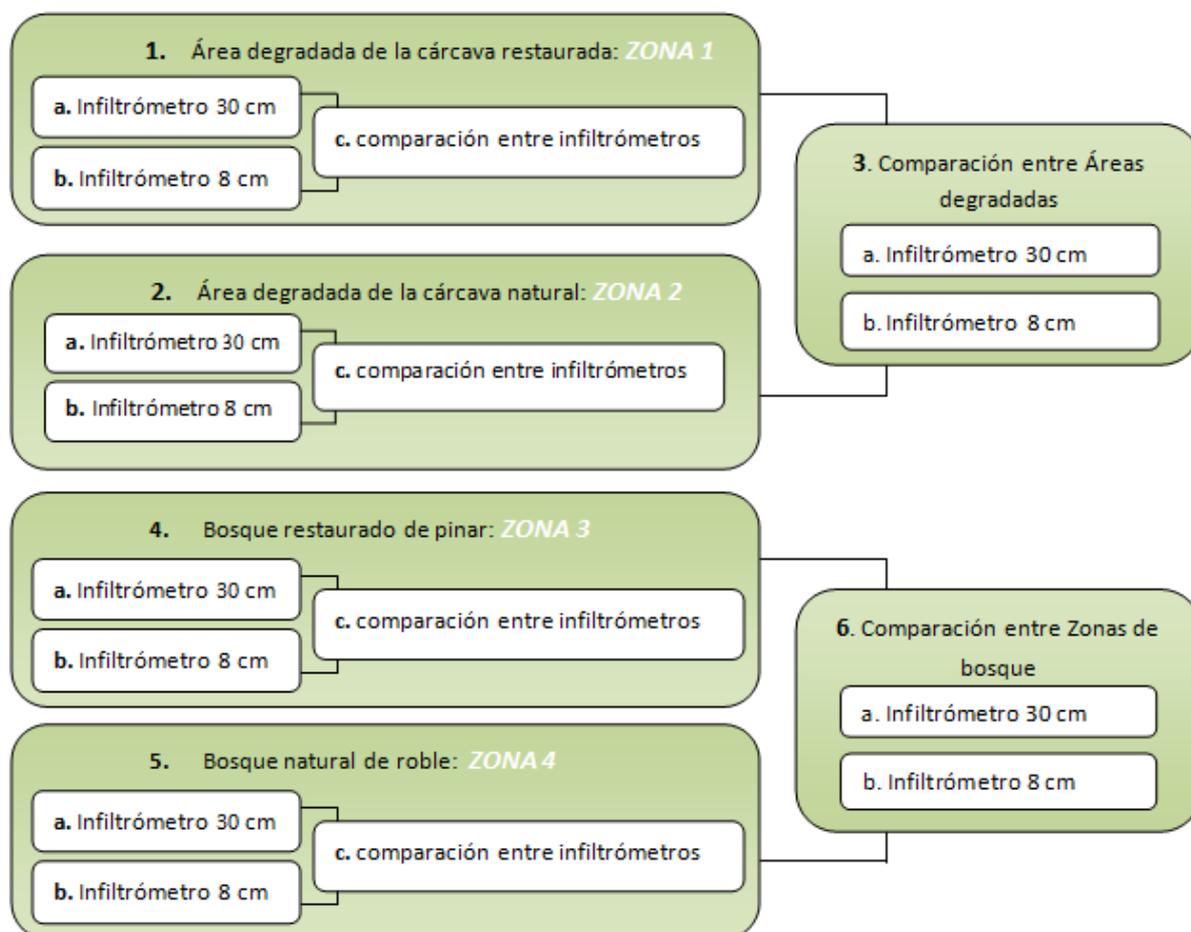


Figura 6.1. Esquema que muestra la forma en la que se estructuran los resultados a continuación.

#### 6.3.1. Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada

Las gráficas de infiltración obtenidas para los ensayos realizados en la zona degradada dentro de la cárcava restaurada de muestran a continuación. Estos datos pueden verse de forma detallada en el *Anejo V: Datos medidos en campo*.

a) Infiltrómetro de 30 cm

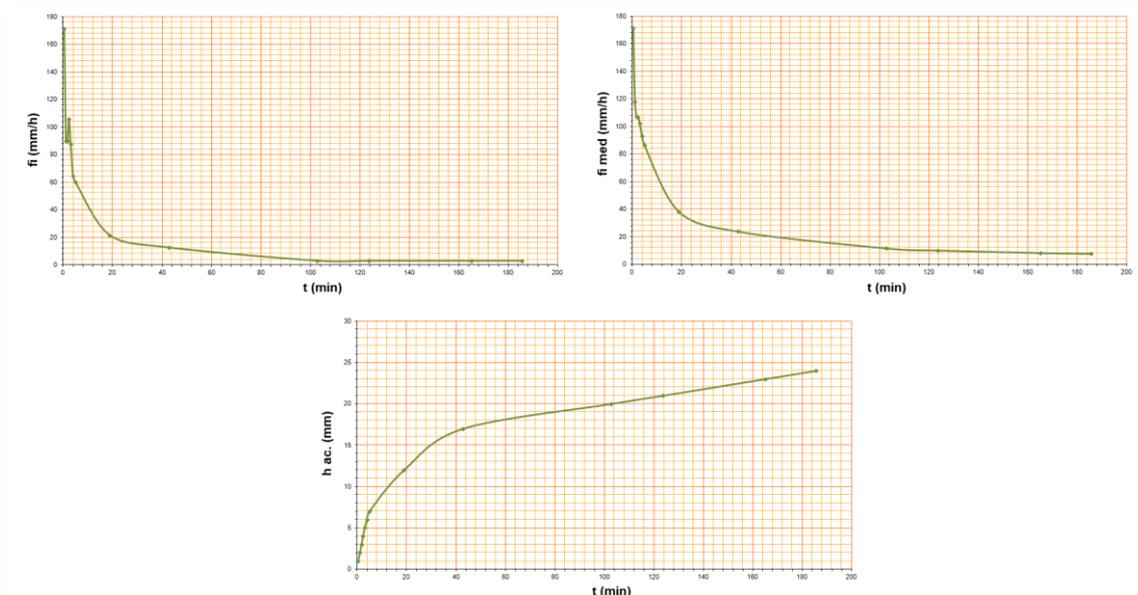


Figura 6.2. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 1 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

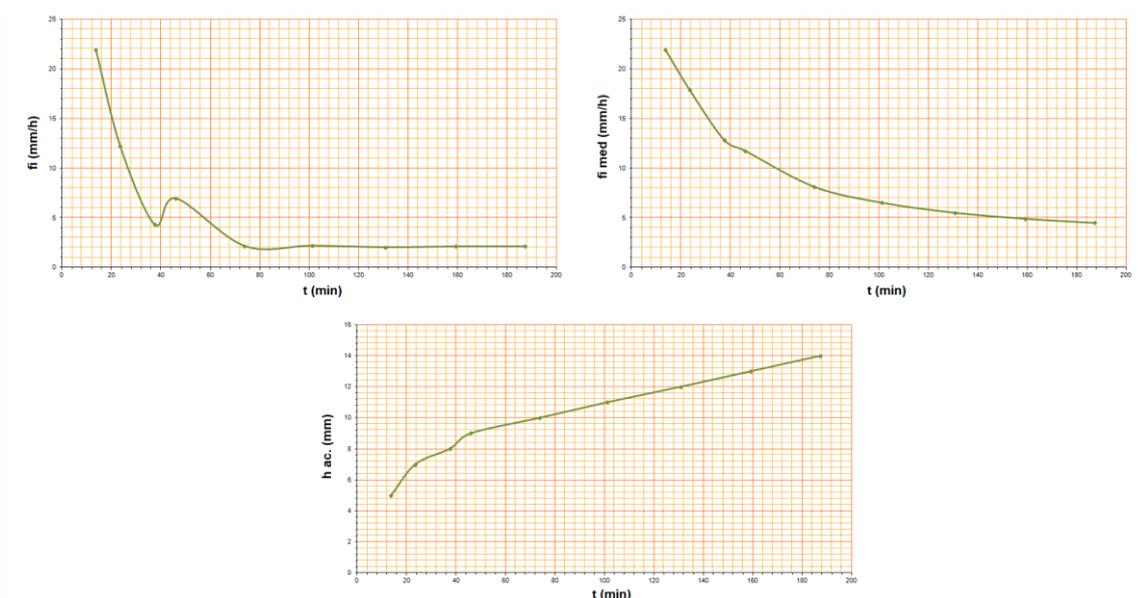


Figura 6.3. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 2 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

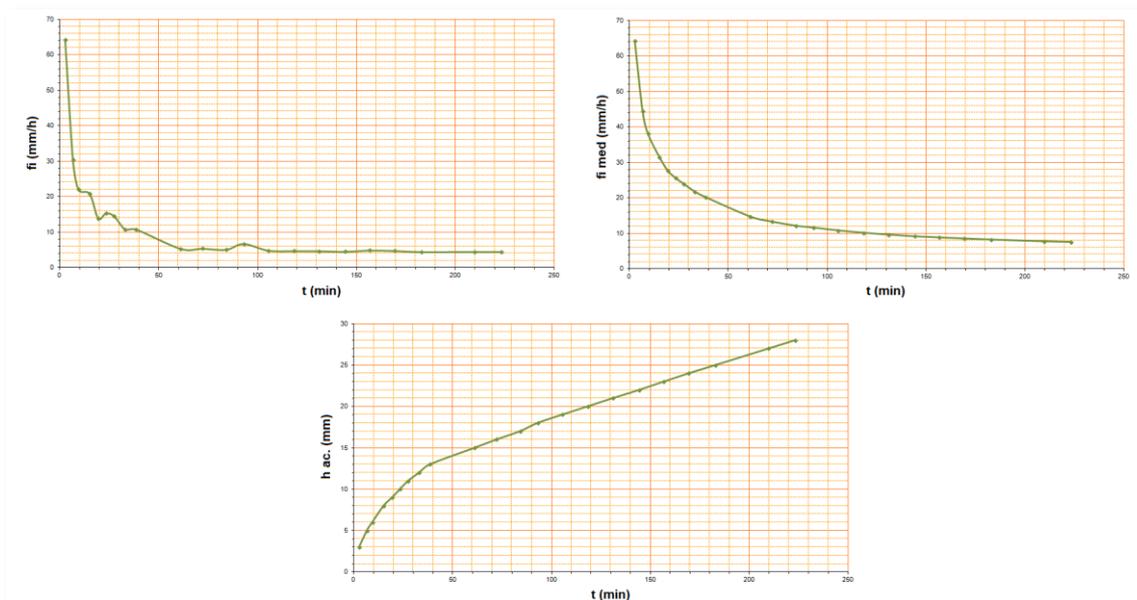


Figura 6.4. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

Los datos del cuarto ensayo con el infiltrómetro de 30 cm en esta zona no se muestran al ser incoherentes, probablemente debido a la presencia de grietas bajo la zona de ensayo, por lo que se ha decidido desechar este ensayo.

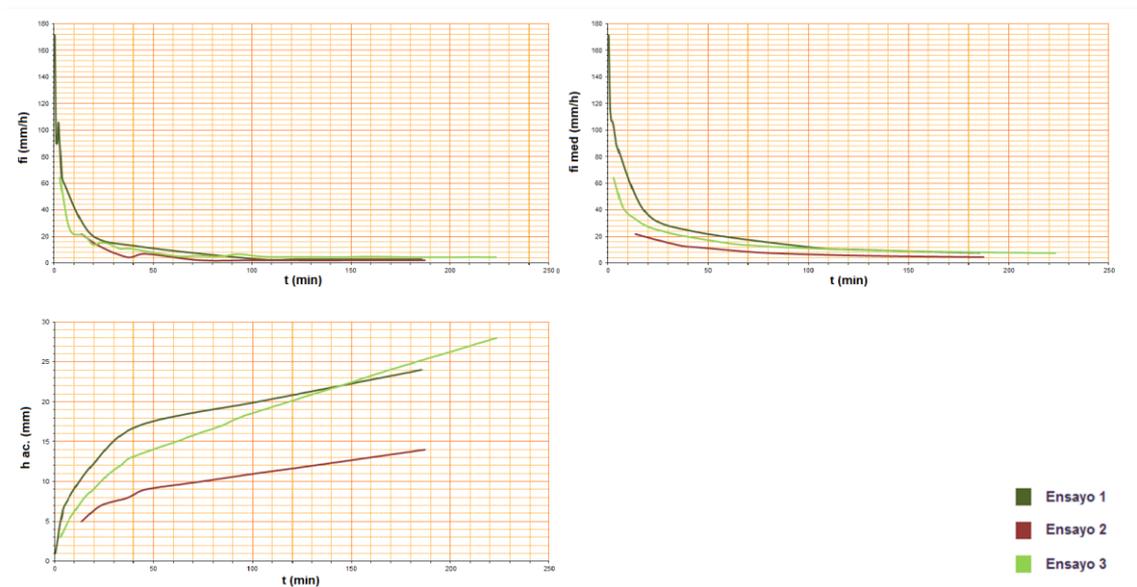


Figura 6.5. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

**b) Infiltrómetro de 8 cm**

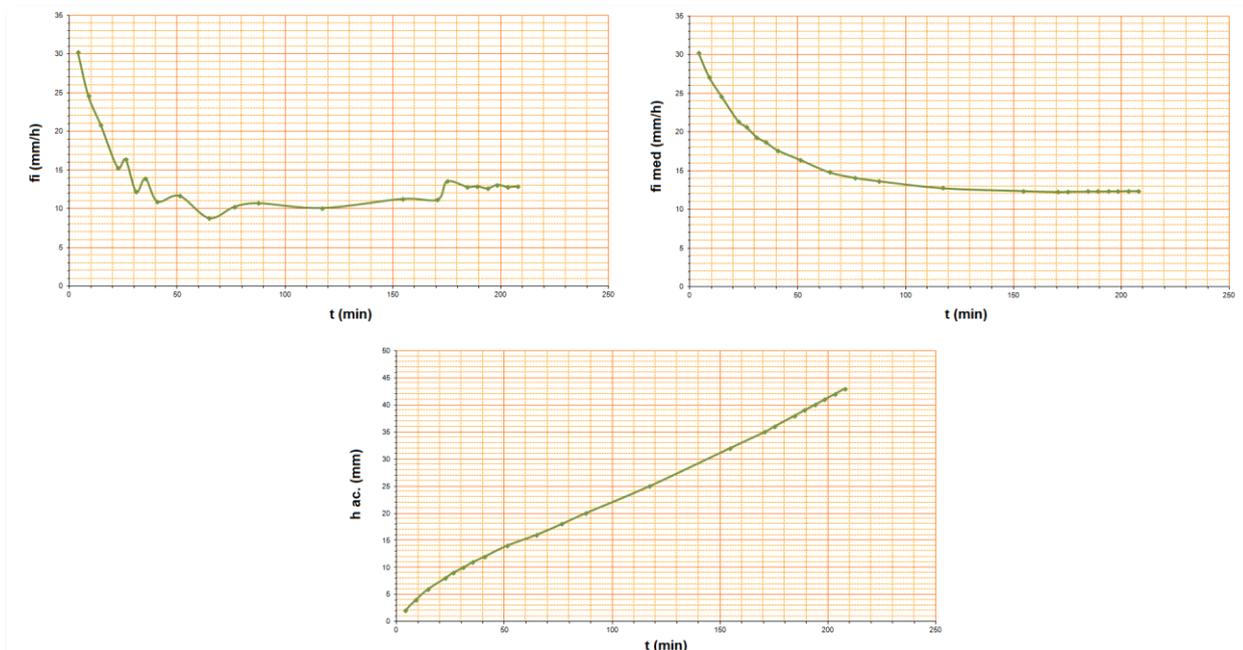


Figura 6.6. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

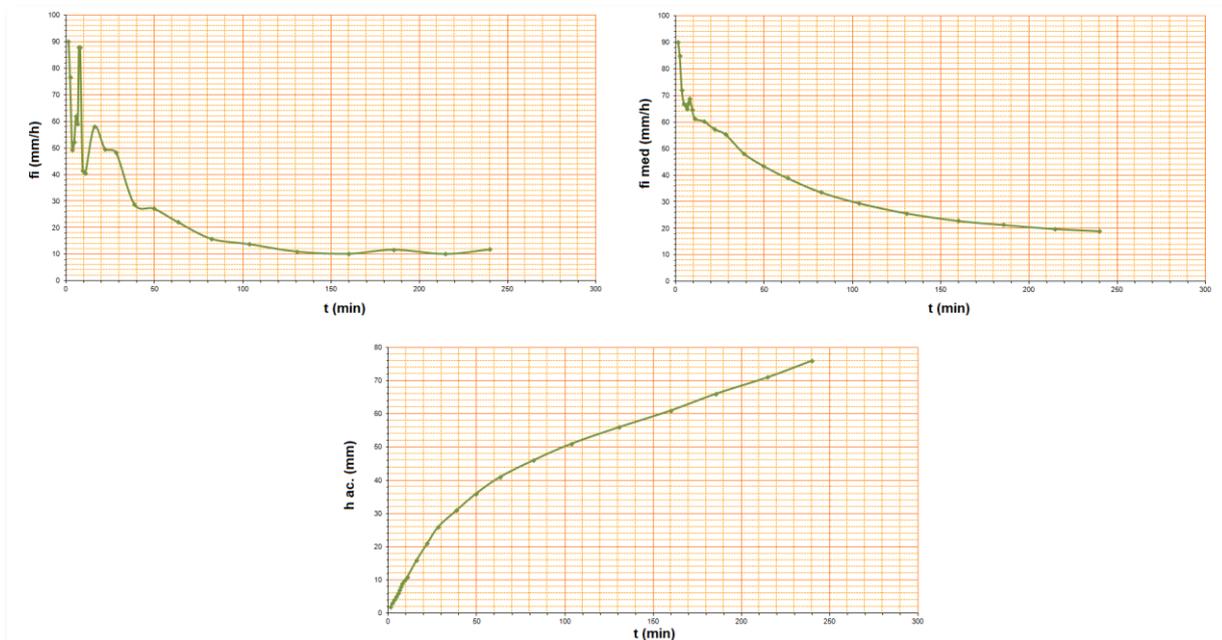


Figura 6.7. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

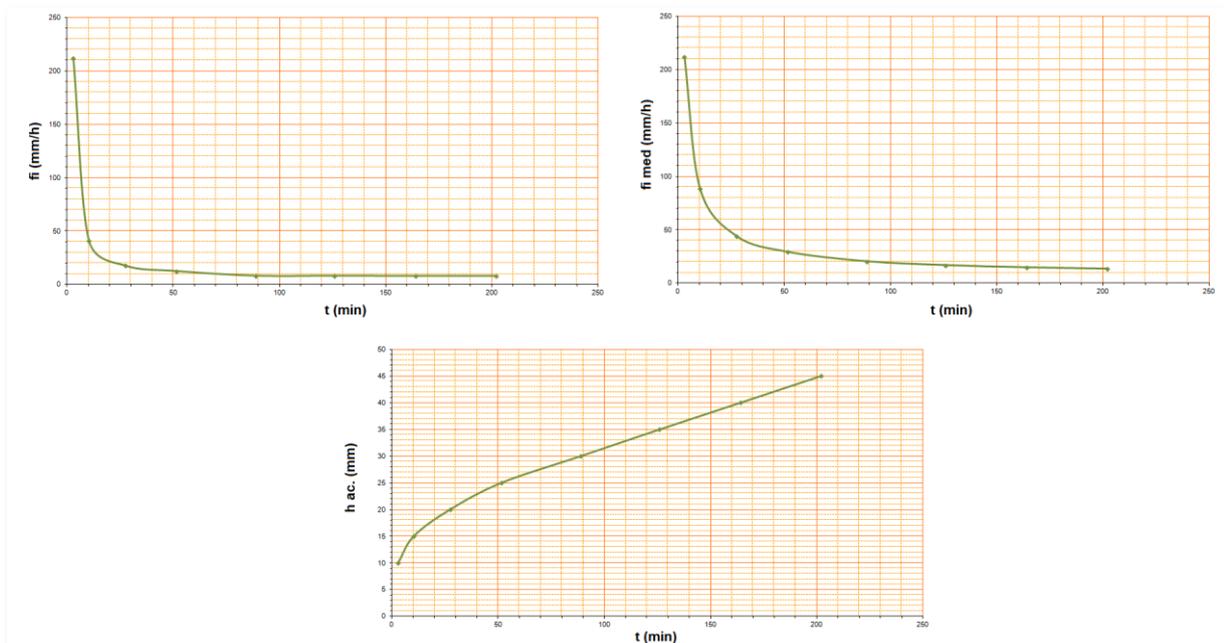


Figura 6.8. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

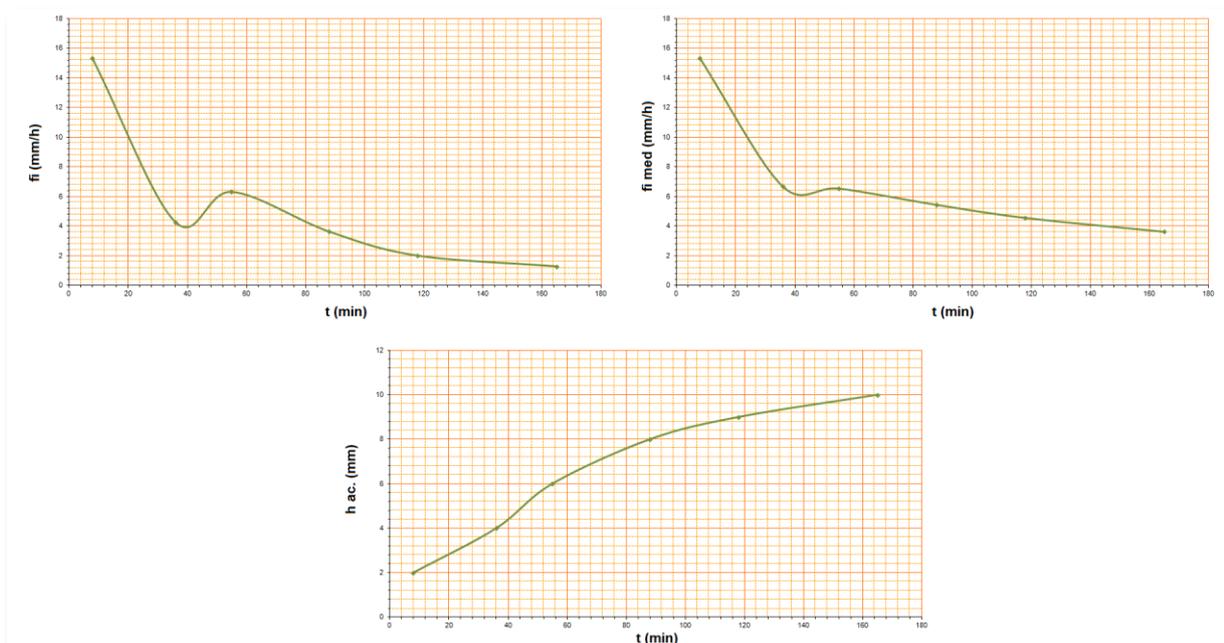


Figura 6.9. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 4 de la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

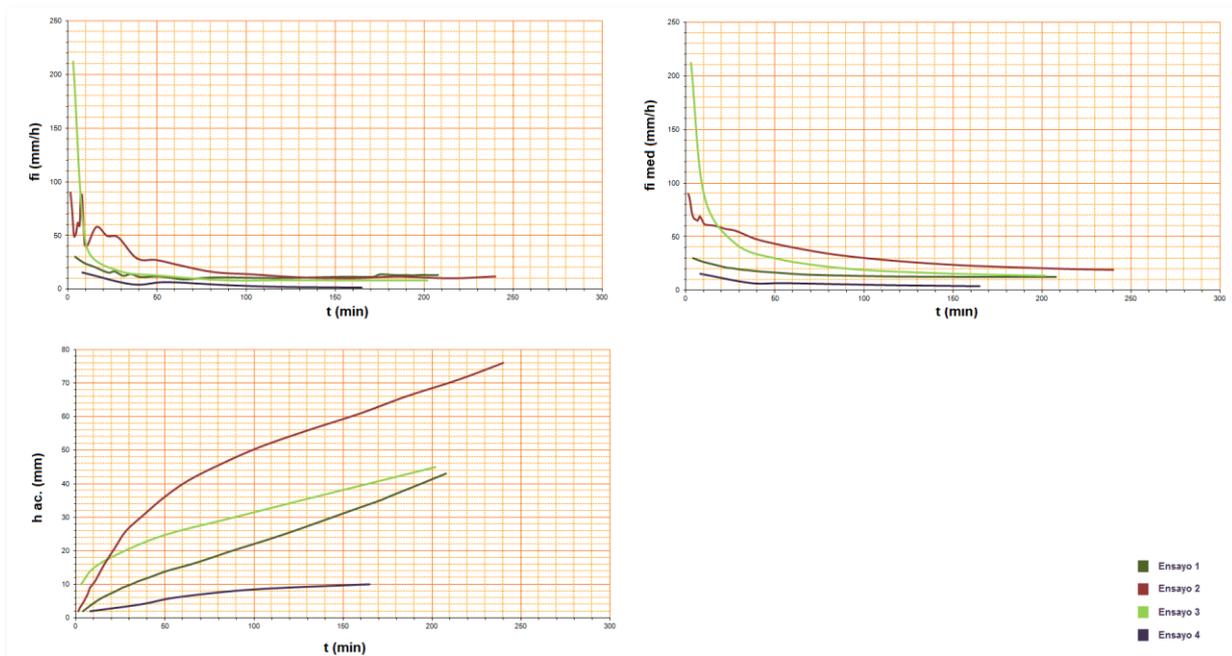


Figura 6.10. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

### c) Comparación entre infiltrómetros

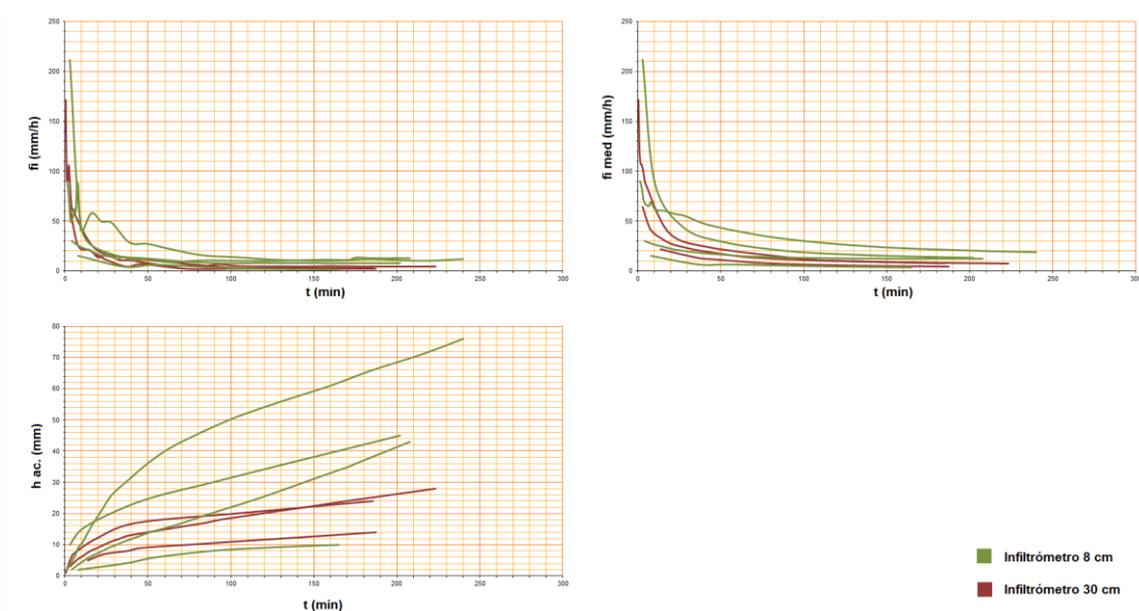


Figura 6.11. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 1 (área degradada de la cárcava restaurada) con los 2 tipos de infiltrómetros utilizados en el estudio.

### 6.3.2. Zona 2: Área degradada de la zona de cárcava natural

#### a) Infiltrómetro de 30 cm

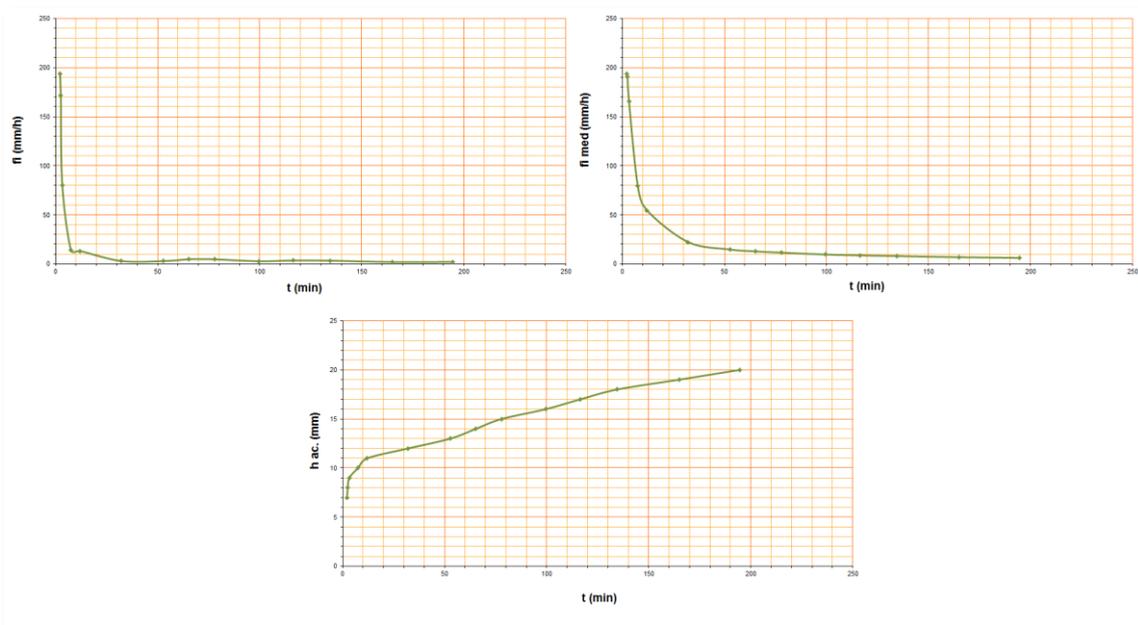


Figura 6.12. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

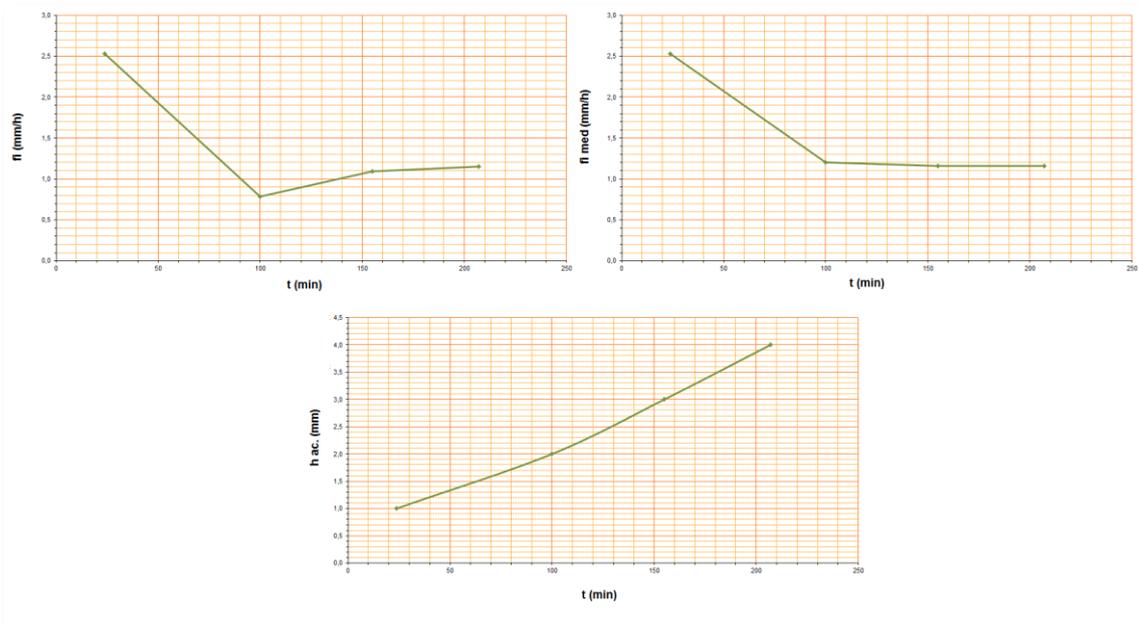


Figura 6.13. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

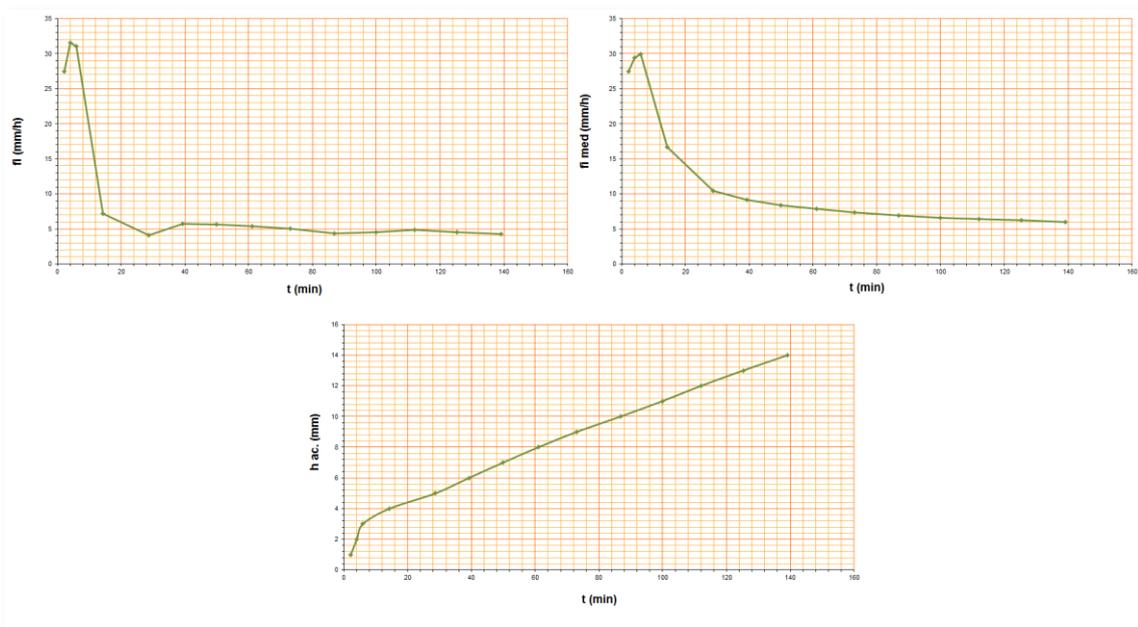


Figura 6.14. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

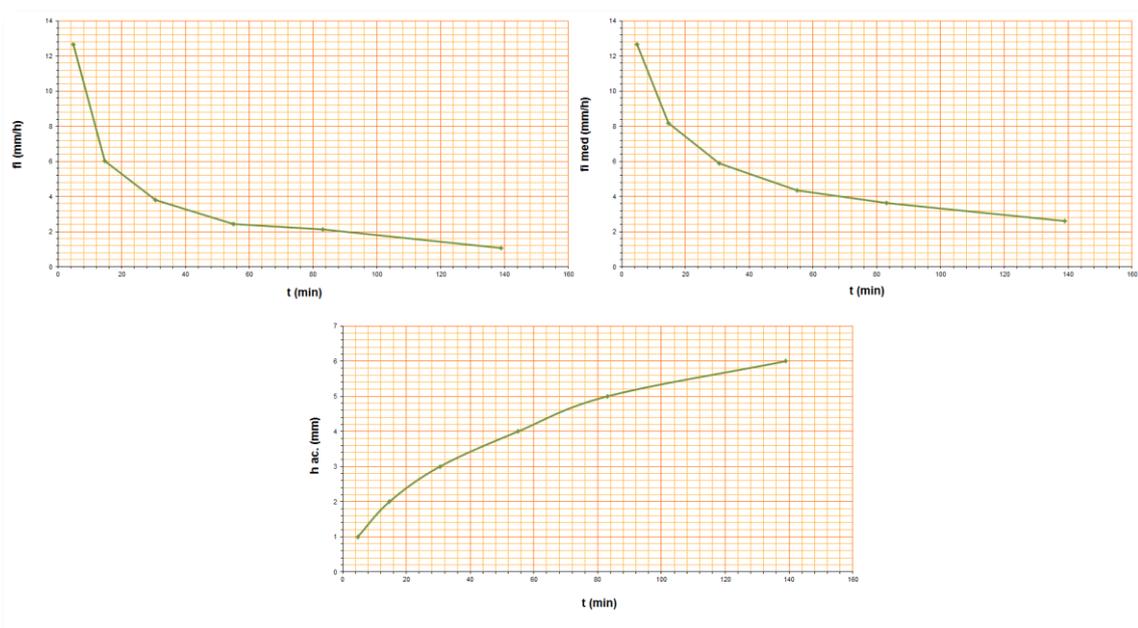


Figura 6.15. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 4 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

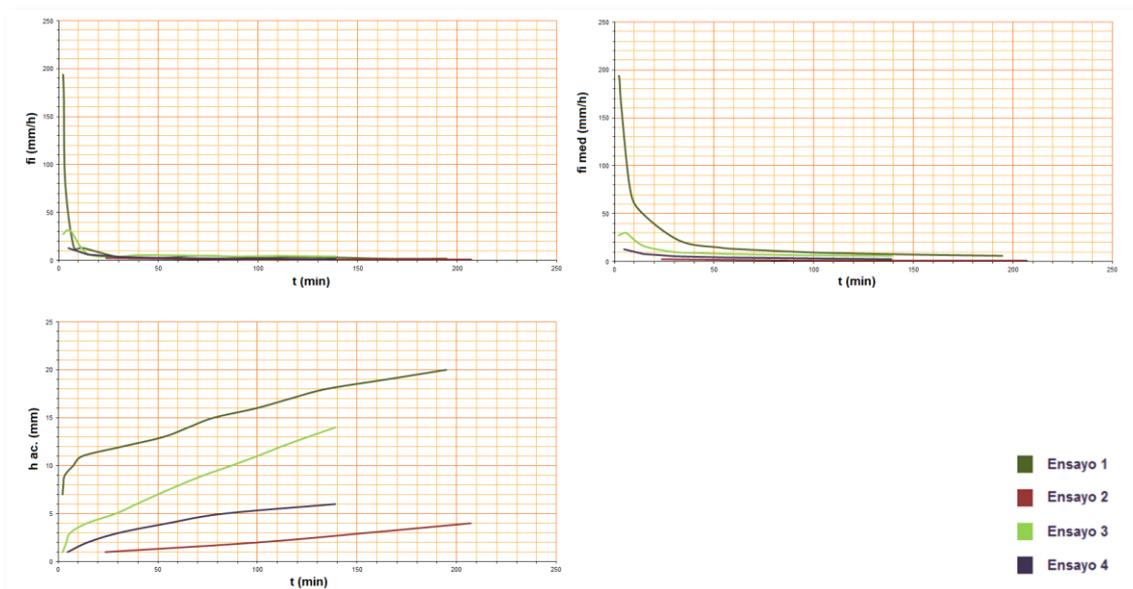


Figura 6.16. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

### b) Infiltrómetro de 8 cm

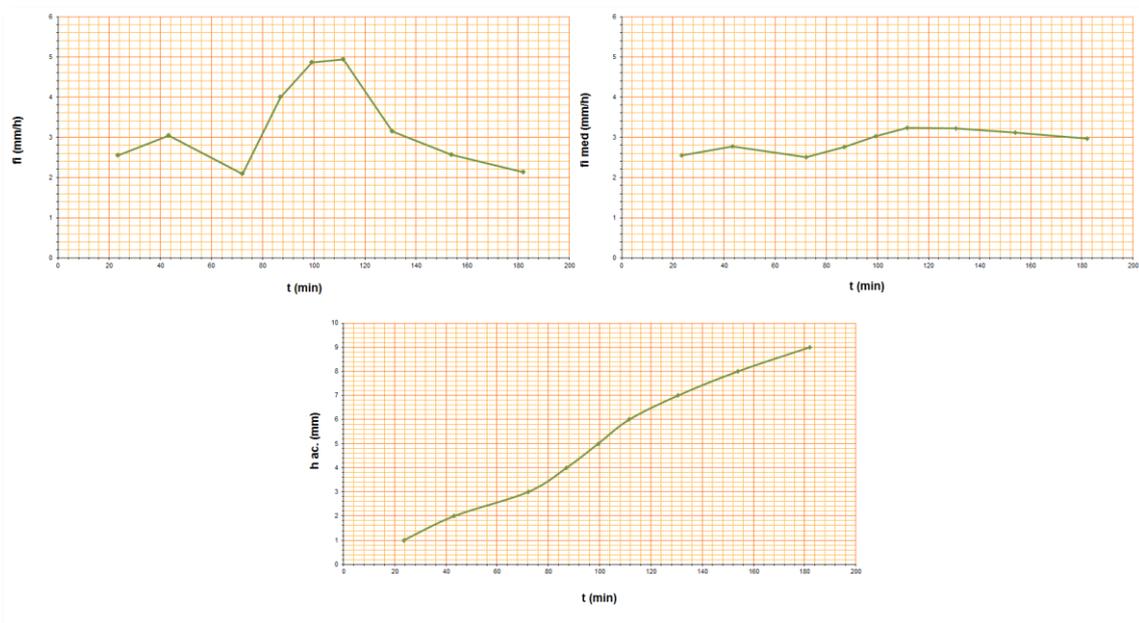


Figura 6.17. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

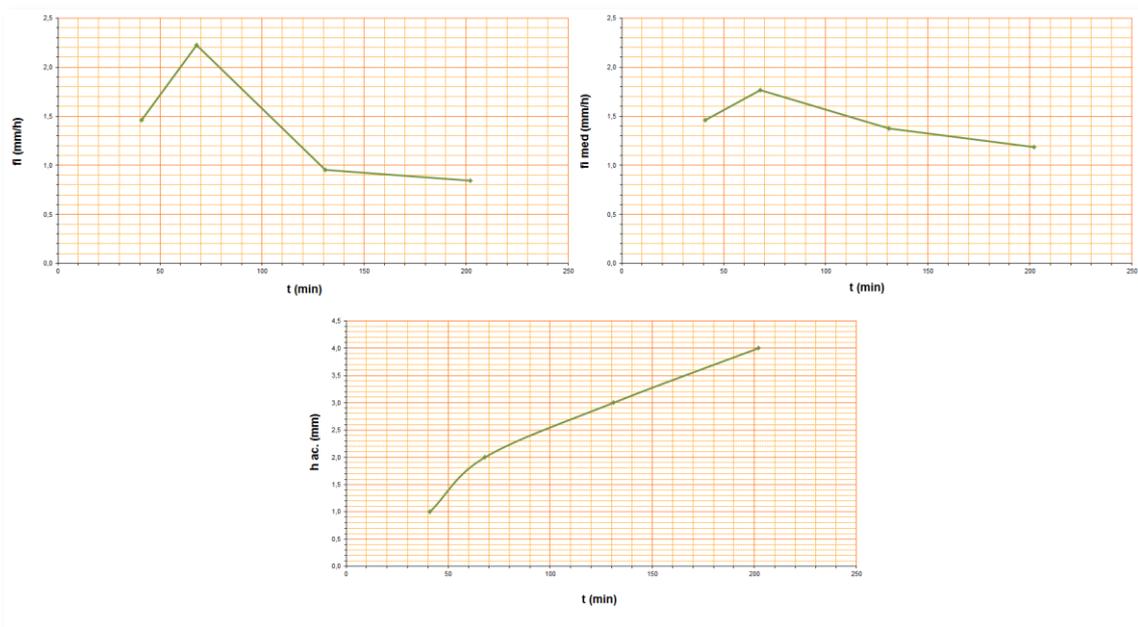


Figura 6.18. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

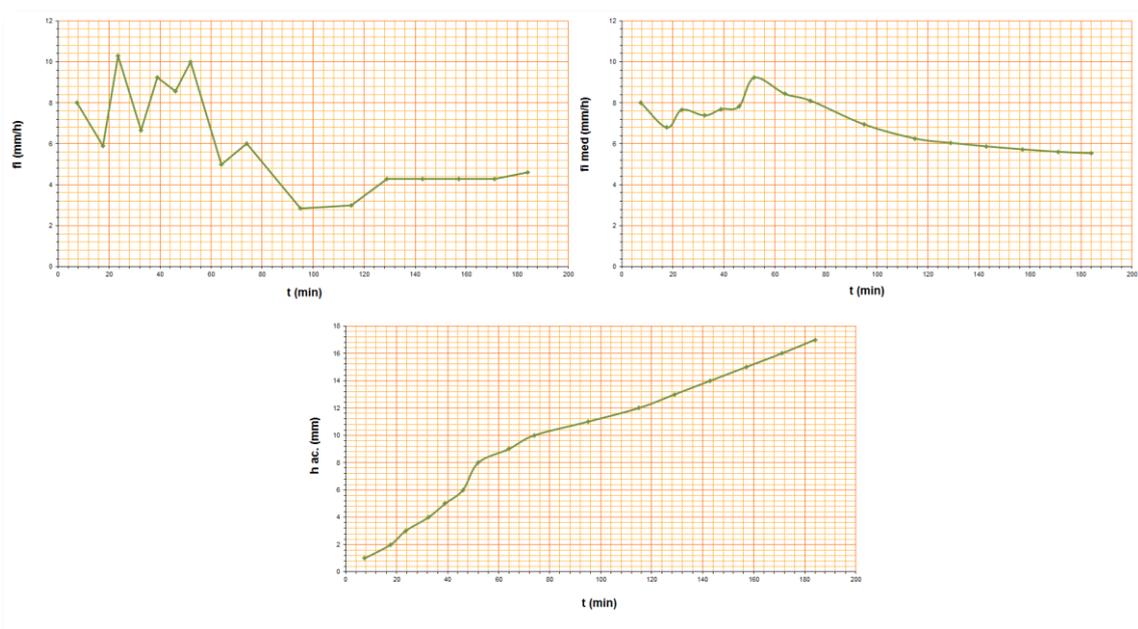


Figura 6.19. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

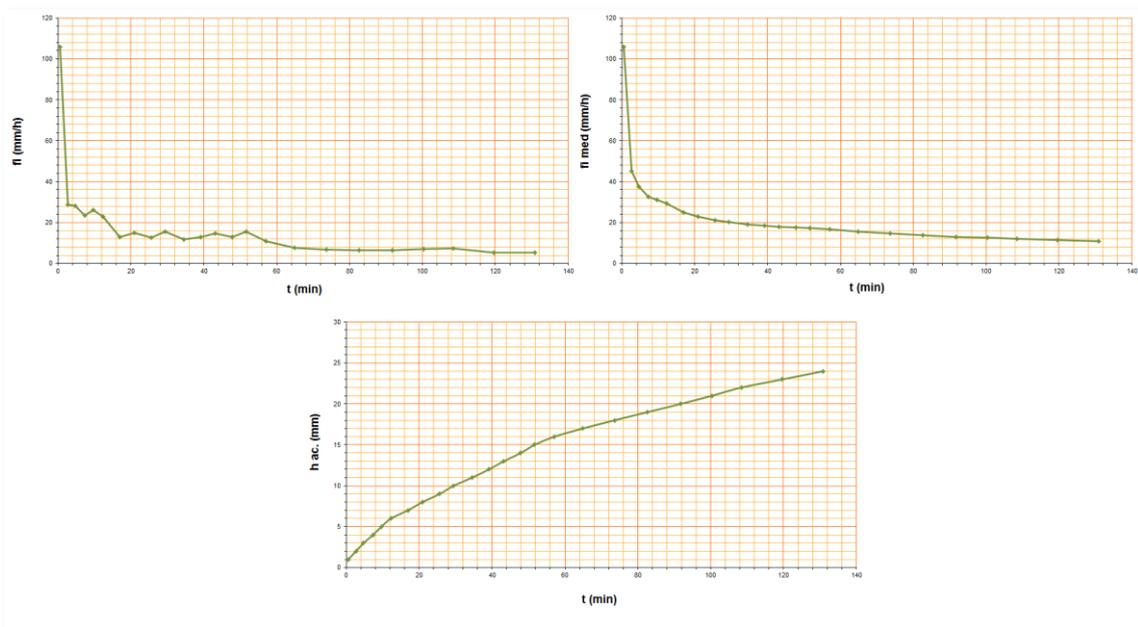


Figura 6.20. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 4 de la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

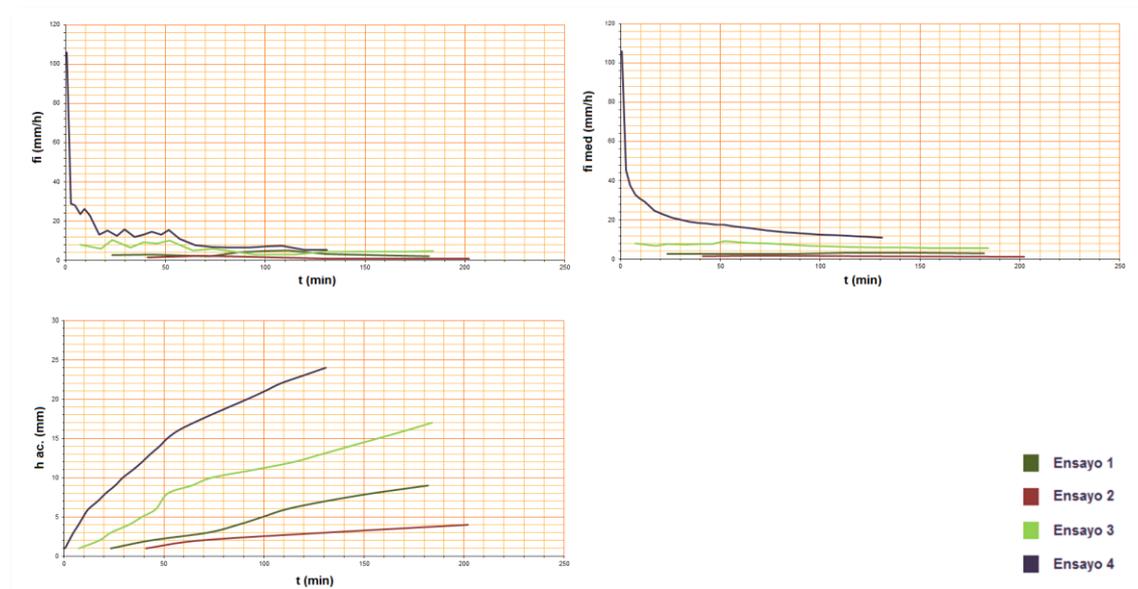


Figura 6.21. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

### c) Comparación entre infiltrómetros

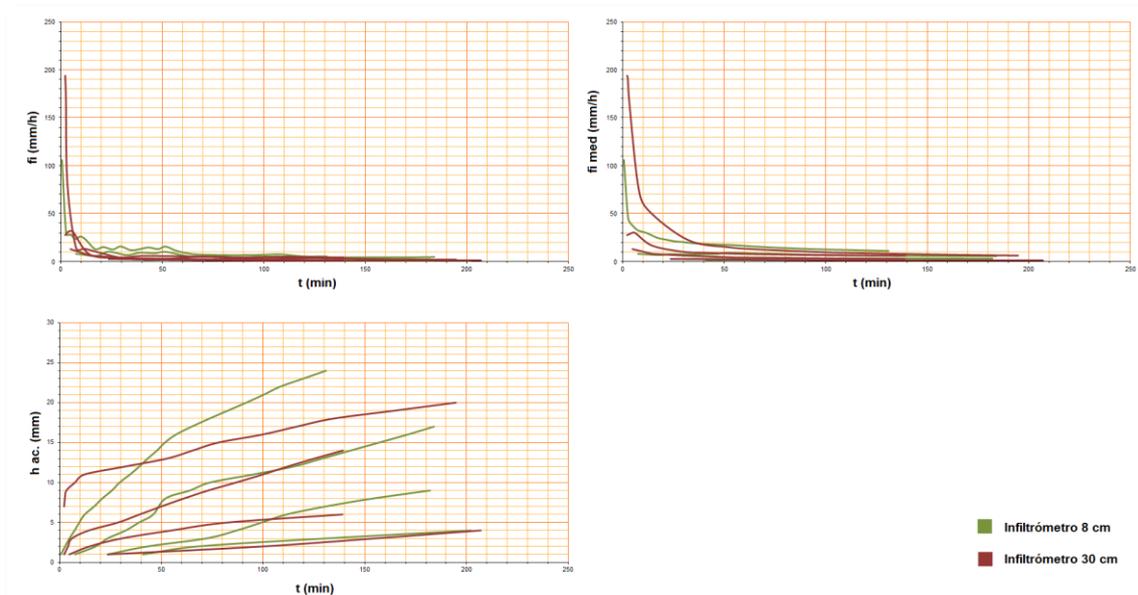


Figura 6.22. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_{i\ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h\ ac.$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 2 (área degradada de la cárcava natural) con los 2 tipos de infiltrómetros utilizados en el estudio.

### 6.3.3. Comparación entre las áreas degradadas de ambas zonas de cárcava (Zonas 1 y 2)

#### a) Infiltrómetro de 30 cm

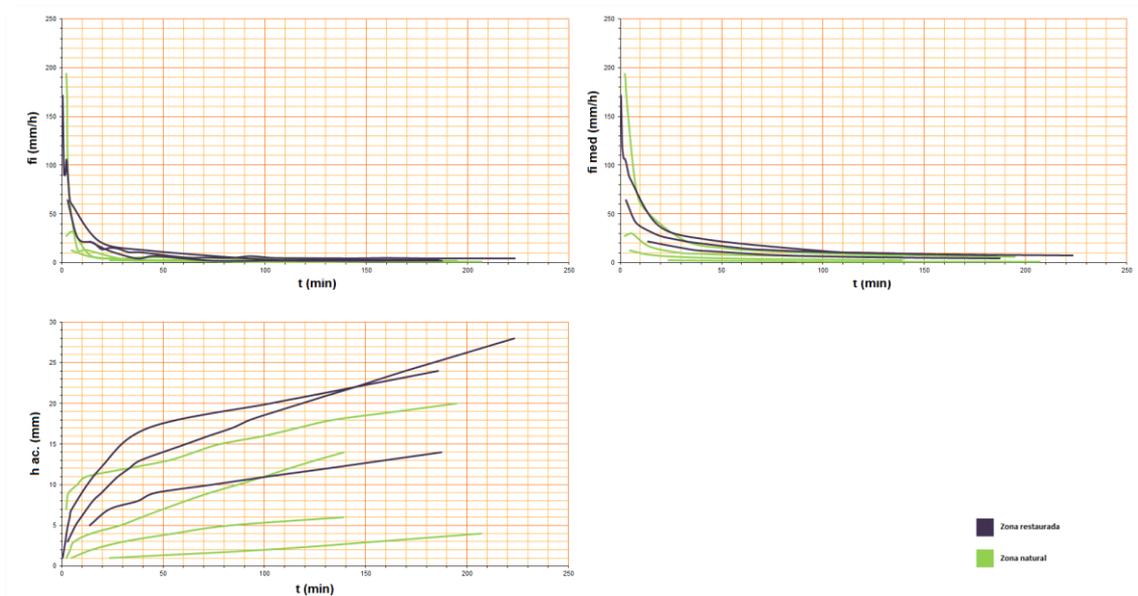


Figura 6.23. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_{i\ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h\ ac.$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en ambas zonas degradadas (área degradada de la cárcava restaurada, zona 1, en morado; y área degradada de la cárcava natural, zona 2, en verde) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

### b) Infiltrómetro de 8 cm

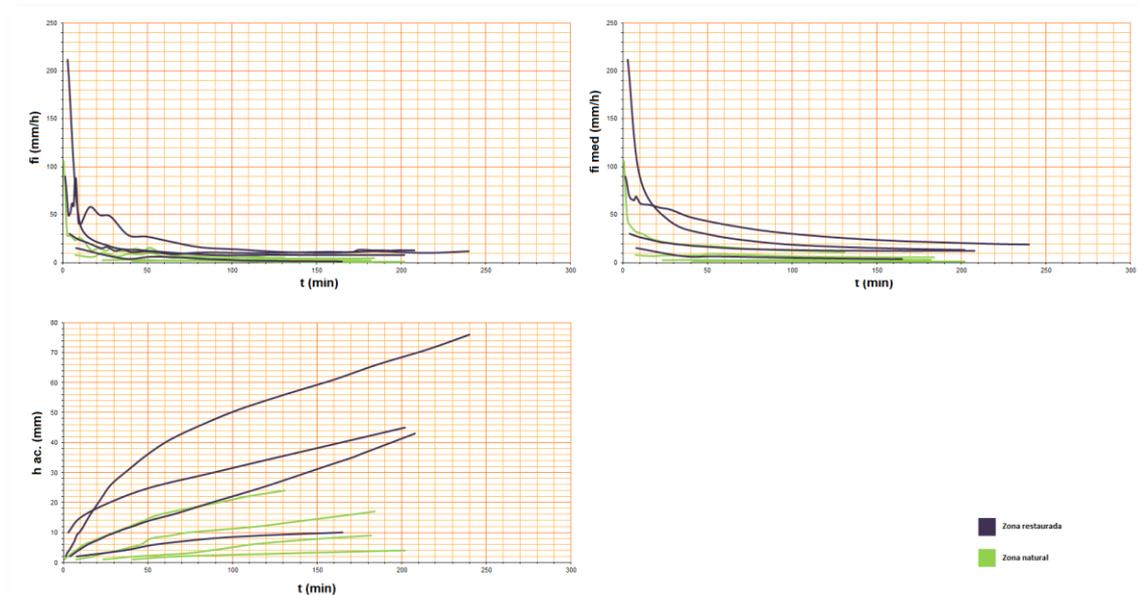


Figura 6.24. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en ambas zonas degradadas (área degradada de la cárcava restaurada, zona 1, en morado; y área degradada de la cárcava natural, zona 2, en verde) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

### 6.3.4. Zona 3: Bosque restaurado de pino

Las gráficas de infiltración obtenidas para los ensayos de la zona de bosque se muestran a continuación:

#### a) Infiltrómetro de 30 cm

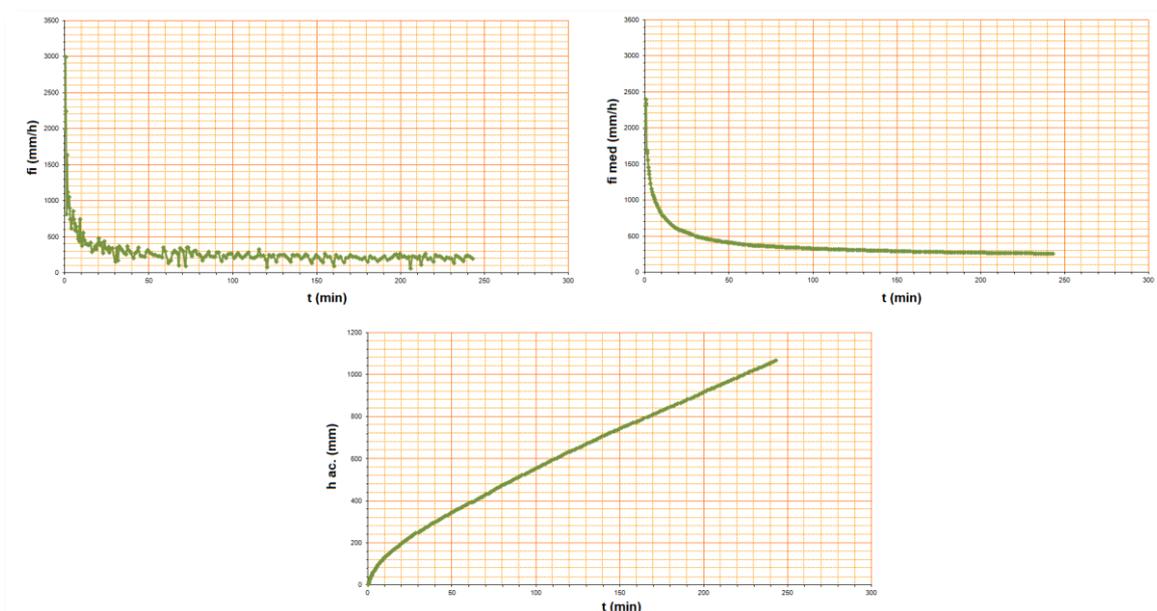


Figura 6.25. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

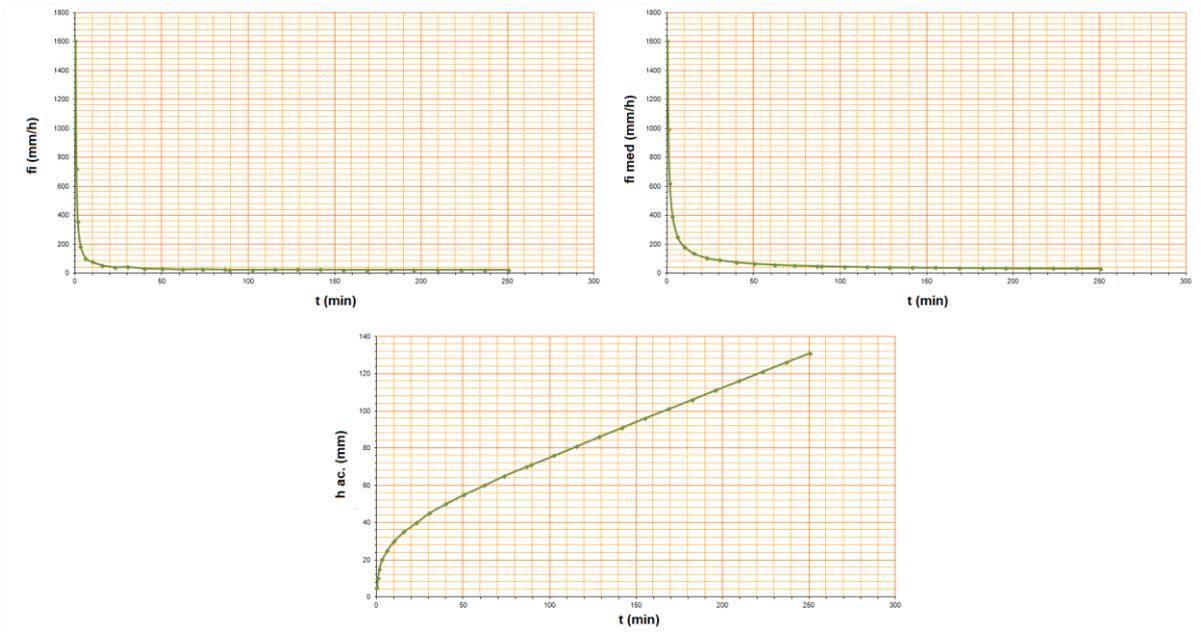


Figura 6.26. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

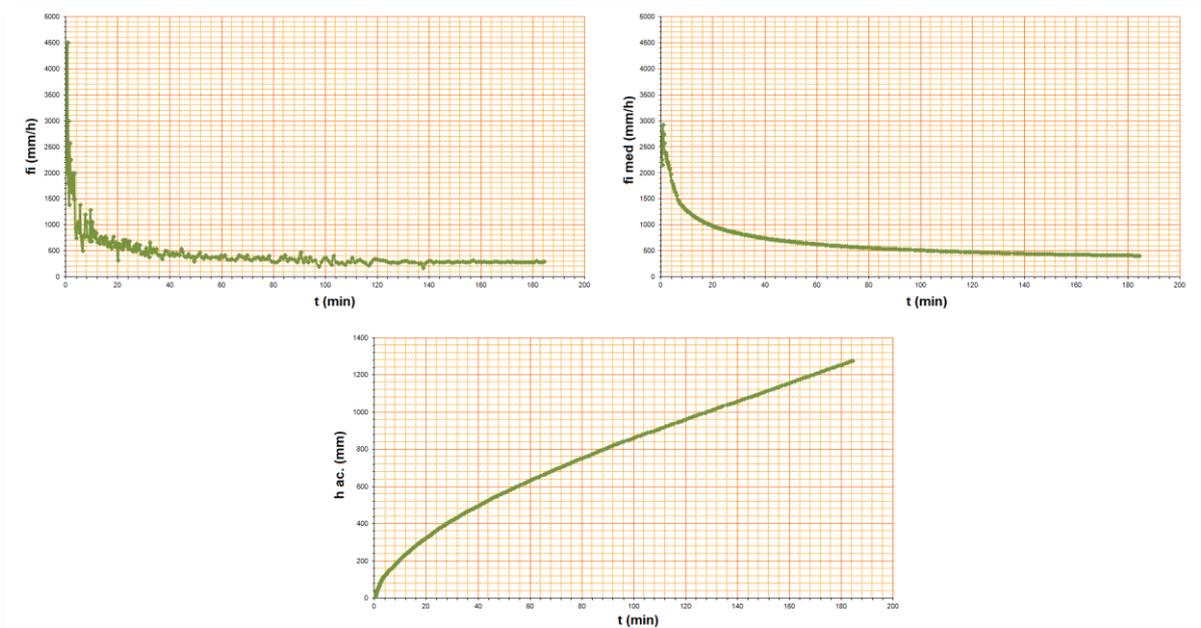


Figura 6.27. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

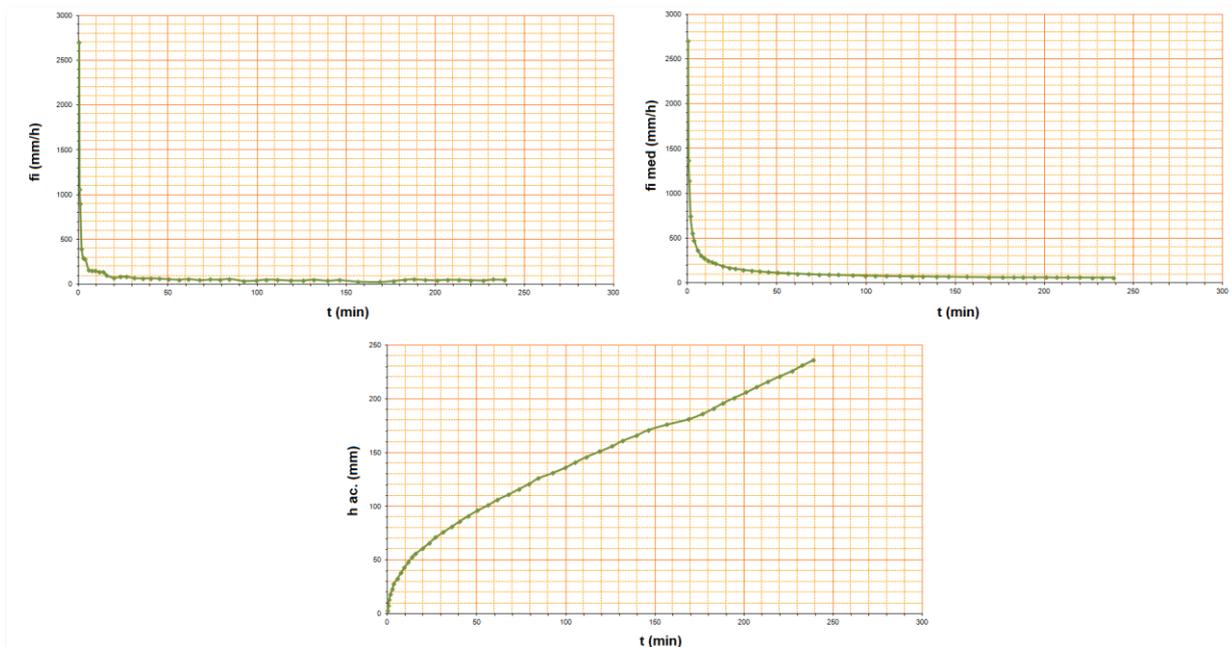


Figura 6.28. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 4 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

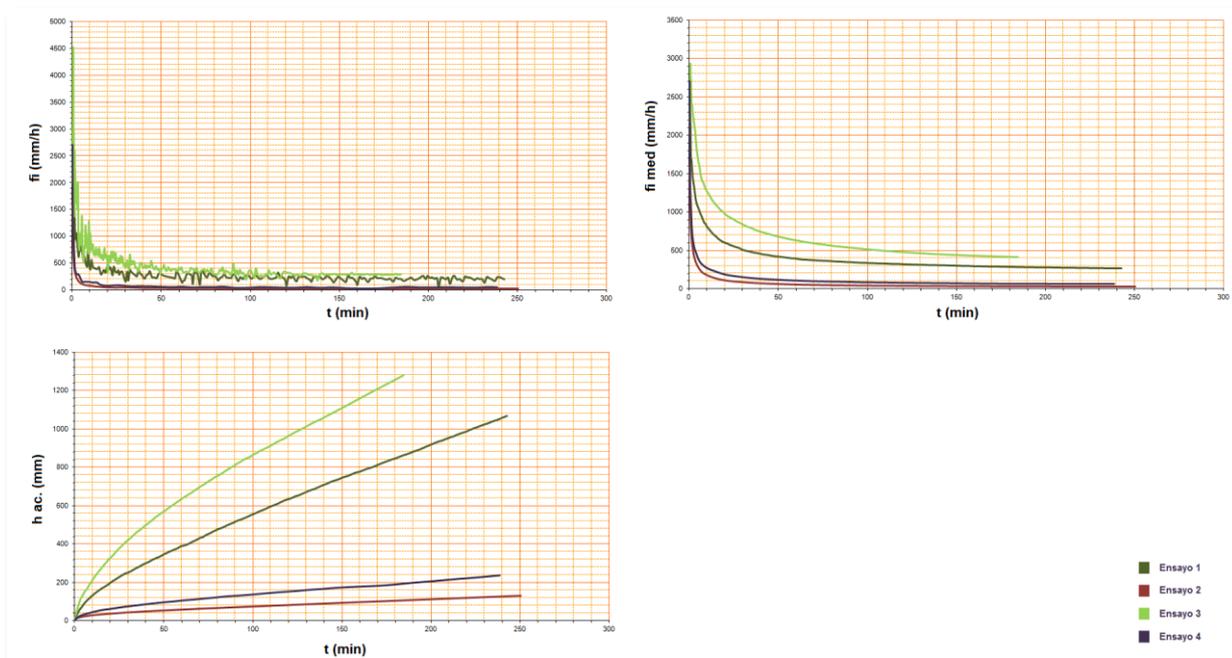
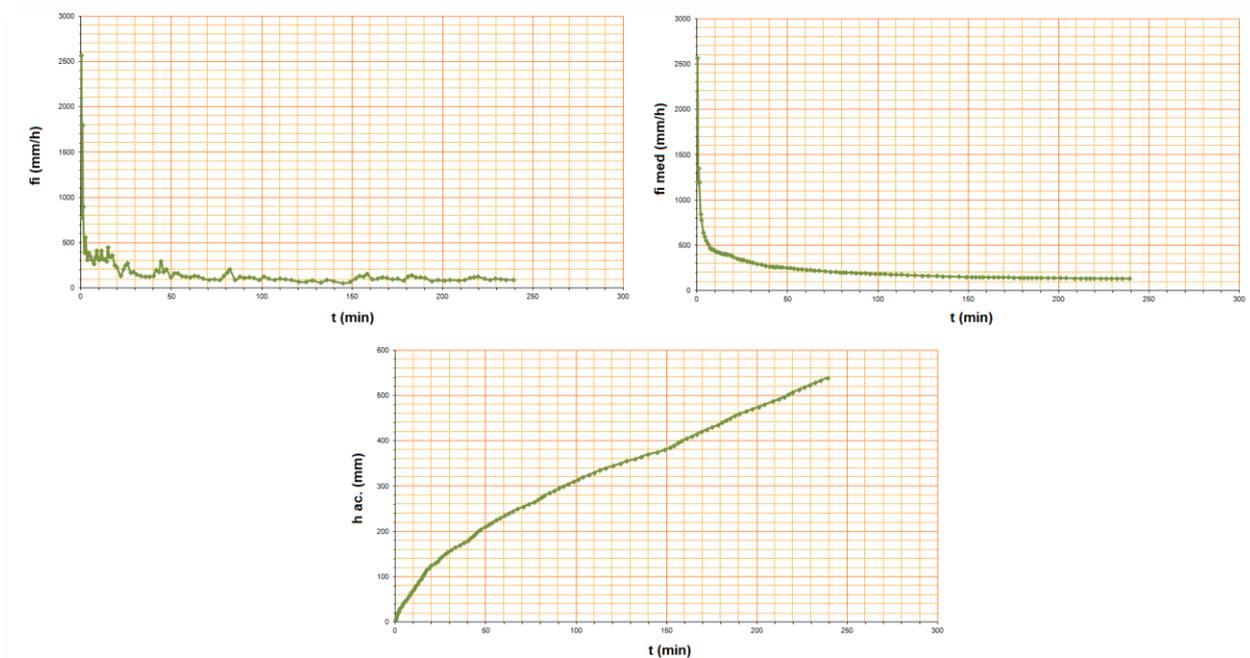
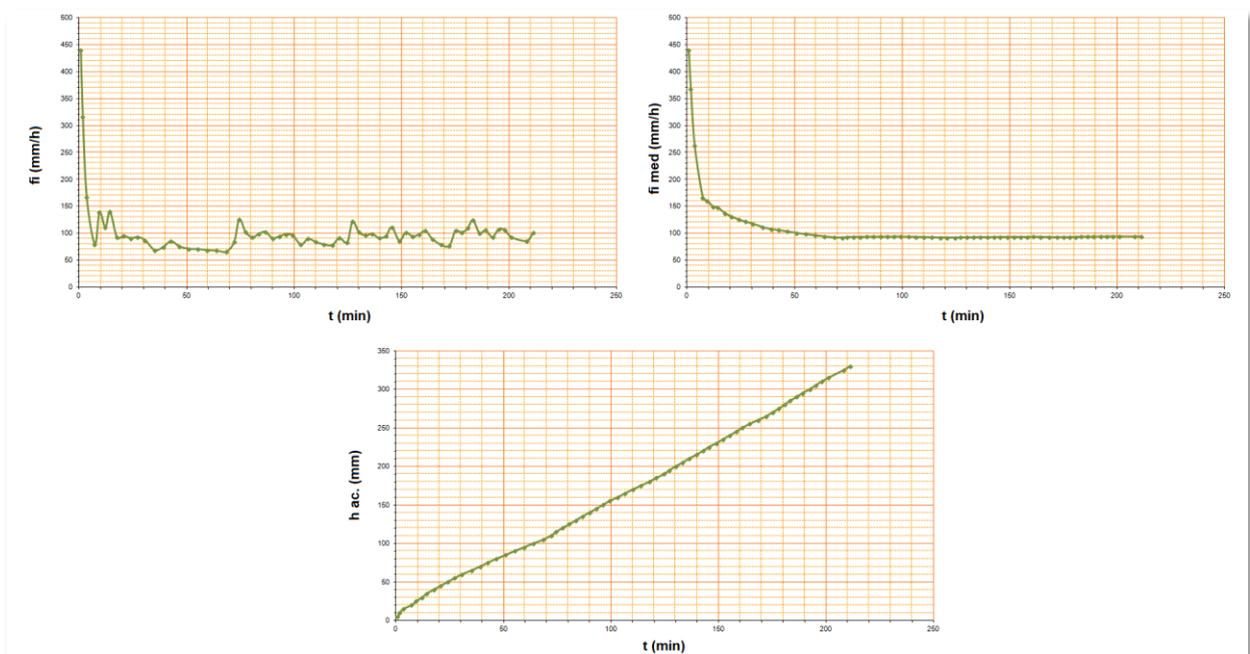


Figura 6.29. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 3 (bosque restaurado de pino) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

**b) Infiltrómetro de 8 cm**



**Figura 6.30.**Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 1 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.



**Figura 6.31.**Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 2 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

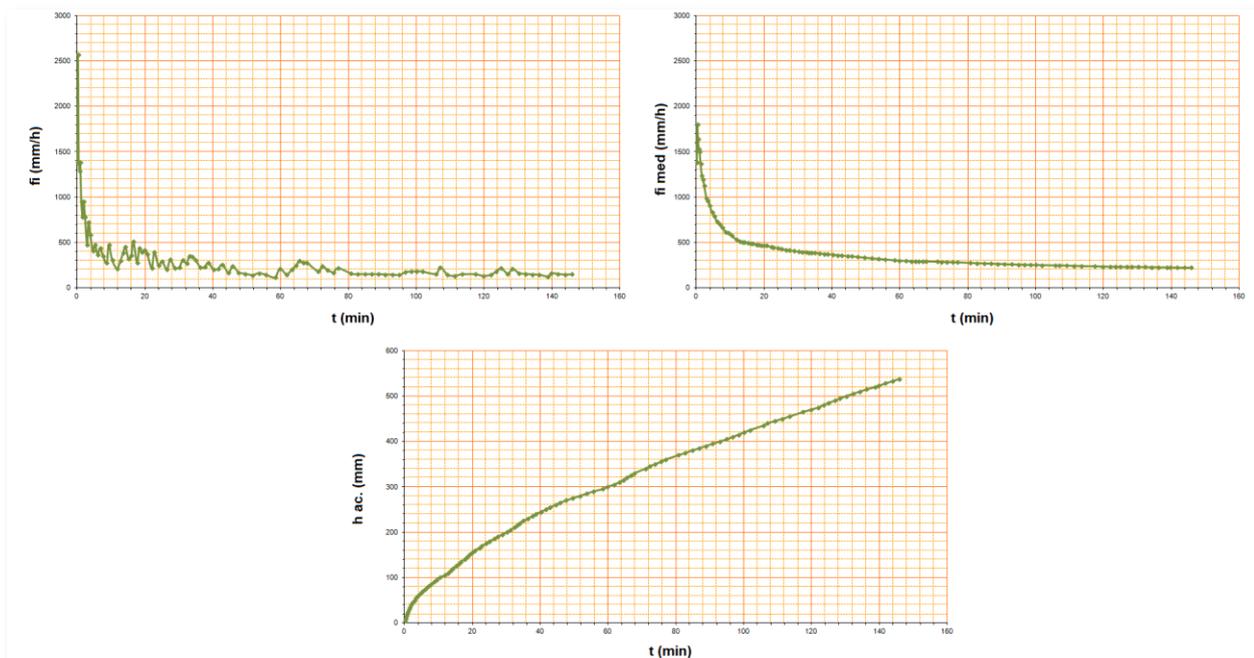


Figura 6.32. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 3 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

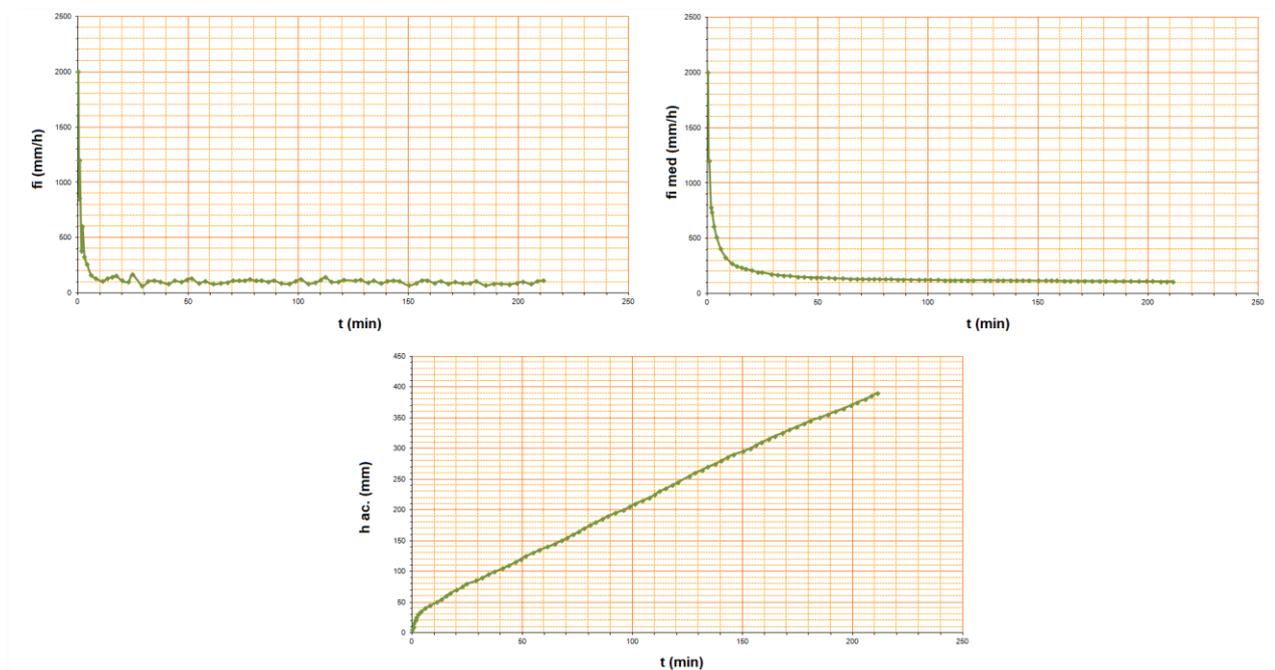


Figura 6.33. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 4 de la zona 3 (bosque restaurado de pino) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

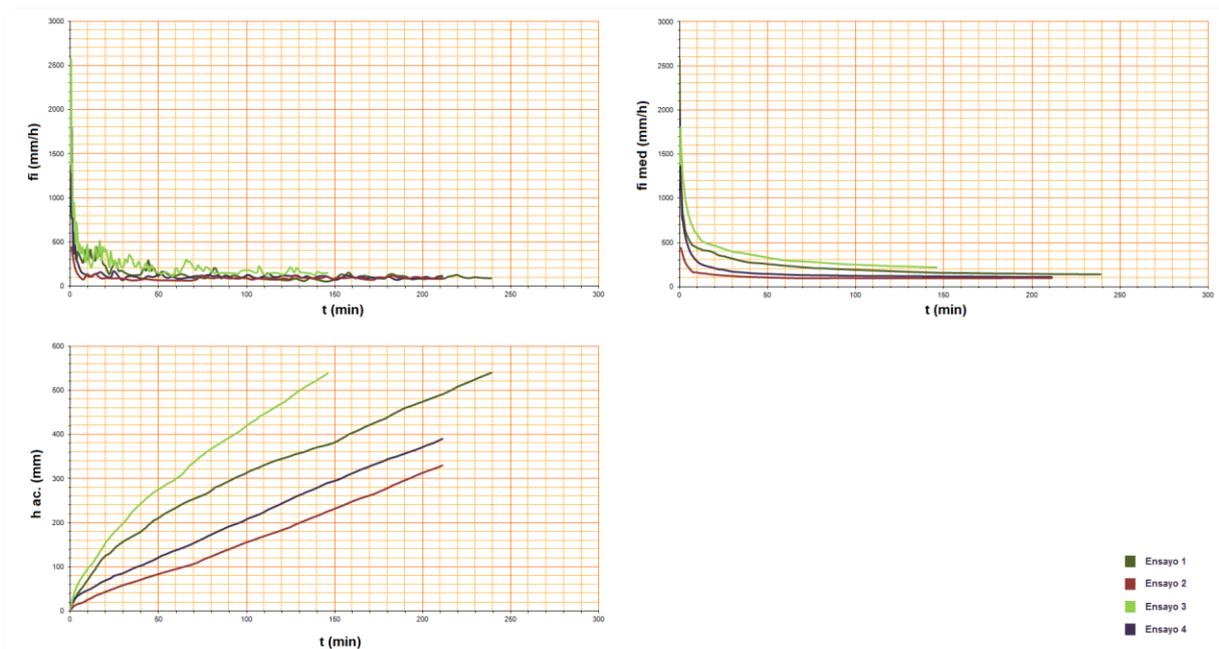


Figura 6.34. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 3 (bosque restaurado de pino) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

### c) Comparación entre infiltrómetros

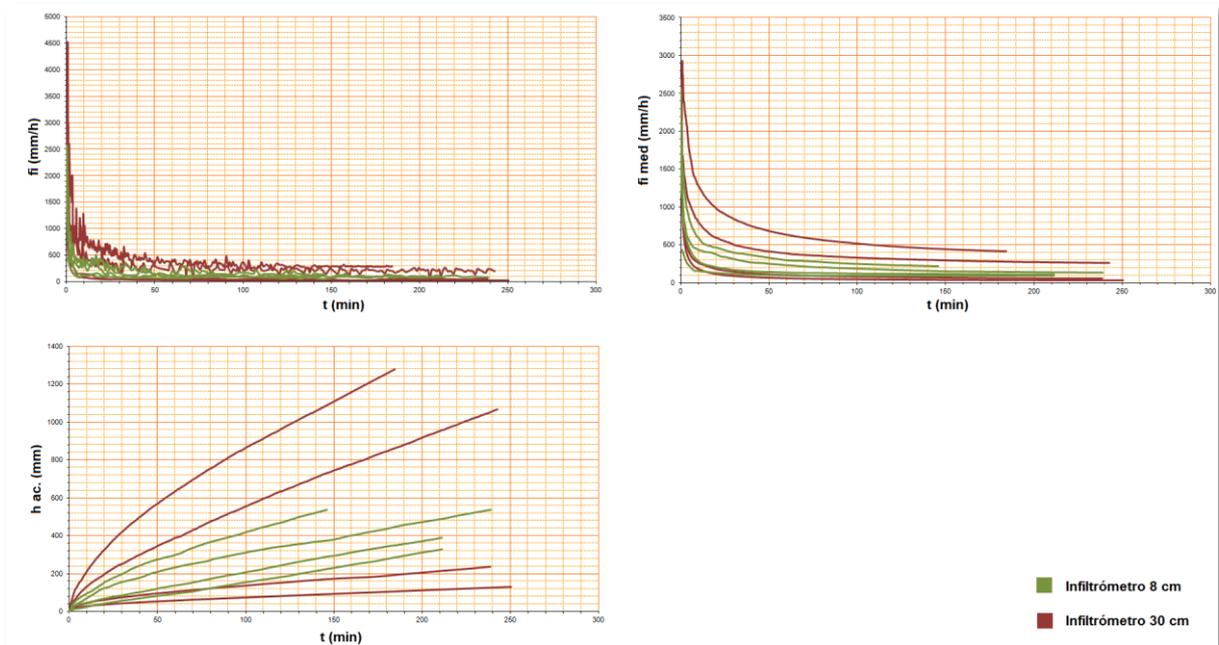


Figura 6.35. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 3 (bosque restaurado de pino) con los 2 tipos de infiltrómetros utilizados en el estudio.

### 6.3.5. Zona 4: Bosque natural de roble

#### a) Infiltrómetro de 30 cm

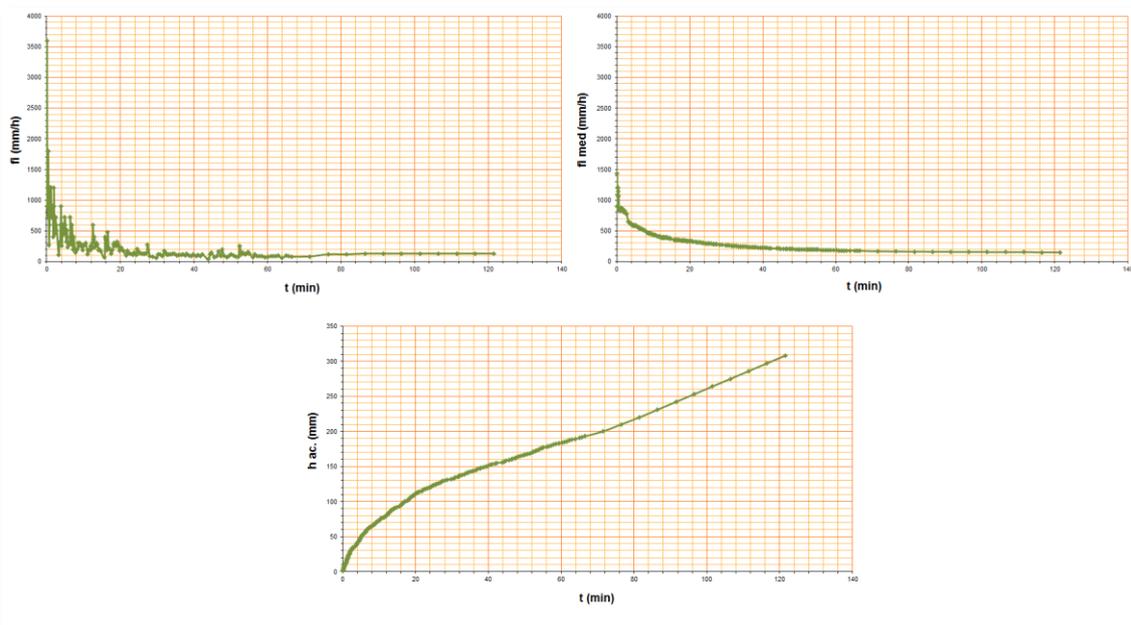


Figura 6.36. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h_{ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

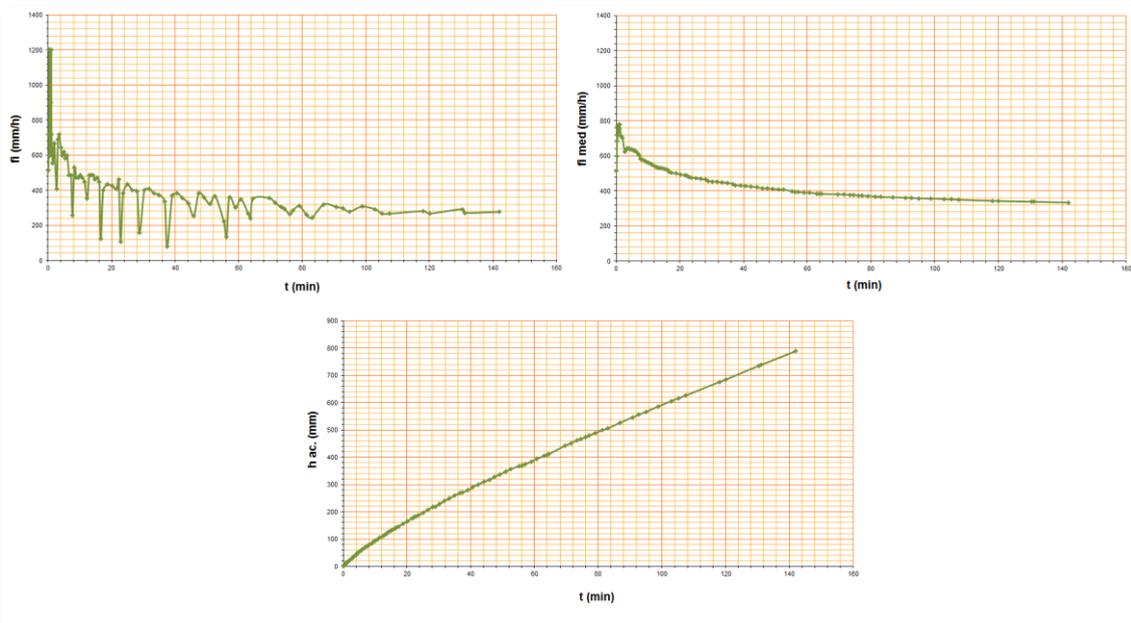


Figura 6.37. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h_{ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

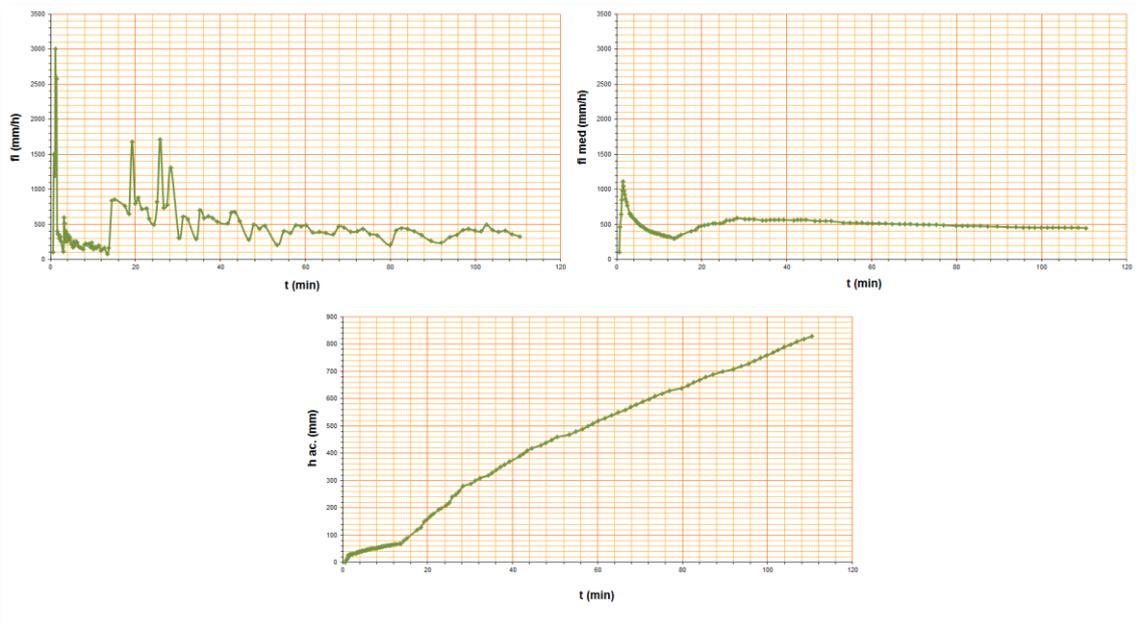


Figura 6.38. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 3 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

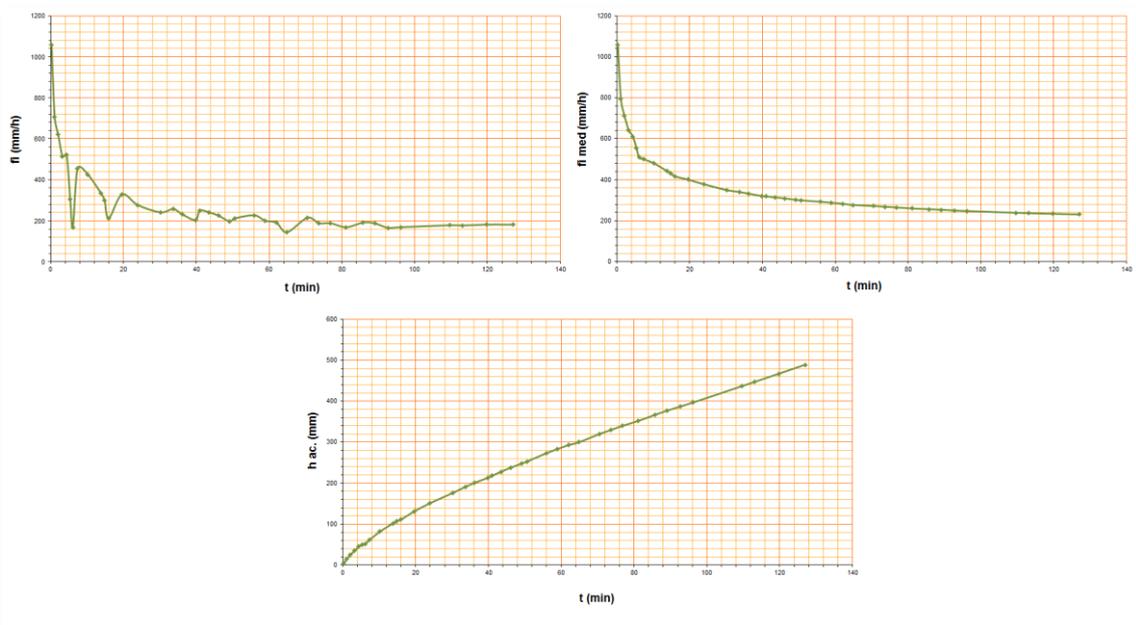


Figura 6.39. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) para el ensayo 4 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

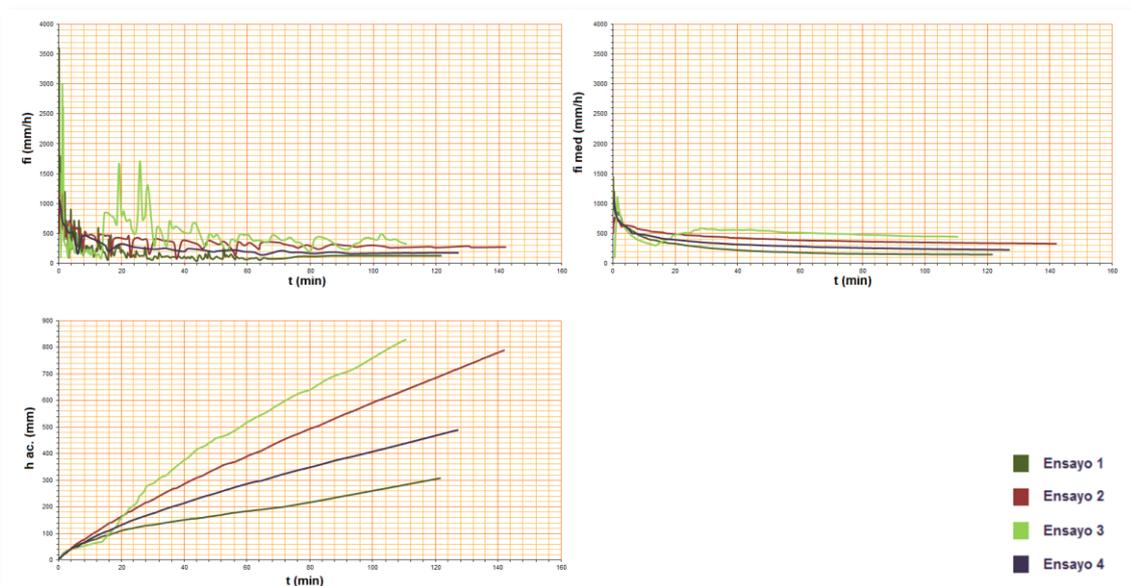


Figura 6.40. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 4 (bosque natural de roble) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

#### b) Infiltrómetro de 8 cm

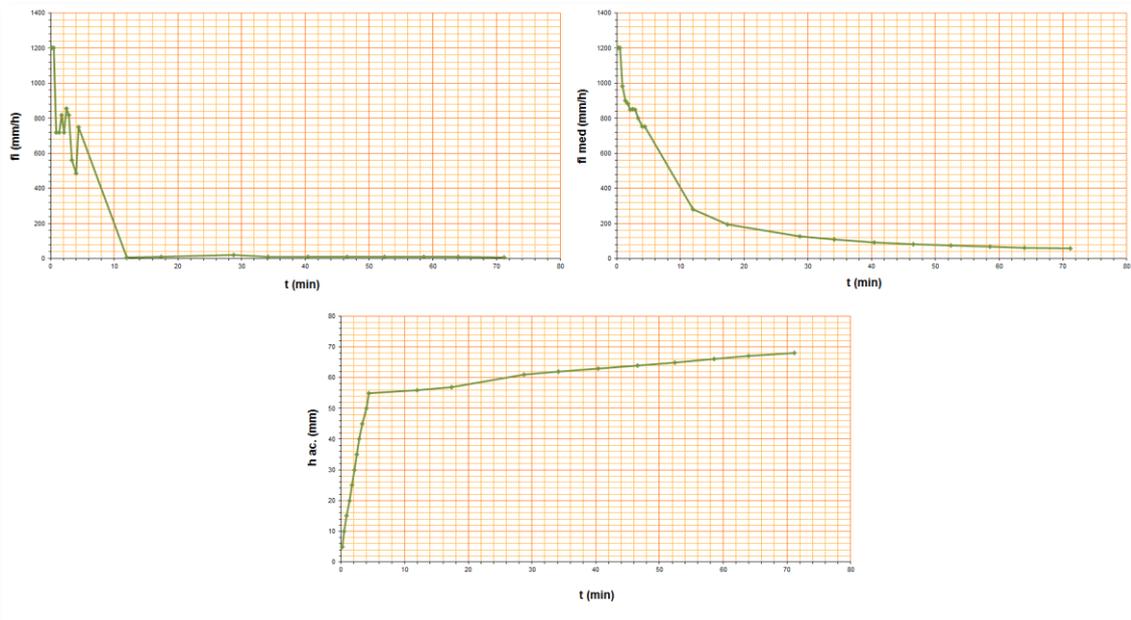


Figura 6.41. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 1 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

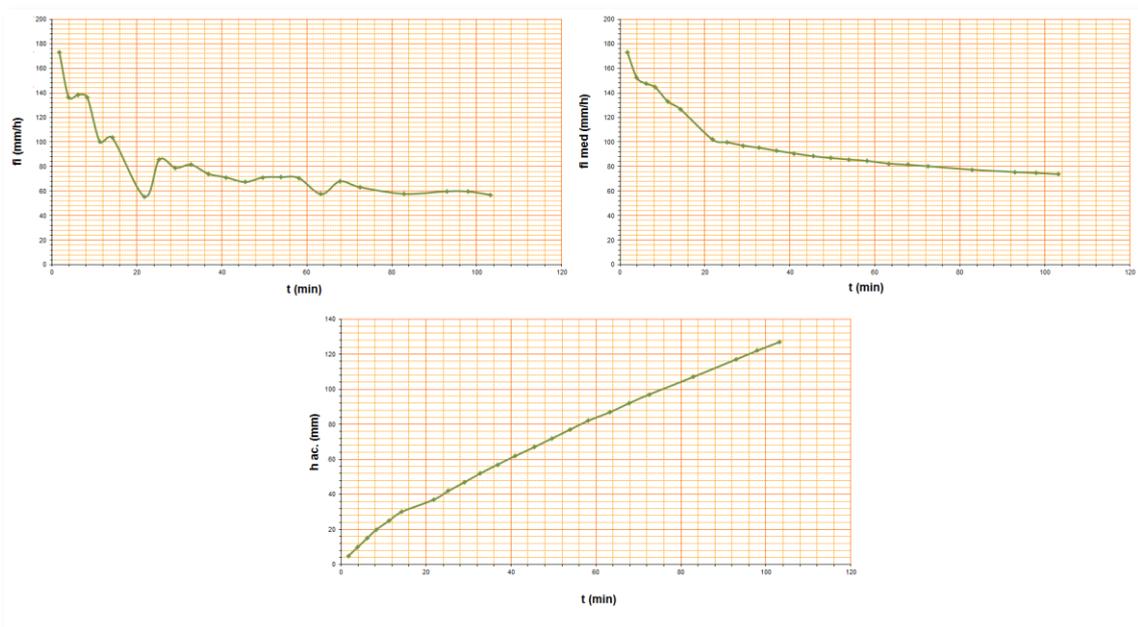


Figura 6.42. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 2 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

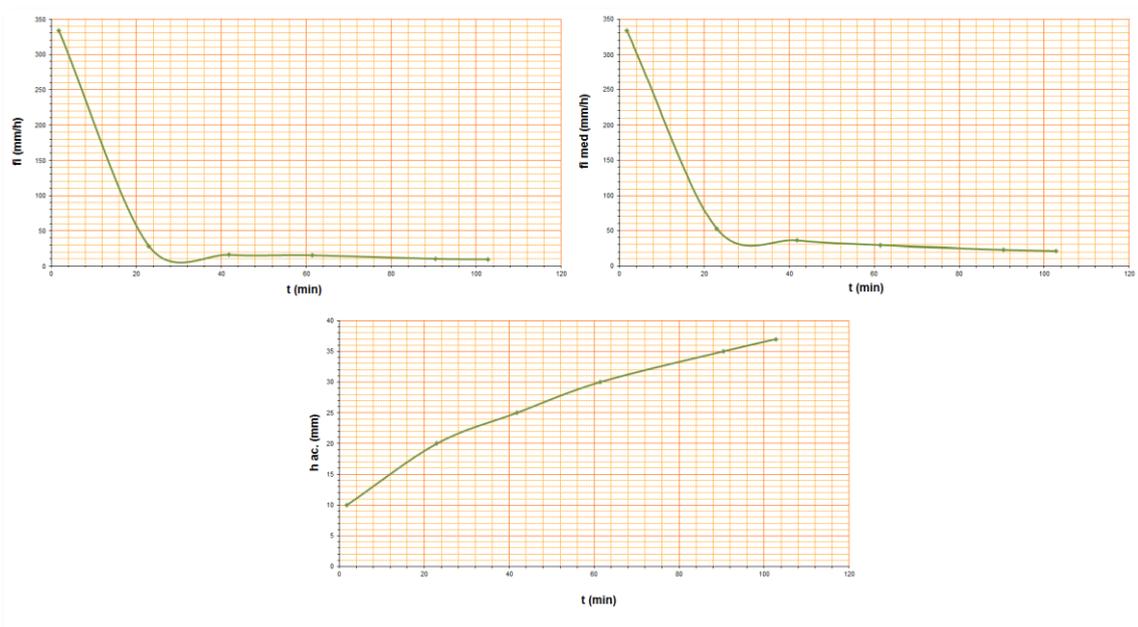


Figura 6.43. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 3 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

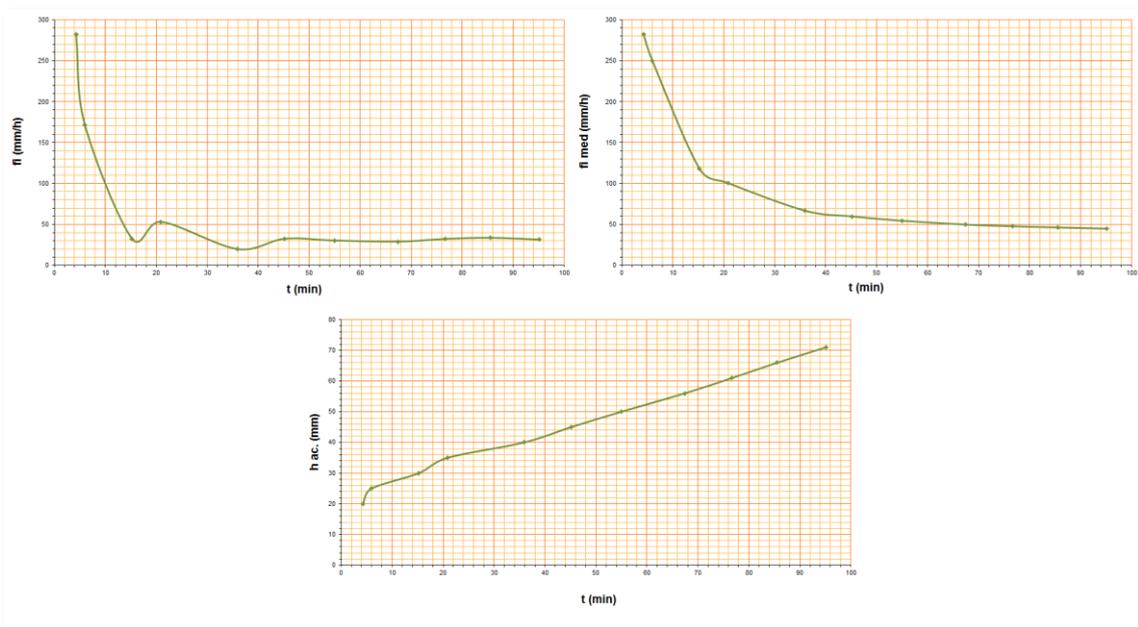


Figura 6.44. Tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) para el ensayo 4 de la zona 4 (bosque natural de roble) utilizando el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

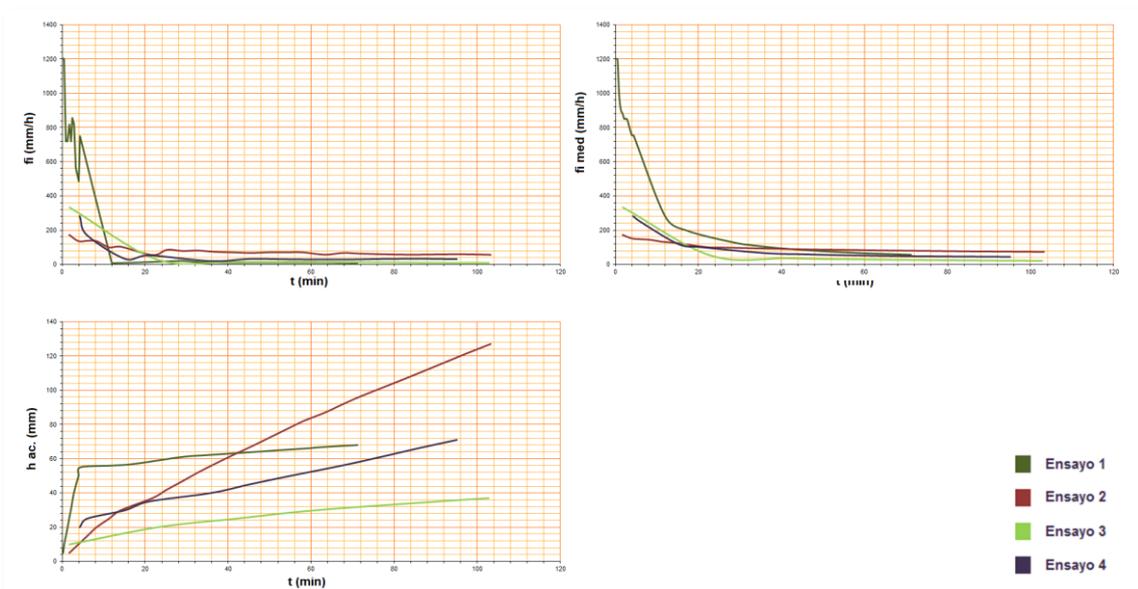


Figura 6.45. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h \text{ ac.}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 4 (bosque natural de roble) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

### c) Comparación entre infiltrómetros

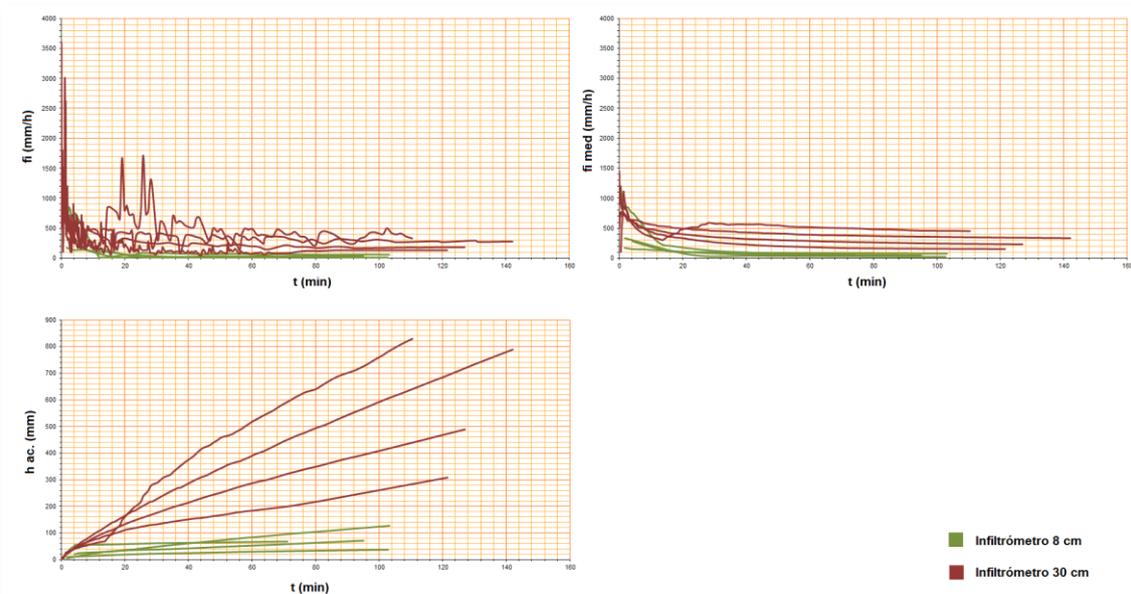


Figura 6.46. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h_{ac}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en la zona 4 (bosque natural de roble) con los 2 tipos de infiltrómetros utilizados en el estudio.

### 6.3.6. Comparación entre los bosques de ambas zonas (Zonas 3 y 4)

#### a) Infiltrómetro de 30 cm

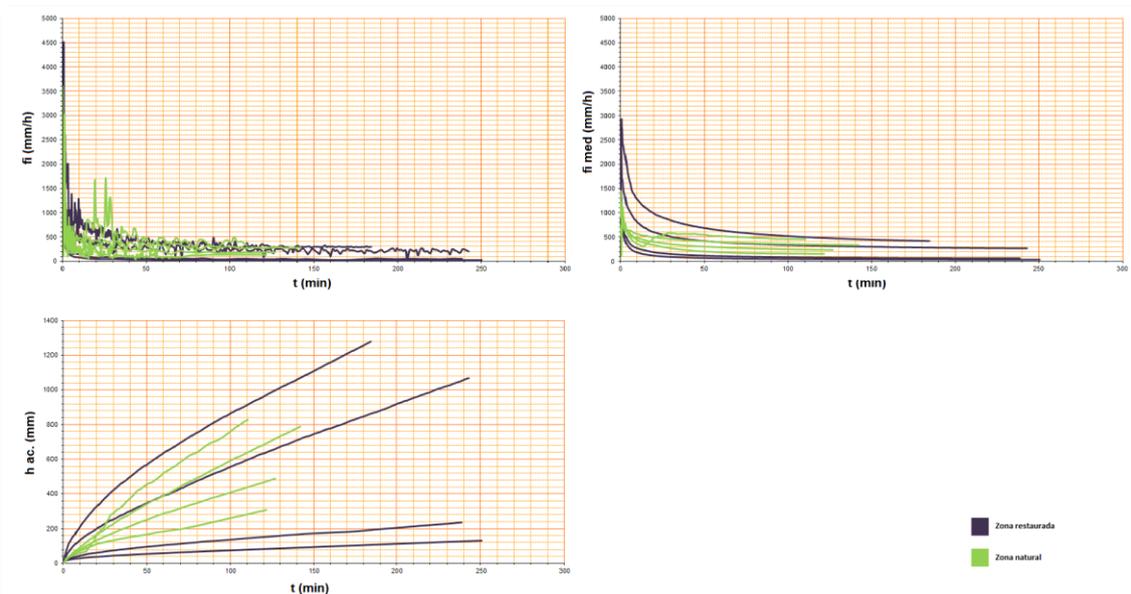


Figura 6.47. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i \text{ med}$ ) (mm/h) y altura infiltrada ( $h_{ac}$ ) (mm) de los diferentes ensayos realizados en ambas zonas de bosque (zona de bosque restaurado de pinar, zona 3, en morado; y zona de bosque natural de roble, zona 4, en verde) con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

## b) Infiltrómetro de 8 cm

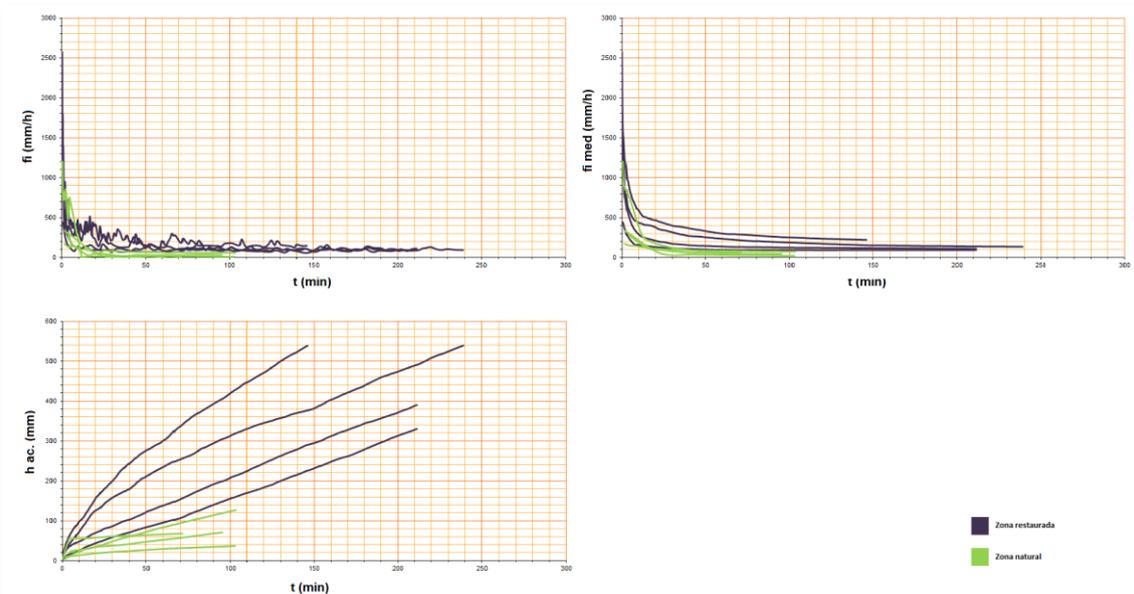


Figura 6.48. Comparación entre la tasa de infiltración en cada intervalo ( $f_i$ ) (mm/h), tasa de infiltración desde el comienzo del ensayo ( $f_i$  med) (mm/h) y altura infiltrada ( $h$  ac.) (mm) de los diferentes ensayos realizados en ambas zonas de bosque (zona de bosque restaurado de pinar, zona 3, en morado; y zona de bosque natural de roble, zona 4, en verde) con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

## 6.4. Análisis comparativo entre las diferentes zonas

### 6.4.1. Análisis respecto a la tasa de infiltración final y las propiedades del suelo que influyen en la misma

#### 6.4.1.1. Análisis de la Tasa de Infiltración Final

En este apartado se han estudiado las diferencias en cuanto a la tasa de infiltración medida en las diferentes zonas.

La documentación previa nos ha permitido conocer que el diámetro del infiltrómetro influye a la hora de realizar las medidas de infiltración. Autores como Tricker (1978) o Bouwer (1986) determinan que el infiltrómetro de 30 cm tiene el tamaño mínimo necesario para obtener valores representativos de la realidad.

Basándonos en esto analizaremos, primero por separado, los dos métodos utilizados, por una parte el aconsejado por los autores antes nombrados y, por otra, el infiltrómetro de 8 cm utilizado por autores como Cerdá (1996) o Mongil *et al.* (2012a, 2012b, 2013). Este método presenta ciertas ventajas, como puede ser la posibilidad de usarlo en zonas de complicado acceso o la utilización de menor cantidad de agua.

También serán analizados una serie de factores físicos que han sido medidos y que la revisión bibliográfica ha determinado que pueden ser importantes de cara a la determinación de la infiltración en una zona.

Cabe recordar que aunque el número mínimo de ensayos aconsejados por zona es de 3 (Mongil *et al.*, 2012b), se han realizado 4 por si los valores obtenidos por alguno de ellos debiera desecharse debido a anomalías. En el caso de los ensayos realizados en la zona 1: área degradada de la cárcava restaurada, se ha desechado un ensayo al observar una medida que a priori presentaba una anomalía respecto al resto de la zona. Para corroborarla se procedió al análisis visual del bulbo húmedo. En él, como se muestra en la Figura 6.49., se pueden observar grandes grietas, algunas en los límites del cilindro, por las cuales el agua fluyó a gran velocidad perturbándose así el flujo vertical buscado en estos ensayos.



Figura 6.49. Detalle de las grietas aparecidas en el ensayo 4 con el infiltrómetro de 30 cm en el área degradada.

#### a) Infiltrómetro de 30 cm de diámetro

En la Figura 6.50. se recogen todos los valores de la tasa de infiltración final en mm/h para cada una de las zonas.

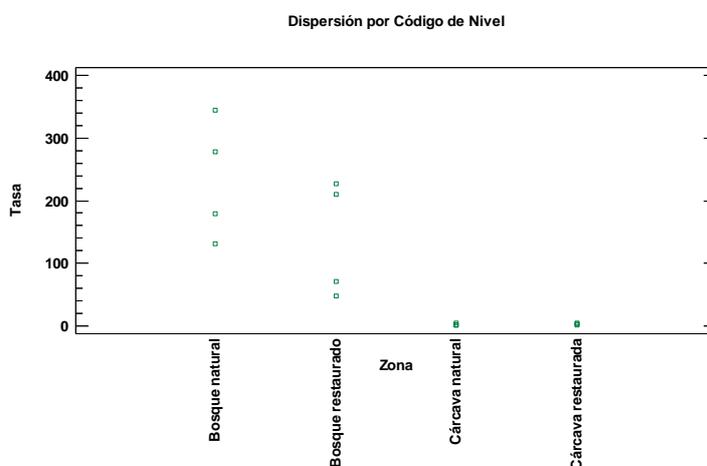
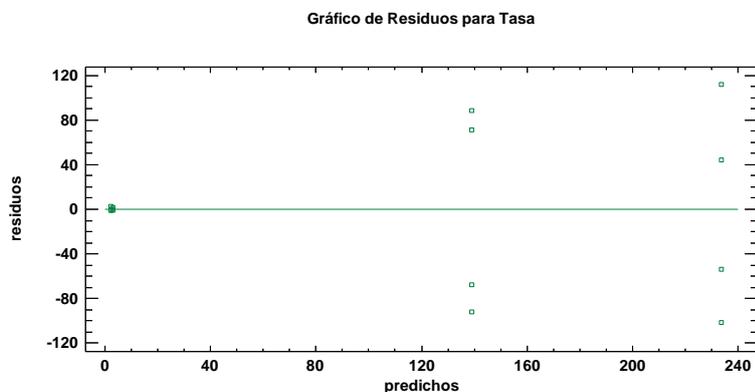


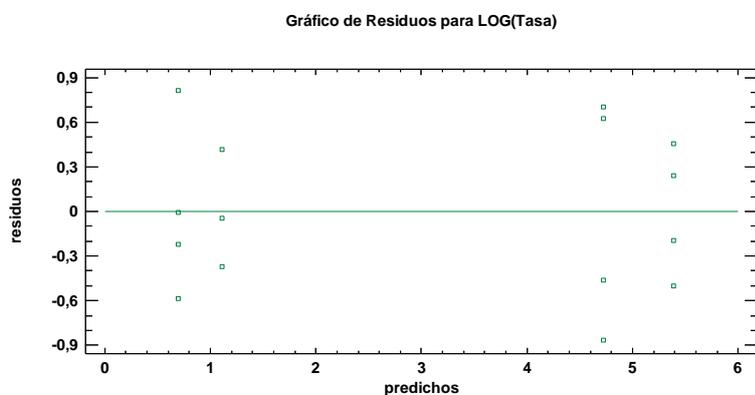
Figura 6.50. Dispersión de valores de tasa de infiltración final en mm/h por zonas.

En la figura siguiente se puede observar que parece no haber homogeneidad en las varianzas, pudiendo existir así heterocedasticidad, ya que en el gráfico de residuos esta condición aparece típicamente mediante una apariencia en forma de embudo, como se observa en la Figura 6.51.



**Figura 6.51. Gráfico de residuos para la Tasa de infiltración.**

Debido a la forma presentada en el gráfico anterior, se ha procedido a la transformación de los valores mediante el logaritmo neperiano de la serie de datos.



**Figura 6.52. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración.**

Al aplicar logaritmos vemos que la forma de la nube de puntos pasa a ser más rectangular, por lo que pasamos a realizar un test de normalidad de los residuos.

**Tabla 6.6. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.**

Normal	
DMAS	0,113224
DMENOS	0,121229
DN	0,121229
P-valor	0,980186

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.7. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,959758	0,656378

Del mismo modo, debido a que el p-valor más pequeño de la prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

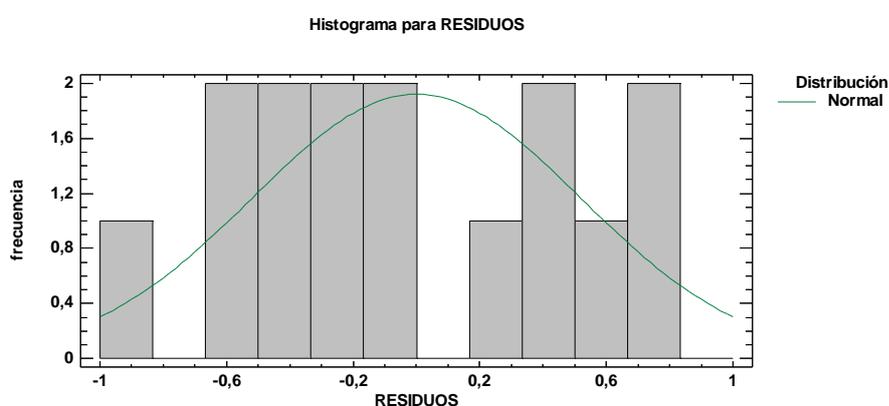


Figura 6.53. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

Sobre los valores del logaritmo neperiano de los valores representados en la Figura 6.50., se calculan las medias, sus errores estándar (una medida de su variabilidad en la muestra), así como los límites superior e inferior de los Intervalos de Confianza (I.C.) al 95 %. La Figura 6.54. y la Tabla 6.8. recogen esta información.

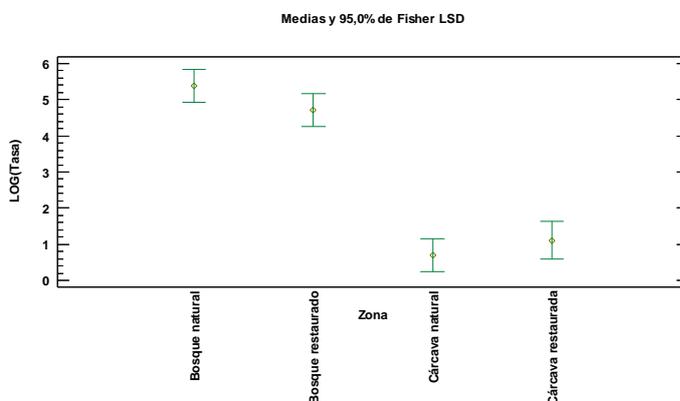


Figura 6.54. Medias e intervalos de confianza al 95% para la tasa de infiltración final en mm/h respecto a zona.

Tabla 6.8. Medias para la tasa de infiltración en mm/h por Zona con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque natural	4	5,38563	0,292851	4,92985	5,8414
Bosque restaurado	4	4,72277	0,292851	4,267	5,17855
Cárcava natural	4	0,697656	0,292851	0,241881	1,15343
Cárcava restaurada	3	1,10899	0,338156	0,582709	1,63528
Total	15	3,10341			

Esta tabla muestra la media de Log(Tasa) para cada nivel de Zona. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces.

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad de la TASA DE INFILTRACIÓN en las contribuciones debidas al factor ZONA. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.9. ANOVA para la Tasa de infiltración por Zona.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	66,4071	3	22,1357	<b>64,53</b>	<b>0,0000</b>
Intra grupos	3,77352	11	0,343048		
Total (Corr.)	70,1806	14			

Se observa que el p-valor (verde) es inferior a 0,05, por lo que se puede determinar que la ZONA tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable TASA DE INFILTRACIÓN para un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.10. Pruebas de Múltiple Rangos para Tasa de infiltración por Zona. Valores en mm/h.

Tabla a)			
Método: 95.0 porcentaje LSD			
Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Cárcava natural	4	0,697656	X
Cárcava restaurada	3	1,10899	X
Bosque restaurado	4	4,72277	X
Bosque natural	4	5,38563	X

Tabla 6.10. Continuación. Pruebas de Múltiple Rangos para Tasa de infiltración por Zona. Valores en mm/h.

Tabla b)				
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites	
Bosque natural - Bosque restaurado		0,662852	0,91155	
Bosque natural - Cárcava natural	*	4,68797	0,91155	
Bosque natural - Cárcava restaurada	*	4,27663	0,984586	
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	4,02512	0,91155	
Bosque restaurado - Cárcava restaurada	*	3,61378	0,984586	
Cárcava natural - Cárcava restaurada		-0,411336	0,984586	

La Tabla b) muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la Tabla a), se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

**A modo de resumen, se puede decir que la TASA DE INFILTRACIÓN depende de la ZONA en la que se haya realizado la medición cuando medimos con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro, siendo significativamente mayor en las zonas de bosque que en las degradadas, pero no existiendo diferencias significativas entre ambas zonas degradadas ni entre ambas zonas de bosque.**

#### b) Infiltrómetro de 8 cm de diámetro

En la Figura 6.55. se recogen todos los valores de la tasa de infiltración final para cada una de las zonas, esta vez obtenidas con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

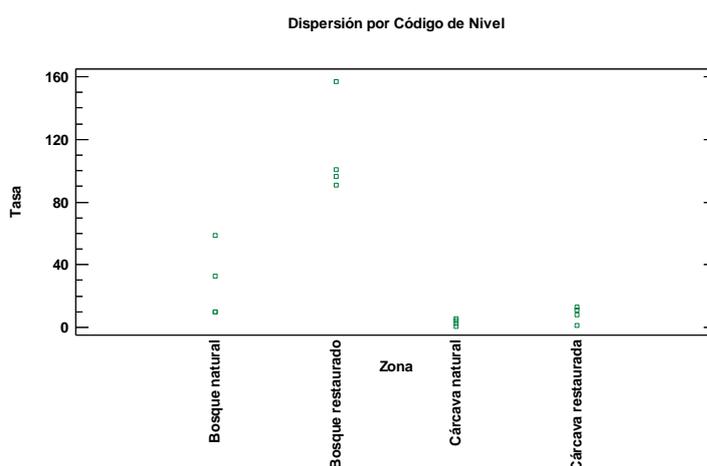
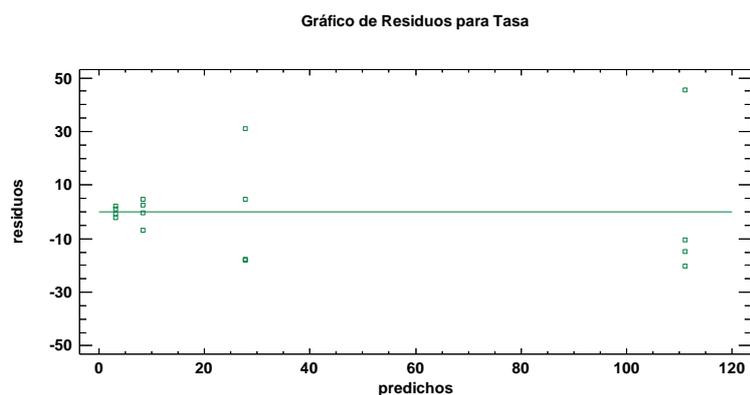


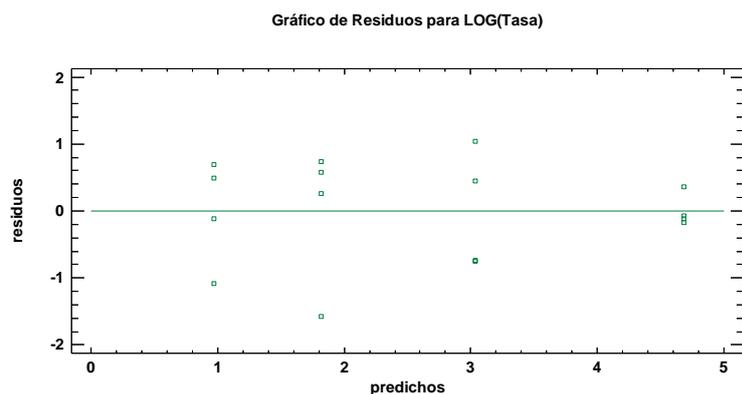
Figura 6.55. Dispersión de valores de tasa de infiltración final en mm/h por zonas.

El gráfico de residuos para los valores de la tasa de infiltración con el infiltrómetro de 8 cm es el siguiente:



**Figura 6.56. Gráfico de residuos para la Tasa de infiltración.**

Puesto que en el gráfico de residuos se aprecia una forma de embudo, vamos a proceder a la transformación de los datos mediante el logaritmo neperiano.



**Figura 6.57. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración.**

Posteriormente vamos a comprobar si existe normalidad mediante varios test de normalidad, que pueden verse en la Tabla 6.11. y la Tabla 6.12., puesto que la nube de puntos de la Figura 6.57. no presenta una clara forma rectangular.

**Tabla 6.11. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.**

	<b>Normal</b>
DMAS	0,0941415
DMENOS	0,153079
DN	0,153079
P-valor	0,847569

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.12. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,942388	0,373686

Debido a que el p-valor más pequeño de la prueba de Shapiro-Wilk es mayor a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

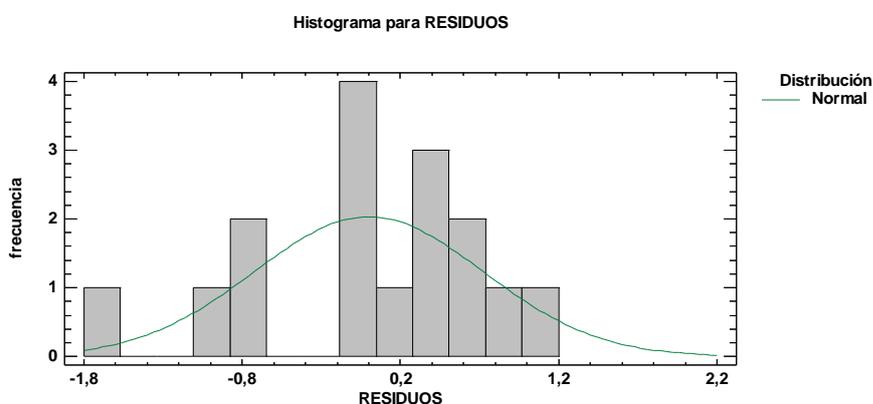


Figura 6.58. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

Una vez comprobada la normalidad, sobre los valores del logaritmo neperiano de la tasa de infiltración se calculan las medias, sus errores estándar (una medida de su variabilidad en la muestra), así como los límites superior e inferior de los Intervalos de Confianza (I.C.) al 95 %. La Figura 6.59. y la Tabla 6.13. recogen esta información.

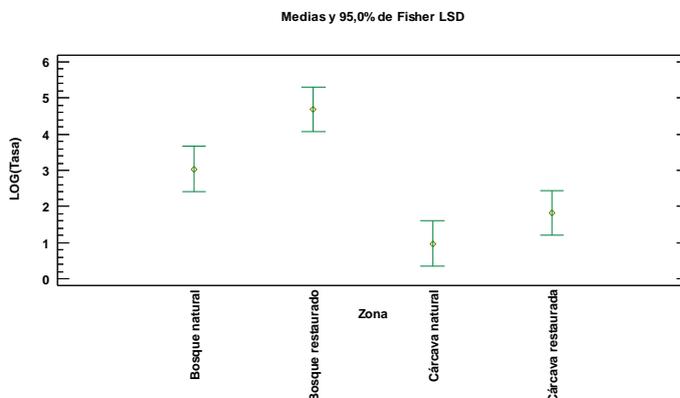


Figura 6.59. Medias e intervalos de confianza al 95% para la Tasa de infiltración final en mm/h respecto a Zona.

Tabla 6.13. Medias para la Tasa de infiltración en mm/h por Zona con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque natural	4	3,03715	0,403675	2,41523	3,65908
Bosque restaurado	4	4,68729	0,403675	4,06537	5,30922
Cárcava natural	4	0,973145	0,403675	0,351221	1,59507
Cárcava restaurada	4	1,81473	0,403675	1,19281	2,43666
Total	16	2,62808			

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad del Logaritmo neperiano de la TASA DE INFILTRACIÓN en las contribuciones debidas al factor ZONA. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.14. ANOVA para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h por Zona.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	31,2321	3	10,4107	<b>15,97</b>	<b>0,0002</b>
Intra grupos	7,82175	12	0,651813		
Total (Corr.)	39,0539	15			

Se observa que el p-valor (verde) es inferior a 0,05, por lo que se puede determinar que la ZONA tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable Logaritmo neperiano de la TASA DE INFILTRACIÓN para un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.15. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h por Zona.

Tabla a)			
Método: 95.0 porcentaje LSD			
Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Cárcava natural	4	0,973145	X
Cárcava restaurada	4	1,81473	XX
Bosque natural	4	3,03715	X
Bosque restaurado	4	4,68729	X
Tabla b)			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Bosque natural - Bosque restaurado	*	<b>-1,65014</b>	1,24385
Bosque natural - Cárcava natural	*	<b>2,06401</b>	1,24385
Bosque natural - Cárcava restaurada		1,22242	1,24385
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	<b>3,71415</b>	1,24385
Bosque restaurado - Cárcava restaurada	*	<b>2,87256</b>	1,24385
Cárcava natural - Cárcava restaurada		-0,841589	1,24385

La Tabla b) muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 4 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la Tabla a), se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

**A modo de resumen, se puede decir que la TASA DE INFILTRACIÓN depende de la ZONA en la que se haya realizado la medición cuando medimos con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro, siendo significativamente mayor en las zonas de bosque que en las degradadas, no existiendo diferencias significativas entre ambas zonas degradadas, pero sí entre ambas zonas de bosque.**

#### 6.4.1.2. Factores medidos que afectan a la tasa de infiltración final

##### a) Densidad

En la Figura 6.60. se recogen todos los valores de densidad para cada una de las zonas.

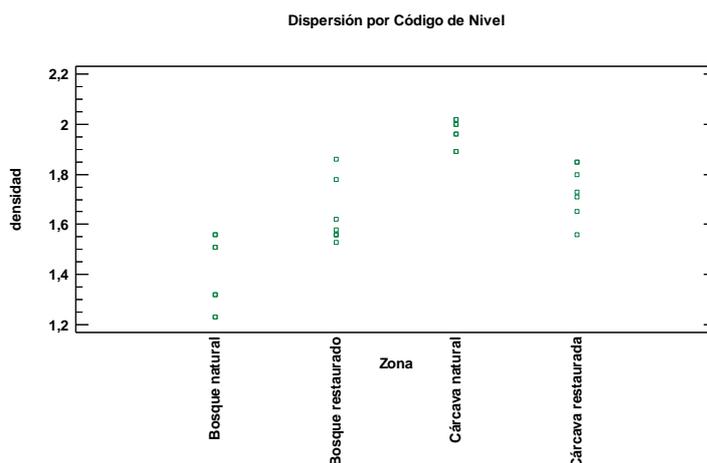


Figura 6.60. Dispersión de valores de densidad en  $\text{g/cm}^3$  del suelo por zonas.

Vamos a observar el gráfico de residuos para conocer si existe normalidad, que evaluaremos mediante dos test de normalidad, cuyos resultados pueden verse en las Tablas 6.16. y 6.17.

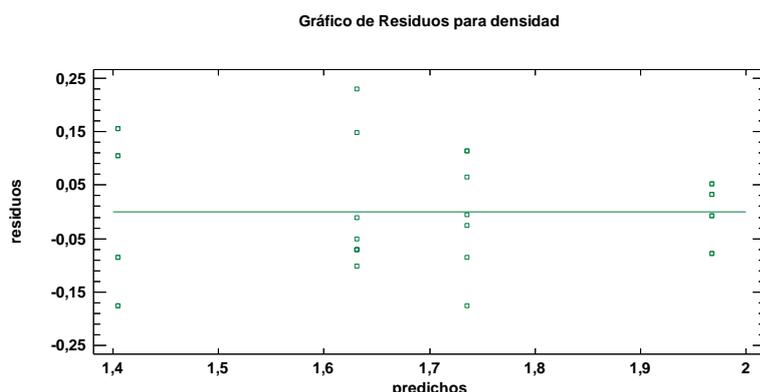


Figura 6.61. Gráfico de residuos para la densidad del suelo.

Tabla 6.16. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

Normal	
DMAS	0,136256
DMENOS	0,0969984
DN	0,136256
P-valor	0,61264

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.17. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,95689	0,282818

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

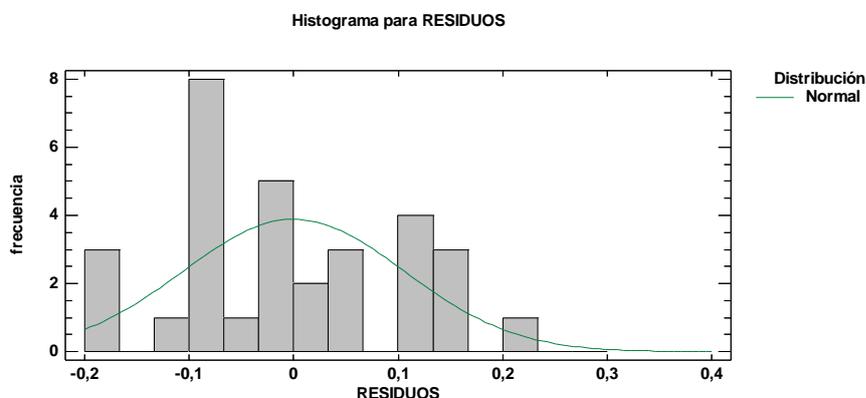


Figura 6.62. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

Una vez comprobada la normalidad, sobre los valores de densidad se calculan las medias, sus errores estándar (una medida de su variabilidad en la muestra), así como los límites superior e inferior de los Intervalos de Confianza (I.C.) al 95 %. La Figura 6.63. y la Tabla 6.18. recogen esta información.

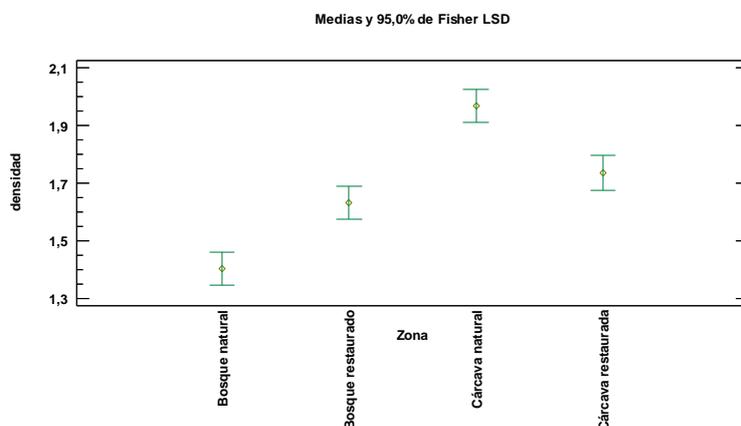


Figura 6.63. Medias e intervalos de confianza al 95% para la densidad del suelo en  $g/cm^3$  respecto a zona.

Tabla 6.18. Medias para la densidad del suelo en  $g/cm^3$  por Zona con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque natural	8	1,405	0,0395231	1,34766	1,46234
Bosque restaurado	8	1,63125	0,0395231	1,57391	1,68859
Cárcava natural	8	1,9675	0,0395231	1,91016	2,02484
Cárcava restaurada	7	1,73571	0,042252	1,67441	1,79702
Total	31	1,68323			

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad de la DENSIDAD en las contribuciones debidas al factor ZONA. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.19. ANOVA para la Densidad por Zona.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	1,30667	3	0,435556	34,85	0,0000
Intra grupos	0,337409	27	0,0124966		
Total (Corr.)	1,64408	30			

Se observa que el p-valor (verde) es inferior a 0,05, por lo que se puede determinar que la ZONA tiene un efecto estadísticamente significativo en la variable DENSIDAD para un nivel de confianza del 95,0%.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.20. Pruebas de Múltiple Rangos para Densidad en g/cm<sup>3</sup> por Zona.

Tabla a)			
Método: 95.0 porcentaje LSD			
Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Bosque natural	8	1,405	X
Bosque restaurado	8	1,63125	X
Cárcava restaurada	7	1,73571	X
Cárcava natural	8	1,9675	X
Tabla b)			
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Bosque natural - Bosque restaurado	*	-0,22625	0,114686
Bosque natural - Cárcava natural	*	-0,5625	0,114686
Bosque natural - Cárcava restaurada	*	-0,330714	0,118711
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	-0,33625	0,114686
Bosque restaurado - Cárcava restaurada		-0,104464	0,118711
Cárcava natural - Cárcava restaurada	*	0,231786	0,118711

La Tabla b) muestra las diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 5 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la Tabla a), se han identificado un grupo homogéneo según la alineación de las X's en columnas. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher.

**A modo de resumen, se puede decir que la DENSIDAD depende de la ZONA en la que se haya realizado la medición, siendo significativamente mayor en la cárcava natural y menor en el bosque natural, lo cual es lógico ya que este último suelo es el más desarrollado.**

## b) Materia orgánica

Otro factor que la bibliografía determina que influye en la infiltración es la cantidad de materia orgánica. Por ello se ha estudiado la diferencia del porcentaje de este factor en las diferentes zonas.

Los porcentajes de materia orgánica para cada zona se muestran en la Figura 6.64.

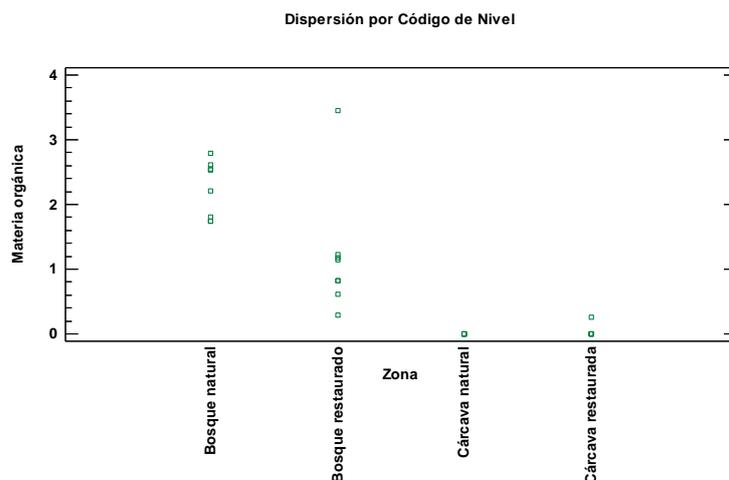


Figura 6.64. Dispersión de valores del porcentaje de materia orgánica del suelo por zonas y mediciones de infiltración.

Sobre los valores anteriores se han calculado las medias, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 6.21. Medias para el porcentaje de materia orgánica del suelo por Zona con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque natural	8	2,25	0,190988	1,9729	2,5271
Bosque restaurado	8	1,19375	0,190988	0,916652	1,47085
Cárcava natural	8	0	0,190988	-0,277098	0,277098
Cárcava restaurada	7	0,0371429	0,204175	-0,259088	0,333374
Total	31	0,897097			

En este caso la prueba de normalidad nos indica que los datos no provienen de una distribución normal, por lo que se ha optado por realizar una comparación de las medianas. Para esta comparación la prueba que se ha utilizado es la de Kruskal-Wallis.

Tabla 6.22. Prueba de Kruskal-Wallis para el porcentaje de materia orgánica por Zona.

Zona	Tamaño Muestra	Rango Promedio
Bosque natural	8	26,5
Bosque restaurado	8	20,5
Cárcava natural	8	7,5
Cárcava restaurada	7	8,57

Estadístico = 26,7534 P-valor = 0,000066316

La prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis de que las medianas de Materia orgánica dentro de cada uno de los 4 niveles de Zona son iguales. Primero se combinan los datos de todos los niveles y se ordenan de menor a mayor. Luego se calcula el rango promedio para los datos de cada nivel. Puesto que el p-valor es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0% de confianza. Para determinar cuáles medianas son significativamente diferentes de otras, podemos observar el diagrama de Caja y Bigotes de la Figura 6.65.:

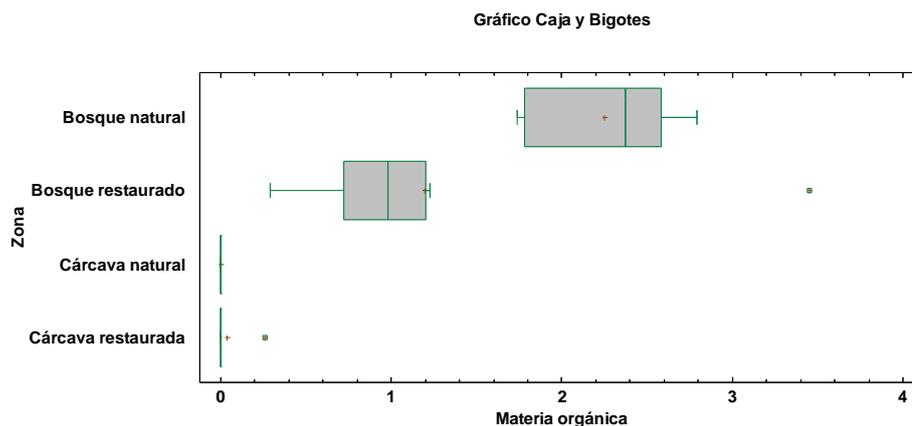


Figura 6.65. Diagrama de caja y bigotes para el porcentaje de materia orgánica en función de la zona.

**Por tanto, se puede decir que la MATERIA ORGÁNICA depende de la ZONA en la que se haya realizado la medición, siendo significativamente mayor en la zona de bosque natural, seguida del bosque restaurado, y siendo a su vez ésta mayor que el porcentaje de materia orgánica presente en las cárcavas.**

### c) Textura

Se han realizado 3 análisis de la varianza (ANOVA) individuales en los que se ha comparado el porcentaje de arcilla, limo y arena en cada zona. Se han analizado los residuos para cada uno de los análisis realizados, y para garantizar las condiciones de normalidad y homocedasticidad necesarias para realizar el análisis de varianza, se ha transformado los valores de limo y arcilla mediante su logaritmo neperiano y, a continuación, se ha realizado un test de normalidad de los residuos. Según el test de Kolmogorov-Smirnov no se puede rechazar la idea de que todos los residuos sean normales con un nivel de confianza del 95%. (p-valor > 0,05).

En la Figura 6.66. se recogen los valores obtenidos del porcentaje de arcilla, limo y arena para las diferentes zonas.

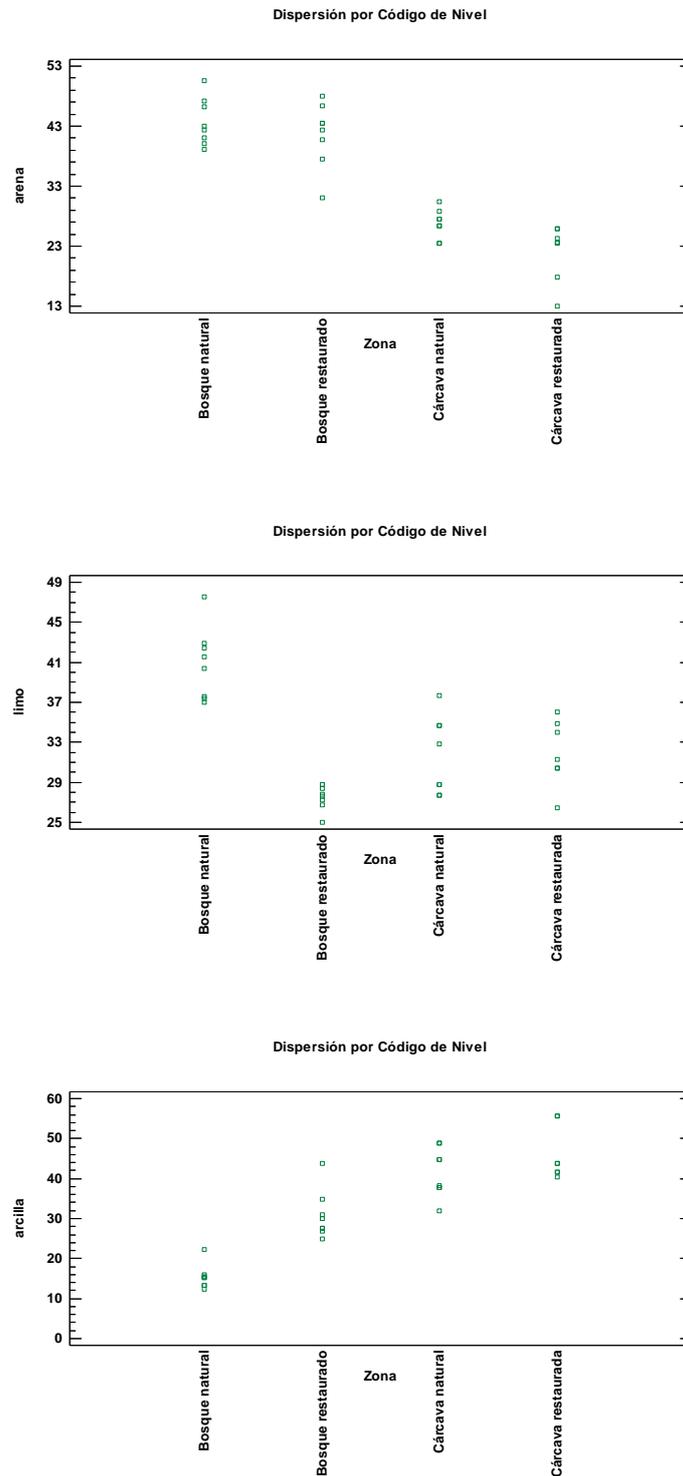


Figura 6.66. Porcentaje de arcilla, limo y arena por zonas y mediciones de infiltración.

Los gráficos de residuos se muestran a continuación:

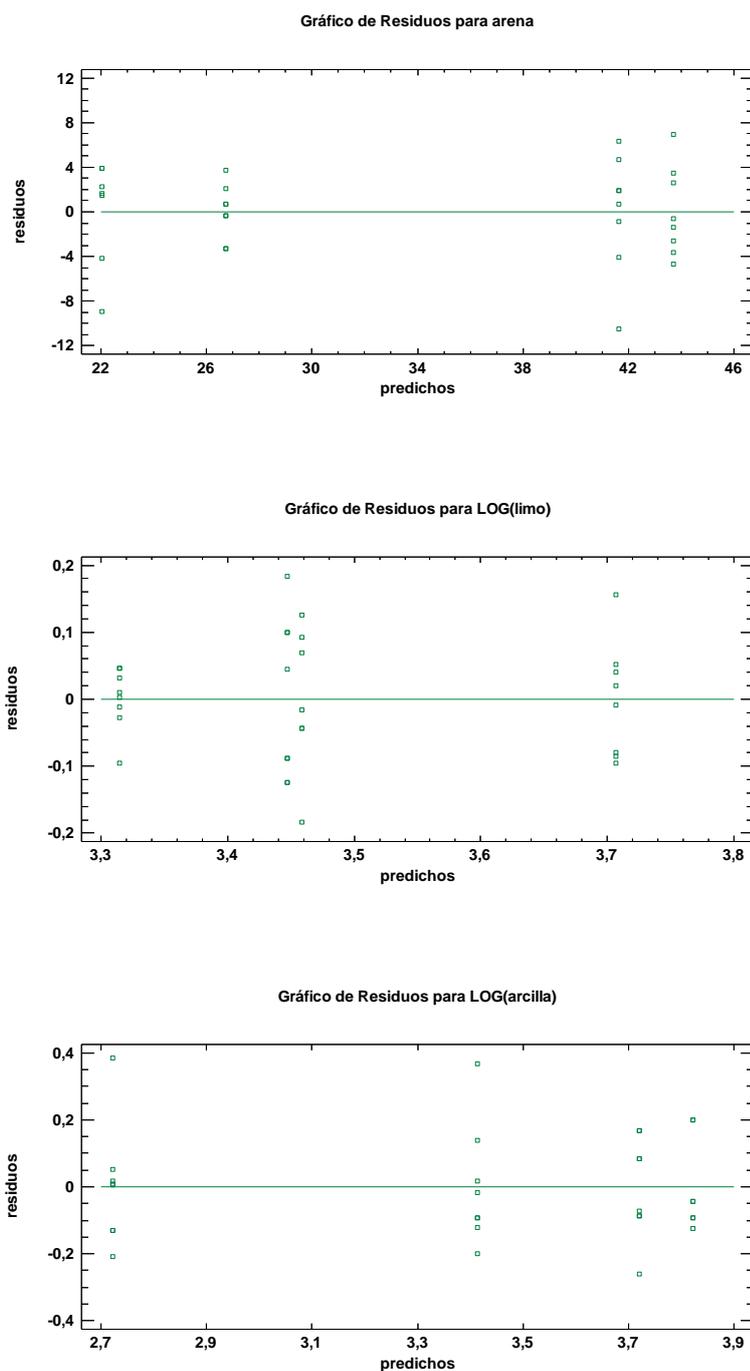


Figura 6.67. Gráficos de residuos para los porcentajes de arena, limo y arcilla por zonas y mediciones de infiltración.

Como hemos comentado antes una vez transformados los datos los residuos tienen forma bastante rectangular, lo que se ha corroborado con el test de normalidad de los residuos.

De los datos del porcentaje de arcilla, limo y arena, se calculan sus medias, errores estándar, así como los límites superior e inferior de los Intervalos de Confianza (I.C.) al 95%. La Figura 6.68. y la Tabla 6.23. muestran estos resultados.

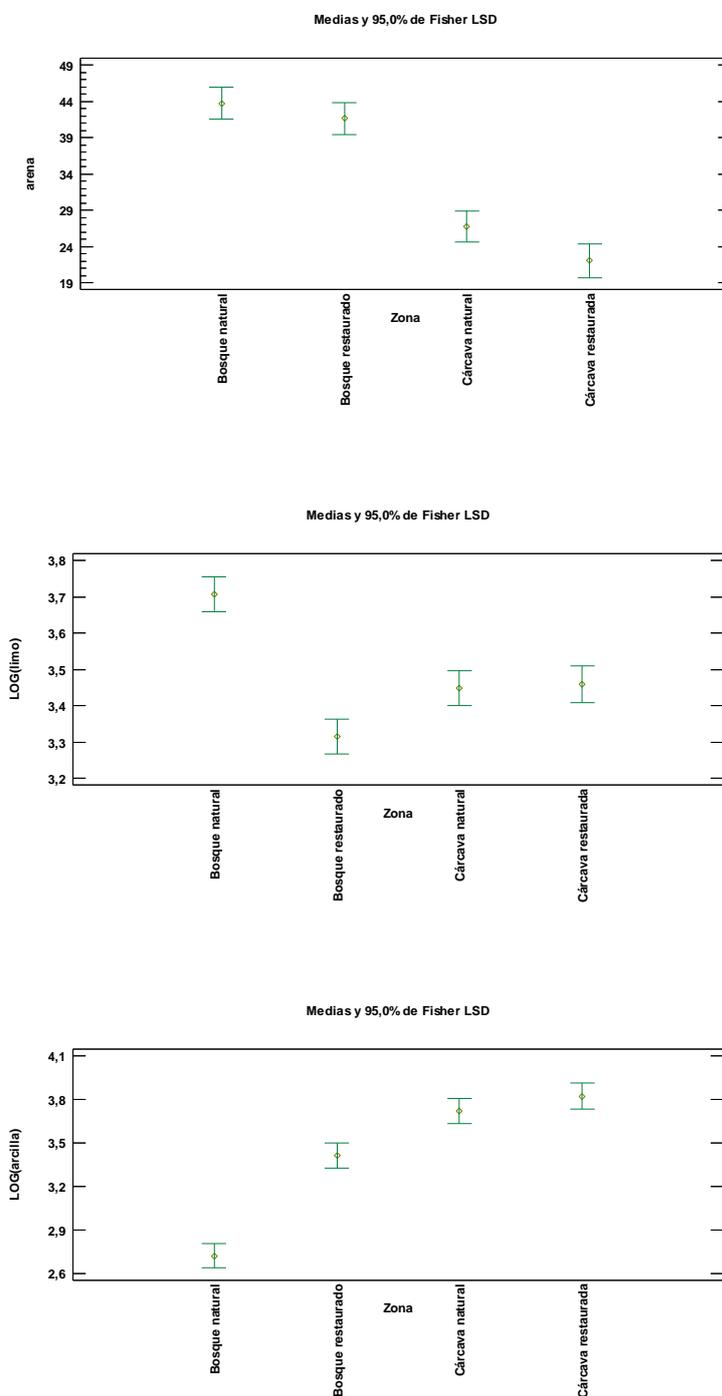


Figura 6.68. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano del porcentaje de arena, de limo y de arcilla en función de la zona.

Tabla 6.23. Medias e intervalos de confianza al 95% para el porcentaje de arcilla, limo y arena en función de la zona.

Zona	Casos	Media	Error Est.	Límite Inferior	Límite Superior
<b>Log(Arcilla)</b>					
Bosque natural	8	2,72174	0,0580813	2,63747	2,80601
Bosque restaurado	8	3,41344	0,0580813	3,32917	3,49771
Cárcava natural	8	3,71959	0,0580813	3,63532	3,80386
Cárcava restaurada	7	3,82138	0,0620916	3,73129	3,91147
Total	31	3,40606			
<b>Log(Limo)</b>					
Bosque natural	8	3,70676	0,0330745	3,65877	3,75474
Bosque restaurado	8	3,31506	0,0330745	3,26707	3,36305
Cárcava natural	8	3,44685	0,0330745	3,39886	3,49484
Cárcava restaurada	7	3,45847	0,0353582	3,40717	3,50977
Total	31	3,48254			
<b>Arena</b>					
Bosque natural	8	43,705	1,50096	41,5273	45,8827
Bosque restaurado	8	41,62	1,50096	39,4423	43,7977
Cárcava natural	8	26,745	1,50096	24,5673	28,9227
Cárcava restaurada	7	22,0271	1,60459	19,6991	24,3552
Total	31	33,8952			

Con el análisis ANOVA se estudiará la contribución de las variables porcentaje de arcilla, limo y arena en cada zona a traves de la evaluación de los p-valores.

Tabla 6.24. Resultados del análisis ANOVA para el porcentaje de arcilla, limo y arena en función de la zona.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	p-valor
<b>Log(Arcilla)</b>					
Entre grupos	5,74063	3	1,91354	<b>70,90</b>	<b>0,0000</b>
Intra grupos	0,728663	27	0,0269875		
Total (Corr.)	6,46929	30			
<b>Log(Limo)</b>					
Entre grupos	0,640825	3	0,213608	<b>24,41</b>	<b>0,0000</b>
Intra grupos	0,236288	27	0,00875139		
Total (Corr.)	0,877113	30			
<b>Arena</b>					
Entre grupos	2642,2	3	880,732	<b>48,87</b>	<b>0,0000</b>
Intra grupos	486,621	27	18,023		
Total (Corr.)	3128,82	30			

Los p-valores de las tres variables estudiadas son inferiores a 0,05, por lo que se puede determinar que la zona tiene un efecto estadísticamente significativo en las variables estudiadas para un nivel de confianza del 95,0%.

Como se ha determinado que tanto la arcilla como el limo y la arena son variables estadísticamente significativas, a continuación se va a realizar un Test de Rango Múltiple que queda recogido en la Tabla 6.25.

Tabla 6.25. Resultados de la prueba de homogeneidad. Tabla a. Método: 95.0 porcentaje LSD

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<b>Log(Arcilla)</b>			
Bosque natural	8	2,72174	X
Bosque restaurado	8	3,41344	X
Cárcava natural	8	3,71959	X
Cárcava restaurada	7	3,82138	X
<b>Log(Limo)</b>			
Bosque restaurado	8	3,31506	X
Cárcava natural	8	3,44685	X
Cárcava restaurada	7	3,45847	X
Bosque natural	8	3,70676	X
<b>Arena</b>			
Cárcava restaurada	7	22,0271	X
Cárcava natural	8	26,745	X
Bosque restaurado	8	41,62	X
Bosque natural	8	43,705	X

Tabla 6.26. Resultados de la prueba de homogeneidad. Tabla b.

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
<b>Log(Arcilla)</b>			
Bosque natural - Bosque restaurado	*	-0,691701	0,168536
Bosque natural - Cárcava natural	*	-0,99785	0,168536
Bosque natural - Cárcava restaurada	*	-1,09964	0,174452
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	-0,306149	0,168536
Bosque restaurado - Cárcava restaurada	*	-0,407939	0,174452
Cárcava natural - Cárcava restaurada		-0,10179	0,174452
<b>Log(Limo)</b>			
Bosque natural - Bosque restaurado	*	0,391696	0,0959734
Bosque natural - Cárcava natural	*	0,259907	0,0959734
Bosque natural - Cárcava restaurada	*	0,248288	0,0993419
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	-0,131788	0,0959734
Bosque restaurado - Cárcava restaurada	*	-0,143408	0,0993419
Cárcava natural - Cárcava restaurada		-0,0116192	0,0993419
<b>Arena</b>			
Bosque natural - Bosque restaurado		2,085	4,35538
Bosque natural - Cárcava natural	*	16,96	4,35538
Bosque natural - Cárcava restaurada	*	21,6779	4,50824
Bosque restaurado - Cárcava natural	*	14,875	4,35538
Bosque restaurado - Cárcava restaurada	*	19,5929	4,50824
Cárcava natural - Cárcava restaurada	*	4,71786	4,50824

Las diferencias entre los pares de medias de los porcentajes que se muestran marcadas con un asterisco determinan que existe una diferencia estadísticamente significativa a un nivel de confianza del 95% entre los diferentes porcentajes. Para la arcilla y el limo tenemos dos grupos homogéneos de datos entre ambas áreas degradadas de las cárcavas. Sin embargo para las zonas de bosque sólo existe un grupo homogéneo para la arena, variando los porcentajes de arcilla y limo entre ambos. En concreto, el porcentaje de arcilla es mayor en el bosque restaurado.



Figura 6.69. Imágenes donde se observa el gran contenido en arcilla de los suelos de la zona degradada, (izquierda: Zona degradada de la cárcava restaurada; Derecha: Zona degradada de la cárcava natural) hinchadas por el agua tras la realización de un ensayo con el infiltrómetro de 30 cm.

#### 6.4.1.3. Discusión

Como hemos visto en los resultados mostrados anteriormente, se puede afirmar que la tasa de infiltración depende de la zona en la que se ha realizado el ensayo, tanto si medimos con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro como si lo hacemos con el de 8 cm.

A continuación se muestran las medias de la tasa de infiltración final obtenida en cada zona y con cada método utilizado. Además se ha asignado a cada media la clase de infiltración que utiliza el servicio de conservación de suelos del USDA (USDA, 1999).

Tabla 6.27. Clases de infiltración utilizadas por el USDA (Modificado de USDA, 1999).

Clase de infiltración básica	(mm/h)
Infiltración lenta	< 5
Infiltración moderadamente lenta	5 - 20
Infiltración moderada	21 - 60
Infiltración moderadamente rápida	61 - 130
Infiltración rápida	131 - 250
Infiltración muy rápida	> 250

Con el Infiltrómetro de 30 cm los resultados son los siguientes:

Tabla 6.28. Clase de infiltración observada en cada zona con el infiltrómetro de 30 cm.

Zona	Media mm/h	Clase de infiltración
1. Área degradada restaurada	3,19	Lenta
2. Área degradada natural	2,32	Lenta
3. Bosque restaurado pinar	138,87	Rápida
4. Bosque natural roble	233,51	Rápida

Utilizando el infiltrómetro de 30 cm observamos que la infiltración en la zona de bosque de pinar es casi 45 veces mayor que en las áreas degradadas y en torno a 73 veces mayor en el caso del robledal.

Con el Infiltrómetro de 8 cm los resultados son los siguientes:

Tabla 6.29. Clase de infiltración observada en cada zona con el infiltrómetro de 8 cm.

Zona	Media mm/h	Clase de infiltración
1. Área degradada restaurada	8,27	Moderadamente lenta
2. Área degradada natural	3,23	Lenta
3. Bosque restaurado pinar	111,17	Moderadamente rápida
4. Bosque natural roble	27,80	Moderada

En el caso de las medidas tomadas con el infiltrómetro de 8 cm observamos que la zona de bosque de pinar presenta una infiltración en torno a 13 veces mayor que las áreas degradadas y alrededor de entre 4 y 8 veces mayor en el caso del robledal, lo cual llama la atención si lo comparamos con los resultados del infiltrómetro de 30 cm de diámetro.

Como ya es sabido, uno de los factores que influye en la infiltración es la vegetación (Martínez de Azagra y Navarro, 1996; Fournier *et al.*, 1998, Buzcko *et al.*, 2006, esto nos explica la mayor tasa de infiltración final que presenta el bosque.

En terrenos desprovistos de vegetación, las gotas de lluvia contribuyen a la compactación de la capa superficial del suelo, promoviendo la formación de costras (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

Está demostrado que la implantación de la vegetación en un terreno desnudo aumenta la infiltración, ya que disminuye la velocidad de escorrentía superficial y reduce el impacto de las gotas de lluvia. La presencia de bosque mejora la estructura de suelo gracias al aumento de la materia orgánica. El porcentaje de materia orgánica en el suelo de las zonas de bosque muestra diferencias significativas respecto al contenido de ésta en las zonas degradadas, como veremos más adelante.

Cuando medimos con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro, la tasa de infiltración es significativamente mayor en las zonas de bosque que en las degradadas, pero no existen diferencias significativas entre ambas zonas degradadas, lo cual nos permite comparar las zonas de bosque al estar implantadas sobre terrenos que antes poseían las mismas características de infiltración y propiedades del suelo.

Tampoco existen diferencias significativas entre ambas zonas de bosque, sin embargo, la infiltración es mayor en el robledal que en el pinar.

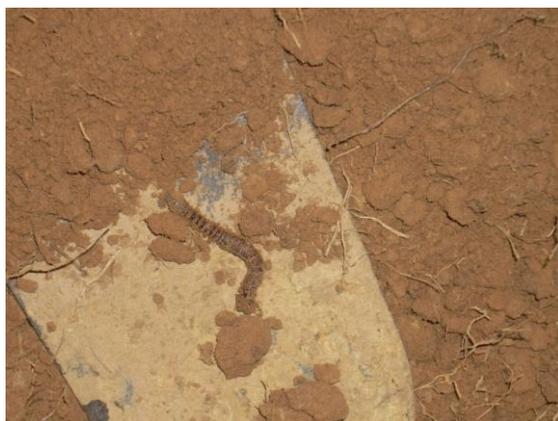
Por el contrario, cuando medimos con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro, aunque la tasa de infiltración sigue siendo significativamente mayor en las zonas de bosque que en las degradadas, y aunque no existen diferencias significativas entre ambas zonas degradadas, sí que las hay entre ambas zonas de bosque y obtenemos que la infiltración es mayor en la zona de pinar de que robleal.

Por tanto, la medición se ve sesgada en función de que se utilice un instrumento de medición u otro.

La infiltración no es una característica constante en el suelo y, como sabemos, puede variar a lo largo de una misma zona de estudio. Harden (2003) afirma que la variabilidad de la tasa de infiltración en las zonas de bosque puede ser muy grande por la presencia de macroporos que se forman alrededor de las raíces que presentan las especies arbóreas.

Por tanto, estas diferencias pueden deberse a diferencias puntuales en las características de los suelos. Al medir con el infiltrómetro de 30 cm, se observó un gran número de gusanos y lombrices al realizar la franja de humectación alrededor del cilindro, mientras que este fenómeno no fue observado al realizarla con el infiltrómetro pequeño.

Johnson-Maynard *et al.* (2002) comparan la conductividad hidráulica saturada en una zona de pinar y robleal, determinando que la infiltración en la zona de robleal es mayor y asociando este incremento, entre otras razones, a la presencia de gusanos en la zona, que incrementarían la porosidad. En nuestro caso, esta presencia de gusanos y lombrices también se vio representada en la zona de robleal, apareciendo lombrices desde las capas superiores del suelo con simplemente cavar la zanja alrededor del infiltrómetro para realizar los ensayos.



**Figura 6.70. Detalle de una lombriz en la zona de realización de un ensayo con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro.**

Neris *et al.* (2012) compara la infiltración entre un pinar y bosque verde en Canarias, determinando que la infiltración es mayor en el bosque verde. Afirman que aunque la cantidad de materia orgánica en ambos suelos es parecida, la relación C/N no lo es, lo cual afecta directamente a la estabilidad de agregados y ésta a la infiltración.

En nuestro caso, los valores de materia orgánica en el pinar y en el robledal muestran valores medios de 1,67% y 2,07%, respectivamente, mientras que los valores de la relación C/N son 13,56 para el robledal y 20,20 para el pinar. En el caso de Neris *et al.* (2012), con valores de materia orgánica también similares entre el bosque verde y de pino, los valores de la relación C/N son muy parecidos a los de nuestro estudio, con una relación de 14,7 en el bosque verde y de 20,8 para el pinar, por lo que el suelo del robledal puede ofrecer una mayor tasa de infiltración debido a las mismas razones que argumentan Neris *et al.* (2012).

Si nos fijamos en la homogeneidad del terreno a la hora de medir la infiltración obtenemos que en zonas más homogéneas como las cárcavas tanto el infiltrómetro de 30 cm de diámetro como el de 8 cm presentan datos de infiltración similares. Sin embargo, estos datos pasan a ser más heterogéneos y por tanto con un mayor valor del coeficiente de variación en el caso del infiltrómetro pequeño cuando la zona de estudio ya no presenta características homogéneas, como ocurre en el bosque. Por tanto creemos que este infiltrómetro puede ser muy útil en el estudio de zonas homogéneas, pero que en zonas más desiguales necesita un mayor número de ensayos para obtener una menor desviación típica en los datos.

Los datos obtenidos por Johnson-Maynard *et al.* (2002) muestran que dependiendo de la palatabilidad de cada tipo de vegetación, las poblaciones de macrofauna pueden diferir en tamaño y composición bajo cada tipo de vegetación. Los animales salvajes y domesticados utilizan los árboles como refugio durante las tormentas de lluvia o para tener sombra. Esta congregación de animales, en particular en momentos en los que el suelo está húmedo, puede compactar el suelo y por lo tanto reducir también el Ks del horizonte A del suelo (Drewry *et al.*, 2000), por lo que la presencia de animales como corzos en la zona de robledal puede hacer que estos suelos estén más compactados y muestren por tanto menor infiltración, habiéndose reflejado este aspecto sólo en algunos de los ensayos, a pesar de no distar mucho entre sí. Por otro lado, Chappell *et al.* (1996), en Chandler *et al.* (2008) afirma que uno de los efectos negativos de los árboles en la conductividad hidráulica saturada se basa en que el peso de un árbol, combinado con el movimiento de estructural de las raíces durante condiciones de viento, pueden comprimir los suelos en escalas de centímetros, lo que puede reducir esta conductividad.

El infiltrómetro de 8 cm de diámetro, al tener sólo una pequeña zona a través de la que infiltra el agua, puede verse más influido por características del terreno como las comentadas. Como se explica en los antecedentes, Tricker (1978) afirma que cuanto mayor sea el diámetro del cilindro menor será el error, pero que con un cilindro de 15 cm de diámetro se consigue una combinación entre una precisión adecuada y un aporte de agua razonable, lo cual sería un diámetro superior a 8 cm.

Por último se deduce que el pinar, en menos años, puede llegar a dar valores de la tasa de infiltración iguales o superiores al robledal natural instalado en la zona de cárcavas, por lo que el uso de los mismos para la restauración fue un acierto, consiguiendo aumentar la infiltración y por tanto reducir la erosión en unos plazos de tiempo más cercanos.

Neris *et al.* (2012), estudian la influencia de las propiedades del suelo en la infiltración. Su análisis estadístico muestra que las propiedades del suelo que principalmente afectan a la infiltración son la agregación del suelo, la estabilidad estructural y, en menor medida, la materia orgánica y densidad aparente.

En nuestro caso, en cuanto a la densidad, también se observa que depende de la zona de medición, siendo significativamente mayor en la cárcava natural y menor en el bosque natural, lo cual es lógico ya que este último suelo es el más desarrollado debido a que la vegetación lleva implantada más tiempo.

En lo que respecta a la materia orgánica se puede decir que también depende de la zona en la que se haya realizado la medición, siendo significativamente mayor en la zona de bosque natural de roble, seguida del bosque restaurado, y prácticamente nula en las zonas de cárcavas, lo cual es lógico si nos fijamos también en los datos de cobertura, del 100% en el caso de los bosques y del 0% para las cárcavas, como puede verse en la Figura 6.71.



Figura 6.71. Coberturas vegetales de las distintas zonas. 1: Área degradada de la cárcava restaurada; 2: Área degradada de la cárcava natural; 3: Bosque restaurado de pinar; 4: Bosque natural de roble.

Por último, para la textura, se obtienen dos grupos homogéneos de datos entre ambas áreas degradadas de las cárcavas. Estos datos, junto con la ausencia de diferencias en la tasa de infiltración entre estas dos zonas degradadas, nos permite comparar el pinar y el robledal sin problemas. Para las zonas de bosque sólo existe un grupo homogéneo para la arena, variando los porcentajes de arcilla y limo entre ambos. En concreto, el porcentaje de arcilla es mayor en el bosque restaurado. Esto puede deberse a la diferencia en el estado de desarrollo del suelo, como también se observa en las diferencias en la relación C/N, y por tanto, en la estabilidad de los agregados, antes mencionada.

Por último, si comparamos los resultados de las tasas de infiltración final con la bibliografía, vemos que Fournier *et al.* (1998) obtienen una tasa de infiltración media para un suelo arenoso-limoso de 148 mm/h. Esta textura no es comparable a ninguna de las obtenidas en este estudio. Sin embargo, al igual que en nuestro caso, obtienen tasas mayores en las zonas provistas de vegetación que en las desnudas. Este hecho también es constatado por Dunkerley *et al.* (2000).

Harden *et al.* (2003) obtienen tasas de infiltración con un infiltrómetro de 15 cm de diámetro de entre 23 y 94 mm/h, dentro del rango de tasas obtenidas en nuestro caso en la zona de bosque.

Por otro lado, las tasas observadas por Omuto *et al.* (2008) con un infiltrómetro de 30 cm de diámetro difieren de las obtenidas en nuestro caso bajo dosel arbolado, y tampoco se acercan para zonas en las que se observan síntomas de degradación, donde obtiene tasas de infiltración de 18 cm/h, muy superiores a las obtenidas en nuestro caso, de en torno a 3 mm/h, aunque los contenidos en arcilla en el estudio de Omuto *et al.* (2008) son menores.

En cualquier caso, la gran variabilidad en la tasa de infiltración obtenida en unas mismas condiciones de experimentación es una constante en los estudios de infiltración, puesto que así lo han observado Harden *et al.* (2003) Dunkerley *et al.* (2000), Cerdà (1997), o Fournier *et al.* (1998).

## **6.4.2. Análisis de Componentes Principales (ACP)**

### **6.4.2.1. Resultados del Análisis de Componentes Principales**

Como se explicó en 5. *Material y métodos*, el Análisis de Componentes Principales consiste en establecer clases de infiltración en función de las características del suelo, de modo que sea posible predecir el comportamiento de un suelo frente a la infiltración conociendo propiedades del mismo tales como su densidad, contenido en materia orgánica o textura.

El Análisis de Componentes Principales (ACP) es una técnica estadística que pretende sintetizar la información aportada mediante la denominada reducción de las dimensiones (número de variables). En este caso, las variables serán las siguientes:

- Tasa de infiltración (en adelante, Tasa). Sus unidades serán mm/h.
- Densidad, medida en g/cm<sup>3</sup>.
- Porcentaje de materia orgánica (en adelante, Materia orgánica).
- Porcentaje de arena (Arena).
- Porcentaje de limo (Limo).
- Porcentaje de arcilla (Arcilla).
- Relación carbono /nitrógeno (C/N).

El resumen estadístico de las variables previo al análisis ACP puede observarse en la Tabla 6.30.

Tabla 6.30. Resumen estadístico de las variables utilizadas en el ACP.

	Tasa	Densidad	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla	C/N
Recuento	15	15	15	15	15	15	15
Promedio	100,56	1,67	0,84	35,35	33,38	31,27	11,89
Desviación Estándar	118,65	0,23	1,07	8,90	6,48	12,33	6,20
Mínimo	1,12	1,23	0	23,45	27,19	13,36	4,65
Máximo	345,14	2,0	2,79	47,93	47,58	48,84	20,2

Para determinar los nuevos componentes principales, que denominaremos factores, debemos construir la matriz de varianzas que se muestra en la Tabla 6.31.

Tabla 6.31. Matriz de covarianzas.

Variable	Tasa	Densidad	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla	C/N
Tasa	1,000000						
Densidad	-0,698871	1,000000					
Materia orgánica	0,731294	-0,683385	1,000000				
Arena	0,660921	-0,653461	0,612334	1,000000			
Limo	0,461176	-0,612703	0,730801	0,269676	1,000000		
Arcilla	-0,718783	0,792959	-0,825302	-0,862784	-0,719514	1,000000	
C/N	0,590603	-0,515922	0,431473	0,861422	-0,022641	-0,609367	1,000000

La matriz de correlación o de covarianzas muestra la relación lineal entre las variables continuas empleadas a las cuales se hace referencia a través de su identificador (Tasa, Densidad, etc.).

Los valores propios se recogen en la Tabla 6.32., obteniéndose de multiplicar los siete vectores propios de la matriz (definidos por la diagonal de la matriz de correlación) por una serie de factores.

Tabla 6.32. Determinación de los factores que explican los datos.

Componentes principales	Valores propios	% Varianza total	Valores propios acumulados	% Acumulado
1	4,790466	68,43523	4,790466	68,4352
2	1,278036	18,25766	6,068502	86,6929
3	0,376424	5,37748	6,444926	92,0704
4	0,317156	4,53081	6,762083	96,6012
5	0,155340	2,21914	6,917422	98,8203
6	0,082578	1,17968	7,000000	100,0000

Como existen siete vectores propios y el valor de cada uno de ellos es la unidad, deberán existir siete valores propios y la suma de los mismos ha de ser siete también. En la columna de porcentajes se muestra qué porcentaje del total (suma de valores propios igual a siete) supone cada uno de los valores propios. Así mismo en la columna adyacente se recogen los porcentajes acumulados a medida que se van añadiendo valores propios, y que informan sobre el porcentaje de los datos que van explicando dichos valores.

Por lo tanto, la línea doble de color verde establece un límite lógico entre el porcentaje de datos explicado y los factores a considerar. Con dos factores (límite sensato para la manejabilidad de las estadísticas) se explican más del 86 % de la información de partida (límite muy razonable de probabilidad).

De este modo, el Factor 1 explicará el 68,44 % de los datos, mientras que el Factor 2 definirá el 18,26 % de los mismos, y, en conjunto, explican el 86,69 %.

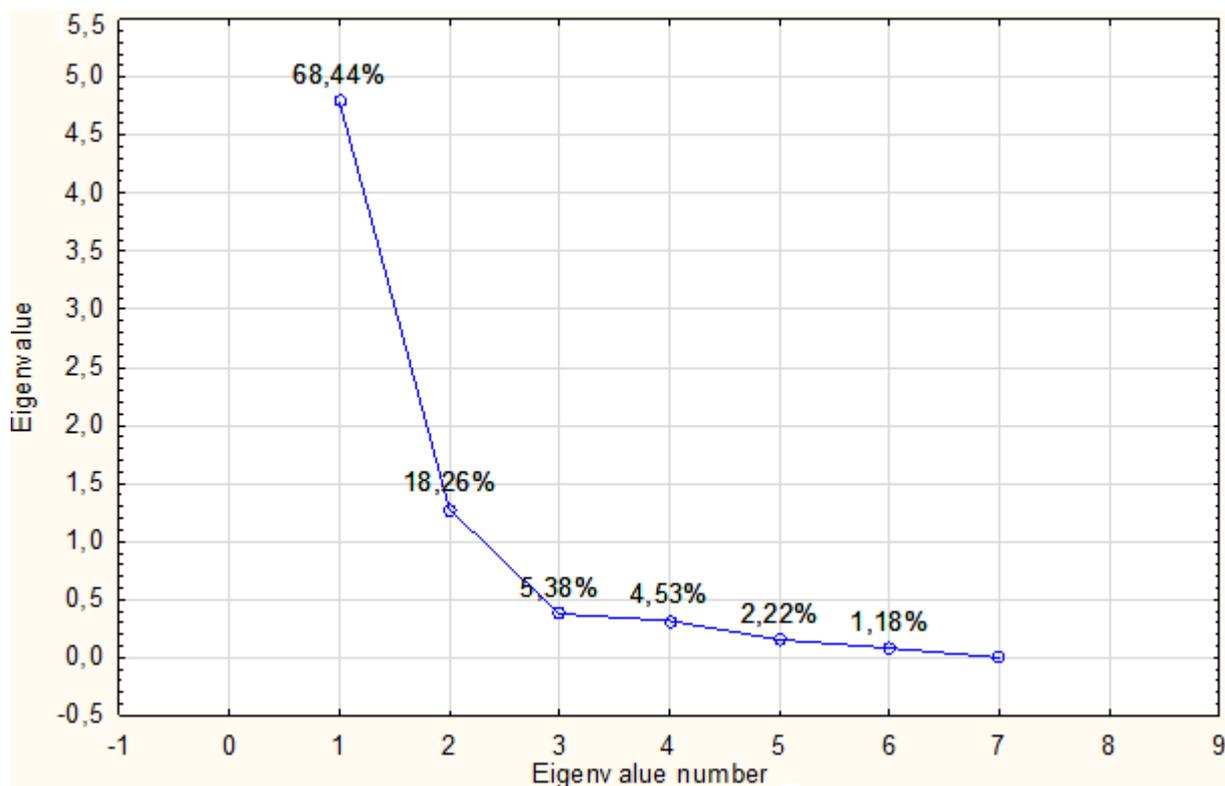


Figura 6.72. Porcentaje de varianza total explicada por cada factor.

En la Tabla 6.33. se recogen las coordenadas de las variables activas e ilustrativas sobre los ejes o Factores. Las coordenadas se presentan sobre 6 ejes con el objetivo de mostrar la diferencia entre las relaciones variable-factor entre la elección realizada (2 ejes) y la hipotética elección de 6 ejes.

Tabla 6.33. Coordenadas factoriales de las variables.

Variable	Factor 1	Factor 2	Factor 3	Factor 4	Factor 5	Factor 6
Tasa	<b>0,846843</b>	0,050766	-0,502434	-0,021895	0,165401	-0,001543
Densidad	<b>-0,862386</b>	0,109904	0,008611	-0,477249	0,119720	0,045148
Materia orgánica	<b>0,871614</b>	-0,278547	-0,089706	-0,281855	-0,266201	-0,065944
Arena	<b>0,860163</b>	0,425648	0,215056	-0,069414	0,104109	-0,130528
Limo	0,650068	<b>-0,728886</b>	0,133516	-0,020836	0,087777	0,142023
Arcilla	<b>-0,961649</b>	0,075708	-0,225197	0,061001	-0,121168	0,019570
C/N	0,694741	<b>0,683820</b>	0,032760	-0,022237	-0,097781	0,196461

Se observa que en el Factor 1, en rojo, las variables con las coordenadas más cercanas a 1 o -1 son ARCILLA (-0,96), MATERIA ORGÁNICA (0,87), DENSIDAD (-0,86), ARENA (0,86) Y TASA (0,84), indicando que son estas variables las que caracterizan este Factor. Al mismo tiempo, analizando las coordenadas de estas variables sobre el Factor 2, en verde, se observan valores inferiores a 0,5 e incluso cercanos a 0, luego la relación de éstas con este segundo Factor es poca. Realizando el mismo análisis con respecto a las variables que caracterizan al Factor 2, se percibe que éstas son LIMO (-0,72) y C/N (0,68).

Las coordenadas con respecto a los ejes 3, 4, 5 y 6 de las variables, en su mayoría, no superan valores de 0,5, corroborando que la elección de dos Factores es la más acertada. En el gráfico adjunto se recoge de una manera más visual todo lo explicado anteriormente.

Por tanto, los ensayos de infiltración objeto de estudio están caracterizados por la DENSIDAD y ARCILLA, (verde) con correlación negativa, junto con el contenido en ARENA y MATERIA ORGÁNICA (en amarillo), y por otro con el contenido en LIMO y la relación C/N, el primero con correlación positiva y el segundo negativa (azul).

Esta caracterización se observa perfectamente en la Figura 6.73.

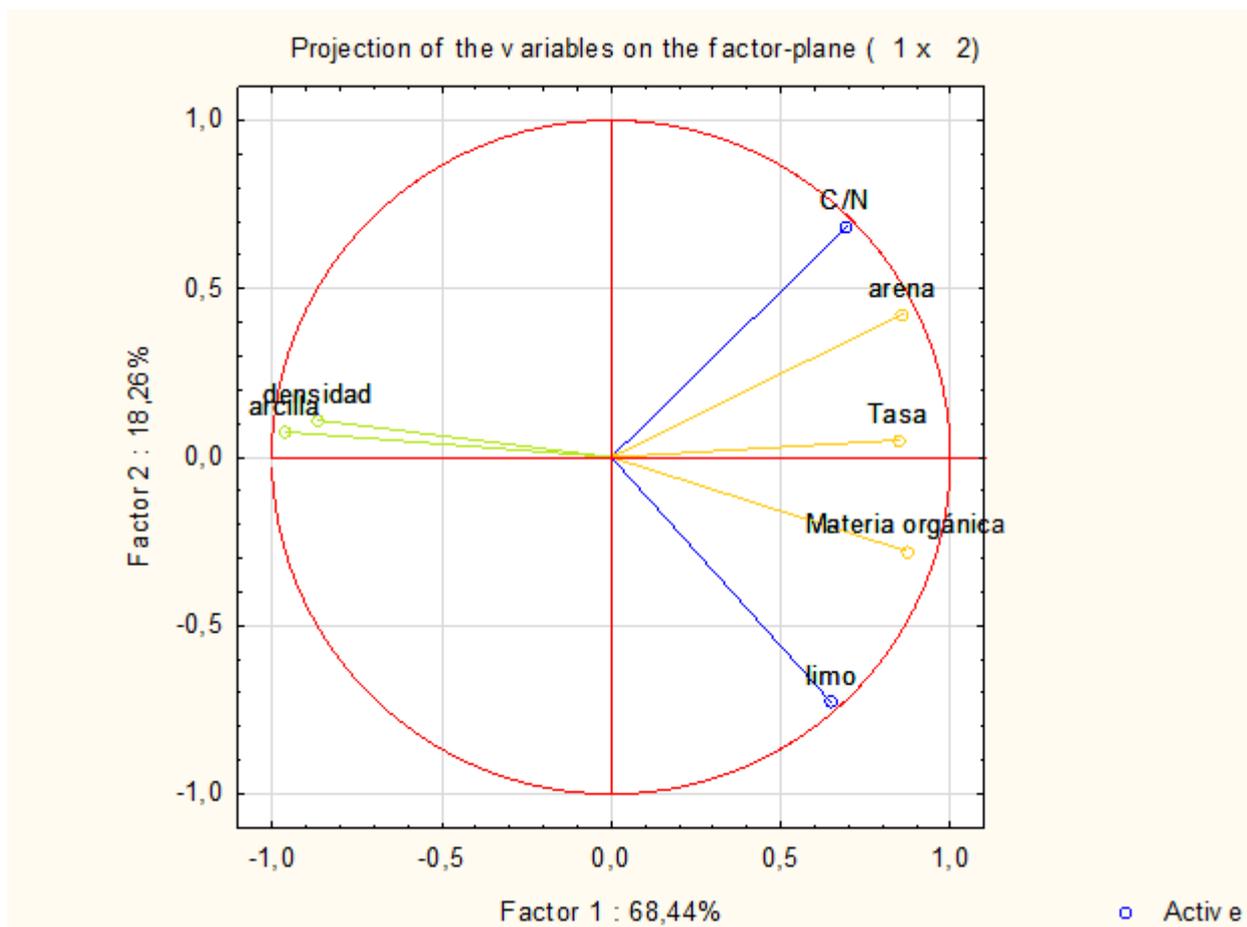


Figura 6.73. Descripción de los ejes factoriales y de las variables características.

En el gráfico clúster se observan los diferentes grupos que se van formando en el desarrollo del procedimiento. En la base del mismo se encuentran los datos iniciales y a medida que se asciende, se van concretando los grupos. En la Figura 6.74. se muestra el desarrollo de los grupos. Con ayuda del gráfico clúster se realiza el corte del árbol jerárquico por el lugar donde las distancias entre grupos aumentan considerablemente. Este corte tiene una parte subjetiva, pues se realiza manualmente por donde el analista considere. En el caso que se presenta a continuación la lógica establece que el corte se ha de realizar fijando 3 clases diferentes, como se muestra en la Figura 6.74.

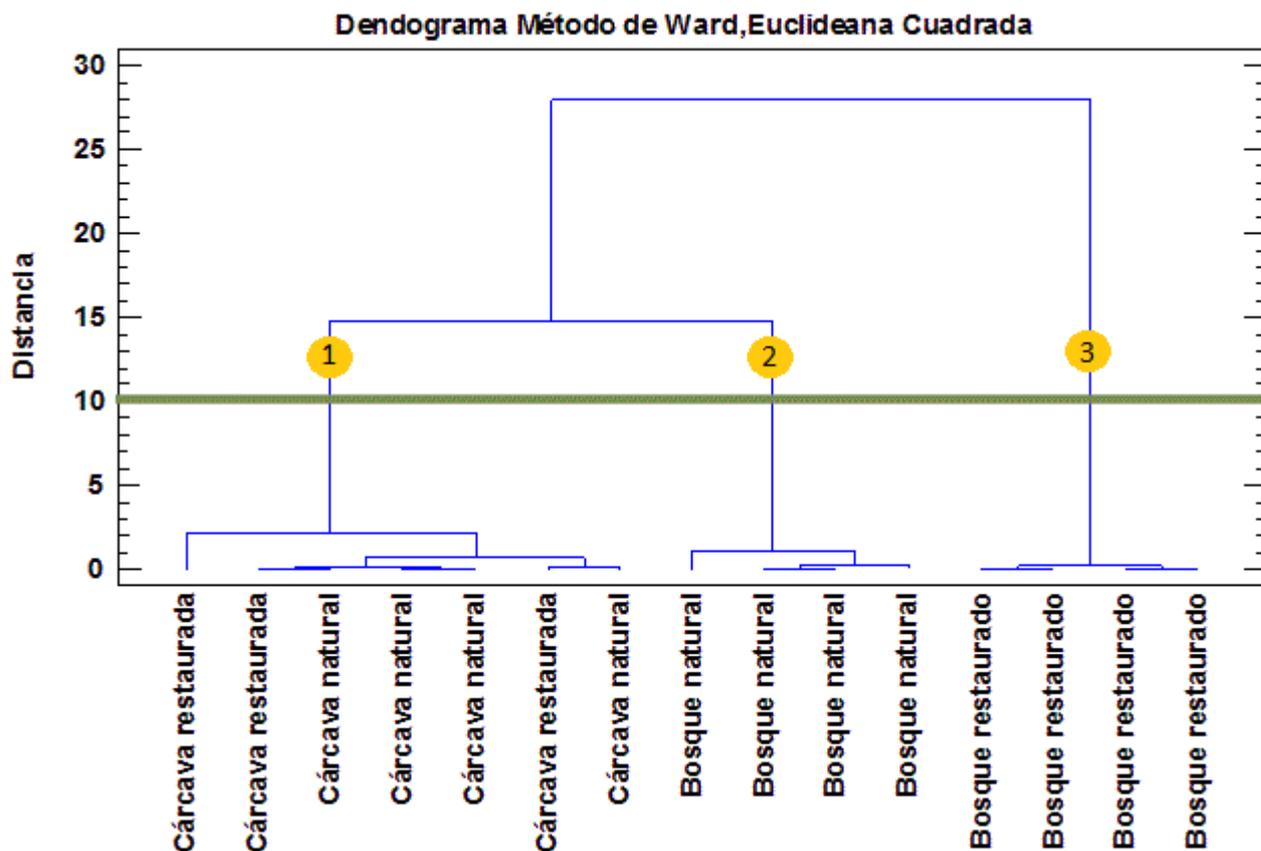


Figura 6.74. Desarrollo de los grupos mediante procedimiento Clúster (Método de Ward con las distancias euclídeas al cuadrado)

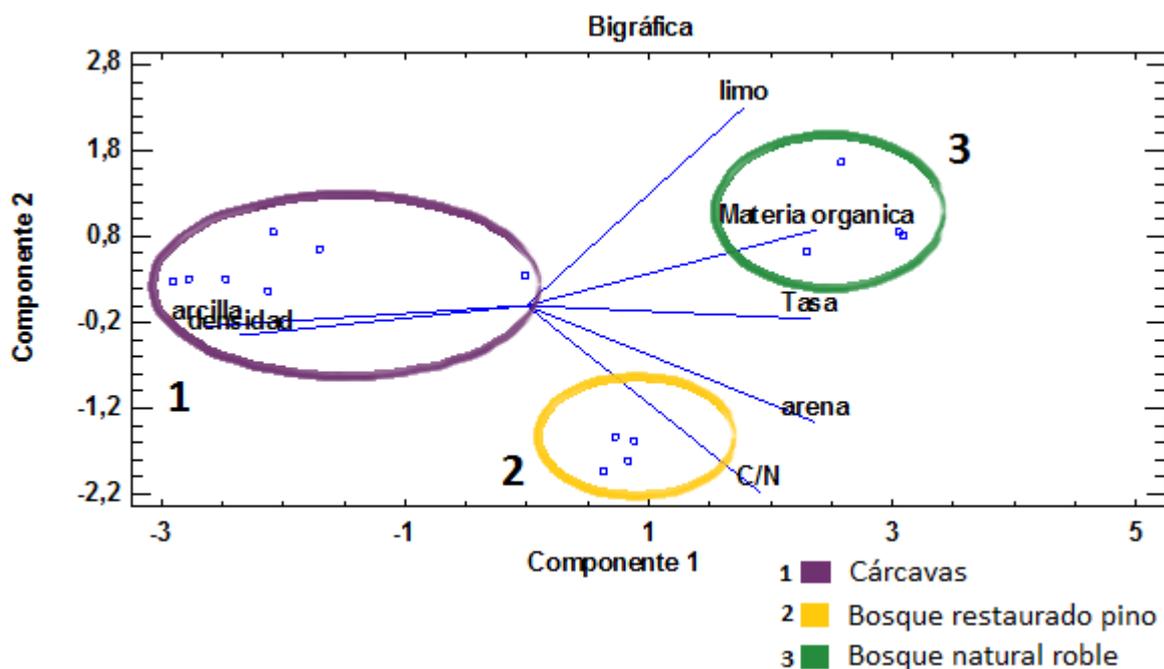


Figura 6.75. Clases de ensayos de infiltración obtenidas.

- La **clase 1** (morado) está formada por ensayos de infiltración con Tasas de infiltración lentas (alrededor de 3 mm/h), con suelos con elevada densidad (1,84 g/cm<sup>3</sup> de media), altos contenidos en arcilla (>40%) y nulo contenido en materia orgánica, así como valores de la relación C/N menores de 8.
- La **clase 2** (amarillo) está formada por ensayos de infiltración con Tasas de infiltración moderadas (aproximadamente 140 mm/h), con suelos con una densidad alrededor de 1,65 g/cm<sup>3</sup>, contenidos en arcilla menores del 30% y contenidos en arena alrededor del 40% y un contenido en materia orgánica de alrededor del 1%. La relación C/N de esta zona es muy alta, con valores cercanos a 20.
- La **clase 3** (verde) está formada por ensayos de infiltración con Tasas de infiltración altas (alrededor de 200 mm/h), con suelos con densidades menores (1,41 g/cm<sup>3</sup>), un contenido en arcilla de cómo máximo alrededor del 15% y un contenido en arena superior al 40%, así como un contenido en materia orgánica superior al 2%. La relación C/N es moderada, con valores que rondan el 14.

Los resultados de esta caracterización de las clases de ensayos de infiltración se muestran a continuación (Tablas 6.34-6.44 y Figuras 6.76-6.79), mediante un análisis ANOVA de los grupos obtenidos.

Se han analizado los residuos para cada uno de los análisis ANOVA realizados y transformado los datos en caso necesario, obteniendo que según el test de kolmororov-Smirnov no se puede rechazar que todos los residuos sean normales con un nivel de confianza del 95%.

- En cuanto a la caracterización de la **Tasa de infiltración** para los distintos ensayos los resultados son los siguientes:

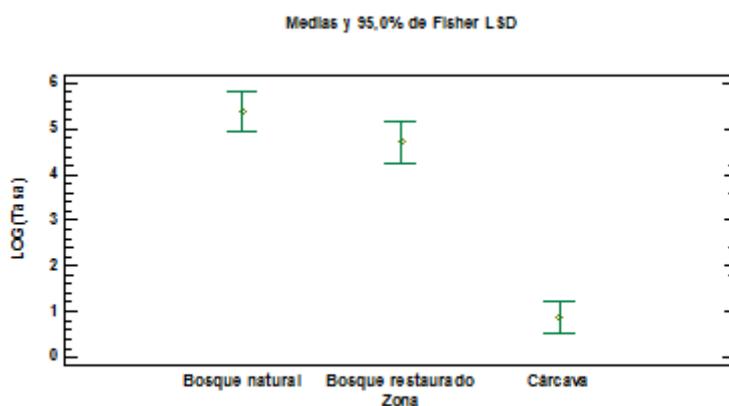


Figura 6.76. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h en función de las zonas y clases de infiltración obtenidas.

Tabla 6.34. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración por Zona y clase de infiltración obtenidas. Valores en mm/h.

Clase	Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
1	Cárcava	7	0,873943	X
2	Bosque restaurado	4	4,72277	X
3	Bosque natural	4	5,38563	X

Tabla 6.35. Resumen estadístico de la variable Tasa de infiltración por zona y clase de infiltración. Datos en mm/h.

Clase	Zona	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	Bosque natural	4	233,512	95,9201	41,0771%	132,0	345,14	213,14
2	Bosque restaurado	4	138,87	92,8522	66,8627%	47,202	227,304	180,102
1	Cárcava	7	2,69171	1,38758	51,55%	1,12	4,59	3,47
	Total	15	100,558	118,654	117,995%	1,12	345,14	344,02

- En cuanto a la caracterización de la **Densidad** de las distintas zonas, los resultados se muestran en la Figura 6.77. y la Tabla 6.36.

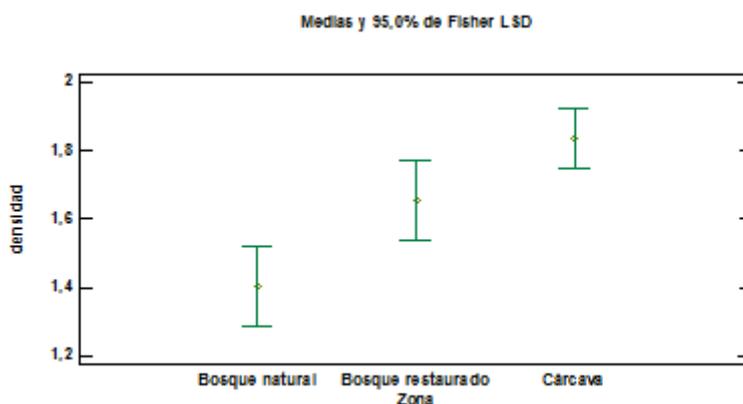


Figura 6.77. Medias e intervalos de confianza al 95% para la densidad en función de las zonas y clases de infiltración obtenidas.

Tabla 6.36. Pruebas de Múltiple Rangos para la Densidad por Zona y clase de infiltración obtenidas. Valores en g/cm<sup>3</sup>.

Clase	Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
3	Bosque natural	4	1,405	X
2	Bosque restaurado	4	1,655	X
1	Cárcava	7	1,83714	X

Tabla 6.37. Resumen estadístico de la variable Densidad por zona y clase de infiltración. Datos en g/cm<sup>3</sup>.

Clase	Zona	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	Bosque natural	4	1,405	0,155885	11,095%	1,23	1,56	0,33
2	Bosque restaurado	4	1,655	0,138924	8,39423%	1,56	1,86	0,3
1	Cárcava	7	1,83714	0,152939	8,32485%	1,56	2,0	0,44
	Total	15	1,67333	0,231198	13,8166%	1,23	2,0	0,77

- En el caso de la **Materia orgánica** no incluimos los datos correspondientes a ambas zonas de cárcavas puesto que su contenido en materia orgánica es nulo, obteniendo los siguientes resultados:

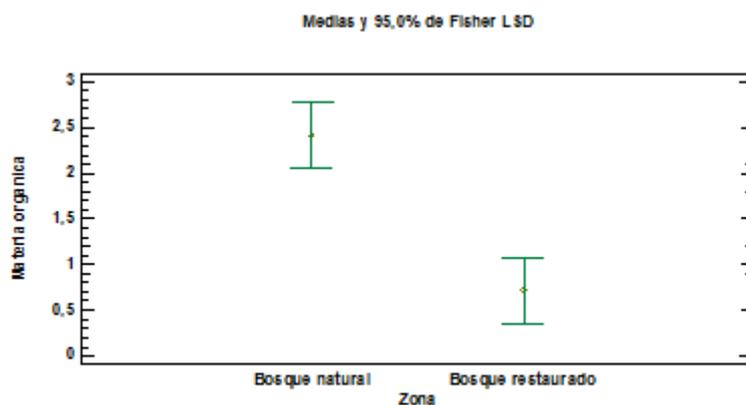


Figura 6.78. Medias e intervalos de confianza al 95% para el contenido en materia orgánica en función de las zonas y clases de infiltración obtenidas.

Tabla 6.38. Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido en materia orgánica por Zona y clase de infiltración obtenidas.. Valores en porcentaje.

Clase	Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
2	Bosque restaurado	4	0,7175	X
3	Bosque natural	4	2,4225	X

Tabla 6.39. Resumen estadístico de la variable Materia orgánica por zona y clase de infiltración. Datos en porcentaje.

Clase	Zona	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	Bosque natural	4	2,4225	0,466289	19,2482%	1,74	2,79	1,05
2	Bosque restaurado	4	0,7175	0,356499	49,6863%	0,29	1,14	0,85
1	Cárcava	7	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0
	Total	15	0,837333	1,07071	127,871%	0,0	2,79	2,79

La caracterización de la **Textura** se muestra a continuación, expresándose por separado los valores para la arena, limo y arcilla.

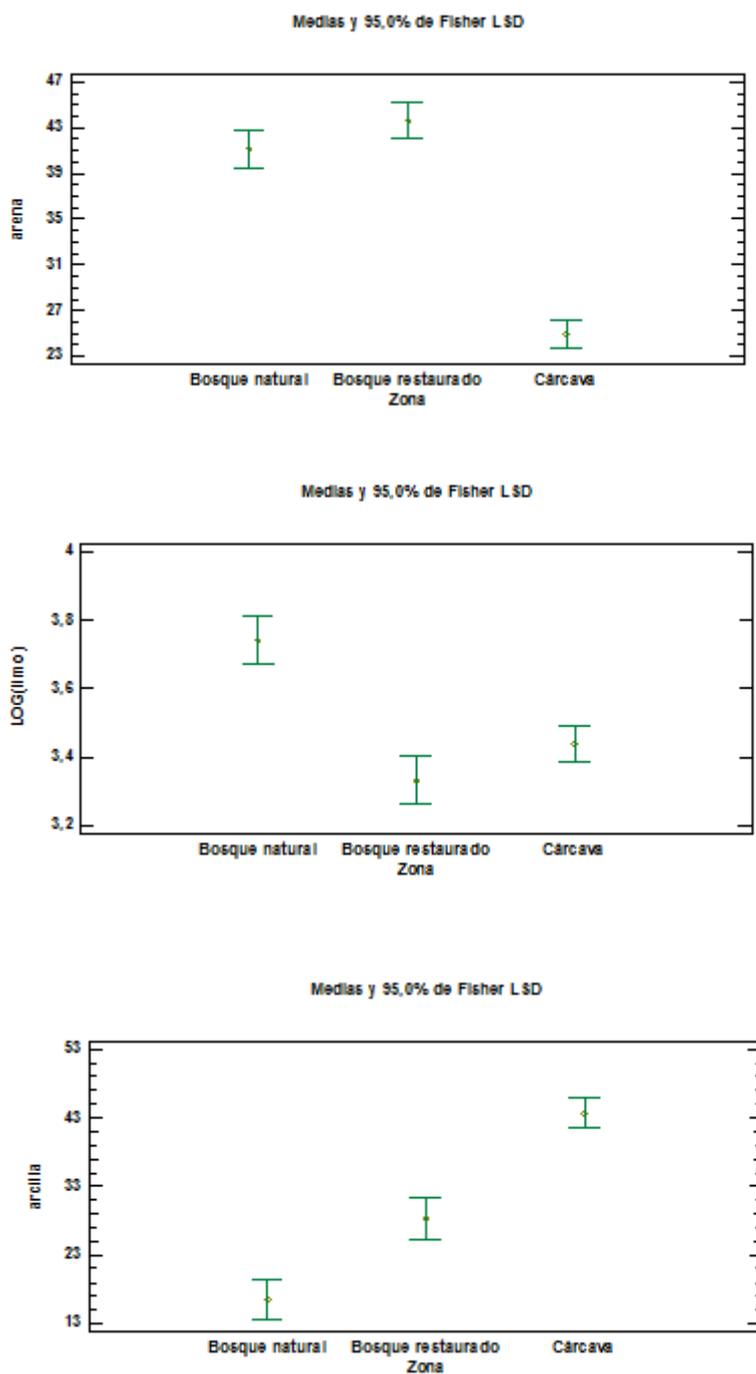


Figura 6.79. Medias e intervalos de confianza al 95% para el contenido en arena, el logaritmo neperiano del contenido en limo y el contenido en arcilla en función de las zonas y clases de infiltración obtenidas.

Tabla 6.40. Pruebas de Múltiple Rangos para el contenido en arena, el logaritmo neperiano del contenido en limo y el contenido en arcilla por Zona y clase de infiltración obtenidas. Valores en g/cm<sup>3</sup>.

Clase	Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
<b>Arena</b>				
1	Cárcava	7	24,95	X
3	Bosque natural	4	41,1175	X
2	Bosque restaurado	4	43,6225	X
<b>Log(Limo)</b>				
2	Bosque restaurado	4	3,33366	X
1	Cárcava	7	3,43925	X
3	Bosque natural	4	3,74112	X
<b>Arcilla</b>				
3	Bosque natural	4	16,59	X
2	Bosque restaurado	4	28,33	X
1	Cárcava	7	43,7186	X

Tabla 6.41. Resumen estadístico de las variables arena, limo y arcilla por zona y clase de infiltración. Datos en porcentaje.

Clase	Zona	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
<b>Arena</b>								
3	Bosque natural	4	41,1175	1,88691	4,58907%	39,06	43,06	4,0
2	Bosque restaurado	4	43,6225	3,09097	7,08572%	40,72	47,93	7,21
1	Cárcava	7	24,95	1,62904	6,52921%	23,45	27,46	4,01
	Total	15	34,2407	9,26098	27,0467%	23,45	47,93	24,48
<b>Limo</b>								
3	Bosque natural	4	42,2925	4,095	9,68257%	37,62	47,58	9,96
2	Bosque restaurado	4	28,0475	0,708819	2,52721%	27,19	28,81	1,62
1	Cárcava	7	31,3314	3,51966	11,2336%	27,71	36,01	8,3
	Total	15	33,3787	6,47518	19,3992%	27,19	47,58	20,39
<b>Arcilla</b>								
3	Bosque natural	4	16,59	3,95621	23,847%	13,36	22,36	9,0
2	Bosque restaurado	4	28,33	2,6602	9,39005%	24,88	30,88	6,0
	Cárcava	7	43,7186	4,16431	9,52527%	37,84	48,84	11,0
	Total	15	32,3807	12,3493	38,138%	13,36	48,84	35,48

No ha sido posible realizar el análisis de la varianza para la relación **Carbono-Nitrógeno** ya que en los análisis de suelo sólo se proporcionó un dato por zona, pero el resumen estadístico de esta variable se muestra en la Tabla 6.42:

Tabla 6.42. Resumen estadístico de la variable C/N por zona y clase de infiltración. Adimensional.

Clase	Zona	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo	Rango
3	Bosque natural	4	13,56	0,0	0,0%	13,56	13,56	0,0
2	Bosque restaurado	4	20,2	0,0	0,0%	20,2	20,2	0,0
1	Cárcava	7	6,18	1,90825	30,8778%	4,65	8,22	3,57
	Total	15	11,8867	6,19595	52,1252%	4,65	20,2	15,55

Por último, en la Tabla 6.43. podemos observar los diferentes grupos o clases de infiltración obtenidos.

Tabla 6.43. Grupos de variables que caracterizan las distintas zonas entre sí.

Variable	Tasa	Densidad	Materia orgánica	Arena	Limo	Arcilla
Bosque natural	A	A	A	A	A	A
Bosque restaurado	A	B	B	A	B	B
Cárcavas	B	B	-	B	B	C

#### 6.4.2.2. Discusión

Como se puede observar en la Figura 6.75., las clases de infiltración observadas se corresponden con los ensayos realizados por un lado en ambas zonas de cárcava, por otro en el bosque natural de roble y por último en el bosque restaurado de pino. Esto nos permite comprobar que por un lado, la infiltración y características del suelo en las zonas de las cárcavas no varía y, por otro, que sí que existen diferencias significativas entre la zona de pinar y de robledal.

Estos resultados concuerdan con lo obtenido en el análisis de la varianza (ANOVA) realizado y discutido anteriormente.

## 6.5. Comparación entre ambos métodos de medición de la infiltración

### 6.5.1. Introducción

En este apartado se van a comparar ambos métodos de medición de la infiltración entre sí, el infiltrómetro de 30 cm y el de 8 cm de diámetro.

Se ha analizado si existe algún tipo de correlación entre el infiltrómetro de 30 cm y el de 8 cm con el fin de establecer una relación con la que predecir el valor que nos proporcionaría el infiltrómetro más preciso a través del método que presenta más facilidad de uso.

Para ello se ha realizado un análisis de regresión entre los diferentes ensayos realizados con los dos métodos que se han utilizado.

## 6.5.2. Resultados del análisis de regresión

### a) Resultados generales

Para la realización de la comparación entre métodos se han utilizado, además de los datos usados hasta ahora correspondientes a las cuatro zonas descritas, una zona más que se utilizó en el estudio llevado a cabo en 2012. La zona en cuestión consiste en la cuña de sedimentación de uno de los diques construidos en la cárcava restaurada. De este modo dispondremos de un mayor número de datos para establecer la posible correlación entre métodos.

Pese a que en el estudio anterior los ensayos también se realizaron de modo que la distancia entre infiltrómetros fuese de 1 m, no se pudo establecer una regresión coherente entre los datos medidos con cada infiltrómetro, ya que existían diferencias significativas entre la Tasa de infiltración medida con ambos. Por esta razón, se ha optado por realizar este análisis de otra forma: en primer lugar, se utilizarán las medias de los 4 ensayos realizados en cada una de las 5 zonas con cada tipo de infiltrómetro, para evitar el problema descrito anteriormente y, en segundo lugar, se estudiará si existen diferencias significativas entre los datos en cada una de las zonas.

Sin embargo, surge un nuevo problema, y es la ausencia de una muestra de datos amplia que permita un análisis consistente de la correlación entre métodos, pero se cree que, aunque no puedan establecerse conclusiones firmes, podamos tomar este análisis como base para la realización de sucesivos ensayos.

Comenzamos por tanto realizando la regresión y eligiendo el modelo que más se ajuste para el conjunto de los datos.

Para conseguir un mejor ajuste hemos transformado las variables de regresión y después hemos elegido el modelo que presente un mejor valor del coeficiente  $R^2$ .

Tabla 6.44. Coeficientes de correlación y  $R^2$  de cada modelo de regresión analizado.

Modelo	Correlación	$R^2$
Doble Inverso	0,9320	86,87%
Multiplicativa	0,8298	68,86%
Curva S	-0,7747	60,01%
Logarítmico-Y Raíz Cuadrada-X	0,7663	58,73%
Raíz Cuadrada-Y Log-X	0,6938	48,14%
Exponencial	0,6723	45,19%
Raíz Cuadrada-Y Inversa de X	-0,6474	41,91%
Raíz Cuadrada Doble	0,6414	41,13%
Logaritmo de X	0,5688	32,36%
Raíz Cuadrada de Y	0,5652	31,94%
Inversa de X	-0,5531	30,59%
Log-Y Cuadrado-X	0,5518	30,45%
Inversa-Y Cuadrado-X	-0,5190	26,94%
Raíz Cuadrada de X	0,5083	25,84%
Raíz Cuadrada-X Cuadrado-X	0,4712	22,21%
Cuadrado-Y Inversa de X	-0,4497	20,22%

Tabla 6.44. Continuación. Coeficientes de correlación y R<sup>2</sup> de cada modelo de regresión analizado.

Modelo	Correlación	R <sup>2</sup>
Lineal	0,4339	18,82%
Cuadrado-Y Log-X	0,4002	16,01%
Cuadrado de X	0,3500	12,25%
Cuadrado-Y Raíz Cuadrada-X	0,3077	9,47%
Cuadrado de Y	0,2176	4,74%
Cuadrado Doble	0,1293	1,67%
Inversa de Y	<sin ajuste>	
Inversa-Y Raíz Cuadrada-X	<sin ajuste>	
Inversa-Y Log-X	<sin ajuste>	
Logístico	<sin ajuste>	
Log probit	<sin ajuste>	

De los modelos ajustados, el modelo doble inverso es el que arroja el valor más alto de R<sup>2</sup> con 86,8704%. El gráfico de residuos para esta regresión se muestra en la Figura 6.80.

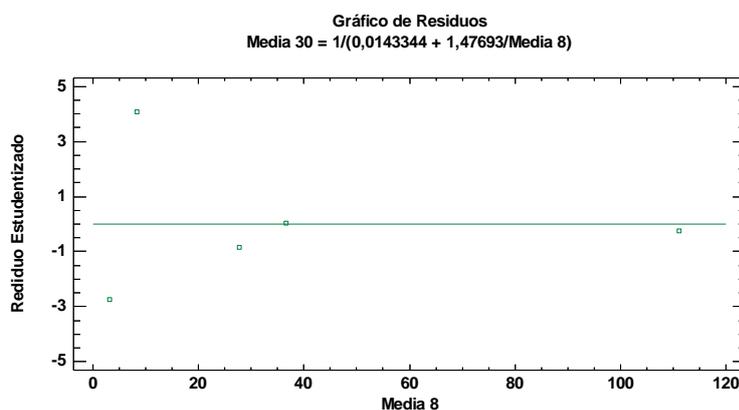


Figura 6.80. Gráfico de residuos de la relación doble inversa de las Tasas medidas con cada infiltrómetro.

La regresión obtenida es la siguiente:

$$Tasa\ 30 = \frac{1}{(0,0143344 + \frac{Tasa\ 8}{1,47693})}$$

donde Tasa 30 es la media de las Tasas de infiltración obtenidas con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro para cada una de las distintas zonas de medición y Tasa 8 la media de las Tasas de infiltración obtenidas en cada zona con el infiltrómetro de 8 cm de diámetro.

Tabla 6.45. Coeficientes de regresión y p-valor de la misma.

Parámetro	Mínimos Cuadrados Estimado	Estándar Error	Estadístico T	P-valor
Intercepto	0,0143344	0,0497099	0,288362	0,7918
Pendiente	1,47693	0,331504	4,45524	0,0210

Además se ha llevado a cabo un Análisis de la Varianza para ver si existe correlación entre las mediciones realizadas con cada infiltrómetro, como puede verse en la Tabla 6.46.

Tabla 6.46. Análisis de la varianza.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Modelo	0,135098	1	0,135098	19,85	0,0210
Residuo	0,0204188	3	0,00680626		
Total (Corr.)	0,155517	4			

Los valores obtenidos del coeficiente de correlación,  $R^2$ , etc., son:

- Coeficiente de Correlación = 0,932043
- R-cuadrado = 86,8704%
- R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 82,4939 %
- Error estándar del est. = 0,0825001
- Error absoluto medio = 0,0491505
- Estadístico Durbin-Watson = 1,44777 (P=0,1556)
- Autocorrelación de residuos en retraso 1 = -0,175748

Puesto que el p-valor en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre la Tasa 30 y Tasa 8 con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico  $R^2$  indica que el modelo ajustado explica un 86,8704% de la variabilidad en Tasa 30. El coeficiente de correlación es igual a 0,932043, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables.

A continuación se muestra el análisis de regresión de forma gráfica:

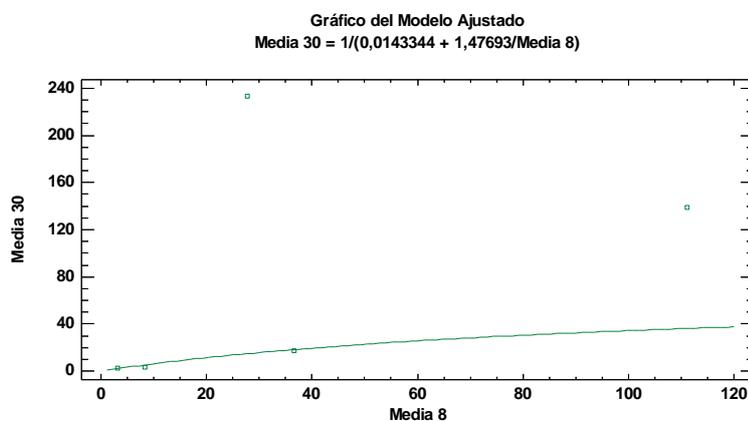


Figura 6.81. Gráfico del modelo ajustado.

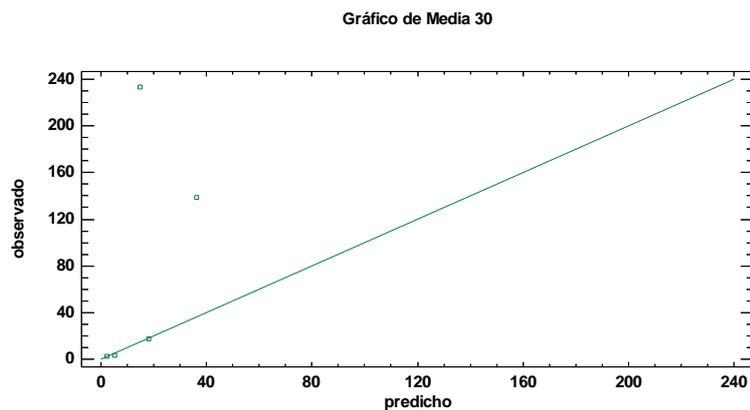


Figura 6.82. Gráfico de valores observados frente a valores predichos.

Pese a mostrar un ajuste muy bueno, como hemos dicho anteriormente, al tener pocos datos no podemos asegurar que exista tal relación entre los dos infiltrómetros, pero dejamos abierta una puerta para que este análisis de regresión sirva de base para estudios posteriores.

A continuación se ha procedido a comprobar si existen diferencias entre las medidas con cada método en cada zona.

### b) Zona 1: Zona degradada de la cárcava restaurada

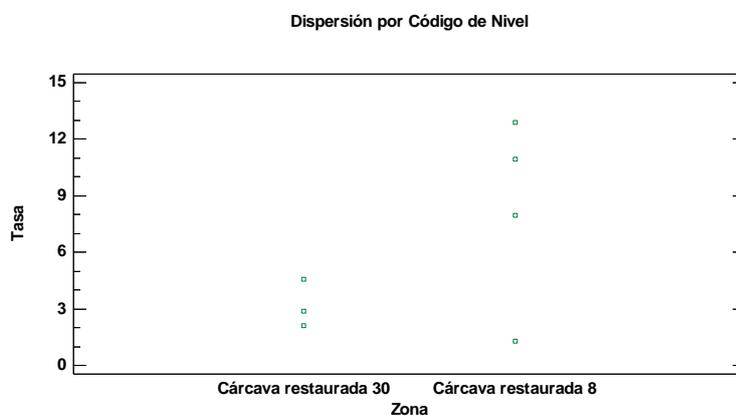


Figura 6.83. Dispersión de valores de Tasa de infiltración en mm/h medida con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

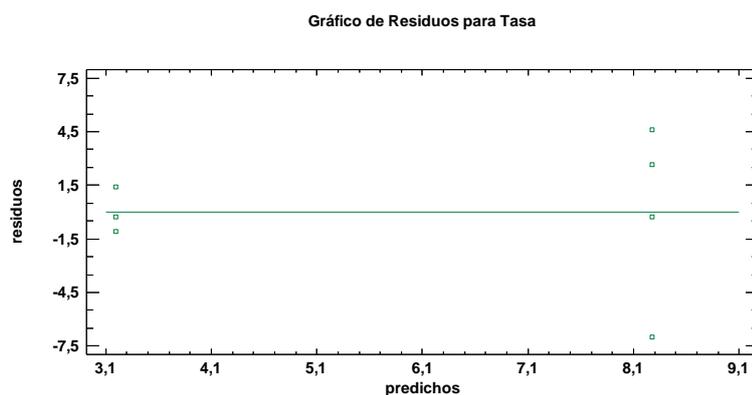


Figura 6.84. Gráfico de residuos para Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

A continuación se ha procedido a transformar los datos, ya que como vemos en la Figura 6.84. éstos no parecen seguir una distribución normal. Tras transformarlos, se procederá a la comprobación mediante un test de normalidad.

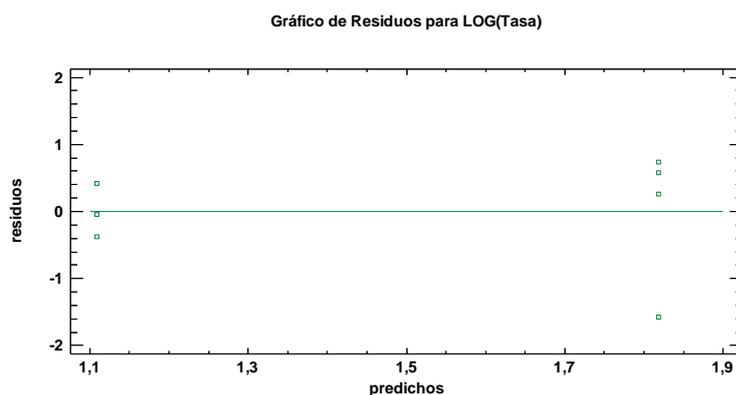


Figura 6.85. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

Tabla 6.47. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

	Normal
DMAS	0,174135
DMENOS	0,200204
DN	0,200204
P-valor	0,941731

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.48. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,861959	0,162418

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

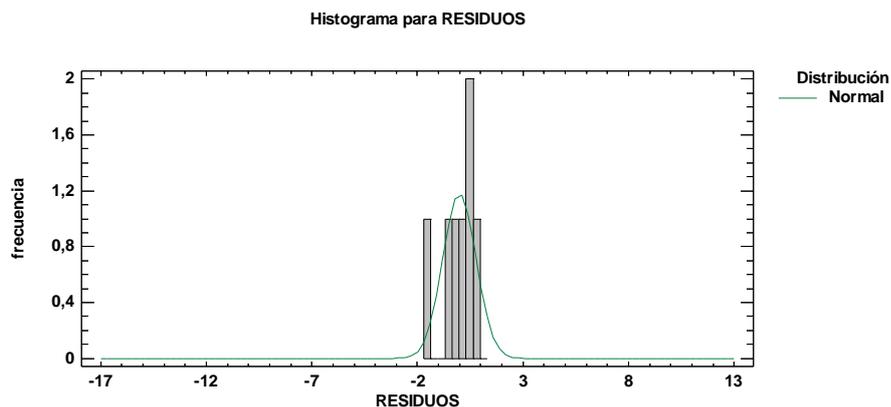


Figura 6.86. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

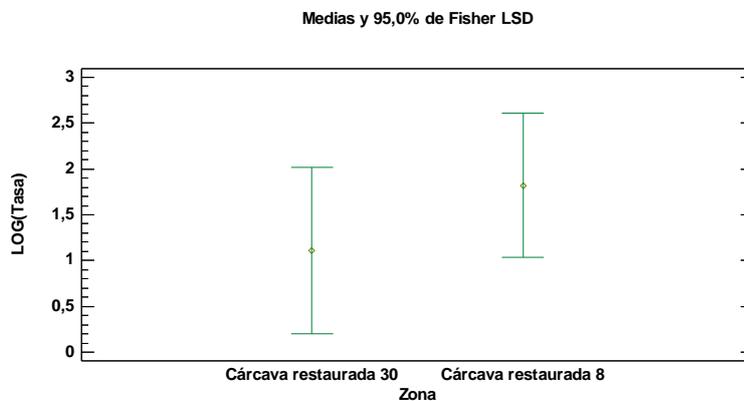


Figura 6.87. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

Tabla 6.49. Medias para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Cárcava restaurada 30	3	1,10899	0,498508	0,202864	2,01512
Cárcava restaurada 8	4	1,81793	0,43172	1,0332	2,60266
Total	7	1,5141			

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad del logaritmo neperiano de la TASA DE INFILTRACIÓN en las contribuciones debidas al factor INFILTRÓMETRO. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.50. ANOVA para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	0,861578	1	0,861578	1,16	0,3315
Intra grupos	3,72765	5	0,74553		
Total (Corr.)	4,58923	6			

Puesto que el p-valor de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de LOG(Tasa) entre un nivel de Infiltrómetro y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.51. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava restaurada.

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Cárcava restaurada 30	3	1,10899	X
Cárcava restaurada 8	4	1,81793	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Cárcava restaurada 30 - Cárcava restaurada 8		-0,708934	1,69521

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza.

### c) Zona 2: Área degradada de la cárcava natural

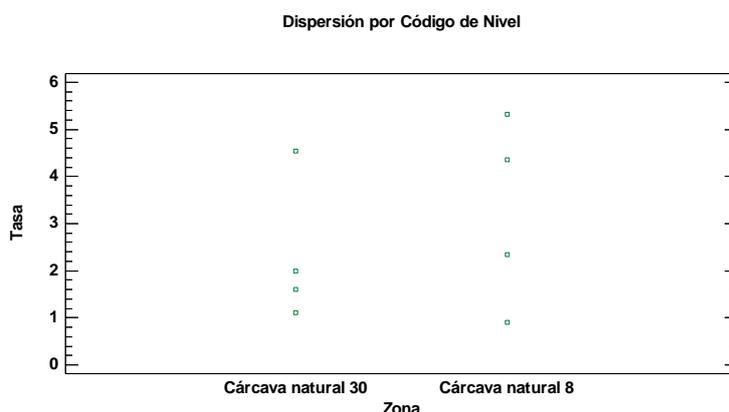
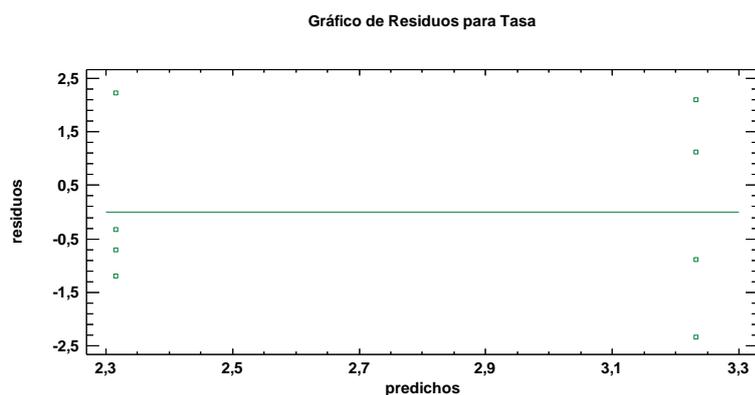


Figura 6.88. Dispersión de valores de Tasa de infiltración en mm/h medida con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural.



**Figura 6.89.** Gráfico de residuos para Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural.

En este caso no ha sido necesario transformar los datos y la prueba de normalidad se ha realizado directamente, como se muestra en las Tablas 6.52. y 6.53.:

**Tabla 6.52.** Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

	Normal
DMAS	0,203502
DMENOS	0,149415
DN	0,203502
P-valor	0,894861

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

**Tabla 6.53.** Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,92375	0,465929

Del mismo modo, debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

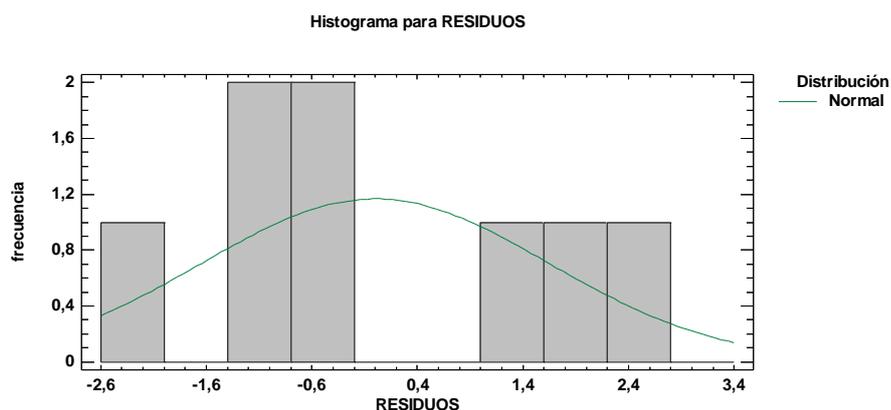


Figura 6.90. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

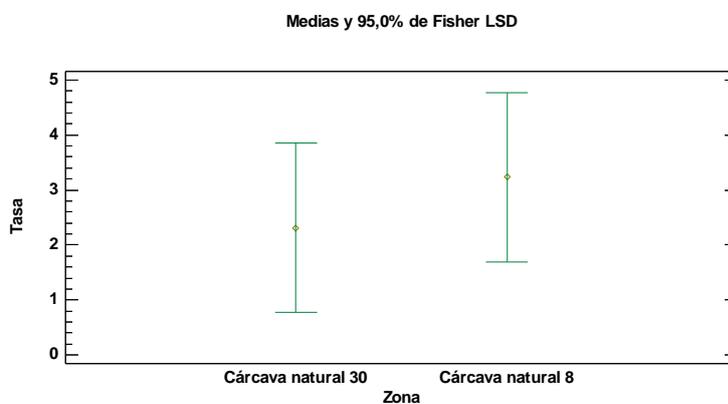


Figura 6.91. Medias e intervalos de confianza al 95% para la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural.

Tabla 6.54. Medias para la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Cárcava natural 30	4	2,315	0,886213	0,781645	3,84835
Cárcava natural 8	4	3,2325	0,886213	1,69915	4,76585
Total	8	2,77375			

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad de la TASA DE INFILTRACIÓN en las contribuciones debidas al factor INFILTRÓMETRO. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.55. ANOVA para la Tasa de infiltración con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	1,68361	1	1,68361	0,54	0,4917
Intra grupos	18,849	6	3,1415		
Total (Corr.)	20,5326	7			

Puesto que el p-valor de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de Tasa entre un nivel de Zona y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.56. Pruebas de Múltiple Rangos para la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona degradada de la cárcava natural.

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Cárcava natural 30	4	2,315	X
Cárcava natural 8	4	3,2325	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Cárcava natural 30 - Cárcava natural 8		-0,9175	3,06671

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

**d) Zona 3: Zona de bosque restaurado de pinar**

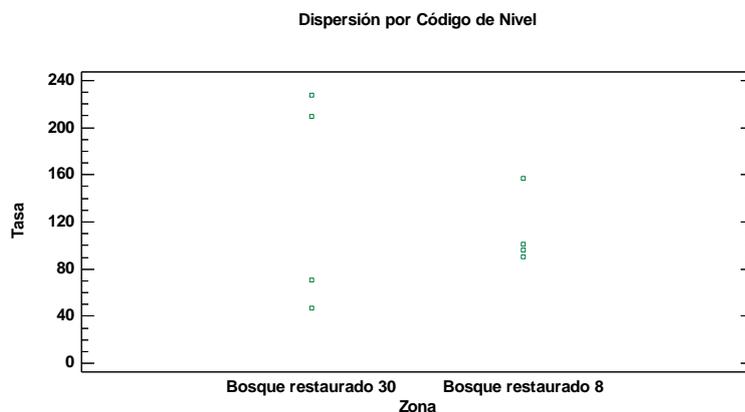
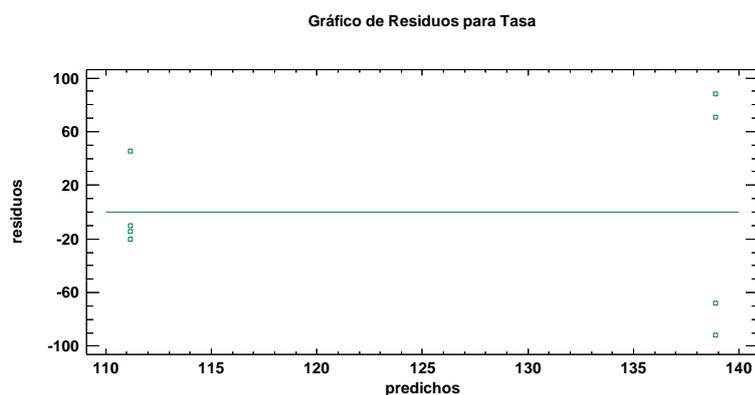
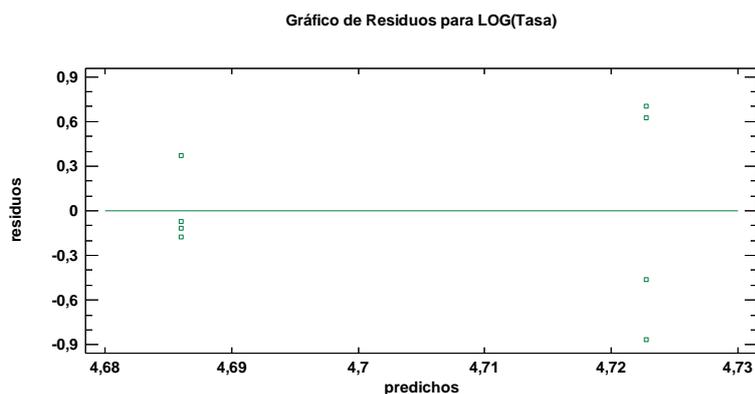


Figura 6.92. Dispersión de valores de Tasa de infiltración en mm/h medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.



**Figura 6.93. Gráfico de residuos para Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.**

En este caso ha sido necesario transformar los datos mediante el uso del logaritmo neperiano, como se muestra a continuación en la Figura 6.94:



**Figura 6.94. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.**

A continuación se ha realizado la prueba de normalidad, como se muestra en las Tablas 6.57. y 6.58.:

**Tabla 6.57. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.**

	<b>Normal</b>
DMAS	0,179214
DMENOS	0,127794
DN	0,179214
P-valor	0,959364

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.58. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,952214	0,735249

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

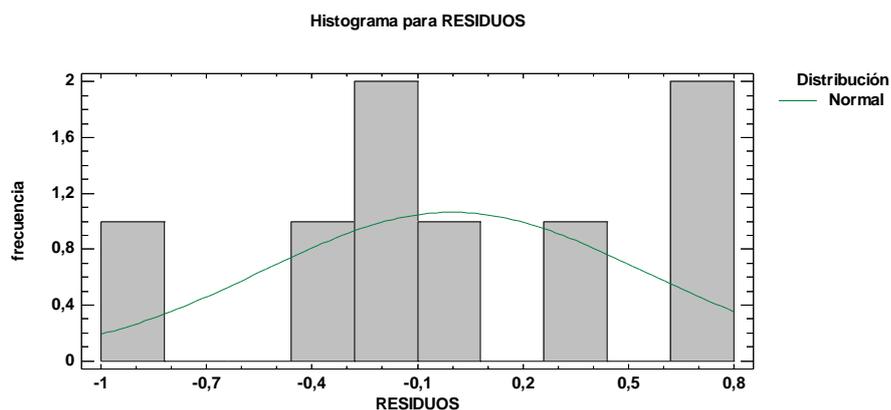


Figura 6.95. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

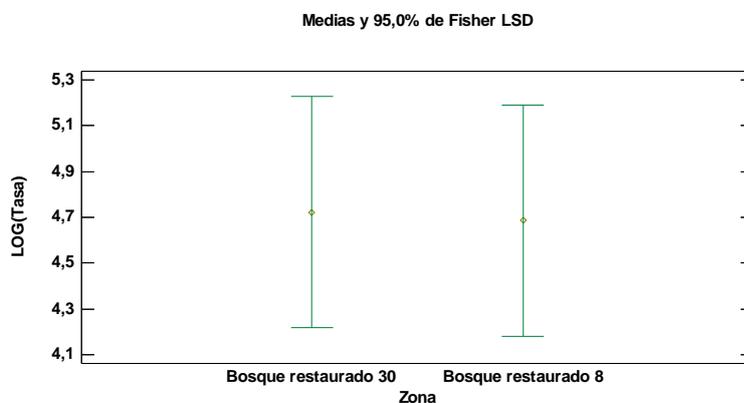


Figura 6.96. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.

Tabla 6.59. Medias para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque restaurado 30	4	4,72277	0,291215	4,2189	5,22664
Bosque restaurado 8	4	4,68604	0,291215	4,18217	5,18991
Total	8	4,70441			

A continuación, con el análisis ANOVA se pretende descomponer la variabilidad de la TASA DE INFILTRACIÓN en las contribuciones debidas al factor INFILTRÓMETRO. El p-valor comprueba la importancia estadística del factor.

Tabla 6.60. ANOVA para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	0,00269822	1	0,00269822	0,01	0,9318
Intra grupos	2,03535	6	0,339225		
Total (Corr.)	2,03805	7			

Puesto que el p-valor de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de LOG(Tasa) entre un nivel de Zona y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.61. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque restaurado de pinar.

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Bosque restaurado 8	4	4,68604	X
Bosque restaurado 30	4	4,72277	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Bosque restaurado 30 - Bosque restaurado 8	0,0367302		1,00774

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. Se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

#### e) Zona 4: Zona de bosque natural de roble

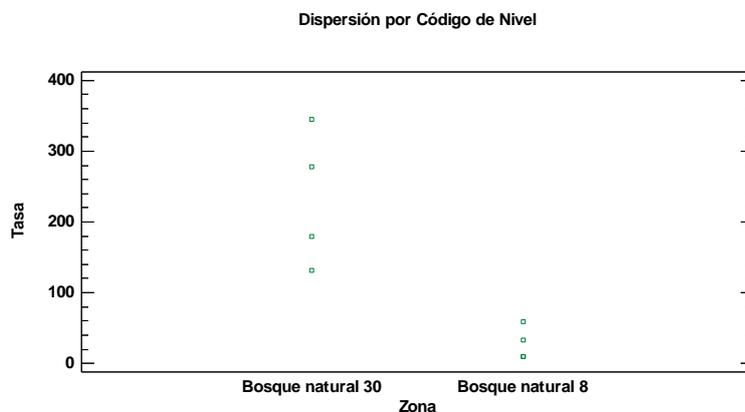


Figura 6.97. Dispersión de valores de Tasa de infiltración en mm/h medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

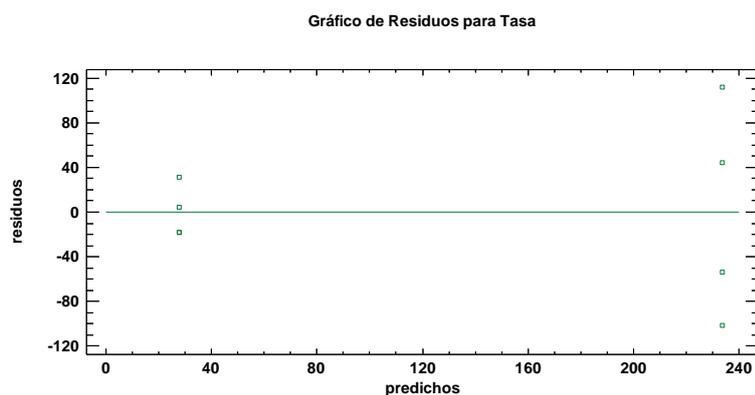


Figura 6.98. Gráfico de residuos para Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

En este caso ha sido necesario transformar los datos mediante el uso del logaritmo neperiano, como se muestra a continuación en la Figura 6.99:

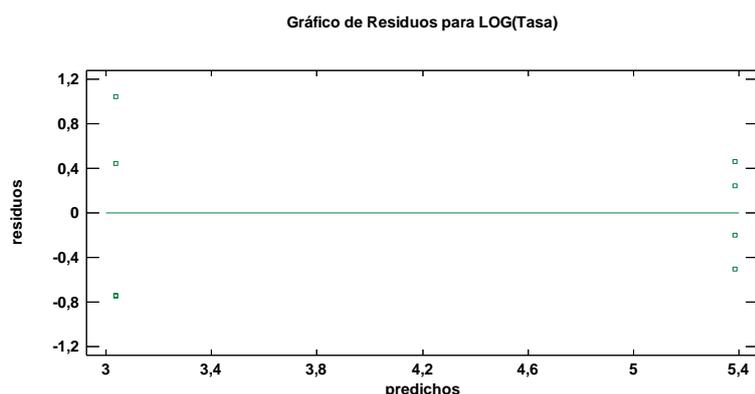


Figura 6.99. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

A continuación se ha realizado la prueba de normalidad, como se muestra en las Tablas 6.62. y 6.63.:

Tabla 6.62. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

	Normal
DMAS	0,156556
DMENOS	0,144556
DN	0,156556
P-valor	0,989521

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.63. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,927679	0,500007

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

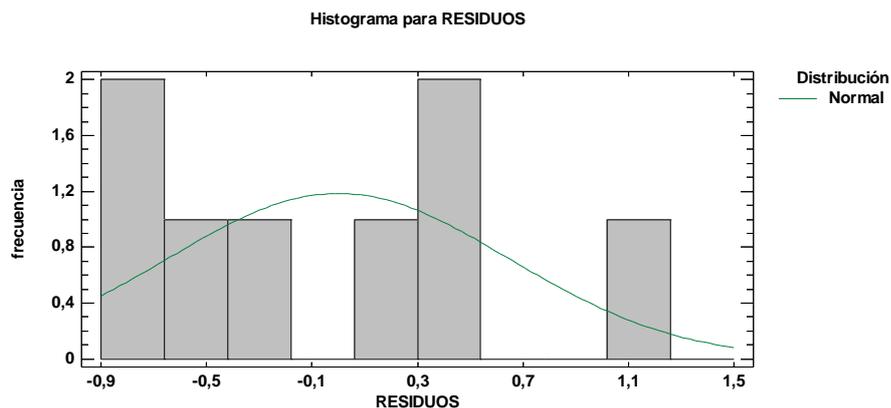


Figura 6.100. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

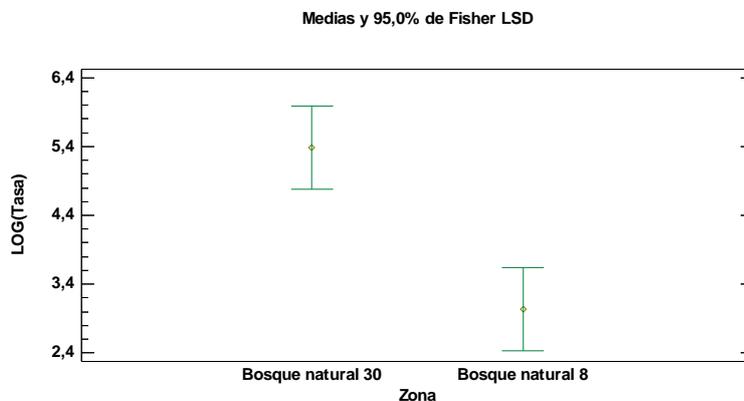


Figura 6.101. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

Tabla 6.64. Medias para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Bosque natural 30	4	5,38563	0,349289	4,78127	5,98998
Bosque natural 8	4	3,03715	0,349289	2,4328	3,6415
Total	8	4,21139			

Tabla 6.65. ANOVA para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	11,0307	1	11,0307	22,60	0,0031
Intra grupos	2,92806	6	0,488011		
Total (Corr.)	13,9587	7			

Puesto que el p-valor de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de LOG(Tasa) entre un nivel de Zona y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.66. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la Zona de bosque natural de roble.

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Bosque natural 8	4	3,03715	X
Bosque natural 30	4	5,38563	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Bosque natural 30 - Bosque natural 8	*	2,34847	1,2087

\* indica una diferencia significativa.

Se ha colocado un asterisco junto a 1 par, indicando que este par muestra diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. Se han identificado 2 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas.

#### f) Zona 5: Cuña de sedimentación

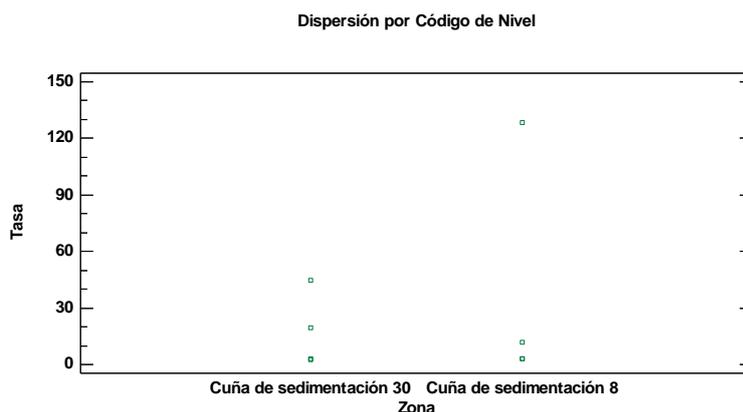


Figura 6.102. Dispersión de valores de Tasa de infiltración en mm/h medida con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

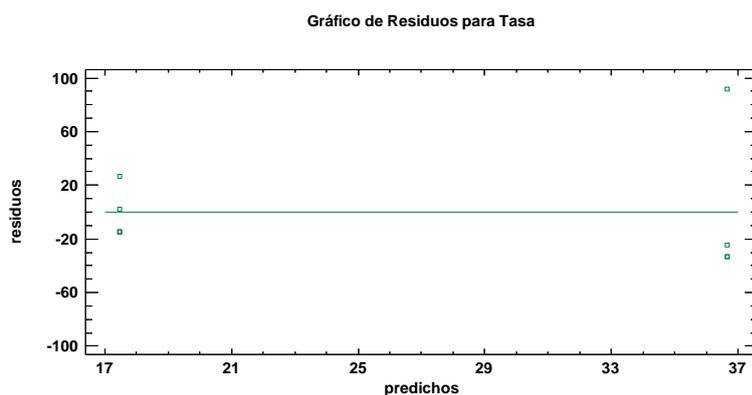


Figura 6.103. Gráfico de residuos para Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

En este caso ha sido necesario transformar los datos mediante el uso del logaritmo neperiano, como se muestra a continuación en la Figura 6.104:

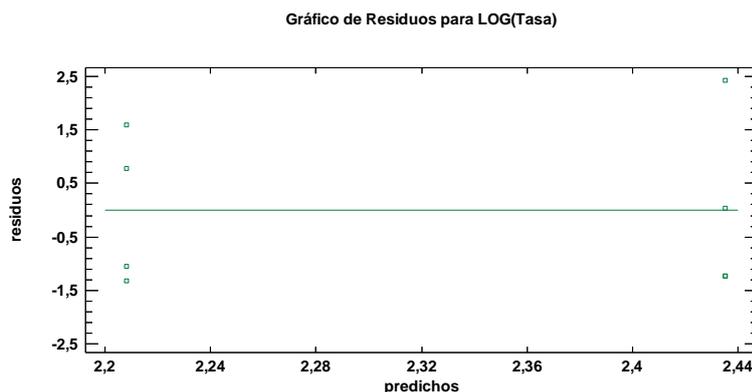


Figura 6.104. Gráfico de residuos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración medida con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

A continuación se ha realizado la prueba de normalidad, como se muestra en las Tablas 6.67. y 6.68.:

Tabla 6.67. Prueba de Kolmogorov-Smirnov.

	<b>Normal</b>
DMAS	0,262892
DMENOS	0,181815
DN	0,262892
P-valor	0,637998

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Kolmogorov-Smirnov es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

Tabla 6.68. Pruebas de Normalidad para Residuos.

Prueba	Estadístico	P-valor
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0,859073	0,120031

Debido a que el p-valor más pequeño de las prueba de Shapiro-Wilk es mayor ó igual a 0,05, no se puede rechazar la idea de que RESIDUOS proviene de una distribución normal con 95% de confianza.

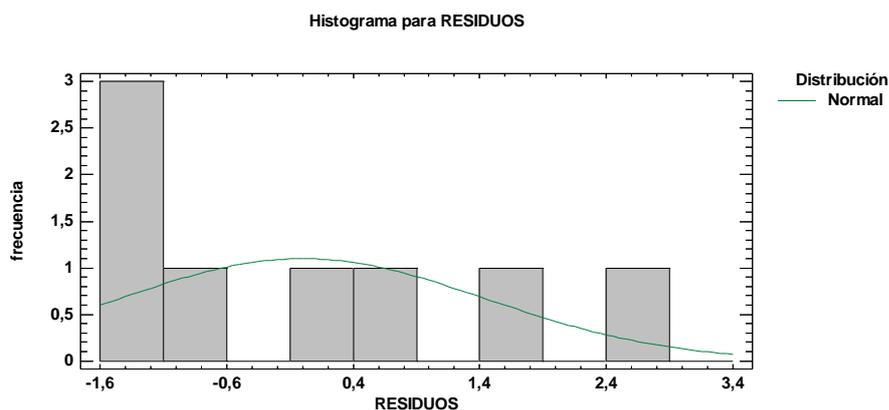


Figura 6.105. Histograma para residuos comparado con una distribución normal.

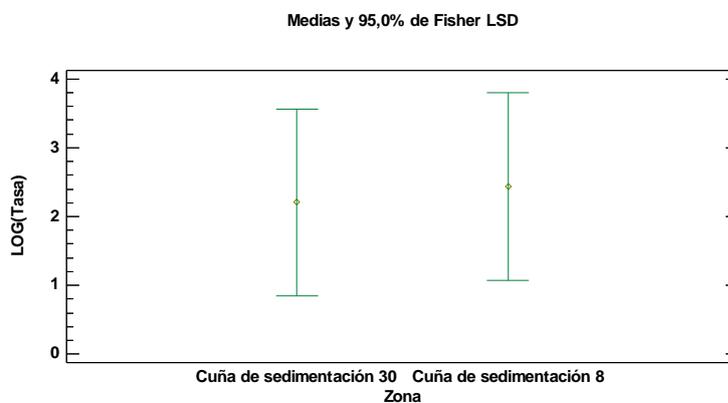


Figura 6.106. Medias e intervalos de confianza al 95% para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

Tabla 6.69. Medias para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación con intervalos de confianza del 95,0%.

Zona	Casos	Media	Error Est.(s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
Cuña de sedimentación 30	4	2,20819	0,784887	0,850152	3,56623
Cuña de sedimentación 8	4	2,43503	0,784887	1,07699	3,79306
Total	8	2,32161			

Tabla 6.70. ANOVA para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	P-valor
Entre grupos	0,102909	1	0,102909	0,04	0,8448
Intra grupos	14,7851	6	2,46419		
Total (Corr.)	14,8881	7			

Puesto que el p-valor de la razón-F es mayor o igual que 0,05, no existe una diferencia estadísticamente significativa entre la media de LOG(Tasa) entre un nivel de Zona y otro, con un nivel del 95,0% de confianza.

Para determinar qué medias son significativamente diferentes de otras, se establecen las pruebas de múltiples rangos.

Tabla 6.71. Pruebas de Múltiple Rangos para el logaritmo neperiano de la Tasa de infiltración en mm/h con cada infiltrómetro en la cuña de sedimentación.

Zona	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Cuña de sedimentación 30	4	2,20819	X
Cuña de sedimentación 8	4	2,43503	X
Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Cuña de sedimentación 30 - Cuña de sedimentación 8		-0,226836	2,71607

No hay diferencias estadísticamente significativas entre cualquier par de medias, con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se ha identificado un grupo homogéneo, según la alineación de las X's en columna. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's.

### 6.5.3. Discusión

En el presente estudio se ha establecido una correlación entre infiltrómetros. Tras la experiencia adquirida en el estudio anterior, donde se vio que los datos no podían ser comparables por pares puesto que variables como la textura y la materia orgánica variaban con cada tipo de infiltrómetro, se ha procedido a realizar este análisis utilizando las medias de cada zona. Sin embargo, de esta manera, nos encontramos con un nuevo problema, que es la ausencia de una muestra de datos consistente. Por tanto, no podemos arrojar conclusiones en este punto.

En el anterior estudio, a la vista de la heterogeneidad del suelo, se determinó que los datos de cada infiltrómetro no eran comparables a priori, pues existen variables influyentes en la infiltración que varían entre pares de infiltrómetros, pese a que los dos infiltrómetros se colocaron a escasos centímetros entre sí.

En cualquier caso, se cree que este análisis puede servir como punto de partida para estudios posteriores, por lo que se ha considerado importante su inclusión.

En la Figura 6.107. se observa cómo los infiltrómetros se han colocado a una distancia menor de 1 m entre sí para la realización de los ensayos.



Figura 6.107. En las imágenes se puede observar la escasa distancia que separa los ensayos de infiltración pareados.

En ocasiones anteriores ya se ha hablado de la heterogeneidad de las medidas de infiltración. Estos resultados pueden tener algunas explicaciones: en primer lugar, debemos tener en cuenta que la inserción de los anillos produce una ligera alteración de la superficie del suelo. Como es lógico, esta alteración se reparte en una superficie menor en el infiltrómetro de 8 cm. Esta superficie cubierta menor, como ya se ha demostrado, confiere un mayor error en la medición de la tasa de infiltración, aunque, por otro lado, una mayor superficie puede conducir a una mayor heterogeneidad en cuanto a porosidad, humedad, raíces, etc., conduciendo a unos valores variables de la tasa de infiltración, como ya ha sido observado por Moreno *et al.*, 1993 o Prieto *et al.*, 2006.

Puesto que la tasa de infiltración es una de las propiedades del suelo que presenta mayor variabilidad (Prieto *et al.*, 2006), el coeficiente de variación obtenido oscila entre 27,57 y 166,79%, resultado que, como ya se ha citado, no difiere de lo observado por otros autores como Harden *et al.* (2003) Dunkerley *et al.* (2000), Cerdà (1997), o Fournier *et al.* (1998). Los coeficientes de variación obtenidos pueden verse en la Tabla 6.72.

Tabla 6.72. Coeficientes de variación de las tasas de infiltración por zonas y tipo de infiltrómetro utilizado.

Zona	Tipo de infiltrómetro	Coeficiente de Variación
Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada	8 cm	61,44%
	30 cm	39,89%
Zona 2: Área degradada de la cárcava natural	8 cm	61,53%
	30 cm	65,90%
Zona 3: Zona de bosque restaurado de pinar	8 cm	27,57%
	30 cm	66,86%
Zona 4: Zona de bosque natural de roble	8 cm	83,62%
	30 cm	41,08%
Zona 5: Cuña de sedimentación	8 cm	166,79%
	30 cm	112,89%

Por otro lado, y aunque el coeficiente de variación sea menor en general para el infiltrómetro de 30 cm, considerando lo anotado por varios autores (Vanderlinden *et al.*, 1998; Dorsey *et al.*, 1993; Torrente *et al.*, 2003), la comparación de métodos debe tener en cuenta otros aspectos tales como tiempo, facilidad de aplicación, simplicidad, cantidad de agua utilizada, mano de obra y costo. En ese sentido el infiltrómetro de 8 cm es mucho más manejable, requiere menor cantidad de agua (se utilizaron entre 15 y 80 litros en el infiltrómetro de 30 cm y entre 10 y 30 litros en el pequeño) y menor mano de obra., por lo que su aplicación práctica es innegable.

## 6.6. Determinación del Grupo Hidrológico de Suelo

### 6.6.1. Introducción

Para la aplicación del método del Número de Curva del SCS, a partir del cual es posible determinar la escorrentía que se produciría en una zona para una aguacero determinado, es necesario establecer los grupos hidrológicos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento respecto a la escorrentía, característica que se determina en función de la textura del suelo, la profundidad y su capacidad de infiltración.

A lo largo de los años se han establecido diferentes criterios para determinar el grupo hidrológico de suelo pudiendo obtener resultados diferentes dependiendo del criterio a utilizar, lo que genera una gran incertidumbre a la hora de determinar el tipo de suelo y el número de curva (Mongil *et al.*, 2012a).

En este trabajo se ha optado por utilizar el criterio establecido por el USDA Soil Conservation Service en la actualidad para ser utilizado en el número de curva, este criterio es el del NRCS (2007).

Este método utiliza la conductividad hidráulica saturada para determinar el grupo hidrológico de suelo. Puesto que cuando la velocidad de infiltración disminuye en el tiempo tiende a aproximarse a un valor final que teóricamente es igual a la conductividad hidráulica saturada (Muñoz *et al.*, 2005), aunque el aire atrapado en los poros podría reducir éste valor, se han tomado los valores de la tasa final de infiltración para determinar los grupos hidrológicos de suelo.

Dicho esto podemos indicar que los dos factores que determinan el número de curva son la conductividad hidráulica (que en nuestro caso sustituiremos por la tasa de infiltración final) y la textura del suelo. Los diferentes grupos hidrológicos que establece el NRCS (2007) según estos factores se pueden observar en las Tablas 6.72. y 6.73.

Tabla 6.72. Grupos hidrológicos de suelo según la textura. NRCS (2007).

TEXTURA	NRCS(2007)
Arenosa (Ar)	A
Arenoso-franca (Ar-F)	B
Arcillosa (a)	D
Arcillo-arenosa (a-Ar)	C
Arcillo-limosa (a-L)	C
Franca (F)	C
Franco-arenosa (F-Ar)	B
Franco-arcillosa (F-a)	C
Franco-arcillo-arenosa (F-a-Ar)	C
Franco-arcillo-limosa (F-a-L)	C
Franco-limosa (F-L)	C
Limosa (L)	B

Tabla 6.73. Grupos hidrológicos de suelo según la tasa de infiltración final. NRCS (2007).

Tasa de infiltración final	NRCS(2007)
>144 mm/h	A
36,1-144 mm/h	B
3,6-36,1 mm/h	C
<3,6 mm/h	D

## 6.6.2. Resultados

Fijándonos en la clasificación anterior, los grupos hidrológicos de suelo de la zona de estudio, para cada ensayo de infiltración, son:

Tabla 6.74. Grupos hidrológicos de suelo según asignados a cada ensayo de infiltración según el método NRCS (2007) en función de su textura y capacidad de infiltración.

Zona	Infiltrómetro	Ensayo	Textura	Tasa	Textura	Tasa
1. Área degradada de la cárcava restaurada	8cm	1	Arcillosa	12,9	D	C
		2	Arcillosa	10,938	D	C
		3	Arcillosa	7,98	D	C
		4	Arcillosa	1,278	D	D
	30cm	1	Arcillosa	2,898	D	D
		2	Arcillosa	2,094	D	D
		3	Arcillosa	4,59	D	C
		4	Arcillosa	2,35	D	D
2. Área degradada de la cárcava natural	8 cm	2	Franco arcillosa	0,9	C	D
		3	Franco arcillosa	4,35	C	C
		4	Franco arcillosa	5,33	C	C
		1	Arcillosa	1,99	D	D
	30 cm	2	Arcillosa	1,12	D	D
		3	Arcillosa	4,54	D	C
		4	Franco arcillosa	1,61	C	D

Tabla 6.74. Continuación. Grupos hidrológicos de suelo según asignados a cada ensayo de infiltración según el método NRCS (2007) en función de su textura y capacidad de infiltración.

Zona	Infiltrómetro	Ensayo	Textura	Tasa	Textura	Tasa
3. Bosque restaurado de pinar	8cm	1	Franco arcillosa	100,74	C	B
		2	Franco arcillo arenosa	96,45	C	B
		3	Franco arcillosa	156,726	C	A
		4	Franco arcillosa	90,75	D	B
	30cm	1	Franco arcillosa	209,898	C	A
		2	Franco arcillo arenosa	71,076	C	B
		3	Arcillosa	227,304	C	A
		4	Franco arcillosa	47,202	C	B
4. Bosque natural de roble	8 cm	1	Franca	9,87	C	C
		2	Franca	58,79	C	B
		3	Franca	10,01	C	C
		4	Franca	32,51	C	C
	30 cm	1	Franca	132	C	B
		2	Franca	277,37	C	A
		3	Franca	345,14	C	A
		4	Franca	179,54	C	A

Tabla 6.75. Grupos hidrológicos de suelo asignados a cada zona de medida de la infiltración por infiltrómetros según el método NRCS (2007) en función de su textura y capacidad de infiltración.

Zona	Infiltrómetro	Textura	Tasa final media	Textura	Tasa
1. Área degradada cárcava restaurada	8cm	Arcillosa	8,27	D	C
	30cm	Arcillosa	3,19	D	D
2. Área degradada cárcava natural	8cm	Franco arcillosa	3,23	C	D
	30cm	Arcillosa	2,32	D	D
3. Bosque restaurado de pinar	8cm	Franco arcillosa	111,17	C	B
	30cm	Franco arcillosa	138,87	C	B
4. Bosque natural de roble	8cm	Franca	27,80	C	C
	30cm	Franca	233,51	C	A

Tabla 6.76. Grupos hidrológicos de suelo asignados a cada zona de medida de la infiltración por infiltrómetros según el método NRCS (2007) en función de la combinación de textura y tasa de infiltración.

Zona	Infiltrómetro	NRCS 2007
1. Área degradada cárcava restaurada	8cm	C-D
	30cm	D
2. Área degradada cárcava natural	8cm	C-D
	30cm	D
3. Bosque restaurado de pinar	8cm	B-C
	30cm	B-C
4. Bosque natural de roble	8cm	C
	30cm	A-C

### 6.6.3. Discusión

Los resultados obtenidos nos muestran ligeras diferencias respecto a la utilización de los diferentes infiltrómetros. Pese a ello queda claramente marcada la diferencia entre las distintas zonas respecto al grupo hidrológico de suelo.

Se ha obtenido que el bosque las cárcavas presentan grupos C-D, con más tendencia hacia el D con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro. En cuanto a los bosques, sin embargo, existen ligeras diferencias. En el caso del bosque de pinar el grupo hidrológico coincide para ambos infiltrómetros con un grupo B-C, mientras que para el bosque natural de roble este grupo se presenta como C ó A-C, lo que indica una alta variabilidad de los resultados de infiltración en el caso de la medición con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro en este suelo.

Estudios como el de Mongil *et al.* (2012a) muestra grupos de suelo muy parecidos a los observados en nuestro caso, respecto a la textura y la influencia del bosque a la hora de determinar el grupo hidrológico de suelo. En su caso, los suelos se han clasificado en los grupos hidrológicos C (puntos de muestreo 1 – bosque– y 2 –arbustiva–, con texturas franca y franco-arcillosa, respectivamente), con tendencia hacia el grupo B en el bosque de repoblación (punto de muestreo 1), y D (punto de muestreo 3 (presencia de herbáceas y alguna especie arbustiva), con textura arcillosa).

Mongil *et al.* (2012b) asignan los grupos de suelos a los suelo de su estudio. Comprueban que la asignación de los grupos de suelos es tremendamente incierta, dependiendo del criterio utilizado y afirman que este hecho crea una gran incertidumbre no sólo a la hora de determinar el grupo de suelo, sino también al elegir el número de curva. Concluyen que, debido a esta incertidumbre, se hace necesario el establecimiento de un consenso al respecto, y posiblemente avanzar en la consideración del grupo de suelo como variable continua, como ya ha realizado Fernández de Villarán (2006), en Mongil *et al.* (2012b). Lo ideal para la utilización práctica del modelo del Número de Curva a nivel técnico, sería elaborar diagramas texturales de fácil empleo, pero basados en suficientes ensayos de infiltración que permitan una fiable delimitación de los grupos.

## 7. CONCLUSIONES

### 7.1. Conclusiones relativas a la capacidad de infiltración y propiedades que afectan a ésta

- Se observó que existen diferencias estadísticamente significativas en cuanto a la tasa de infiltración final en función de la zona, siendo dicha tasa mayor en las zonas de bosque y menor en las zonas degradadas, independientemente del método utilizado para su cuantificación.
- Las infiltraciones medias observadas con el infiltrómetro de 30 cm de diámetro son de entre 2 y 3 mm/h para el área degradada de la cárcava restaurada y para el área degradada de la cárcava natural, mientras que para la zona de bosque restaurado de pinar y bosque natural de roble son de entre 135 y 235 mm/h, lo que determina una clase de infiltración lenta para las áreas degradadas y rápidas para las dos zonas de bosque. En el caso del infiltrómetro de 8 cm de diámetro, estos valores fueron de alrededor de 3 y 8 mm/h para las áreas degradadas restaurada y natural respectivamente, es decir, una clase de infiltración moderadamente lenta y lenta. Por su parte las zonas de bosque de pinar y roble presentan unas tasas de infiltración de entre 100 y 25 mm/h, por lo que las clases de infiltración asignadas son moderadamente rápida y moderada. Por lo tanto observamos que la infiltración en las zonas de bosque estudiadas son entre 45 y 73 veces mayores que en las áreas degradadas para el infiltrómetro de 30 cm y entre 8 y 13 veces mayor con el infiltrómetro de 8 cm, por lo que se puede afirmar que la presencia de bosque aumenta la capacidad de infiltración de la zona.
- Existen diferencias significativas en cuanto al contenido de arcilla, limo y arena de las distintas zonas, observándose que el mayor contenido en arcilla se da en las zonas degradadas.
- Del mismo modo, existen diferencias significativas en cuanto al contenido en materia orgánica del suelo, siendo mayor en las zonas de bosque y menor en las degradadas.
- En el caso de la densidad se puede observar una mayor densidad en las zonas degradadas que en las zonas de bosque, siendo ésta menor en el caso del roble, por lo que el bosque está más establecido en esta zona que en la restauración de pinar.

- La realización de un análisis de componentes principales con las diferentes propiedades del suelo determinó que las áreas de estudio se dividen en 3 zonas diferenciadas, ya que las zonas degradadas no presentan diferencias estadísticamente significativas entre ellas. Con esto podemos afirmar que las características de las dos zonas de cárcavas próximas entre sí presentan suelos similares, por lo que las diferencias entre las zonas de bosque han sido provocadas por las diferentes vegetaciones presentes en ellas.
- Hemos observado que el bosque de pinar utilizado en la restauración, más joven que el robledal natural, presenta tasas de infiltración que, aunque siguen siendo menores que las de éste, no muestran diferencias significativas con esta especie. El roble es una especie que necesita mayor humedad edáfica que el pino y mediante el establecimiento del mismo se ha conseguido que empiece a haber rebrotes de roble. Por ello, se cree que las restauraciones hidrológico-forestales son una técnica eficaz de control de la infiltración y por tanto de la erosión, y los estudios de infiltración se han constatado como un método eficiente de medición de su éxito.

## 7.2. Comparación entre métodos de medición de la infiltración

- Descartamos relacionar los datos medidos a menos de un metro con cada método de medición de la infiltración, ya que se ha comprobado que la estructura del suelo puede variar incluso en distancias muy pequeñas, como lo constatan diversos autores. Por este motivo no se pudo establecer un factor de correlación entre ambos métodos que permita utilizar el infiltrómetro de menor tamaño con una precisión adecuada, ya que no se dispone del número apropiado de datos para obtener una correlación consistente. Sin embargo, los datos obtenidos pueden suponer una base para futuras investigaciones.
- Sólo se observaron diferencias significativas entre métodos de medida de la infiltración en la zona de roble. Esto ha sido achacado a la heterogeneidad de dicho suelo, debido especialmente a la porosidad de éste producida por la presencia de gusanos y lombrices.
- El coeficiente de variación por lo general es menor para el infiltrómetro de 30 cm de diámetro que para el de 8 cm de diámetro.

## 7.3. Determinación del grupo hidrológico de suelo

- Las diferencias entre zonas han quedado claramente marcadas respecto al grupo hidrológico de suelo. Los suelos de las dos zonas degradadas presentan la misma clasificación con suelos del grupo C-D y D. El bosque de pinar, por su parte, presenta suelos de tipo B-C, mientras que el bosque de roble presenta diferencias en el tipo de suelo según se tengan en cuenta las medidas con el infiltrómetro de 30 cm o el de 8 cm, presentando un suelo de tipo C cuando medimos con el infiltrómetro de 8 cm y un suelo del grupo A-C cuando medimos con el infiltrómetro de 30 cm.

#### **7.4. Otras conclusiones**

- Hemos observado que los estudios de infiltración deberían tener en cuenta la medición de otras variables, no sólo físicas sino también químicas, que afectan a la infiltración, por lo que se ha decidido incluir en el presente estudio la relación C/N por su relación directa con la estabilidad de agregados. Sin embargo, no ha sido posible incluir la estabilidad de agregados del suelo debido a la imposibilidad de encontrar un laboratorio que la proporcionase.

## 8. PERSPECTIVAS FUTURAS Y RECOMENDACIONES

La realización de este estudio constituye una segunda fase de conocimiento del proceso de infiltración y, si el primer estudio llevado a cabo en el 2012 abría las posibilidades de investigación en torno a la capacidad de infiltración en las cárcavas de Saldaña (Palencia), éste consolida el estudio de la zona restaurada, confirmando que, como se ha observado, los estudios de infiltración son un buen método de cara a determinar el éxito de una restauración hidrológico-forestal como la realizada en Saldaña.

Uno de los problemas observados en ambos estudios y compartidos con diversos autores es la alta variabilidad de las tasas de infiltración medidas, debido directamente a la heterogeneidad de los suelos de estudio. Sin embargo, conforme se vayan realizando más ensayos de infiltración, se irá reduciendo esta variabilidad observada. Se sigue creyendo necesario, por tanto, la continuación de este estudio con un número mayor de ensayos de infiltración, así como la combinación de pruebas de este tipo con ensayos de erosión, que nos permitan tener un conocimiento completo de los procesos erosivos y su corrección en estas zonas. Además, sería interesante completar la descripción de los suelos con sus propiedades químicas y no sólo físicas, como afirman Bamutaze *et al.* (2010). En este sentido, en el presente estudio se ha incluido la variable relación carbono/nitrógeno, pero sería apropiado añadir más variables.

Además, y como novedad, se ha llevado a cabo un análisis de componentes principales que nos ha permitido caracterizar las clases de infiltración observadas, pudiendo predecir así el comportamiento de un suelo en cuanto a la infiltración conociendo variables del mismo. Sin embargo, sería adecuado introducir más variables a este análisis. Debemos matizar, sin embargo, que a la dificultad de modelización de la infiltración debido al elevado número de factores que intervienen en ella, se une el problema de realizar mediciones fiables, ya que la medición de la tasa de infiltración es muy dependiente del método utilizado (Cerdà, 1995).

Para establecer una correlación entre infiltrómetros que permita utilizar en campo el infiltrómetro de 8 cm con una buena precisión y, debido a la heterogeneidad observada en el suelo, creemos que la mejor forma de realizar dos ensayos pareados sería llevar a cabo éstos exactamente en el mismo punto una vez secado el suelo tras el primero de los experimentos, como ya se vio oportuno en el estudio anterior, ya que a pesar de haber aumentado el número de ensayos, sigue sin poder establecerse una correlación consistente entre ambos métodos. De este modo se reduce la influencia de las características del suelo en la capacidad de infiltración.

De forma similar se plantea la posibilidad de analizar la evolución de la cubierta vegetal cárcava a cárcava para obtener un modelo lineal de su evolución que permita determinar por periodos, valores de vegetación en restauraciones hidrológico-forestales y del control del fenómeno erosivo en *badlands* bajo climas mediterráneos continentalizados.

Cabe destacar la dificultad de realizar estudios de este tipo en campo, debido a la necesidad de transportar una gran cantidad de litros de agua a las zonas de medición, lo que complica la realización de un elevado número de ensayos. Por ello, es conveniente mejorar la precisión de las medidas de infiltración con infiltrómetros de pequeño tamaño, más manejables y que requieren una menor cantidad de agua, como el infiltrómetro pendiente de patente utilizado en el presente estudio.

Por último, se ha comprobado que la asignación de los grupos de suelos es tremendamente incierta, dependiendo del criterio utilizado, lo cual crea una gran incertidumbre no sólo a la hora de determinar el grupo de suelo, sino también al elegir el número de curva en el método del SCS. Por ello, y como destacan entre otros Mongil *et al.*, 2012b, se hace necesario el establecimiento de un consenso al respecto, y posiblemente avanzar en la consideración del grupo de suelo como variable continua.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

**ALLUÉ, J.L. 1990.** Atlas fitoclimático de España. Taxonomías. *Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación*. Madrid.

**ANGULO-JARAMILLO, R; VANDERVAERE; J. P; ROULIER, S; THONY, J. L; GAUDET, J. P; VAUCLIN, M. 2000.** Field measurement of soil surface hydraulic properties by disc and ring infiltrometers. A review and recent developments. *Soil & Tillage Research*, 55: 1-29.

**AODA, M. I; NEDAWI, D. R.; ABDUL-RASSUL, I. A. 1988.** A Comparison of the Goodness of Fit for Three Theoretically-derived Infiltration Equations. *J. Agric. Engng Res.*, 41: 173-180.

**ARMAND, R; BOCKSTALLER, C; AUZET, V; VAN DIJK, P. 2009.** Runoff generation related to intra-field soil surface characteristics variability application to conservation tillage context. *Soil & Tillage Research*, 102: 27–37.

**AYERBE, J.M. 1930.** Proyecto de restauración y repoblación de las laderas de la margen izquierda del río Carrión. *Servicio Forestal de la Confederación Sindical Hidrográfica del Duero*. Valladolid.

**AZCARRETAZÁBAL, D. 1963.** Proyecto de repoblación forestal y restauración de las laderas de la cuenca del Carrión, fase 1ª. *Servicio Forestal de la Confederación Hidrográfica del Duero*. Valladolid.

**BAGARELLO, V; DI STEFANO, C; FERRO, V; IOVINO, M; SGROI, A. 2010.** Physical and hydraulic characterization of a clay soil at the plot scale. *Journal of Hydrology*, 387: 54–64.

**BAGARELLO, V; SFERLAZZA, S; SGROI, A. 2009.** Comparing two methods of analysis of single-ring infiltrometer data for a sandy-loam soil. *Geoderma*, 149: 415–420.

**BAGARELLO, V; SGROI, A. 2004.** Using the single-ring infiltrometer method to detect temporal changes in surface soil field-saturated hydraulic conductivity. *Soil & Tillage Research*, 76: 13–24.

**BAMUTAZE, Y; TENYWA, N. M; MAJALIWA, M. J. G; BAGOORA, F; MAGUNDA, M; OBANDO, J; WASIGE, J. E; VANACKER, V. 2010.** Infiltration characteristics of volcanic sloping soils on Mt. Elgon, eastern Uganda. *Catena*, 80: 122–130.

**BEDFORD, D .R; SMALL, E. E. 2007.** Spatial patterns of ecohydrologic properties on a hillslope-alluvial fan transect, central New Mexico. *Catena*, 73: 34–48.

**BENEGAS, L; ILSTEDT, U; ROUPSARD, O; JONES, J; MALMER, A. 2005.** Effects of trees on infiltrability and preferential flow in two contrasting agroecosystems in Central America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 183: 185-196.

**BERGER, T; HAGER, H. 2000.** Physical top soil properties in pure stands of Norway spruce (*Picea abies*) and mixed species stands in Austria. *Forest Ecol. Manag.*, 136: 159–172.

**BERGKAMP, GER. 1998.** A hierarchical view of the interactions of runoff and infiltration with vegetation and microtopography in semiarid shrublands. *Catena*, 33: 201–220.

**BERGLUND, E. R; ABDELAZIZ, A; TAYAA, M. 1980.** Comparison of soil and infiltration properties of range and afforested sites in northern Morocco. *Forest Ecology and Management*, 3: 295-306.

**BLANCO-SEPÚLVEDA, 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 mediterránea. *Baetica: estudios de arte, geografía e historia*, 21: 9-33.

**BONELL, M; WILLIAMS, J. 1986.** The two parameters of the Philip infiltration equation: their properties and spatial and temporal heterogeneity in a red earth of tropical semi-arid queensland. *Journal of Hydrology*, 87: 9-31.

**BORMANN, H. 2010.** Towards a hydrologically motivated soil texture classification. *Geoderma*, 157: 142–153.

**BOUWER, H. 1986.** Intake rate: cylinder infiltrometer. Klute, second edition. *Agron. Monogr.*, 9: 825-844.

**BOUWER, H. 2002.** Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. *Hydrogeology Journal*, 10: 121 142.

**BRUIJNZEEL, L.A. 2004.** Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104: 185–228.

**BUCKINGHAM, E. 1907.** Studies on the movement of soil moisture, *US Dept. of Agriculture Bureau of Soils Bull.*

**BUCZKO, U; BENS, O; HÜTTL, R. F. 2006.** Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine–beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology*, 331: 383–395.

**BUCZKO, U; BENS, O; HÜTTL, R.F. 2006.** Water infiltration and hydrophobicity in forest soils of a pine–beech transformation chronosequence. *Journal of Hydrology*, 331: 383– 395.

**BUTLER R. 2011.** Rainforest. *Create Space Independent Publishing Platform*. 94 pp.

**BUTTLE, J. M.; HOUSE, D. A. 1997.** Spatial variability of saturated hydraulic conductivity in shallow macroporous soils in a forested basin. *Journal of Hydrology*, 203: 127- 142.

**CALDER, IAN R. 2007.** Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management*, 251: 110–120.

**CAMPANO FERNÁNDEZ, ALBERTO. 2012.** Estudio de infiltración de una cárcava restaurada en Saldaña (Palencia). Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería Técnica Forestal, especialidad en Explotaciones Forestales, de la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias de Palencia. Sin publicar.

**CANORA, F; FIDELIBUS, M. D; SCIORTINO, A; SPILOTRO, G. 2008.** Variation of infiltration rate through karstic surfaces due to land use changes: a case study in Murgia (SE-Italy). *Engineering Geology*, 99: 210–227.

**CAPUTO, M. C; DE CARLO, L; MASCIOPINTO, C; NIMMO, J. R. 2010.** Measurement of field-saturated hydraulic conductivity on fractured rock outcrops near Altamura (Southern Italy) with an adjustable large ring infiltrometer. *Environ Earth Science*, 60: 583–590.

**CEBALLOS, A; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J; SANTOS, F; ALONSO, P. 2002.** Soil-water behaviour of sandy soils under semi-arid conditions in the Duero basin (Spain). *Journal of Arid Environments*, 51: 501–519.

**CERDÀ, A. 1993.** Metodologías para el estudio de la hidrología y erosión de superficies degradadas (badland) a partir de lluvia simulada. *Cuaternario y Geomorfología*, 7: 35-48.

**CERDÀ, A. 1994.** Comportamiento hidrológico de los suelos sobre areniscas. Sierra de la Calderona, Valencia. *Cuaternario y Geomorfología*, 8 (3-4): 3-21.

**CERDÀ, A. 1996.** Seasonal changes of the infiltration rates in a mediterranean scrubland on limestone. *Journal of Hydrology*, 198: 209–225.

**CERDÀ, A. 1997.** Seasonal changes of the infiltration rates in a Mediterranean scrubland on limestone. *Journal of Hydrology*, 198: 209–225.

**CERDÀ, A. 2001.** Effects of rock fragment cover on soil infiltration, inter rill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52: 59-68.

**CERDÀ, A; BODÍ, M.B. 2009.** El proceso de infiltración en los badlands del este de la Península Ibérica. Avances y retos. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, nº35: 7-42.

**CERDÀ, A; IMESON, A. C; CALVO, A. 1995.** Fire and aspect induced differences on the erodibility and hydrology of soils at La Costera, Valencia, Southeast Spain. *Catena*, 24: 289-304.

**CHAHINIAN, N; MOUSSA, R; ANDRIEUX, P; VOLTZ, M. 2005.** Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *Journal of Hydrology*, 306: 191–214.

**CHANDLER, KATHY R; CHAPPELL, NICK A. 2008.** Influence of individual oak (*Quercus robur*) trees on saturated hydraulic conductivity. *Forest Ecology and Management*, 256: 1222–1229.

**CHENG, Q; CHEN, X; CHEN, X; ZHANG, Z; LING, M. 2011.** Water infiltration underneath single-ring permeameters and hydraulic conductivity determination. *Journal of Hydrology*, 398: 135–143.

**CHONG, S. K; TENG, T. M. 1986.** Relationship between the runoff curve number and hydrologic soil properties. *Journal of Hydrology*, 84: 1-7.

**CHOWDARY, V. M.; DAMODHARA-RAO, M; JAISWAL, C. S. 2006.** Study of infiltration process under different experimental conditions. *Agricultural Water Management*, 83: 69–78.

**CUBERA, ELENA; MORENO, GERARDO. 2007.** Effect of single *Quercus ilex* trees upon spatial and seasonal changes in soil water content in dehesas of central western Spain. *Annals of Forest Science*, 64: 355–364.

**DA SILVEIRA, A. L; LOUZA, J. A; BELTRAME, L. F. 1993.** Infiltaçao e armazenamento no solo. pp. 335-372. In: Tucci, C.E.M., (ed.). *Hidrología: Ciencia e applicação. Editora da Universidade, edusp, ABRH, Sao Paulo, Brasil.*

**DARCY, H. 1856.** Les fontaines publiques de la ville de Dijon. *Dalmont*, Paris (1856), pp. 647.

**DIAMOND, J; SHANLEY, T. 2003.** Infiltration rate assessment of some major soils. *Irish Geography*, 36(1): 32-46.

**DORSEY, D.; WARD, A.; FAUSEY, N. Y BAIR, E. 1990.** A comparison of four field methods for measuring saturated hydraulic conductivity. *Transactions of the ASAE*, 33: 1925-1931.

**DUNIN, F.X. 1976.** Infiltration: its simulation for field conditions. J.C. Rodda (Ed.), *Facets of Hydrology*, Wiley, Bristol (1976), pp. 199–227.

**DUNKERLEY, D. 2000.** Hydrologic effects of dryland shrubs: defining the spatial extent of modified soil water uptake rates at an Australian desert site. *Journal of Arid Environments*, 45:159–172.

**ELRICK, D. E; PARKIN, G. W; REYNOLDS, D. W; FALLOW, D. J. 1995.** Analysis of early-time and steady state single-ring infiltration under falling head conditions. *Water Resources Research*, 31: 1883-1893.

**EL-SHAFEI, Y. Z. 1988.** The effect of initial moisture content and rain (sprinkler) intensity on wetting front advance during rain (sprinkler) infiltration. *Catena*, 15: 491-505.

**FERNÁNDEZ, P.C., LUQUE, J.A., PAOLONI, J.D. 1971.** Análisis de la infiltración y su aplicación para diseño de riego en el valle inferior del Río Colorado. *Publicación Nº 130 INTA*. pp 29.

**FOROUD, N; ST. GEORGE, E; ENTZ, T. 1995.** Determination of infiltration rate from border irrigation advance and recession trajectories. *Agricultural Water Management*, 30: 133- 142.

**FOURNIER, A; PLANCHON, O. 1998.** Link of vegetation with soil at a few metre-scale: herbaceous floristic composition and infiltrability in a Sudanian fallow-land. *Acta Ecológica*, 3: 215-226.

**GANDULLO, J.M. Y SERRADA, R. 1977.** Mapa de Productividad potencial de la España Peninsular. *INIA*. Madrid.

**GAVANDE, S. A. 1972.** Física de Suelos. Principios y Aplicaciones. *Ed. Limusa Wiley*: pp. 199–232.

**GÓMEZ, J. A; VANDERLINDENB, K; NEARINGC, M. A. 2005.** Spatial variability of surface roughness and hydraulic conductivity after disk tillage: implications for runoff variability. *Journal of Hydrology*, 311: 143–156.

**GREEN, W.H; G. AMPT. 1911.** Studies of soil physics, part I: the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science*, 4:1-24.

**GUPTA, R; RUDRA, R; DICKINSON, N; PATÍN, N. Y WALL, G. 1993.** Comparison of saturated hydraulic conductivity measured by various field methods. *Transactions of the ASAE*, 36: 51-55.

**GUYONNET, D; AMRAOUI, N; KARA, R. 2000.** Analysis of transient data from infiltrometer in fine-grained soils tests. *Ground Water*, vol. 38, no. 3: 396-402.

**HALL, R. L; CALDER, I. A; GUNAWARDENA, E. R. N; ROSIER, P. T. W. 1995.** Dependence of rainfall interception on drop size: implementation and comparative performance of the stochastic model using data from a tropical site in Sri Lanka. *Journal of Hydrology*, 185: 389-407.

**HARDEN, CAROL P; SCRUGGS, P. DELMAS. 2003.** Infiltration on mountain slopes: a comparison of three environments. *Geomorphology*, 55: 5 –24.

**HASSLERA, SIBYLLE K; ZIMMERMANN, BEATE; VAN BREUGELB, MICHEL; HALLB, JEFFERSON S; ELSENBEEA, HELMUT. 2011.** Recovery of saturated hydraulic conductivity under secondary succession on former pasture in the humid tropics. *Forest Ecology and Management*, 261: 1634-1642.

**HATT, B; LE COUSTOMER, S. 2008.** Practice note 1: in situ measurement of hydraulic conductivity facility for advancing water biofiltration.

**HILLS, R.C. 1971.** Lateral flow under cylinder infiltrometers: a graphical correction procedure. *Journal of Hydrology*, 13: 153-162.

**HORTON, R.E. 1940.** An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. *Soil Science Society of America Proceedings*, 5, 399-417.

**IGME. 1982.** Mapa geológico de España. Escala 1.50000. Hoja 164 (Saldaña). *Instituto Geológico y Minero de España*. Madrid.

**ILSTEDT, ULRİK; MALMER, ANDERS; VERBEETEN, ELKE; MURDIYARSO, DANIEL. 2007.** The effect of afforestation on water infiltration in the tropics: A systematic review and meta-analysis. *Forest Ecology and Management*, 251: 45–51.

**INGELMO, F; CUADRADO, S. 1986.** El agua y el medio físico del suelo. *Centro de Edafología y Biología Aplicada (CSIC)*. Excm. Diputación Provincial, Salamanca.

**INGELMO, F; MOLINA, M. J; DE PAZ, J. M; VISCONTI, F. 2011.** Soil saturated hydraulic conductivity assessment from expert evaluation of field characteristics using an ordered logistic regression model. *Soil and Tillage Research*, 115–116: 27–38.

**IOWA STORMWATER MANAGEMENT. 2008.** 2c-5 NRCS tr-55 Methodology. Visto el 15 de junio de 2014 en <http://www.usda.gov>.

**JIMÉNEZ, C. C; TEJEDOR, M; MORILLAS, G; NERIS, J. 2006.** Infiltration rate in andisols: Effects of changes in vegetation cover (Tenerife, Spain). *Soil and Water Conservation Society*, v 61; nº 3: 153-158.

**JIMÉNEZ-HERNÁNDEZ, M. E; DE LA LOSA, A; VALVERDE, M. I; MORENO, L; CASTAÑO, S. 2009.** Caracterización de las propiedades hidráulicas de la ZNS: determinaciones en laboratorio y ensayos “in situ” en una parcela agrícola de Arganda del Rey (Madrid). *Estudios en la zona no saturada del suelo*. Vol IX, Barcelona, 18 a 20 de noviembre, 2009.

**JOFFRE, R. 1988.** Soil water improvement by trees in the rangelands of southern Spain. *Acta Ecologica, Ecol. Plant.*, Vol. 9, nº 4: 405-422.

**JOHNSON-MAYNARD, J.L; GRAHAM, R.C; WUB, L; SHOUSE, P.J. 2002.** Modification of soil structural and hydraulic properties after 50 years of imposed chaparral and pine vegetation. *Geoderma*, 110: 227– 240.

**JORDÁN, ANTONIO; MARTÍNEZ-ZAVALA, LORENA; BELLINFANTE, NICOLÁS. 2008.** Heterogeneity in soil hydrological response from different land cover types in southern Spain. *Catena*, 74: 137–143.

**KELLIHER, F. M; WHITEHEAD, D; POLLOCK, D. S. 1991.** Rainfall interception by trees and slash in *Pinus radiata* D. Don stand. *Journal of Hydrology*, 131: 187-204.

**KOSTIAKOV, A. N. 1932.** On the dynamics of the coefficients of water percolation in soils and on the necessity of studying it from a dynamic point of view for purpose of amelioration. Transactions of the 6<sup>th</sup> Communication of the Int. *Society of Soil Sciences*, Part A: 17–21.

**LAMPURLANÉS, J., C. CANTERO., 2003.** Soil bulk density and penetration resistance under different tillage and crop management system and their relationship with barley root growth. *Agronomy Journal*, 95: 526-536.

**LASSABATÈRE, L; ANGULO-JARAMILLO, R; SORIA-UGALDE, J. M; CUENCA, R; BRAUD, I; HAVERKAMP, R. 2006.** Beerkan estimation of soil transfer parameters through infiltration experiments—BEST. *Soil Science Society of America Journal*, 70: 521–532.

**LI, XIAO-YAN; CONTRERAS, SERGIO; SOLÉ-BENET, ALBERT. 2008.** Unsaturated hydraulic conductivity in limestone dolines: Influence of vegetation and rock fragments. *Geoderma*, 145: 288–294.

**LI, XIAO-YAN; CONTRERAS, SERGIO; SOLÉ-BENET, ALBERT; CANTÓN, YOLANDA; DOMINGO, FRANCISCO; LÁZARO, ROBERTO; LIN, HENRY; VAN WESEMAEL, BAS; PUIGDEFÁBREGAS, JUAN. 2011.** Controls of infiltration–runoff processes in Mediterranean karst rangelands in SE Spain. *Catena*, 86: 98–109.

**LIU, HU; ZHAO, WENZHI; HE, ZHIBIN. 2013.** Self-organized vegetation patterning effects on surface soil hydraulic conductivity: A case study in the Qilian Mountains, China. *Geoderma*, 192: 362–367.

**LÓPEZ-BERMÚDEZ, F; ROMERO-DÍAZ, A; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, J. 1998.** Vegetation and soil erosion under a semi-arid Mediterranean climate: a case study from Murcia (Spain). *Geomorphology*, 24: 51–58.

**LÓPEZ-CADENAS, F; MINTEGUI, F. 1986.** Hidrología de superficie. *Fundación Conde del Valle de Salazar, E.T.S.I. Montes Madrid*. 224 pp.

**MACHIWAL, D; JHA, M. K; MAL, B. C. 2005.** Modelling Infiltration and quantifying Spatial Soil Variability in a Wasteland of Kharagpur, India. *Biosystems Engineering*, 95 (4): 569–582.

**MAHMOOD, H; NCHABE, H. 1995.** Estimating hydraulic conductivity for models of soils with macropores. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 121: 95-102.

**MAIMER, A. 1996.** Hydrological effects and nutrient losses of forest plantation establishment on tropical rainforest land in Sabah, Malaysia. *Journal of Hydrology*, 174: 129-148.

**MAO, L. L; LEI, T. W; LI, X; LIU, H; HUANG, X. F; ZHANG, Y. N. 2008.** A linear source method for soil infiltrability measurement and model representations. *Journal of Hydrology*, 353: 49–58.

**MAO, L; LEI, T. W; BRALTS, V. F. 2011.** An analytical approximation method for the linear source soil infiltrability measurement and its application. *Journal of Hydrology*, 411: 169–177.

**MARTÍNEZ DE AZAGRA, A. 2011.** Oasificación.com: una página web sobre hidrología forestal. Actas de la II Reunión Sobre Hidrología Forestal. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 32: 71-76.

**MARTÍNEZ DE AZAGRA, A., FERNÁNDEZ, R., SESEÑA, A., MÉNDEZ, C., DÍEZ, J.M., NAVARRO, J. Y VARELA, J.M. 1997.** Estudio para la elaboración de una metodología de análisis de la eficacia de obras transversales de corrección hidrológico-forestal ubicadas en escarpes de páramo. *CEDEX*. Madrid.

**MARTÍNEZ DE AZAGRA, A; NAVARRO, J. 1996.** Hidrología forestal: el ciclo hidrológico. *Universidad de Valladolid*. Palencia.

**MARTÍNEZ DE AZAGRA, A; PANDO FERNÁNDEZ, V; DEL RÍO SAN JOSÉ, J; NAVARRO HEVIA, J. 2006.** Aproximación al conocimiento de la infiltración a través del análisis dimensional. *Ecología*, 20: 471-492.

**MARTÍNEZ, J. 1996.** Variabilidad espacial de las propiedades físicas e hídricas de los suelos en medio semiárido mediterráneo. *Universidad de Murcia*, 1996. 191 pp.

**MERTENS, J; JACQUES, D; VANDERBORGHTE, J; FEYEN, J. 2002.** Characterization of the field-saturated hydraulic conductivity on a hillslope: in situ single ring pressure infiltrometer measurements. *Journal of Hydrology*, 263: 217-229.

**MOEYS, J. 2012.** Package "soiltexture". Manual para R. Visto en <http://soiltexture.r-forge.r-project.org/> el 10 de junio de 2012.

**MONGIL, J.; DÍAZ, V.; NAVARRO, J.; CRUZ, V.; 2013.** Infiltrómetro inundador mejorado de cilindro simple de metacrilato con elementos facilitadores de la medición para test de infiltración económico en campo. Proyecto Infiltest. Memoria de investigación. Programa piloto de prototipos orientados al mercado TCUE4. *Universidad Católica de Ávila*. Ávila.

**MONGIL, J; NAVARRO, J. 2012a.** Bases para el conocimiento de la infiltración en varios terrenos forestales de la provincia de Ávila (centro de España). *Article in press*.

**MONGIL, J; NAVARRO, J. 2012b.** Infiltración y grupos hidrológicos de suelos en las laderas de los páramos (Valladolid). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38: 131-153.

**MORENO-DE LAS HERAS, M; MERINO-MARTÍN, L; NICOLAU, J.M. 2009.** Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena*, 77: 39–47.

**MUBARAK, I; ANGULO-JARAMILLO, R; MAILHOL, J. C; RUELLE, P; KHALEDIAN, M; VAUCLIN, M. 2010.** Spatial analysis of soil surface hydraulic properties: is infiltration method dependent? *Agricultural Water Management*, 97: 1517–1526.

**MUÑOZ CARPENA, R; RITTER RODRIGUEZ, A. 2005.** Hidrología agroforestal. *Dirección general de Universidades e Investigación, Gobierno de Canarias*. Ediciones Mundi-Prensa.

**MUSGRAVE, G.W. 1955.** How much of the rain enters the soil? *In Water: U.S. Department of Agriculture. Yearbook*. Washington, DC. pp. 151–159.

**NERIS, J; JIMÉNEZ, C; FUENTES, J; MORILLAS, G; TEJEDOR, M. 2012.** Vegetation and land-use effects on soil properties and water infiltration of Andisols in Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena*, 98: 55-62.

**NERIS, J; TEJEDOR, M; RODRÍGUEZ, M; FUENTES, J; JIMÉNEZ, C. 2013.** Effect of forest floor characteristics on water repellency, infiltration, runoff and soil loss in Andisols of Tenerife (Canary Islands, Spain). *Catena*, 108: 50–57.

**NRCS. 2007.** National Engineering Handbook, Part 630 Hydrology. *USDA*. Washington D.C. (EEUU).

**OGÉE, J; BRUNET, Y. 2002.** A forest floor model for heat and moisture including a litter layer. *Journal of Hydrology*, 233: 212-233.

**OMUTO, C.T. 2008.** Assessment of soil physical degradation in eastern Kenya by use of a sequential soil testing protocol. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 128: 199–211.

**OMUTO, T. C; MINASNY, B; MCBRATNEY A. B; BIAMAH, E. K. 2006.** Nonlinear mixed effect modeling for improved estimation of water retention and infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 330: 748– 758.

**PAZ-PELLAT, F. 2009.** Mitos y falacias del método hidrológico del número de curva del SCS/NRCS. *Agrociencia*, Vol. 43, nº5: 521-528.

**PEDRETTI, D; BARAHONA-PALOMO, M; BOLSTER, D; SANCHEZ-VILA, X; FERNÁNDEZ-GARCÍA, D. 2012.** A quick and inexpensive method to quantify spatially variable infiltration capacity for artificial recharge ponds using photographic images. *Journal of Hydrology*, 430-431: 118-126.

**PHILIP, J. R. 1957.** The theory of infiltration: The influence of the initial moisture content. *Soil Science*, 84: 329–339.

**PORTA, J. 2003.** Edafología para la agricultura y el medio ambiente. *Ediciones Mundi-Prensa*, Madrid.

**PREVIATI, M; BEVILACQUA, I; CANONE, D; FERRARIS, S; HAVERKAMP, R. 2010.** Evaluation of soil water storage efficiency for rainfall harvesting on hillslope micro-basins built using time domain reflectometry measurements. *Agricultural Water Management*, 97: 449–456.

**PRIETO, B; TÁMARA, R; PEROZA, J.A. 2006.** Comparación de dos métodos de campo para la determinación de la conductividad hidráulica saturada en suelos del Sinu (Córdoba, Colombia). *Temas Agrarios*, 11(2), julio - diciembre 2006: 36-44.

**PROCEDIA COMEGNA, LUCA; DAMIANO, EMILIA; GRECO, ROBERTO; GUIDA, ANDREA; OLIVARES, LUCIO; PICARELLI, LUCIANO. 2013.** Effects of the vegetation on the hydrological behavior of a loose pyroclastic deposit. *Environmental Sciences*, 19: 922 – 931.

**RAMOS DIEZ, I. 2012.** Control de sedimentos y evaluación morfológica de la cárcava nº 20 de Saldaña (Palencia) como consecuencia de su restauración hidrológico-forestal. Proyecto fin de carrera de Ingeniería Técnica Forestal, especialidad en Explotaciones Forestales. ETSIIAA Palencia. Sin publicar.

**REYNOLDS, W. D; BOWMAN, B. T; BRUNKE, R. R; DRURY, C. F; TAN, C. S. 2000.** Comparison of tension infiltrometer, pressure infiltrometer, and soil core estimates of saturated hydraulic conductivity. *Science Society American Journal*, 64: 478–484.

**RICHARDS, L. A. 1931.** Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1: 318-333.

**RIVAS-MARTÍNEZ, S. 1987.** Mapa de series de vegetación de España y memoria: 1:400000. *ICONA*. Madrid.

**RIVAS-MARTÍNEZ, S. 2007.** Mapa de series, geoseries y geopermaseries de vegetación de España. Parte 1, Memoria del mapa de vegetación potencial de España. *Servicio de Publicaciones de la Universidad de León*. León.

**RIVERA POSADAS, H. 2012.** Erosión en cárcavas. Bioingeniería y restauración hidrológicas. Visto el 10 de agosto de 2012 en <http://ecoambientes.tripod.com/id7.html>

**ROBINSON JUDITH L; SLATER, LEE D; SCHAFER, KARINA V.R. 2012.** Evidence for spatial variability in hydraulic redistribution within an oak–pine forest from resistivity imaging. *Journal of Hydrology*, 430–431: 69–79.

**RODRÍGUEZ-VÁSQUEZ, A. F; ARISTIZÁBAL-CASTILLO, A. M; CAMACHO-TAMAYO, J. H. 2005.** Variabilidad espacial de los modelos de infiltración de Philip y Kostiaikov en un suelo Ándico. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v.28, nº 1: 64-75.

**ROJAS, R. 2012.** Curso de diseño hidrológico de Riegos y Drenajes. Postgrado de Ingeniería de Riegos y Drenajes. *CIDIAT*. Universidad Central de Venezuela.

**RUIZ-LEGAZPI, JORGE. 2010.** Estudio de la capacidad de natación de la trucha común (*Salmo trutta*) y del salvelino (*Salvelinus fontinalis*). Proyecto Fin de Carrera de Ingeniería de Montes de la ETSIAA de Palencia. Sin publicar.

**SCS, SOIL CONSERVATION SERVICE. 1956.** Hydrology, National Engineering Handbook, Supplement A, Sect. 4, Chapt. 10, *Soil Conservation Service, USDA*, Washington, D.C., 1956.

**SEPASKHAH, A.R; SHAHABIZAD, V. 2010.** Effects of water quality and Pam application rate on the control of soil erosion, water infiltration and runoff for different soil textures measured in a rainfall simulator. *Biosystems Engineering*, 106: 513-520.

**SIDIRAS, N; ROTH, C.H. 1987.** Infiltration measurements with double-ring infiltrometers and a rainfall simulator under different surface conditions on an oxisol. *Soil and Tillage Research*, 9: 161-168.

**SILVA, L. L. 2007.** Fitting infiltration equations to centre-pivot irrigation data in a Mediterranean soil. *Agricultural Water Management*, 94: 83–92.

**STOTHOFF, S.A; OR, D; GROENEVELD, D.P; JONES, S.B. 1999.** The effect of vegetation on infiltration in shallow soils underlain by fissured bedrock. *Journal of Hydrology*, 218:169–190.

**TAYLOR A. S, ASHCROFT, G. L. 1972.** Physical Edaphology: The physics of irrigated and nonirrigated soils. W. H. *Freeman and Company*, San Francisco.

**TEÓFILO, E; MORALES, G. P. 2012.** Aplicación del infiltrómetro de cilindros concéntricos en la determinación aproximada de la velocidad de infiltración lateral. *XXI Congreso Nacional de Hidráulica*. Guadalajara, Jalisco, México, octubre 2010.

**TERRÁDEZ GURREA, MANUEL. 2014.** Análisis de componentes principales. Visto el 24 de julio de 2014 en [http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes\\_principales.pdf](http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/Componentes_principales.pdf).

**TOAMA, J; ALBERGEL, J. 1992.** Determining soil hydrologic properties from rain simulator or double ring infiltrometer experiments: a comparison. *Journal of Hydrology*, 135: 73-86.

**TRICKER, A. S. 1978.** The infiltration cylinder: some comments on its use. *Journal of Hydrology*, 36: 383-391.

**USDA, 1999.** Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2nd Edition. *Natural Resources Conservation Service. U.S. Department of Agriculture.* Handbook 436. Washington DC.

**VAN DIJK, ALBERT I.J.M; KEENAN, RODNEY J. 2007.** Overview. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management* 251: 1–9.

**VAN SCHAIK, N.L.M.B. 2009.** Spatial variability of infiltration patterns related to site characteristics in a semi-arid watershed. *Catena*, 78: 36–47.

**VÁSQUEZ-MÉNDEZ, REBECA; VENTURA-RAMOS, EUSEBIO; OLESCHKO, KLAUDIA, HERNÁNDEZ-SANDOVAL, LUIS; PARROT, JEAN-FRANCOIS; NEARING, MARK A. 2010.** Soil erosion and runoff in different vegetation patches from semiarid Central Mexico. *Catena*, 80: 162–169.

**VIVAR SANZ, A. 1993.** Aplicación del modelo de Green-Ampt para infiltrometría de doble anillo con carga variable sobre suelos alterados por labores de preparación para la repoblación. Actas del XII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo: el estudio del suelo y de su degradación en relación con la desertificación. *MAPA. SECS.* Salamanca, 142-150.

**WOODING, R. A. 1968.** Steady infiltration from large shallow circular pond, *Water Resources Research*, 4, 1259–1273.

**WU, L; PAN, L. 1997.** Generalized solution to infiltration from single-ring infiltrometers by scaling. *Soil Science Society American Journal*, 61: 1318-1322.

**WUEST, S.B. 2005.** Bias in ponded infiltration estimates due to sample volume and shape. *Vadose Zone Journal*, vol. 4, November, 2005.

**XU, X; LEWIS, C; LUI, W; ALBERTSON, J. D; KIELY, G. 2012.** Analysis of single ring infiltrometer data for soil hydraulic properties estimation: Comparison of BEST and Wu methods. *Agricultural Water Management.* Article in press.

**ZAPATA-SIERRA, A; MANZANO-AGUGLIARO, F. 2008.** Influencia de seis especies arbóreas en la infiltración de agua en el suelo. *Agrociencia*, 42: 835-845.

**ZAVALA, LORENA M; GARCÍA-MORENO, JORGE; GORDILLO-RIVERO, ÁNGEL J; JORDÁN, ANTONIO; MATAIX-SOLERA, JORGE. 2014.** Natural soil water repellency in different types of Mediterranean woodlands. *Geoderma*, 226–227: 170–178.

**ZHAO, YONGGANG; WUA, PUTE; ZHAO, SHIWEI; FENG, HAO. 2013.** Variation of soil infiltrability across a 79-year chronosequence of naturally restored grassland on the Loess Plateau, China. *Journal of Hydrology*, 504: 94–103.

# ANEJO I: El proceso de infiltración

## ANEJO I. El proceso de infiltración

### I.1. El proceso de infiltración

#### I.1.1. Introducción

El proceso de infiltración del agua en el suelo actúa como gestor de la escorrentía superficial y por tanto del almacenamiento de agua en el suelo (Dunin, 1976). Es por ello un proceso fundamental en el ciclo hidrológico del agua, ya que controla y regula tanto la generación de escorrentía como la recarga de acuíferos, el almacenamiento del agua en el suelo y la evaporación de la misma (Cerdà, 1993).

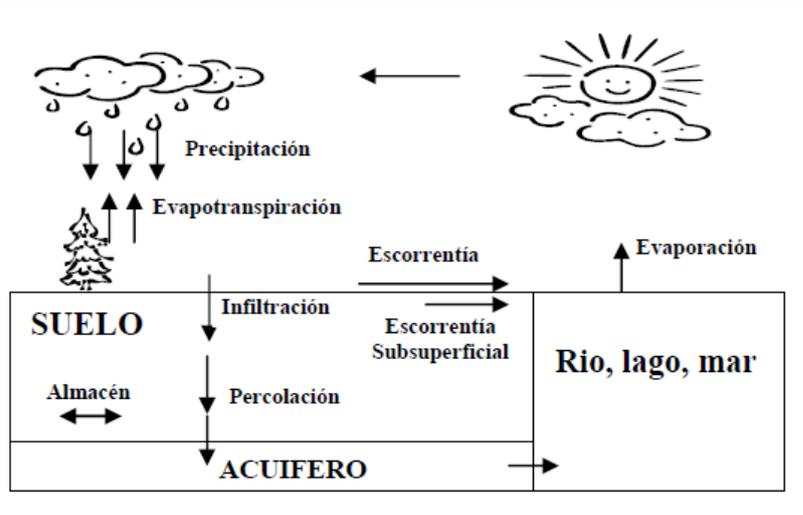


Figura I.1. Esquema del ciclo del agua (Rivera, 2012).

La infiltración designa el proceso de entrada de agua, generalmente vertical, en el suelo desde la superficie, lo que constituye la primera etapa en el movimiento del agua en el suelo (Porta *et al.*, 2003). Cuando se inicia una lluvia sobre un suelo seco, la entrada de agua en el mismo tiene lugar en condiciones no saturadas ( $P < I$ ), siendo  $P$  la precipitación e  $I$  la infiltración. En los casos en los que la lluvia continúa, llega un momento en que el suelo no es capaz de infiltrar toda el agua que recibe ( $P > I$ ), se produce por tanto escorrentía y el flujo de agua que tiene lugar en el suelo se produce en condiciones saturadas.

De la parte infiltrada, una fracción queda retenida en el suelo y pasará a ser evapotranspirada. Otra segunda fracción escapa de los procesos de evaporación y transpiración al moverse hacia el subsuelo, hacia las zonas más profundas, hasta que termina incorporándose a las capas freáticas y acuíferos.

Esta segunda fracción, que se destina entonces a la recarga de acuíferos y a proporcionar regularmente el caudal de los ríos a través de los flujos subterráneos, es de una gran importancia en la conformación de los recursos hidráulicos de una zona, y por consiguiente resulta de gran interés conocer las leyes o principios que regulan la entrada del agua en el interior del suelo.

### I.1.2. Definición de algunos términos relacionados con la infiltración:

⇒ **Infiltración acumulada:** cantidad de agua que se ha infiltrado en la unidad de superficie de un suelo a lo largo de un determinado lapso de tiempo.

⇒ **Velocidad de infiltración:** tasa o velocidad a la que el agua entra en el suelo en cada instante. Cantidad de agua infiltrada por unidad de superficie y de tiempo.

Disminuye muy rápidamente a lo largo de los primeros momentos del proceso, partiendo de unas condiciones de suelo seco y tiende a estabilizarse asintóticamente a lo largo del tiempo. Se denomina también velocidad de infiltración instantánea.

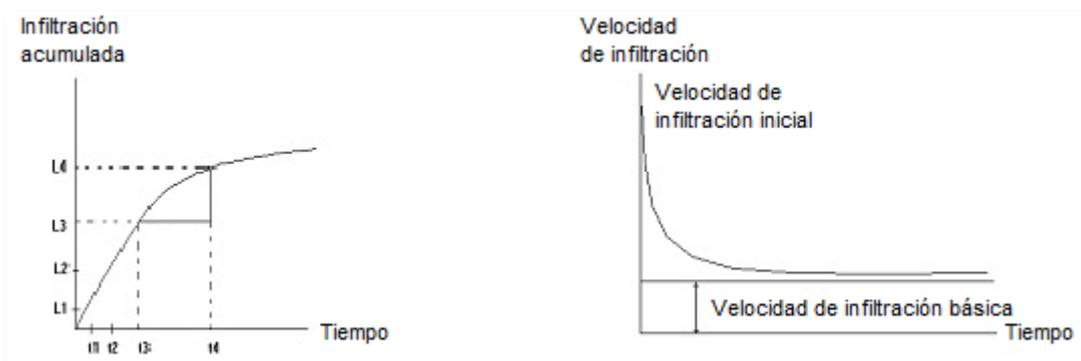


Figura I.2. Gráfica de comparación entre la infiltración acumulada y la velocidad de infiltración. Elaboración propia.

⇒ **Velocidad de infiltración media:** cantidad acumulada de agua infiltrada por unidad de superficie a lo largo del tiempo que ha durado el proceso.

⇒ **Velocidad de infiltración básica o final:** es la velocidad de infiltración que corresponde a un régimen relativamente estabilizado, lo que suele ocurrir al cabo de 3 a 5 horas desde el inicio del ensayo.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i(t) = i_f$$

donde  $i$  es la velocidad de infiltración,  $t$  el tiempo e  $i_f$  la infiltración final.

⇒ **Capacidad de infiltración:** se refiere a la cantidad máxima de agua que puede introducirse en el suelo por unidad de tiempo y en un instante dado. Depende de la naturaleza del terreno y de su contenido en humedad. A mayor humedad en el suelo menor es su capacidad de infiltración. Cuando el suelo se encuentra saturado de humedad, entonces, la capacidad de infiltración coincide con lo que se denomina permeabilidad. La infiltración constituye un proceso, mientras que la permeabilidad es una propiedad de un material poroso (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

⇒ **Coefficiente de infiltración:** cociente entre la intensidad de infiltración y la intensidad de lluvia. Si es igual a la unidad, significa que no se produce escorrentía superficial; si es menor, entonces se producirá encharcamiento y escorrentía superficial.

⇒ **Percolación:** movimiento del agua dentro del suelo cuando éste se encuentra saturado de humedad. Este movimiento se debe a la acción de la gravedad.

⇒ **Filtración:** movimiento del agua a través de cualquier medio poroso, en cualquier dirección.

⇒ **Conductividad hidráulica saturada  $K_s$ :** capacidad de un suelo saturado para permitir el paso de agua a través del mismo. Si no existiese el efecto del aire aprisionado en el interior del suelo dificultando la infiltración, la tasa de infiltración final sería igual a la conductividad hidráulica saturada. Debido a la existencia de ese efecto, normalmente, la tasa de infiltración final es menor que  $K_s$  (Da Silveira *et al.*, 1993).

⇒ **Sortividad:** Concepto introducido por Philip (1957) que refleja la capacidad de un medio poroso para absorber o desorber líquidos por capilaridad.

### I.1.3. Flujo del agua en el suelo

La conductividad hidráulica expresa la aptitud de un medio poroso como es el suelo para transmitir agua. Se distinguen dos tipos de transmisiones de agua en el suelo, la que se realiza en régimen no saturado y en régimen saturado. La mayoría de los procesos que implican interacciones entre suelo y agua ocurren mientras el suelo se encuentra en condiciones no saturadas (Hillel, 1980). El movimiento del agua en un suelo no saturado está sujeto a fuerzas de succión, que son equivalentes a un potencial de presión negativo. Este potencial de succión matricial negativo, se debe a la afinidad del agua por la superficie de las partículas de suelo y los poros capilares. De forma que el agua fluye espontáneamente de las zonas donde el potencial matricial es menor hacia donde es mayor, así la dirección del movimiento viene determinada por el valor de la diferencia de potencial total entre los dos puntos del suelo (Ingelmo *et al.*, 1986). Este flujo resulta más difícil de describir y medir que el flujo saturado, debido a que no es posible controlar múltiples factores que son constantes en el caso del saturado, como es el caso de la cantidad de agua en el suelo.

Los estudios experimentales del flujo del agua en un medio poroso han dado lugar a una serie de leyes: la que describe el flujo de agua en condiciones de régimen saturado se conoce como ley de Darcy; mientras que, la del flujo no saturado es la ley de Buckingham-Darcy.

El flujo de agua en suelos saturados se describe mediante la ley de Darcy (Darcy, 1856). La velocidad media del fluido,  $v_{wz}$ , a través del medio poroso es proporcional al gradiente de carga hidráulica,

$$v_{wz} = -k_z \frac{\partial h}{\partial z}$$

donde  $k_z$  = permeabilidad respecto a la fase de agua en dirección  $z$ ;  $\partial h/\partial z$  = gradiente hidráulico en la dirección  $z$ , que puede designarse  $i_z$ .

La ley de Darcy asume una relación lineal entre el gradiente hidráulico y la velocidad media, lo cual resulta válido en condiciones de flujo laminar. El signo negativo de la ecuación indica que el agua fluye en la dirección en que disminuye la carga total.

En 1907 Buckingham observó que la ley de Darcy podía ser extendida para describir el flujo en un medio poroso no saturado.

$$v_x = -k(\theta) \cdot \frac{\partial h}{\partial z} = -k(\theta) \cdot \frac{\partial(\psi + z)}{\partial x}$$

donde la conductividad hidráulica es una función del contenido de humedad,  $\theta$ , y de la succión,  $\psi$ .

La diferencia más importante entre el flujo saturado y no saturado, radica en los valores de conductividad hidráulica. En la conductividad hidráulica en régimen saturado ( $K_s$ ), todos los espacios porosos están llenos de agua e interconectados y en estas condiciones, la continuidad y la conductividad hidráulica son máximas (Taylor, 1972). En la conductividad hidráulica en régimen no saturado ( $K$ ), los poros de mayor tamaño comienzan a llenarse de aire, la conductividad decrece, y el flujo de agua discurre sólo en los poros de menor tamaño, dependiendo además del grado de saturación (contenido de agua) (Hillel, 1980).

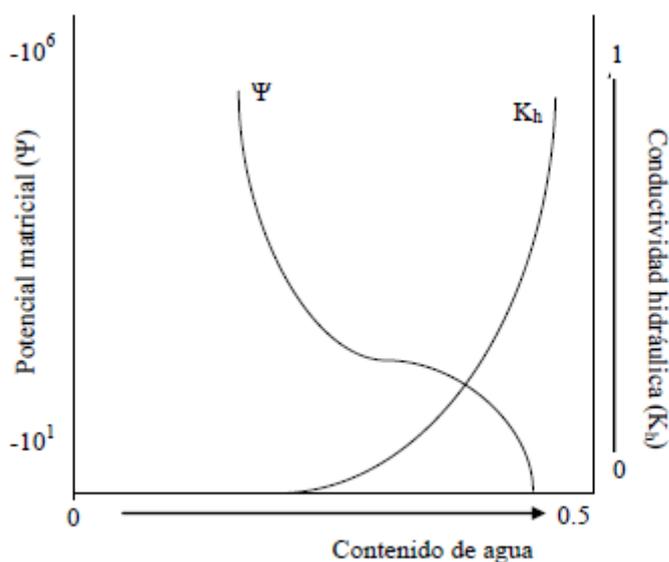


Figura I.3. Relación entre el potencial matricial, la conductividad hidráulica y el contenido de agua (modificado de Hillel, 1980).

### I.1.4. Descripción cualitativa del proceso de infiltración

Partiendo de una situación teórica de suelo seco, con un perfil homogéneo y con igual contenido de humedad en todos los puntos, la entrada de agua provoca la aparición de una zona húmeda en la parte superior, mientras la inferior permanece seca (Porta *et al.*, 2003).

El perfil hídrico resultante se debe al potencial hidráulico que caracteriza el estado energético del agua en los distintos puntos del sistema.

$$\psi_H = \psi_p + \psi_g$$

$\psi_H$  = Potencial hidráulico.

$\psi_p$  = Potencial matricial.

$\psi_g$  = Potencial gravitacional.

De esta forma, en el perfil hídrico podemos diferenciar varias zonas en función de los contenidos de agua y el tiempo:

- La *zona de saturación* corresponde a la superficie de suelo donde el contenido volumétrico del agua en el suelo es igual al contenido de saturación del mismo, siendo el potencial matricial cero. En esta zona, la velocidad de infiltración está condicionada por la conductividad hidráulica.

- La *zona de transición* se sitúa debajo de la anterior. El potencial matricial sigue siendo cero, puesto que el contenido volumétrico está cerca de la saturación, de forma que actúa el potencial gravitacional.

- En la *zona de humectación o transmisión* el contenido de humedad decrece bruscamente hasta que el contenido volumétrico alcanza el contenido inicial.

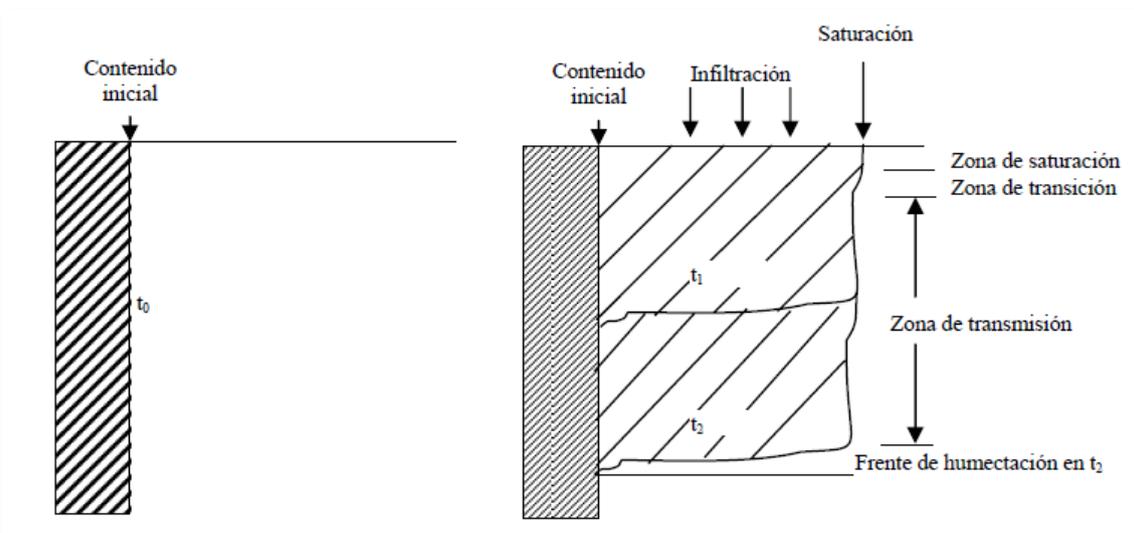


Figura I.4. Perfil hídrico (Porta *et al.*, 2003).

### **I.1.5. Factores que rigen la infiltración (Martínez de Azagra y Navarro, 1996)**

#### **⇒ La precipitación:**

Las precipitaciones influyen en cuanto a su duración e intensidad. Cuando la intensidad de la precipitación es menor que la capacidad de infiltración, todo el agua que cae se introduce en el suelo, mientras que si es superior, el terreno no es capaz de absorber todo el agua que cae, produciéndose encharcamiento y escorrentía superficial. Para una misma intensidad de precipitación, un aguacero de larga duración puede terminar por encharcar el suelo, mientras que uno corto no.

El tamaño de las gotas, o bien el tipo de precipitación, afectan a la energía cinética transmitida al suelo y puede originar la compactación de la superficie e influir en la capacidad de infiltración.

#### **⇒ Estado de la superficie del suelo:**

Las gotas de lluvia contribuyen a la compactación de la capa superficial del suelo promoviendo la formación de costras, sobre todo en los terrenos carentes de vegetación. Este efecto se acentúa más en los suelos arcillosos que en los arenosos. También producen compactaciones las pisadas del ganado o el movimiento de la maquinaria utilizada en las explotaciones agrarias y forestales.

Otra causa que influye en la infiltración es el taponamiento de los poros con pequeñas partículas de tierra, sobre todo, tras largos periodos secos (que es cuando más abundan estas partículas de polvo en las zonas áridas). La escorrentía superficial las traslada y las deposita según se va produciendo la infiltración, con lo que los poros de entrada de agua en el suelo quedan sellados.

En los suelos arcillosos en los que se producen contracciones del terreno (grietas por desecación), la capacidad de infiltración es alta al principio de las lluvias por las grietas existentes pero decrece rápidamente con la expansión de las arcillas, creándose una estructura prácticamente impermeable.

Un factor importante es la pendiente del terreno. A mayor pendiente el agua tiene menos tiempo para poder infiltrarse, pues permanece en contacto con la superficie un intervalo menor.

Las labores en cultivos como el alzado favorecen la infiltración. Tras la recolección se suele pasar una grada de discos que rompe la costra del suelo y favorece la penetración del agua en el substrato y la adquisición de tempero.

Los cultivos en fajas, el abanclado del terreno, o técnicas de repoblación como el acaballonado y el aterrazado, favorecen la infiltración y la disposición hídrica de la vegetación en laderas bajo climas de cierta aridez.

#### **⇒ La vegetación:**

La implantación de vegetación en un terreno desnudo aumenta la infiltración. Los efectos principales de la cubierta vegetal son:

- Disminuye la velocidad de la escorrentía superficial y consecuentemente aumenta el tiempo de oportunidad de infiltración.
- Reduce y elimina el impacto de las gotas de lluvia.
- Aumenta la porosidad del suelo por los canalillos que crean las raíces.
- Mejora la estructura del suelo gracias al incremento de materia orgánica.

En general, una cubierta arbórea con tapiz natural no alterado mantiene tasas de infiltración elevadas con respecto a otros suelos. La infiltración es mayor en masas arbóreas adultas que en las jóvenes, en los bosques sin pastoreo que en los pastoreados, en los montes claros que en los rasos. La infiltración en un suelo forestal puede llegar a ser 50 veces superior a la de otro terreno similar pero sometido a usos agrícolas. Se puede afirmar que la capacidad de infiltración de un terreno es máxima si sustenta una cubierta vegetal climácica. (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

#### ⇒ **Contenido de humedad y permeabilidad:**

La infiltración está condicionada por la mayor o menor facilidad con la que el agua desciende a través del perfil edáfico. Como la capacidad de transmisión es distinta para cada horizonte, el descenso del agua se verá influenciado por el horizonte de más baja transmisibilidad, propiedad que depende de la permeabilidad y el contenido de humedad del suelo.

La permeabilidad viene condicionada por los macroporos. A través de ellos el agua se mueve por la acción de la gravedad. No sólo la cantidad de macroporos, sino también su distribución y estabilidad ante cambios de humedad, influyen en esta propiedad.

A nivel macroscópico la textura, la estructura y estabilidad estructural, la materia orgánica y la actividad de la flora y la fauna edáficas son los factores que afectan a la permeabilidad.

Los terrenos arenosos son más estables que los arcillosos, ya que sus partículas no se disgregan ni se hinchan.

El contenido de humedad influye de la siguiente manera:

- Al aumentar el contenido de humedad se reduce el espacio del que dispone el suelo para almacenar agua y si la permeabilidad es baja, una vez los horizontes edáficos se han saturado, la capacidad de infiltración es muy pequeña.
- En un suelo seco la infiltración es más rápida, ya que actúan, además de las fuerzas gravitatorias, las fuerzas capilares.

En algunos terrenos denominados hidrófobos (se producen tras un incendio forestal), cuando están secos y se origina una precipitación, el agua es repelida. En los suelos que han sufrido un incendio recientemente, aparece interiormente una capa hidrófoba que provoca o facilita el deslizamiento del horizonte superficial, cuando éste se ha saturado de humedad.

- En los suelos arcillosos, los coloides, al captar moléculas de agua por fuerzas electrostáticas, se hinchan reduciendo el tamaño de los macroporos y, por lo tanto, la capacidad de infiltración.

⇒ **Características del agua:**

El agua influye principalmente a través de tres características:

- Turbidez.
- Conductividad.
- Temperatura.

La turbidez del agua afecta principalmente por la materia en suspensión transportada. En las zonas donde sedimenta el material arrastrado, se taponan los poros del suelo favoreciendo el encharcamiento.

El contenido en sales también influye, produciendo en ocasiones la formación de flóculos con los coloides del suelo y reduciendo la intensidad de infiltración. En suelos salinos (formación de costras salinas), tras largas lluvias puede suceder lo contrario: el progresivo lavado del suelo facilita la desaparición de las sales y el aumento de los poros.

La temperatura del agua afecta a su viscosidad y en consecuencia, a la facilidad con la que atravesara el perfil edáfico. Si las temperaturas son muy bajas ( $T^a$  edáfica), el agua se puede helar produciendo la impermeabilización del horizonte superficial.

Por ultimo conviene mencionar que la carga de agua existente sobre el suelo también influye en el proceso de infiltración. A mayor presión hidrostática del agua en la superficie del suelo mayor será su infiltración.

## **I.2. Utilización de modelos en el estudio de la infiltración**

### **I.2.1. Modelos de infiltración**

Existen muchos modelos de infiltración, casi tantos como investigadores han tratado el tema, de lo cual se deduce que es un tema muy delicado y que debe continuarse investigando de cara a su resolución de forma satisfactoria.

A los modelos de infiltración que se fundamentan en la ley de Darcy (1856) o en la ecuación diferencial de Richards (1931) se les denomina mecanicistas o conceptuales.

Existen otros modelos sin base física que tratan, simplemente, de describir la infiltración sin atender al proceso hidrodinámico que rige el fenómeno. Son los modelos empíricos. A su vez, podemos hablar de modelos analíticos (o intermedios), cuando parten de consideraciones físicas razonadas pero ajenas a la ley de Darcy. En Tabla I.1. se muestran algunos de los modelos de infiltración existentes en la actualidad y la categoría a la que pertenecen:

**Tabla I.1. Modelos de infiltración más conocidos. E: modelo empírico; C: modelo conceptual; A: modelo analítico. (Modificado de Martínez de Azagra et al., 2006).**

Nombre del modelo	Año	Tipo	Nombre del modelo	Año	Tipo
Green-Ampt	1911	C	SCS (Riegos)	1974	E
Kostiakov	1932	E	Morel-Seytoux-Khanji	1974	C
Horton	1940	E	Parlange	1975	C
Mezencev (Kostiakov modificado)	1948	E	Li-Stevens-Simons	1976	C
Hall	1955	C	Collis-George	1977	C
SCS (Número de curva)	1956	E	Chu	1978	C
Philip	1957	C	Gill	1978	C
Holtan	1961	A	Hachum-Alfaro	1980	C
Overton	1964	A,E	HEC	1981	E
Huggins-Monke	1966	A	Zhao	1981	A
Mein-Larson	1971	C	Ahuja	1983	C
Snyder	1971	E	Singh-Yu	1990	A
Smith	1972	C	Mishra-Singh	2003	E
Dooge	1973	A	Chu-Mariño	2005	C

Como se ha destacado, existen numerosos modelos de infiltración. Cuando un fenómeno físico complejo no está plenamente descrito resulta muy útil acotarlo definiendo las variables implicadas en él y –a través del teorema Pi (Vaschy, 1892; Buckingham, 1914; en Martínez de Azagra, 2011)– reducir sus variables obteniendo monomios adimensionales. Siguiendo un procedimiento matemático similar al propuesto por López Cadenas en 1983, Martínez de Azagra *et al.* (2006) han intentado hallar la ecuación general de la infiltración. Se trata de una función desconocida que habrá que obtener por experimentación y que depende de siete números adimensionales que poseen una clara interpretación física:

$$f = \varphi(p_e, \theta, \xi_r, d_r, k_r, MA, RE) \cdot \sqrt{\psi/\rho}$$

Donde

$f$ : Capacidad de infiltración, L·t<sup>-1</sup>.

$\varphi$ : Función genérica

$p_e$ : Porosidad eficaz de la superficie del suelo, adimensional.

$\theta$ : contenido de humedad del suelo, adimensional

$\xi_r$ : Tortuosidad relativa, adimensional

$d_r$ : Porosidad relativa entre horizontes, adimensional

$k_r$ : Permeabilidad relativa entre horizontes, adimensional

$MA$ : Cociente de la capacidad de infiltración entre la permeabilidad, número de Martínez de Azagra, adimensional.

$RE$ : Número de Reynolds, adimensional.

$\psi$ : Potencial hídrico,  $M \cdot L^{-1} \cdot t^{-2}$ .

$\rho$ : densidad absoluta del agua o del granizo, o densidad aparente de la nieve granulada,  $M \cdot L^{-3}$ .

A continuación se detallan los modelos de infiltración más utilizados:

### ⇒ Green & Ampt (1911)

Es un modelo sencillo y útil, que tiene la ventaja de que conduce a ecuaciones que pueden resolverse analíticamente, tanto para flujo horizontal como vertical. Se basa en las siguientes hipótesis (Muñoz *et al.*, 2005):

- El suelo está encharcado con una lámina de agua  $h_0$  desde el principio ( $t=0$ ).
- El frente de avance de humedad es plano (flujo en forma de pistón), es decir, el agua se mueve a la misma velocidad en toda la sección del suelo.
- El suelo es profundo y homogéneo, con un contenido inicial de humedad uniforme en profundidad.

Estas hipótesis reducen el ámbito de aplicación del modelo a suelos de textura gruesa. En este caso los resultados son suficientemente aproximados.

$$I(t) = -K_S$$

$$i(t) = -K_S t + \varepsilon$$

$I$  = infiltración acumulada.

$i$  = velocidad de infiltración.

$\varepsilon$  = constante a determinar experimentalmente.

### ⇒ Kostiakov (1932)

Kostiakov propuso un modelo exponencial, cuya ecuación es la siguiente:

$$L = k \cdot T^n$$

Donde:

$L$ : es la lámina infiltrada.

$T$ : es el tiempo.

$k$ : es un parámetro que depende de la estructura y la condición del suelo en el momento en que se aplica el agua (Gavande *et al.*, 1972).

$n$ : es un parámetro que depende de los cambios de estructura del suelo, resultantes de la humectación (Gavande *et al.*, 1972).

Esta fórmula no tiene un fundamento físico, ni es dimensionalmente homogénea, pero se ajusta muy bien al fenómeno de infiltración, dentro de los límites agronómicos (Fernández *et al.*, 1971).

### ⇒ Horton (1940)

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

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

- *Capacidad de infiltración inicial ( $f_0$ )*. Es la tasa de infiltración que se obtiene al principio del proceso de medición. El valor de esta tasa depende de la humedad inicial del suelo y de la lluvia anterior (Horton, 1940).

- *Capacidad de infiltración o Tasa de infiltración final estable o Velocidad de infiltración básica o final ( $f_c$ )*. Se define como la tasa constante de infiltración o velocidad de infiltración y se caracteriza por un régimen relativamente estabilizado al que se llega a lo largo del tiempo cuando el agua ha infiltrado la totalidad de la superficie del suelo. El tiempo requerido para alcanzar la capacidad de infiltración se define como  $t_c$ . Los términos capacidad de infiltración y tasa de infiltración, normalmente, se confunden. Se utilizan indistintamente, aunque no son exactamente lo mismo. Si la intensidad de la lluvia es inferior que la capacidad de infiltración, la tasa de infiltración no es sinónimo de capacidad. En este sentido, hay una variedad infinita de tasas pero solamente una capacidad de infiltración para un suelo dado y en un momento determinado (Horton, 1940).

- *Infiltración acumulada*. Corresponde a la cantidad de agua que se ha infiltrado en un suelo a lo largo de un determinado período de tiempo, por ejemplo, una lluvia.

- *Tasa o Velocidad de infiltración media*. Cantidad acumulada de agua infiltrada por unidad de superficie a lo largo del tiempo que ha durado el proceso.

- *Índice de decaimiento de la tasa de infiltración ( $k$ )* según el modelo de Horton (ángulo de la curva de infiltración). Es la diferencia entre la tasa de infiltración inicial y la tasa de infiltración final estable dividido por el tiempo transcurrido entre ambos puntos de la curva.

$$f = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt}$$

Donde:

$f$  : Capacidad de infiltración.

$k$  : Factor de proporcionalidad llamado también ' Índice de decaimiento de la tasa de infiltración '.

$f_c$  : Capacidad de infiltración final

$f_o$  : Capacidad de infiltración inicial (Para  $t=0$ ).

$t$  : Tiempo transcurrido desde el inicio de la infiltración.

### ⇒ SCS número de curva (1956)

El Método del Número de Curva es un modelo empírico que fue desarrollado por el SCS como una metodología para determinar la escorrentía producida por un evento de precipitación, sin embargo, esto lo convierte indirectamente en un método de infiltración.

Este método constituye un procedimiento muy simple para calcular la infiltración, basado en consideraciones teóricas simples y datos de más de 1000 cuencas experimentales tomados en la década de los 50 en EEUU. El método fue adoptado inmediatamente por la comunidad internacional y se ha convertido en el estándar de cálculo porque utiliza sólo un parámetro que se puede obtener de mapas temáticos generalmente disponibles (Paz-Pellat, 2009).

Se basa en la suposición de que en un evento de lluvia, toda la precipitación ocurrida antes del inicio del escurrimiento representa la abstracción inicial,  $I_a$ . De esa manera, la precipitación total se distribuye entre las abstracciones iniciales,  $I_a$ , la escorrentía,  $Q$  y la infiltración,  $F$ .

Según Ogrosky y Mockus (1964) la base conceptual del método es (Rojas, 2012):

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P_{efec}}$$

donde  $F$  es la infiltración acumulada real (mm), excluyendo  $I_a$ ,  $S$  es la infiltración potencial (mm),  $Q$  es la escorrentía real y  $P_{efec}$  es la precipitación efectiva.

Considerando que  $F = P_{efec} - Q$ , la ecuación anterior puede ser transformada en:

$$Q = \frac{P_{efec}^2}{P_{efec} + S}$$

Los autores del método, basados en datos de pequeñas cuencas, encontraron que  $I_a = 0.2 S$  y en consecuencia:

$$P_e = P - I_a = P - 0.2 S$$

Donde  $P$  es la lluvia total del evento. Sustituyendo se obtiene:

$$Q = \frac{(P - 0,2 \cdot S)^2}{P + 0,8 \cdot S}$$

que es la ecuación principal del método. La infiltración potencial,  $S$ , en milímetros, se obtiene de:

$$S = \left( \frac{1000}{NC} - 10 \right) \cdot 25,4$$

donde  $NC$  es el Número de Curva, que se obtiene de tablas a partir del uso de la tierra, tratamiento o práctica y su condición hidrológica, que indica el grado de cobertura del terreno.

Para su aplicación práctica, se establecen cuatro tipos o grupos de suelo desde el punto de vista de su comportamiento hidrológico. La clasificación original de los suelos se debe a Musgrave (1955), y posteriormente se han ido modificando las definiciones y delimitaciones (entre otros: NRCS, 1985; SSDS, 1993; NRCS, 2002; NRCS, 2007).

Algunas de sus desventajas consisten en que no considera cambios de humedad del suelo, no simula infiltración instantánea ni considera la estratificación del suelo, y además agrupa los suelos en sólo cuatro clases. Sin embargo, es ampliamente utilizado gracias a su facilidad de uso, la poca información requerida y a que considera la influencia de la cobertura, prácticas y tratamientos conservacionistas y permite simular cambios de uso de la tierra (Rojas, 2012).

### ⇒ Philip (1957)

Philip (1957) demostró que una ecuación compleja de infiltración puede ser expresada por una más simple, rápidamente convirtiendo series de potencia en  $t^{1/2}$ .

Considerando los primeros dos términos de esta serie, la ecuación de infiltración puede escribirse de la siguiente forma:

$$i = S_0 t^{0.5} + At$$

Donde:

$i$  es la infiltración acumulada.

$t$  es el tiempo desde el inicio del encharcamiento en un suelo uniforme.

$S_0$  es la sortividad ( $LT^{-0.5}$ ).

$A$  es una constante reflejando una velocidad estable esencialmente para tiempos largos.

## I.2.2. Estudios previos de ajuste de modelos de infiltración

A lo largo de los años, son muchos los autores que han llevado a cabo ensayos de infiltración con el objetivo de calibrar y mejorar los modelos de infiltración descritos anteriormente. Se ha realizado, por ello, una breve revisión bibliográfica de los estudios más importantes que han desarrollado este punto y su relación con el presente estudio, donde destacan los siguientes:

⇒ Bamutaze *et al.* (2010) miden la infiltración en campo con un infiltrómetro de anillo doble de 20 y 30 cm de diámetro de anillo interior y exterior. Aunque en un principio este estudio podría no interesarnos al utilizar un infiltrómetro doble, sin embargo, su ajuste a los modelos de infiltración más conocidos y la discusión de los ajustes tiene un interés directo para nuestro estudio.

Bamutaze *et al.* (2010) consideran que se alcanza la medida de infiltración final cuando obtienen tres mediciones consecutivas iguales, lo que varió entre 45 minutos y 2 horas.

Las medidas de infiltración final varían entre métodos y sitios. Los suelos de estudio eran arenoso-arcillosos según la clasificación USDA, y están caracterizados como zonas de infiltración alta-muy alta en esa clasificación.

El coeficiente de variación entre mediciones fue del 81%, (varían de 1,2 cm/h a 363 cm/h) lo que pone de manifiesto la heterogeneidad y complejidad de los suelos de montaña. Remarcan además que la variabilidad intrasitio también es muy alta, observándose diferencias de la tasa de 300 cm/h entre sitios que distaban menos de 10 m. Estas diferencias se han atribuido a la posibilidad de que exista un flujo preferencial a través de los macroporos.

En cuanto al ajuste llevado a cabo para los modelos de Horton, Philip, Green-Ampt y Kostiaikov las tasas predichas obtenidas fueron de 115,1 cm/h; 123,1 cm/h; 135,5 cm/h y 117,1 cm/h, respectivamente.

De cara a evaluar la robustez de la aplicación de los modelos de infiltración y estimar las tasas para la zona de estudio, se aplicaron tres grandes criterios que conllevan una combinación de factores:

- Sesgo del modelo
- Ajuste del modelo
- Precisión del modelo

La precisión del modelo se evaluó con el coeficiente de determinación  $R^2$  de las tasas de infiltración predichas y observadas. Los resultados de los tres métodos de evaluación que fueron categorizados numéricamente con valores bajos significaban una mejor ejecución y estos rangos se sumaron después para ver qué modelo de infiltración se ajustaba mejor.

El rendimiento de los modelos para estimar la tasa de infiltración final osciló de bueno a muy bueno, pero varía significativamente entre modelos y condiciones de sitio.

Asumen que las diferencias se deben a las asunciones previas q deben hacerse en los modelos acerca de las condiciones que deben cumplirse en campo, especialmente al contenido en humedad inicial del suelo.

La predicción de la tasa de infiltración final varía también entre modelos. En la mayoría de sitios, sin embargo, los modelos sobrestiman la tasa de infiltración final. La sobrestimación de los modelos fue de un 61% para Philip, 89% para Green-Ampt, 69% para Horton y 61% para Kostiakov. Los modelos de Philip y Kostiakov tienen el mayor número de predicciones subestimadas (36%). Benham *et al.* (2000), en Bamutaze *et al.* (2010), también obtienen tasas de infiltración subestimadas con el modelo de Kostiakov.

Es interesante que el modelo de Horton no subestime ninguna observación, y tiene el mayor número de estimaciones pareadas con la tasa observada, lo cual es lógico puesto que la ecuación de Horton utiliza los valores observados de la tasa de infiltración final para su predicción.

Kostiakov y Horton cumplieron sus restricciones de signos, pero no así Philip y Green-Ampt, que proporcionaron valores negativos en algunos test. Estos valores negativos implican un fallo físico y crean dudas acerca de la capacidad de estos modelos para predecir la infiltración en ciertas localizaciones. Tanto el modelo de Horton como el de Green-Ampt tienen pequeños coeficientes de determinación para algunos test.

En general, concluyen que los modelos de mejor ajuste fueron Philip y Kostiakov.

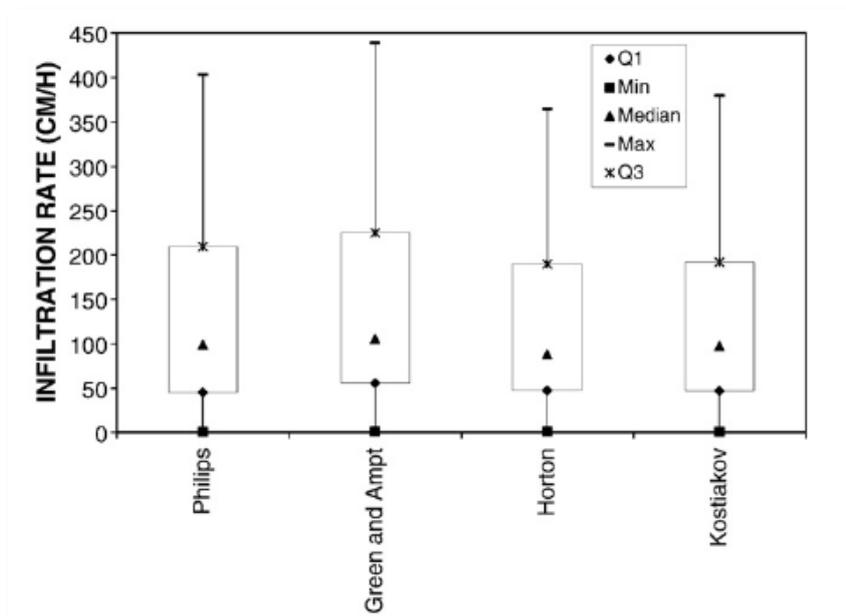


Figura 1.5. Diagrama de caja y bigotes para la infiltración predicha por los modelos. Bamutaze *et al.*, 2010.

⇒ Chahinian *et al.* (2005) llevan a cabo un estudio de infiltración en el que ajustan 14 ensayos de infiltración a diferentes modelos de infiltración y de escorrentía. Mide los resultados en una parcela de 1200 m<sup>2</sup>, con una pendiente de entre el 7 y el 15%, bajo cultivos de vid sin vegetación herbácea. La textura del suelo era limoso-arenosa, con un contenido del 2% en materia orgánica. Las medidas de infiltración se llevaron a cabo con un simulador de lluvia.

Ajusta las medidas a los modelos de Morel-Seytoux (1974), Philip (1978), Horton (1975) y SCS (1956), obteniendo los siguientes rangos de los parámetros característicos de cada modelo.

Tabla I.2. Parámetros para los 4 modelos evaluados. Modificado de Chahinian *et al.* (2005).

Parameter and variables	Model				
	Morel-Seytoux	Philip	Horton	SCS	
$\beta$	1,3	-	-	-	
$\theta_s$ (mm <sup>3</sup> mmK <sub>3</sub> )	0,35	0,35	0,35	-	
$\theta_r$ (mm <sup>3</sup> mmK <sub>3</sub> )	0,03	0,03	0,03	-	
Valores de los modelos fijados a priori	c	-	5	-	
	d	-	0	-	
	$\lambda$	-	0,4	-	
	$\alpha$	-	-	-	0,2
	Ks (mm hK <sub>1</sub> )	[0,5,50]	[0,5,50]	-	-
Hc (mm)	[25,900]	-	-	-	
Jb (mm)	-	[K900,K25]	-	-	
Intervalo de variación admitido para el calibrado de los modelos	fc (mm hK <sub>1</sub> )	-	-	[0,5,20]	-
	fr (mm hK <sub>1</sub> )	-	-	[15,90]	-
	k	-	-	[0,2,10]	-
	Sr (mm)	-	-	-	[1,800]
	Ss (mm)	-	-	-	[1,800]

Para comprobar la calidad del ajuste de cada modelo utilizaron el modelo del SCS (1956) como referencia, sin calibrar. Se observó, sin embargo, que el modelo de referencia no produjo buenas simulaciones, al igual que observaría Zarriello en 1998. Por ello, decidieron calibrar este modelo también. Tras calibrar los modelos pasan a una fase de validación de los mismos.

Concluyen que los valores de los parámetros ajustados de un modelo dado pueden variar ligeramente según el criterio objetivo utilizado pero se encuentran dentro de unos límites aceptables. Cuando se compara el rendimiento global de los cuatro modelos probados, la formulación de Morel-Seytoux obtiene el mejor en promedio, en términos de precisión. Comparativamente, el modelo SCS es el menos adecuado. Por su parte, el modelo de Horton (1975) mostró ser más consistente en el rendimiento general que el de Philip.

⇒ Aoda *et al.* (1998) ajustan distintas medidas de infiltración a varios modelos. Las medidas experimentales de la infiltración acumulada con el tiempo se obtuvieron utilizando columnas empaquetadas uniformemente de materiales porosos de diferentes rangos de tamaño de partícula y distribución.

La densidad de las muestras osciló entre 1,19 y 1,59 g/cm<sup>3</sup> y la textura era arenosa-arcillosa-franca.

La relación entre el agua infiltrada acumulada y el tiempo se ajustó por una regresión no-lineal a tres ecuaciones de infiltración: el de Green y Ampt, la ecuación de Philip y el de Knight. El ajuste fue generalmente bueno para todas las ecuaciones. El que mejor ajuste obtuvo fue el de Philip, puesto que produjo en todos los casos la menor media del cuadrado de los residuos, seguido de Green- Ampt y Knight. La presión de succión del frente húmedo se evaluó a partir de la ecuación de Green-Ampt y parece estar relacionada con el tamaño y distribución de las partículas del medio poroso. Cabe destacar que Green-Ampt sobreestimaba la conductividad hidráulica saturada.

⇒ Machiwal *et al.* (2006), llevan a cabo un estudio con un total de 24 ensayos de infiltración en un patrón de rejilla cuadrada sistemática a lo largo del área de estudio utilizando un infiltrómetro de doble anillo. Los datos de infiltración observados en todos los sitios de ensayo se ajustaron a cuatro modelos de infiltración, e identificando el modelo de mejor ajuste para cada sitio.

Las características generales de la zona mostraron tasas de infiltración bajas (0,1-1,1 cm/h) para la mayoría de los sitios. Los valores de los parámetros de los distintos modelos oscilaron entre los valores que se muestran en la Tabla I.3.:

Tabla I.3. Rango de los parámetros de 4 modelos de infiltración ajustados. Machiwal *et al.* (2006).

<i>Infiltration model</i>	<i>Data used</i>	<i>Model parameter</i>	<i>Range</i>	<i>Mean</i>
Kostiakov	Infiltration rate	<i>a</i>	0.60–9.91	4.38 ± 2.64
		<i>b</i>	0.22–0.76	0.45 ± 0.17
	Cumulative infiltration	<i>a</i>	0.30–10.43	4.02 ± 3.00
		<i>b</i>	0.09–0.74	0.42 ± 0.17
Lewis–Kostiakov	Infiltration rate	<i>a</i>	0.55–12.88	4.83 ± 3.12
		<i>b</i>	0.41–1.04	0.69 ± 0.16
	Cumulative infiltration	<i>a</i>	0.28–8.37	3.22 ± 2.09
		<i>b</i>	0.14–1.12	0.53 ± 0.16
Green–Ampt	Infiltration rate	$K_{fs}$ , mm min <sup>-1</sup>	0.07–2.36	0.89 ± 0.69
		<i>S</i> , mm min <sup>-0.5</sup>	1.03–22.37	9.64 ± 6.75
Philip two-term	Infiltration rate	<i>S</i> , mm min <sup>-0.5</sup>	1.50–27.21	12.89 ± 7.90
		<i>A</i> , mm min <sup>-1</sup>	0.01–1.73	0.58 ± 0.47
	Cumulative infiltration	<i>S</i> , mm min <sup>-0.5</sup>	0.46–20.43	9.20 ± 5.57
		<i>A</i> , mm min <sup>-1</sup>	0–1.62	0.63 ± 0.53

y la precisión para cada ajuste para cada ensayo pueden verse en la Tabla I.4:

Tabla I.4. Coeficientes de determinación de los ajustes. Machiwal et al. (2006).

Test site	Residual moisture content, %	Coefficient of determination						
		Kostiakov		Kostiakov-Lewis		Green-Ampt	Philip two-term	
		Infiltration rate	Cumulative infiltration	Infiltration rate	Cumulative infiltration	Infiltration rate	Infiltration rate	Cumulative infiltration
S <sub>11</sub>	4.5	0.849	0.993	0.816	0.972	0.843	0.918	<b>0.999</b>
S <sub>12</sub>	8.0	0.884	0.990	0.878	0.967	0.532	0.688	<b>0.992</b>
S <sub>13</sub>	20.2	0.890	0.995	0.865	0.991	0.867	0.887	<b>0.997</b>
S <sub>21</sub>	2.8	0.732	0.986	0.721	0.924	0.773	0.826	<b>0.999</b>
S <sub>22</sub>	13.6	0.796	0.997	0.721	0.983	0.848	0.842	<b>0.999</b>
S <sub>23</sub>	13.5	0.660	0.959	0.621	0.898	0.715	0.892	<b>0.994</b>
S <sub>24</sub>	5.5	0.720	0.969	0.768	0.901	0.643	0.309	<b>0.998</b>
S <sub>31</sub>	6.6	0.611	0.998	0.565	0.994	0.747	0.762	<b>0.999</b>
S <sub>32</sub>	9.3	0.976	0.996	0.988	0.972	0.954	0.947	<b>0.997</b>
S <sub>33</sub>	9.8	0.905	0.997	0.902	0.964	0.855	0.878	<b>0.998</b>
S <sub>34</sub>	12.0	0.775	0.975	0.845	0.921	0.894	0.906	<b>0.988</b>
S <sub>41</sub>	5.0	0.684	<b>0.998</b>	0.488	0.994	0.604	0.717	0.990
S <sub>42</sub>	8.4	0.908	0.997	0.907	0.948	0.905	0.905	<b>0.998</b>
S <sub>43</sub>	15.1	0.772	0.870	0.658	0.773	0.712	<b>0.917</b>	0.886
S <sub>44</sub>	7.0	0.716	0.998	0.860	0.974	0.921	0.787	<b>0.999</b>
S <sub>51</sub>	6.1	0.501	0.986	0.393	0.952	0.628	0.724	<b>0.999</b>
S <sub>52</sub>	7.3	0.877	0.939	0.847	0.866	0.299	0.626	<b>0.987</b>
S <sub>53</sub>	13.2	0.794	<b>0.982</b>	0.728	0.980	0.930	0.966	0.976
S <sub>54</sub>	8.2	0.863	<b>0.998</b>	0.791	0.988	0.890	0.892	<b>0.998</b>
S <sub>61</sub>	11.5	0.843	0.998	0.790	0.987	0.854	0.874	<b>0.999</b>
S <sub>62</sub>	9.7	0.959	0.965	0.933	0.937	0.973	0.957	<b>0.979</b>
S <sub>63</sub>	12.1	0.871	0.838	0.866	0.002	<b>0.987</b>	0.536	0.919
S <sub>64</sub>	15.2	0.991	0.966	*	*	0.908	0.989	0.885

Como puede verse en la Tabla, se observó que el modelo de Philip era el mejor modelo para describir el proceso de infiltración en la mayoría de los sitios de prueba. Los parámetros de este modelo (es decir, capacidad de absorción S y factor de transmisividad A) mostraron una amplia variación entre los sitios de prueba.

⇒ Silva (2007) utiliza un infiltrómetro de anillo doble y un permeámetro de disco para calcular la infiltración en zonas de cultivos. Las características de los suelos se muestran en la tabla I.5:

Tabla I.5. Propiedades de los suelos de estudio. Silva (2007).

Longitud de la capa (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Clase de textura	Densidad aparente (g/cm <sup>3</sup> )	Capacidad de campo (%)	Punto de marchitez permanente (%)	Materia orgánica (%)
0-40	54,1	13,4	32,5	Sandy clay loam	1,42	23,6	13,7	1,33
40-67	43,3	15,2	41,5	Sandy clay to clay	1,49	24,9	19,7	0,48
>67	66,1	9,6	24,3	Sandy clay loam	1,62	19,4	11,9	0,25

Ajusta las medidas de infiltración a diferentes modelos, cuyos resultados podemos ver en la Tabla I.6.:

Tabla I.6. Calidad del ajuste de los test de infiltración a cada tipo de ecuación de infiltración. Silva (2007).

Tipo de ecuación de infiltración	Número de test	Ecuaciones ajustadas	Media	Error estándar de la media	Significancia	
					Ecuaciones p < 0.05	Ecuaciones p < 0.01
Kostiakov	39	39	0,78	8,548	34	25
Kostiakov-Lewis	39	32	0,74	9,209	23	12
Philip	39	39	0,78	8,573	34	26
Green-Ampt	39	39	0,82	8,433	36	31
Horton	39	38	0,80	8,474	26	21

Afirma que sólo para 3 de los 5 modelos estudiados fue posible ajustar los parámetros para todos los ensayos de infiltración: Kostiakov (1932), Philip (1957) y Green-Ampt (1911). Para el modelo de Kostiakov-Lewis (1932) y la ecuación de Horton (1940), a veces fue imposible encontrar los coeficientes de regresión ajustados a un conjunto de datos particulares. El proceso de ajuste de curvas para estas ecuaciones determina, en ocasiones un valor negativo para el parámetro de la ecuación que representa la velocidad de infiltración, lo que es físicamente imposible.

La determinación de estos valores, sin significado físico, se debe a la dificultad o incluso la imposibilidad de determinar un valor preciso de la tasa de infiltración constante o final del suelo. Esta situación, que es frecuente en los suelos mediterráneos (Serralheiro, 1995, en Silva, 2007), ocurre con mayor facilidad en este estudio porque los ensayos de infiltración que se llevaron a cabo terminan al inicio de la saturación del suelo.

La ecuación de Green-Ampt fue el que presentó los mejores resultados en el proceso de ajuste de curva. Sin embargo, en ocasiones se observaron valores muy pequeños para la segunda constante de la ecuación, lo que representa casi un tasa de infiltración constante en el tiempo. Tanto en el modelo de Kostiakov-Lewis como en la ecuación de Horton, los parámetros determinados a veces no tienen consistencia física. La corta duración de los ensayos de infiltración hace que sea imposible alcanzar las condiciones necesarias para la determinación precisa de la conductividad hidráulica del suelo saturado.

De las otras dos ecuaciones restantes, el modelo de Kostiakov presenta mejores resultados de ajuste, muy cerca de los resultados de Green-Ampt.

⇒ En el estudio anterior realizado por Campano-Fernández (2012) bajo la dirección del mismo tutor, se obtuvieron las ecuaciones de los modelos de infiltración más utilizados en la bibliografía (Fernández *et al.* 1971; Muñoz *et al.*, 2005; Bamutaze *et al.* 2010), con sus correspondientes parámetros en función de la zona de estudio y el método utilizado, hallados mediante la aplicación para SAS MODÍN (Pando y Martínez de Azagra, 2006), para las zonas del estudio anterior.

Para todas las zonas y con independencia del método utilizado, los dos modelos que proporcionaron un mejor ajuste fueron Green-Ampt y Vivar *et al.* Por el contrario, los modelos que proporcionaron un peor ajuste de los datos de infiltración fueron Holtan en sus dos versiones y SCS II ( $c=7$ ).

Es lógico que si uno de los modelos de mejor ajuste es Green-Ampt, Vivar *et al.* sea otro de los que mejor se adapta a los datos, puesto que el segundo constituye una modificación del primero. Además, este segundo modelo, ha sido desarrollado a través de la realización de ensayos de infiltración con un infiltrómetro de doble anillo con carga variable, es decir, con características muy parecidas a las de los ensayos del estudio llevado a cabo por Campano-Fernández (2012).

Centrándonos en los modelos más utilizados a lo largo de la historia tenemos que en el bosque de pinos el de mejor ajuste es Green-Ampt, seguido de Horton, Philip y Kostiakov. Lo mismo ocurre para la zona degradada de la cárcava restaurada con el infiltrómetro de 30 cm. Sin embargo, para el infiltrómetro de 8 cm en esta zona Horton proporciona mejor ajuste que Green-Ampt, seguido de Philip y Kostiakov.

Si comparamos estos datos con la bibliografía, vemos que, por ejemplo, Silva (2007) ajusta sus datos de infiltración a los modelos de Kostiakov, Philip y Green-Ampt, así como a la ecuación de Horton, aunque en ocasiones le fue imposible encontrar los coeficientes de regresión ajustados a un conjunto de datos particulares. Al igual que en nuestro caso, el mejor ajuste que observó fue el de Green-Ampt con un  $R^2$  del 0,82. Sin embargo, en ocasiones observó valores muy pequeños para la segunda constante de la ecuación, lo que representa casi una tasa de infiltración constante en el tiempo.

Tanto en el modelo de Kostiakov como en la ecuación de Horton, los parámetros determinados a veces no tuvieron consistencia física. La corta duración de los ensayos de infiltración puede hacer que sea imposible alcanzar las condiciones necesarias para la determinación precisa de la conductividad hidráulica del suelo saturado (Silva, 2007).

De las otras dos ecuaciones restantes, el modelo de Kostiakov presentó mejores resultados de ajuste, muy cerca de los resultados de Green-Ampt. Es de destacar que en nuestro caso, el modelo de Kostiakov también presentó un ajuste muy bueno, con valores de  $R^2$  superiores al 95% en todos los casos.

Machiwal *et al.*, 2006, observó que, para zonas con tasas de infiltración bajas (1-11 cm/h), el modelo de Philip era el mejor modelo para describir el proceso de infiltración en la mayoría de los sitios de prueba. Sin embargo, en nuestro caso, en las zonas con velocidades de infiltración menores el modelo de Philip ha sido menos exacto.

Por su parte, en el estudio de Chahinian *et al.*, 2005, el modelo de Horton mostró ser más consistente en el rendimiento general que el de Philip. En nuestro caso, aunque en la zona de bosque apenas hay diferencias entre ellos, con un  $R^2$  superior al 99% en todos los casos, en la zona de la cuña de sedimentación y en la degradada el modelo de Horton sí que ha mostrado un mejor ajuste que el de Philip.

Al contrario que en nuestro caso, Aoda *et al.*, 1998 encontró que el modelo que mejor ajuste obtuvo en su estudio fue el de Philip, por encima Green- Ampt.

Destacan que es interesante que el modelo de Horton no subestime ninguna observación, y tiene el mayor número de estimaciones pareadas con la tasa observada, lo cual es lógico puesto que la ecuación de Horton utiliza los valores observados de la tasa de infiltración final para su predicción. En nuestro caso Horton es uno de los dos modelos con mejor ajuste en 4 ocasiones, aunque no es tan consistente como Green-Ampt y Vivar *et al.*

Bamutaze *et al.* (2010) miden la infiltración en campo con un infiltrómetro de anillo doble de 20 y 30 cm de diámetro de anillo interior y exterior. Aunque en un principio este estudio podría no interesarnos al utilizar un infiltrómetro doble, sin embargo, su ajuste a los modelos de infiltración más conocidos y la discusión de los ajustes tiene un interés directo para nuestro estudio. Kostiaikov y Horton cumplieron sus restricciones de signos, pero no así Philip y Green-Ampt, que proporcionaron valores negativos en algunos test. Estos valores negativos implican un fallo físico y crean dudas acerca de la capacidad de estos modelos para predecir la infiltración en ciertas localizaciones. Tanto el modelo de Horton como el de Green-Ampt tienen pequeños coeficientes de determinación para algunos test. En general, concluyen que los modelos de mejor ajuste fueron Philip y Kostiaikov.

# ANEJO II: Técnicas existentes de medición de la infiltración

## ANEJO II. Técnicas existentes de medición de la infiltración

### II.1. Medidas de laboratorio

#### II.1.1. Permeámetros

Estos instrumentos se usan habitualmente para la medición de la conductividad hidráulica en laboratorio, basándose en la toma de muestras en campo, generalmente de forma que conserven su estructura originaria. Para ello, se monta una columna, de forma que las paredes laterales sean impermeables y se pueda hacer circular agua en sentido vertical y se mide el volumen percolado al cabo de cierto tiempo (Porta *et al.*, 2003).

##### a) Permeámetro de carga constante

La muestra de suelo, inalterada o tamizada a 2 mm, se coloca sobre una base permeable, se satura y se hace percolar agua manteniendo el nivel constante durante el ensayo.

La columna de tierra tiene una altura  $t$ , excluida la capa de gravilla (diámetro mayor de 3 mm) que se suele colocar sobre la base permeable.

Tomando como referencia la base de la columna del suelo, el potencial hidráulico en la base y en la parte superior de la columna será:

$$\psi_H(M) = \psi_p(M) + \psi_z(M) = a + L = H$$

Siendo  $H$  la altura de columna de agua, desde la base permeable (límite inferior) hasta la superficie libre del agua.

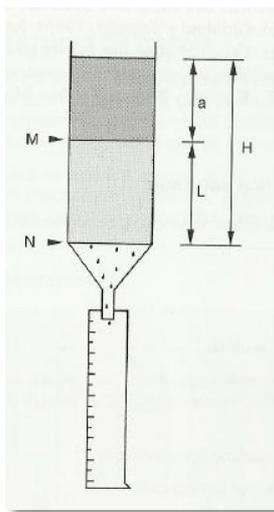


Figura II.1. Permeámetro de carga constante. (Porta *et al.*, 2003).

### b) Permeámetro de carga variable

En muestras de suelo con una baja conductividad hidráulica, se añade agua a la superficie de la muestra una sola vez y se van midiendo los cambios en el nivel de agua a lo largo del tiempo. Un tubo de menor sección facilita la lectura de nivel. (Porta *et al.*, 2003).

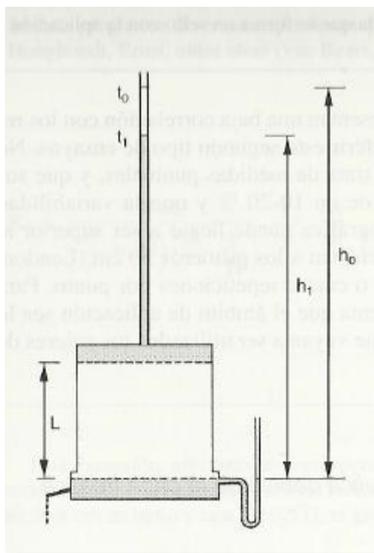


Figura II.2. Permeámetro de carga variable. (Porta *et al.*, 2003).

$$-A'dh = A K_s \frac{h}{L} dt$$

$A'$  = sección del tubo de lectura  $A$

$A$  = sección del permeámetro

$h_0, t_0$  = condiciones iniciales

$h_i, t_i$  = condiciones en el instante  $i$

$-dh$  = caída del nivel de agua en el tubo de lectura con sección  $A'$

$K_s \frac{h}{L} dt$  = flujo de agua a través del suelo con sección  $A$  en el intervalo de tiempo  $dt$

### c) Permeámetro de momento variable

En este método el agua se infiltra horizontalmente al aplicar un potencial de presión positivo a la columna. (Youngs, 1991, en Porta *et al.*, 2003).

#### II.1.2. Conductividad hidráulica del sello superficial

En este método se determinan los cambios en la conductividad hidráulica saturada de una muestra disgregada de suelo a medida que se forma un sello con la aplicación controlada de lluvia simulada. (Pla, 1995, en Porta *et al.*, 2003).

## II.2. Medidas de campo

### II.2.1. Medida de la conductividad hidráulica debajo de la capa freática

#### a) Método de Auger-Hole

Las medidas de la conductividad hidráulica en campo, por debajo de la capa freática, corresponden mayormente al flujo de agua en sentido horizontal, perpendicular a las paredes del sondeo. El método se basa en la relación establecida entre la curva de ascenso de agua en un sondeo y la conductividad hidráulica (Diserens, 1934; Hooghout, 1936; en Beers, 1970).

#### b) Método del piezómetro

Este método determina la conductividad hidráulica en suelos saturados mediante la entrada limitada de agua. La superficie de entrada suele ser una cavidad en la base del tubo piezométrico, quedando revestido de forma impermeable el resto del agujero.

Para ello, se instala en primer lugar el tubo piezométrico de forma que deje una cavidad en la base sin tubo. Se espera para que se establezca el nivel de la capa freática en el tubo y se pueda empezar a realizar las lecturas, se bombea un caudal  $Q$  que se regula hasta conseguir que el desnivel  $H$  permanezca constante en el tiempo y se determina la conductividad hidráulica como:

$$K = m \frac{Q}{H}$$

Siendo  $m$  un coeficiente medido en  $L^{-1}$  y determinado mediante varias fórmulas.

Cabe destacar que este método permite medir la conductividad hidráulica en suelos con capas, al poder localizar la zona de entrada de agua (Porta *et al.*, 2003).

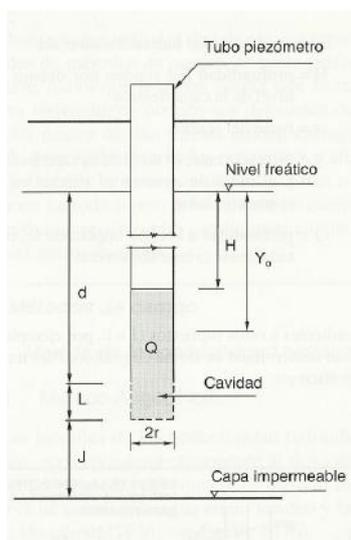


Figura II.3. Esquema del método del piezómetro. (Porta *et al.*, 2003).

**c) Método de los dos pozos**

En este método se practican dos sondeos de igual profundidad por debajo de la capa freática. Se bombea agua de uno de ellos hacia el otro a caudal constante, de forma que en el primero bajará el nivel y en el segundo aumentará. En suelos uniformes la depresión en uno de los pozos será igual a la elevación del otro. (Porta *et al.*, 2003).

**d) Ensayos por bombeo en pozos de grandes dimensiones**

Este tipo de ensayos permite realizar medidas en zonas extensas (Kruseman & Ridder, 1986, en Porta *et al.*, 2003).

**II.2.2. Medida de la conductividad hidráulica encima de la capa freática (zona no saturada)****a) Método Auger-Hole invertido**

En este método, en lugar de bombear el agua del sondeo (Método Auger-Hole), se vierte agua en él de manera que se mantenga un nivel constante (frasco de Mariotte) hasta alcanzar un flujo casi estacionario, lo que generalmente sucede a los 15-30 minutos. El caudal de flujo estacionario junto con la altura del agua sobre el fondo del sondeo y el radio de éste se utilizan para calcular  $K_s$  (Porta *et al.*, 2003).

**b) Método de infiltración**

Se puede utilizar para medir  $K_s$  del suelo en su conjunto, o preferiblemente en cada uno de sus horizontes abiertos de forma escalonada (Porta *et al.*, 2003). Se basan en que:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i(t) \approx K_s$$

**c) Permeámetro de Guelph**

Mide la conductividad hidráulica "in situ", la conductividad hidráulica y el potencial de agua del suelo. Es un permeámetro de carga constante, mantenida por medio de un frasco de Mariotte, que permite medir la velocidad del flujo de agua en un sondeo y en el suelo no saturado circundante. La descripción y método de cálculo se describen en Elrick y Reynolds (1992) (Porta *et al.*, 2003).

Se aplica en suelos sin capa freática y el volumen de suelo afectado por la medida es muy pequeño. El intervalo de trabajo con los equipos disponibles en el mercado va de  $10^{-4}$  a  $10^{-8}$  m/s.

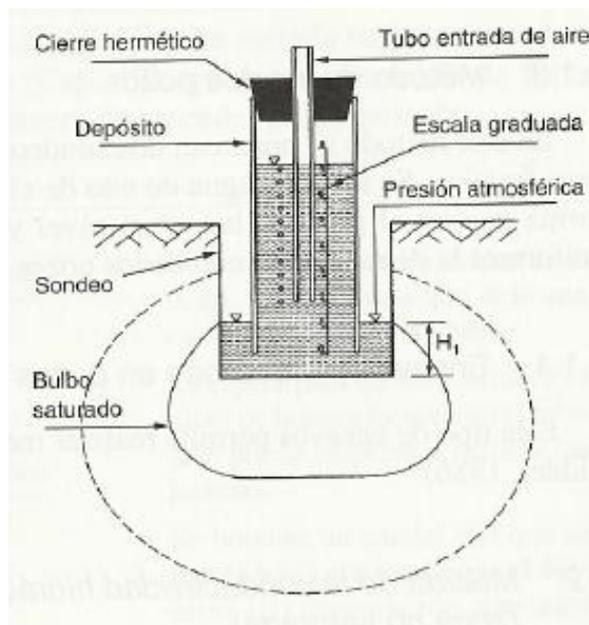


Figura II.4. Esquema del permeámetro de Guelph. (Porta *et al.*, 2003).

#### d) Permeámetro de disco o infiltrómetro de tensión

Este equipo se conoce también como infiltrómetro multidisco (Mathieu y Pielain, 1998); infiltrómetro de tensión (Wang *et al.*, 1998). Mide la conductividad hidráulica saturada y cerca de saturación, incluyendo o no los macroporos.

Permite hacer interpretaciones y aproximaciones de parámetros tales como la sortividad,  $s$ ; la difusividad,  $D(\theta)$ ; la longitud de la capilaridad macroscópica,  $\lambda_m$ ; y la contribución de las vías de flujo preferencial en la infiltración (White *et al.*, 1992, en Porta *et al.*, 2003).

Resulta adecuado para estudios de variabilidad espacial del suelo. Se basa en la ecuación de Wooding (1968). El flujo estabilizado,  $q$ , viene dado por la siguiente expresión:

$$q = K(h_0) + \frac{4\psi_p^m}{2\pi r}$$

Siendo:

$K(h_0)$  = conductividad hidráulica saturada o cerca de saturación a carga constante negativa,  $h_0$ .

$\psi_p^m$  = potencial matricial.

$2\pi r$  = radio del disco empleado.

Realizando dos ensayos sucesivos en un mismo suelo con discos de distinto diámetro se pueden corregir los efectos del flujo lateral para calcular  $K(h_0)$  en sentido vertical y  $\psi_p^m$ . Requiere una preparación cuidadosa de la superficie del suelo en contacto con el disco.

Es un método reciente que parece llamado a un uso generalizado, ya que consume poca agua y es cómodo de instalar. Wang *et al.* (1998), han estudiado la influencia del diámetro de los discos sobre la estimación de los parámetros, indicando que la variabilidad espacial del suelo y de los macroporos pueden tener mayor efecto que el derivado del tamaño del disco. Esto hace que se requieran muchas repeticiones al realizar las medidas.

El ámbito de aplicación de este método es similar al de doble anillo, pero perturba menos el suelo. El intervalo de utilización se extiende de  $10^{-4}$  a  $10^{-7}$  m/s (Porta *et al.*, 2003).

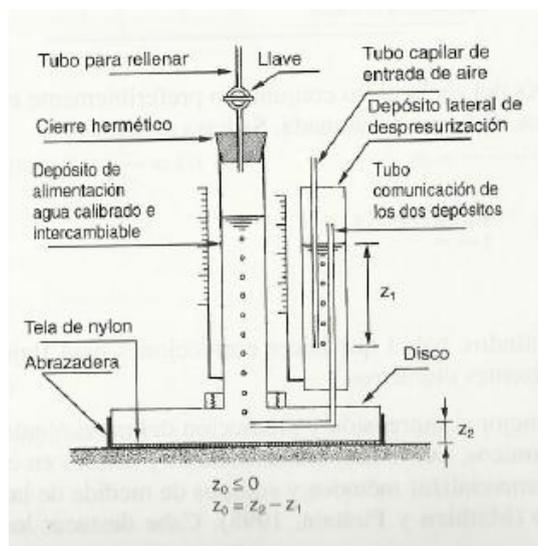


Figura II.5. Esquema del permeámetro de disco. (Porta *et al.*, 2003).

### e) Infiltrómetro de aspersión

A través de aspersores de gran precisión se aplican láminas de agua ( $L^3L^{-2}$ ) por unidad de tiempo inferiores a la  $K_s$  del suelo, a diferentes niveles crecientes. Para cada nivel se deberá esperar hasta alcanzar la condición de flujo estacionario ( $dh/dt=0$ ), lo que se comprueba con tensiómetros para  $h$  o con sensores de humedad, tales como el TDR, para  $\theta$ , colocados a varias profundidades en el perfil. Durante la determinación, que generalmente requiere de mucho tiempo (10 a 30 días) habrá que proteger la superficie del suelo del efecto de sellado por impacto de gotas y de las pérdidas por evaporación (Dirksen y Matula, 1994, en Porta *et al.*, 2003).

### f) Método del perfil instantáneo

Después de haber inundado una parcela inicialmente seca, la infiltración del agua y su redistribución se realizan medidas simultáneas y frecuentes de  $h$  y  $\theta$ , con tensiómetros y sensores de humedad, tales como el TDR, a diferentes profundidades, ya sea a intervalos constantes o bien coincidiendo con los distintos horizontes del suelo. La frecuencia de lecturas, inicialmente cada 5 a 10 minutos se prolonga posteriormente a un día o más. Para evitar pérdidas por evaporación se cubre la parcela con un material plástico.

### II.2.3. Métodos de medición de la velocidad de infiltración

#### a) Infiltrómetros inundadores: Infiltrómetro de doble anillo e infiltrómetro de anillo simple

Se trata de uno de los métodos de medición de la infiltración más comúnmente utilizados, debido a su sencillez de uso y su coste asequible.

El principio de funcionamiento de los infiltrómetros de anillo es común para ambos tipos, simple y doble, cada uno con sus ventajas y desventajas. Consisten en un cilindro abierto que se introduce suavemente en el suelo, actuando a la vez como límite del test y como depósito. Se vierte agua dentro de él, sobre el suelo, y se mide el volumen que es drenado por unidad de tiempo, es decir la capacidad de infiltración (Hills, 1979, en Martínez, 1992). Para conocer este volumen, se utiliza un flotador asociado a un pequeño limnómetro que actúa como una sonda, descendiendo al disminuir el volumen de agua contenido en el cilindro y cambiando así el valor marcado en el limnómetro a lo largo del tiempo.

Para los infiltrómetros de anillo se han sugerido numerosos materiales de fabricación, además de muy diversas dimensiones (Blanco, 1999). En el apartado 2.2.4. *Estudios previos de medición de la infiltración mediante el uso de infiltrómetros de cilindro simple*, se hace referencia al tamaño mínimo necesario de anillo para conseguir medidas fiables sin necesitar grandes cantidades de agua.

La diferencia entre ambos métodos radica en que en el anillo simple se coloca otro anillo exterior, de modo que se crea una zona entre ambos anillos que se rellena de agua antes de la medición, con el objetivo de reducir el flujo lateral de agua, ya que éste sobredimensiona las medidas de infiltración. Sin embargo, y aunque a priori pudiera suponer una ventaja, este método hace que se utilice un anillo interior de menor diámetro que cuando se trabaja con un cilindro simple, incrementando el error en la medición.

Además de ser un método de fácil uso en campo, otra de sus ventajas es que utiliza modelos matemáticos sencillos, aunque, por otro lado, no es posible su utilización en terrenos con pendiente y es difícil conocer la infiltración real debido a la imposibilidad de controlar el flujo lateral.

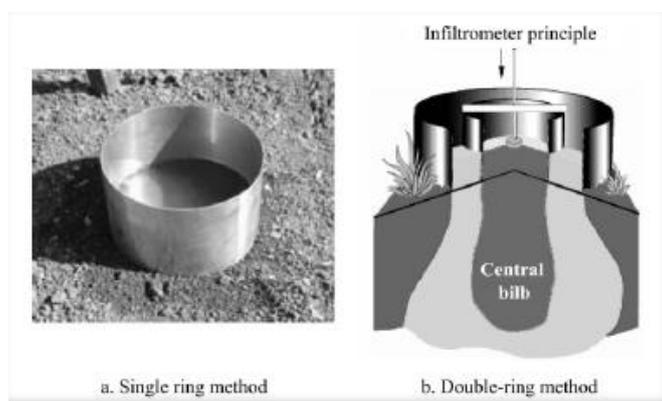


Figura II.6. Infiltrómetro de anillo simple y doble anillo (Mao et al.,2008).

### b) Método de Porchet

Se trata de excavar en el suelo un hoyo cilíndrico de radio R y llenarlo con agua hasta una altura h. la superficie a través de la cual se infiltra el agua es:

$$S = 2\pi R h + \pi R^2$$

Y la intensidad de infiltración en mm/s (f) :

$$f = \frac{R}{2(t_1 - t_2)} \cdot \ln \frac{2h_1 + R}{2h_2 + R}$$

Por lo que midiendo la altura de la lámina de agua ( $h_1$ ,  $h_2$ ) en dos tiempos consecutivos ( $t_1$ ,  $t_2$ ) e introduciendo dichos valores en la fórmula podemos hallar el valor de la intensidad de infiltración "f" en ese tiempo (Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

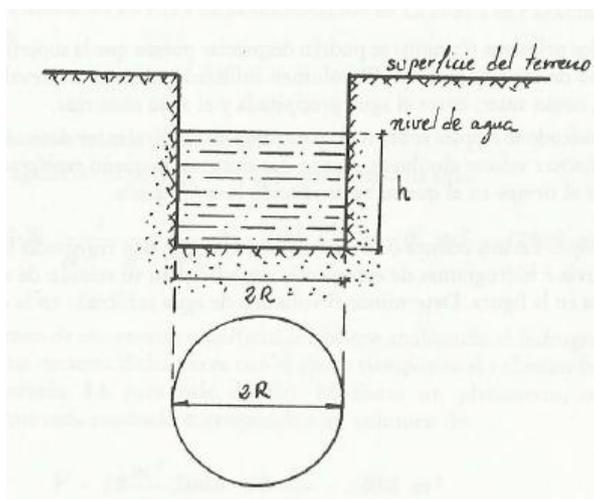


Figura II.7. Método de Porchet ( Martínez de Azagra y Navarro, 1996).

### c) Infiltrómetro simulador de lluvia

Un dispositivo produce gotas de lluvia simulada, que caen dentro de una miniparcela de superficie delimitada de 0,1 a 1 m<sup>2</sup>. La medida incluye el posible efecto del sellado, derivado del impacto de las gotas. Permite estudiar la infiltración y la escorrentía superficial en condiciones muy próximas a las naturales (Porta *et al.*, 2003).

Existen dos tipos de simuladores de lluvia con ventajas e inconvenientes:

- Simulador de gotero: con gotas de igual diámetro y velocidad inicial cero. Su ámbito de aplicación son estudios de infiltración de agua de lluvia en agricultura de secano, estudios de erosión o para riego por aspersión, pivots u otros en los que interese tener en cuenta los cambios en  $i(t)$  derivados del estado de la superficie del suelo, en especial sellado, inducidos por el impacto (energía cinética) de las gotas de agua de lluvia o riego.
- Simulador de aspersión: con gotas de diferentes diámetros y velocidad inicial apreciable.

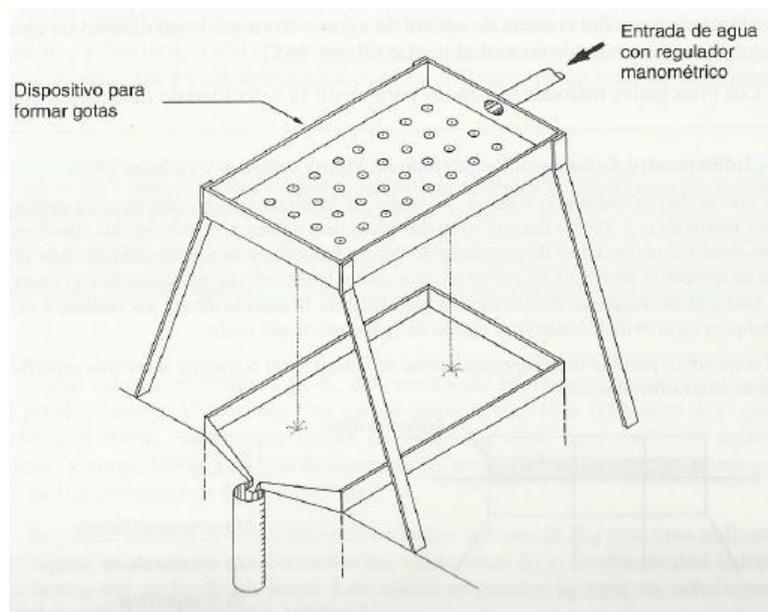


Figura II.8. Esquema de un simulador de lluvia. (Porta *et al.*, 2003).

#### d) Infiltración en surco

Se debe abrir un surco de sección regular conocida, al igual que su longitud. Se riega el surco y se calculan los flujos que se infiltran a lo largo del tiempo o bien los que deben aportarse para mantener el nivel constante. Este método tiene interés en proyectos de transformación en regadío en que vaya a utilizarse el riego por surcos (Porta *et al.*, 2003).

#### e) Infiltrómetro o permeámetro de disco

Este instrumento, descrito anteriormente, también permite conocer la velocidad de infiltración (Porta *et al.*, 2003).

# **ANEJO III: Protocolo de medición de la infiltración del Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila**

## ANEJO III. Protocolo de medida de infiltración del Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila

A continuación se muestra el protocolo de infiltración propuesto por el Grupo de Hidrología y Conservación de la Universidad Católica de Ávila, en el que se ha basado el utilizado en el presente estudio, adaptándolo a las condiciones particulares del estudio.

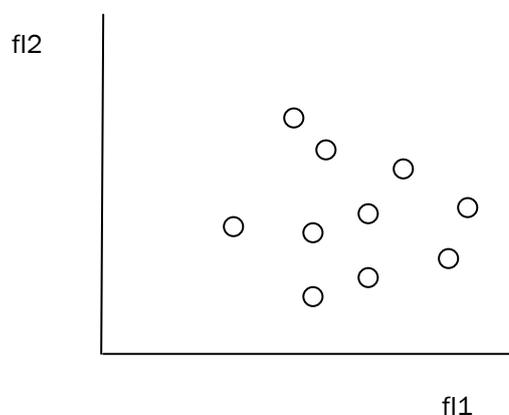


### PROTOCOLO DE ENSAYOS DE INFILTRACIÓN

0) Previamente hacemos una correlación con el infiltrómetro de acero de 30 cm y el infiltrómetro de metacrilato de 8 cm de diámetro y 22 cm de altura. Tres ensayos con cada uno, en el mismo sitio. Establecemos ecuación de correlación:

tiempo	fI1	fI2
00:00	-	-
00:02		
00:04		
00:06		
00:08		
00:10		
00:15		
00:20		
00:30		
00:40		
00:50		
01:00		
01:30		
02:00		
02:30		
03:00		
03:30		
04:00		

f1: altura infiltrada con el infiltrómetro de doble anillo, f2: altura infiltrada con el infiltrómetro de metacrilato.



- 1) Trabajamos con el infiltrómetro de metacrilato de 8 cm.
- 2) Se hacen como mínimo 3 replicaciones en cada suelo en una parcela de 10 m de diámetro para disminuir la variabilidad del suelo.
- 3) Se introduce entre 5 y 10 cm en el suelo, siempre que se pueda (intentar tener biselado el borde inferior del infiltrómetro). Se introduce en vertical, es decir, perpendicular a la horizontal, no perpendicular al suelo.
- 4) Colocar una rejilla en el fondo para que no suban los restos vegetales. La rejilla es de plástico, de 0,5 cm de luz y sujeta al suelo con un par de grapas de alambre o plástico.
- 5) Alrededor del infiltrómetro se hace una pequeña zanja circular de 5-10 cm de profundidad y lo mismo de anchura y que se llena de agua. La zanja se hace a unos 2 cm del infiltrómetro para evitar que se caiga.
- 6) El infiltrómetro se llena de agua hasta arriba (dependerá de lo que hayamos clavado el infiltrómetro, pero estará entre 15 y 22 cm, tenemos que anotar esta altura de agua total). Rellenamos el infiltrómetro siempre que se vacíe (inmediatamente) y cada vez que hacemos una medición.



## FICHA ENSAYO DE INFILTRACIÓN

<b>FECHA:</b>	<b>MUNICIPIO:</b>	<b>PROVINCIA:</b>
<b>LUGAR:</b>		<b>MAPA IGN:</b>
<b>COORDENADAS UTM:</b>		
<b>OBSERVACIONES:</b>		

Altura  
infiltrómetro:

TIEMPO (H:M)	ALTURA INFILTRADA (mm)
00:00	
00:02	
00:04	
00:06	
00:08	
00:10	
00:15	
00:20	
00:30	
00:40	
00:50	
01:00	
01:30	
02:00	
02:30	
03:00	
03:30	
04:00	

## FICHA TEST DE INFILTRACIÓN

FECHA:		
LUGAR:	MUNICIPIO:	PROVINCIA:
COORDENADAS UTM:		MAPA IGN:
OBSERVACIONES:		

FACTOR	VALOR	OBSERVACIONES
Temperatura edáfica		
Pendiente		
Exposición		
Vegetación: Descripción Especies Densidad Biomasa Altura		
Líquenes		
Musgos		
Hojarasca o pinocha		
Canales raíces o fauna		
Estado superficie suelo		
Profundidad perfil		
Pedregosidad perfil		
Textura		
Estructura		
Densidad y porosidad		
Permeabilidad		
Contenido de humedad		
Materia orgánica		
Carbonato cálcico		
Arcillas		
Tratamientos al suelo		

<b>FACTOR</b>	<b>VALOR</b>	<b>OBSERVACIONES</b>
<b>Temperatura edáfica</b>	Se da el valor de la T medido a 10 cm de profundidad	Con temperaturas muy bajas puede haber costra congelada
<b>Pendiente</b>	Se da el valor de la pendiente (%)	
<b>Exposición</b>	Se dirá si es solana, umbría o llano	
<b>Vegetación: Descripción Especies Densidad Biomasa Altura</b>	Descripción lo más extensa posible, por observación en campo y bibliografía	
<b>Líquenes</b>	Decir % superficie cubierta	
<b>Musgos</b>	Decir % superficie cubierta	
<b>Hojarasca o pinocha</b>	% superficie cubierta, tipo, profundidad	
<b>Canales raíces o fauna</b>	En el perfil	
<b>Estado superficie suelo</b>	Observación	
<b>Profundidad perfil</b>	En el perfil	
<b>Pedregosidad perfil</b>	En el perfil	
<b>Textura</b>	Análisis de suelo	
<b>Estructura</b>	Observación del perfil	
<b>Densidad y porosidad</b>	Análisis de suelo	
<b>Permeabilidad</b>	Análisis de suelo	
<b>Contenido de humedad</b>	Análisis de suelo, y condición previa de humedad	
<b>Materia orgánica</b>	Análisis de suelo	
<b>Carbonato cálcico</b>	Análisis de suelo	
<b>Arcillas</b>	Análisis de suelo	
<b>Tratamientos al suelo</b>	Observación	

# ANEJO IV: Estudio climatológico

## ANEJO IV. Estudio climatológico

### IV.1. Datos climatológicos

Para caracterizar el clima de la zona de estudio se han utilizado los datos mostrados por Ramos (2012).

Estos datos de precipitación y temperatura han sido seleccionados de las siguientes estaciones:

- 2370: estación de 2º orden perteneciente a la red meteorológica nacional.
- 2370A: "Instituto laboral".

En la siguiente Tabla se muestran las características de estas estaciones y la serie de datos con la que cuentan:

Tabla IV.1. Datos de las estaciones seleccionadas.

Indicativo	2370	2370A
Municipio	Saldaña	Saldaña
Provincia	Palencia	Palencia
Hemisferio	Norte	Norte
Latitud	42° 31' 25"	42° 31' 25"
Longitud	04° 44' 07"	04° 44' 072"
Altitud (m)	912	912
Orientación	Sur	Sur
Serie de años	1945 - 2009	1958 - 2007

### IV.2. Elección de la estación meteorológica

La elección de la estación meteorológica, de la que se tomarán los datos de cara a caracterizar el clima de la zona, se basa en (Martínez de Azagra y Navarro, 1996):

- Poseer una serie de datos suficientemente amplia. Se puede considerar como válido una serie temporal de 15 años para temperaturas y 30 años para precipitaciones.
- Localización del observatorio en la misma orientación que la zona de estudio respecto a las cadenas montañosas importantes.
- Altitud y proximidad del observatorio similar a la zona de estudio.

De entre las estaciones meteorológicas de Saldaña, se empleó para realizar el estudio climático la 2370, ya que cumplía los requisitos anteriormente citados y además era la más próxima a la zona de estudio y presentaba la serie de datos más larga (1945-2009). La estación 2370A se empleó para completar y comparar datos.

### IV.3. Obtención de la serie de precipitaciones de la cuenca

#### IV.3.1. Fiabilidad de las estaciones y relleno de huecos

La fiabilidad de los datos de precipitaciones debía ser contrastada debido a posibles errores que se pudieran producir en la toma de datos.

Para conocer la fiabilidad de los datos de la estación y contrastar los errores se utilizó el método de las dobles acumulaciones.

En este caso, la estación patrón (con datos fiables) fue la estación de Carrión de los Condes (2374A). (Ramos, 2012). El método de las dobles acumulaciones es efectivo cuando se cumplan las siguientes condiciones:

- Las series han de ser lo suficientemente extensas (25 años): En Saldaña las series son de 64 años (2370) y 49 años (2370A), en Carrión (2374A) la serie disponía de 74 años.
- La altitud debe de ser similar (Diferencia inferior a 200 metros): La diferencia de altitud en las estaciones de Saldaña (912 metros) y (Carrión 839 metros) es de 73 metros (<200m).
- Máxima distancia entre estaciones de 50 km. La distancia aproximada entre Saldaña y Carrión es de 23 kilómetros (<50km).

Como podemos observar dichas condiciones se cumplen, por lo que podemos afirmar que la comparación era válida. Pero para que la comparación realizada resulte fiable se debe comprobar la fiabilidad de los datos de la estación que se emplee como patrón. Por ello se comparó la estación de Carrión con otras dos, la de Villoldo (2374E) y la de Cervatos de la Cueva (2375) que cumplen las condiciones anteriormente descritas respecto a Carrión de los Condes y por tanto permiten realizar la comparación.

La comparación entre estaciones por el método de las dobles acumulaciones se realizó mediante el siguiente procedimiento:

1. Se igualan las series de años de las dos estaciones a comparar eliminando los años en los que falte algún dato de precipitación en ambas series.

2. Se realizan las series acumuladas de precipitaciones para las dos estaciones que se evalúan.

$$Ca_i = C_i + \sum_0^{i+1} C_{i-1}$$

3. Se comparan las series acumuladas. Para ello se representa en un gráfico las series acumuladas y se observa su tendencia.

Una vez conocida la fiabilidad de los datos de la estación que interviene en la caracterización pluviométrica se procedió a completar los huecos existentes mediante regresión lineal por correlación ortogonal.

En el caso que faltasen registros de precipitación para el mismo año en las dos estaciones, para el rellenado de estos huecos, se empleó el dato corregido de la precipitación mensual de la otra estación de Saldaña (2370A), y en el caso de que este también faltase, se rellenó el hueco del mes con la media de la precipitación mensual de toda la serie para ese mes.

Tabla IV.2. Datos de las series de precipitación, ya corregidos (Ramos, 2012). (P: precipitación).

Año	P anual (mm)	P anual corregida (S'i) (mm)	P anual (Ci) (mm)
1945	355,2	355,2	374,2
1946	425,3	425,3	376,9
1947	687,2	687,2	794
1948	347,3	467,7	408,5
1949	277,6	492,5	454,7
1950	307,9	307,9	356
1951	458,6	597,7	581,8
1952	590,6	590,6	393,9
1953	329,5	393,3	335
1954	349,4	349,4	326
1955	729	729	743,6
1956	439	439	472
1957	254	254	319,4
1958	526,5	526,5	604,1
1959	661,3	661,3	698,8
1960	696	696	634
1961	738,5	738,5	548,8
1962	390,7	390,7	307
1963	637,3	637,3	230
1964	353,5	353,5	0
1965	383,1	383,1	0
1966	841,5	841,5	0
1967	475,9	475,9	52
1968	535,6	535,6	448,7
1969	658,8	658,8	531,5
1970	497,4	497,4	493,4
1971	724,7	724,7	679
1972	747	747	774,3
1973	500,5	500,5	567,7
1974	585,2	585,2	464,5
1975	392	392	380
1976	531,5	508,2	473,7
1977	671,6	671,6	678,2
1978	692,8	692,8	629,4
1979	676,7	676,7	495,1
1980	435,1	372,7	370,6
1981	503,9	431,6	430,4
1982	564,7	483,7	354,1
1983	580,6	497,3	466,5
1984	794,6	680,6	532,4
1985	727,5	623,1	473,3
1986	427,6	366,3	324,8
1987	638,4	546,8	581,6
1988	674,3	577,6	671,6

Tabla IV.2. Continuación. Datos de las series de precipitación, ya corregidos (Ramos, 2012). (P: precipitación).

Año	P anual (mm)	P anual corregida (S'i) (mm)	P anual (Ci) (mm)
1989	623,3	533,9	526,2
1990	449	384,6	349,1
1991	406,7	348,4	341,9
1992	564,6	483,6	440,5
1993	612,4	524,6	580,7
1994	373,2	450,1	403,5
1995	503	504,4	469,1
1996	721,3	617,8	565,4
1997	833,9	714,3	780,3
1998	470,7	403,2	359,2
1999	520,5	445,8	409,9
2000	805,9	690,3	602,1
2001	596,2	474,7	433,2
2002	642,7	572,7	551,6
2003	759,7	582,3	563,2
2004	385,1	406,8	346,6
2005	451,8	387	292,2
2006	703,7	602,8	552,2

### IV.3.2. Series de precipitación de la cuenca.

Los datos de precipitaciones que se emplearon para la realización del estudio climático se exponen en la Tabla IV.3.

Tabla IV.3. Datos de precipitaciones para la zona de estudio. (P: precipitación; D: días).

Año	P anual (mm)	P Max	Mes P Max	D lluvia	D nieve	D granizo
1945	355,2	29,6	Diciembre	46	2	2
1946	425,3	27,2	Abril	58	3	0
1947	687,2	42,0	Junio	64	10	0
1948	467,7	26,5	Mayo	41	5	0
1949	492,5	25,5	Junio	38	1	0
1950	307,9	29,0	Junio	47	2	0
1951	597,7	39,0	Noviembre	28	7	0
1952	590,6	38,2	Julio	55	8	0
1953	393,3	35,0	Junio	33	2	0
1954	349,4	38,0	Noviembre	43	7	0
1955	729,0	45,5	Agosto	72	22	3
1956	439,0	22,0	Marzo	48	4	0
1957	254,0	17,0	Marzo	33	4	0
1958	526,5	35,0	Junio	44	0	0
1959	661,3	35,5	Noviembre	59	3	0
1960	696,0	40,0	Octubre	74	6	0
1961	738,5	40,0	Noviembre	20	3	0
1962	390,7	54,0	Enero	14	2	0
1963	637,3	28,0	Noviembre	34	0	0
1964	353,5	30,0	Ene y May	31	0	0
1965	383,1	31,5	Septiembre	0	0	0
1966	841,5	58,0	Octubre	59	9	1
1967	475,9	37,5	Mayo	33	11	6
1968	535,6	25,6	Octubre	53	4	3
1969	658,8	42,0	Junio	52	12	0

Tabla IV.3. Continuación. Datos de precipitaciones para la zona de estudio. (P: precipitación; D: días).

Año	P anual (mm)	P Max	Mes P Max	D lluvia	D nieve	D granizo
1970	497,4	42,5	Enero	44	6	4
1971	724,7	46,5	Octubre	62	10	1
1972	747,0	31,5	Enero	60	8	6
1973	500,5	35,0	Mayo	46	5	1
1974	585,2	43,5	Julio	58	6	8
1975	392,0	19,0	Febrero	51	3	0
1976	508,2	26,5	Junio	76	10	0
1977	671,6	39,0	Diciembre	78	14	12
1978	692,8	29,3	Diciembre	76	9	3
1979	676,7	29,0	Julio	85	9	5
1980	372,7	29,6	Abril	80	8	1
1981	431,6	30,0	Febrero	85	17	1
1982	483,7	48,0	Septiembre	77	6	0
1983	497,3	45,0	Diciembre	85	8	3
1984	680,6	52,3	Octubre	99	10	4
1985	623,1	58,3	Diciembre	90	8	2
1986	366,3	65,6	Septiembre	55	13	2
1987	546,8	60,0	Septiembre	66	13	1
1988	577,6	49,0	Junio	80	3	0
1989	533,9	40,3	Diciembre	94	4	3
1990	384,6	45,9	Junio	71	4	6
1991	348,4	34,0	Septiembre	66	8	0
1992	483,6	35,0	Junio	76	6	2
1993	524,6	61,0	Septiembre	93	8	3
1994	450,1	24,2	Enero	75	8	1
1995	504,4	44,5	Noviembre	88	3	0
1996	617,8	36,5	Enero	106	11	1
1997	714,3	63,2	Julio	125	6	9
1998	403,2	37,5	Agosto	94	8	5
1999	445,8	32,8	Septiembre	91	9	8
2000	690,3	38,6	Noviembre	122	7	4
2001	474,7	40,0	Marzo	40	6	1
2002	572,7	39,0	Septiembre	87	6	3
2003	582,3	41,0	Octubre	56	6	5
2004	406,8	78,0	Septiembre	24	9	2
2005	387,0	29,0	Octubre	49	10	1
2006	602,8	40,0	Octubre	51	1	3

Tabla IV.4. Precipitaciones medias mensuales.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P media (mm)	53	41,9	43,7	44,4	54,1	41,8	21,7	21,2	36,5	57,4	56,8	55,6
P media anual (mm)	528,1											

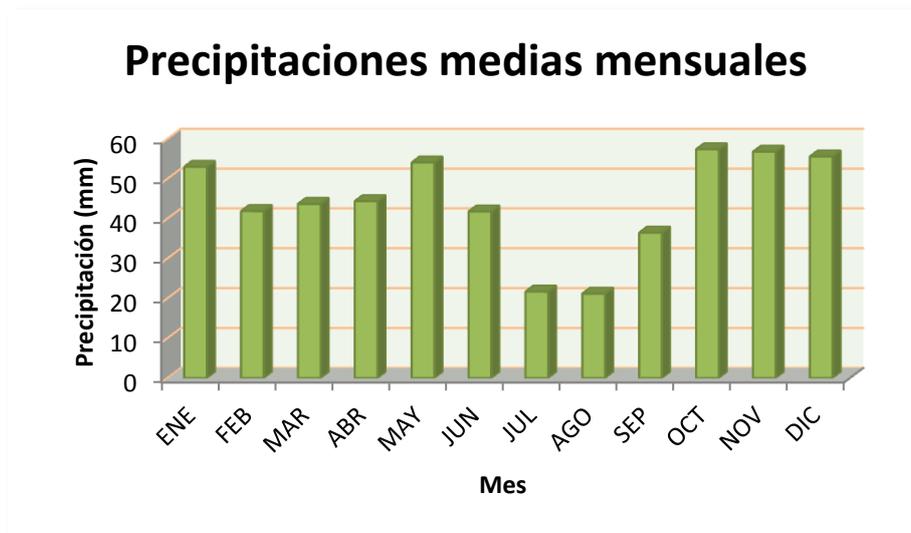


Figura IV.1. Precipitaciones medias mensuales.

### IV.3.3. Datos de temperaturas

Para realizar el estudio climático, se emplearon los datos de temperaturas aportados por la estación meteorológica 2370 de Saldaña. La serie de datos para esta estación abarca el periodo 1945 – 2009.

En la Tabla IV.5. y la Figura IV.2. se muestra el resumen de los datos de temperatura empleados.

Tabla IV.5. Resumen de temperaturas.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
t(°C)	1,8	2,9	5,6	7,6	10,9	15,2	18,2	18,2	15,1	10,0	5,5	2,5
Tm(°C)	5,7	7,4	10,7	13,0	16,6	21,5	25,8	25,4	21,5	15,1	10,0	6,5
tm(°C)	-2,2	-1,6	0,4	2,2	5,3	8,8	10,9	11,0	8,7	5,0	1,0	-1,4
Tma(°C)	19,0	20,0	26,0	29,5	33,5	37,0	38,0	42,0	37,0	29,5	25,0	20,0
Año	1994	87-00	1990	1945	2001	1968	1949	1987	1988	1980	1997	1983
tma(°C)	-17,0	-15,0	-15,0	-7,4	-7,0	-3,0	-0,5	-1,0	-4,0	-6,0	-10,5	-16,0
Año	1945	1948	1955	1953	1956	1965	1966	1960	1965	1964	1965	2009
Días<0°	23,7	20,2	14,9	8,9	3,1	0,2	0,0	0,0	0,3	2,9	13,4	21,5

Donde:

- Tma (°C): media de las temperaturas máximas absolutas.
- Tm (°C): temperatura media de las máximas.
- t (°C): temperatura media mensual.
- tm (°C): temperatura media de las mínimas.
- tma (°C): media de las temperaturas mínimas absolutas.

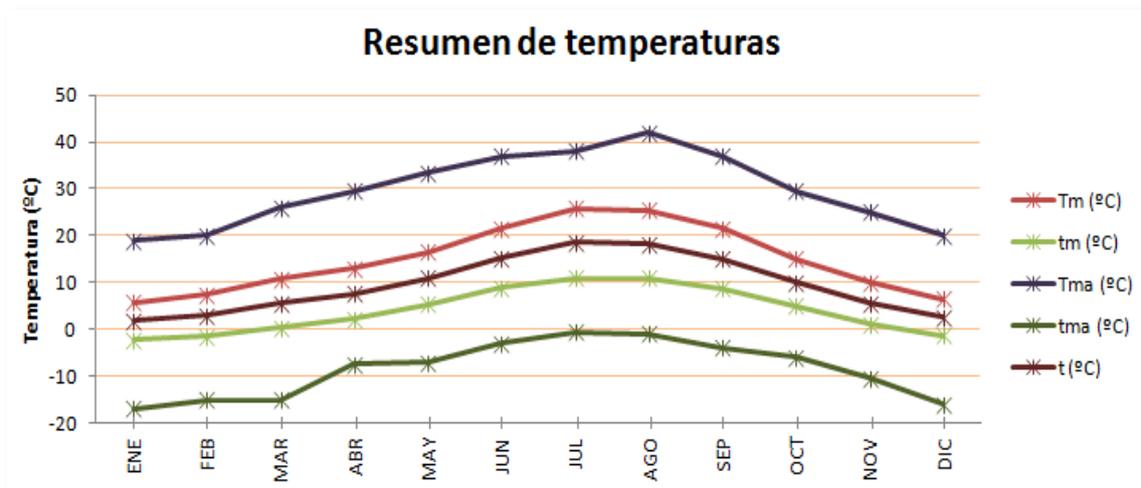


Figura IV.2. Resumen de temperaturas.

Los valores de temperaturas medias obtenidas para la zona de estudio son:

- Temperatura media anual (°C): 9,5 °C
- Media Tm (°C): 14,9 °C
- Media tm (°C): 4 °C
- Media Tma (°C): 34,5 °C
- Media tma (°C): -10,3 °C
- Amplitud térmica: 16,71

#### IV.3.4. Evapotranspiración potencial.

La determinación de la evapotranspiración potencial (ETP) se ha realizado según Thornthwaite (1948). Su fórmula se basa en la utilización de la temperatura media mensual y la latitud del lugar.

$$ETP = K \cdot 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{t}{I}\right)^a$$

Donde:

- ETP: evapotranspiración potencial (mm/mes).
- K: coeficiente de corrección que depende del número de días del mes y de las horas efectivas de luz solar en dicho mes. Este valor se encuentra tabulado en función de la latitud del lugar.
- t: temperatura media mensual (° C).
- I: índice de calor anual. Suma de los doce valores del índice térmico mensual (i):

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

$$I = \sum_{1}^{12} i$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 77,1 \cdot 10^{-6} \cdot I^2 + 0,01792 \cdot I + 0,49329$$

Los cálculos realizados así como pasos intermedios se pueden observar en las Tablas IV.6. y IV.7.

Tabla IV.6. Parámetros de cálculo para la ETP.

Mes	ENE	MAR	FEB	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
t (°C)	1,77	2,91	5,55	7,58	10,95	15,17	18,48	18,16	15,08	9,98	5,49	2,54
t/5	0,35	0,58	1,11	1,52	2,19	3,03	3,70	3,63	3,02	1,99	1,10	0,51
(t/5) <sup>1,514</sup>	0,21	0,44	1,17	1,88	3,26	5,37	7,24	7,05	5,32	1,07	1,15	0,36
l	36,30											
a	1,07											

Tabla IV.7. Cálculo de la ETP según Thornthwaite.

Mes	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
t (°C)	1,77	2,91	5,55	7,58	10,95	15,17	18,48	18,16	15,08	9,98	5,49	2,54
10*T	17,7	29,1	55,57	75,8	109,5	151,7	184,8	181,6	150,8	99,8	54,9	25,4
(10*t)/l	0,49	0,80	1,53	2,09	3,02	4,18	5,09	5,00	4,156	2,75	1,51	0,70
(10*t/l)a	0,46	0,79	1,58	2,21	3,27	4,65	5,75	5,64	4,62	2,96	1,56	0,68
K	0,82	0,83	1,03	1,12	1,26	1,27	1,28	1,19	1,04	0,95	0,82	0,79
16*K	13,12	13,28	16,48	17,9	20,16	20,32	20,48	19,04	16,64	15,2	13,12	12,64
ETP(mm)	6,06	10,46	26,03	39,51	66,00	94,46	117,7	107,47	6,89	45,05	20,45	8,60
ETP anual (mm)	618,59											

El valor de la evapotranspiración potencial anual obtenido para la zona de estudio es de 618,59 mm.

### IV.3.5. Índices climáticos

#### a) Índices de aridez

##### - Índice de pluviosidad de Lang (1915)

Explica de forma sencilla el grado de aridez teniendo en cuenta la precipitación y la energía disponible para evaporar.

$$I = \frac{P}{T} = \frac{528,1}{9,5} = 55,6$$

Donde:

- P: Precipitación media anual: 528,1 mm
- T: Temperatura media anual: 9,5 °C

Su interpretación es la siguiente:

- 0-20 Zonas desérticas.
- 20-40 Zonas áridas.
- 40-60 Zonas húmedas de estepas o sabanas.
- 60-100 Zonas húmedas de bosques.
- 100-160 Zonas húmedas de grandes bosques.
- >160 Zonas perhúmedas de prados y tundras.

Según el índice de pluviosidad de Lang (1915) nos encontraríamos en una zona húmeda de estepas o sabanas.

- **Índice de aridez de Martonne (1906)**

Este índice es ampliamente usado para definir el grado de aridez en los climas desfavorables para el crecimiento de especies arbóreas:

$$I_a = \frac{P}{T + 10} = 27,08$$

Donde:

- P: precipitación media anual = 528,1 mm
- T: Tª media anual = 9,5º C

Su interpretación es la siguiente:

- <5 Desiertos.
- 5-10 Semidesierto.
- 10-20 Semiárido tipo mediterráneo.
- 20-30 Subhúmeda.
- 30-60 Húmeda.
- >60 Perhúmeda.

Según el índice de aridez de Martonne (1906) la zona de estudio se correspondería con una zona subhúmeda.

- **Índice de Emberger (1932)**

$$Q = \frac{100 \cdot P}{(M - m) \cdot (M + m)} = 79,74$$

Donde:

- P: precipitación media anual = 528,1 mm
- M: media de las máximas del mes más cálido = 25.81° C
- m: media de las mínimas del mes más frío = - 2,61° C

La interpretación del índice se realiza a través de la Figura I.3. En ella, introducimos el valor de “Q” y “m”, definiendo la subregión climática o género.

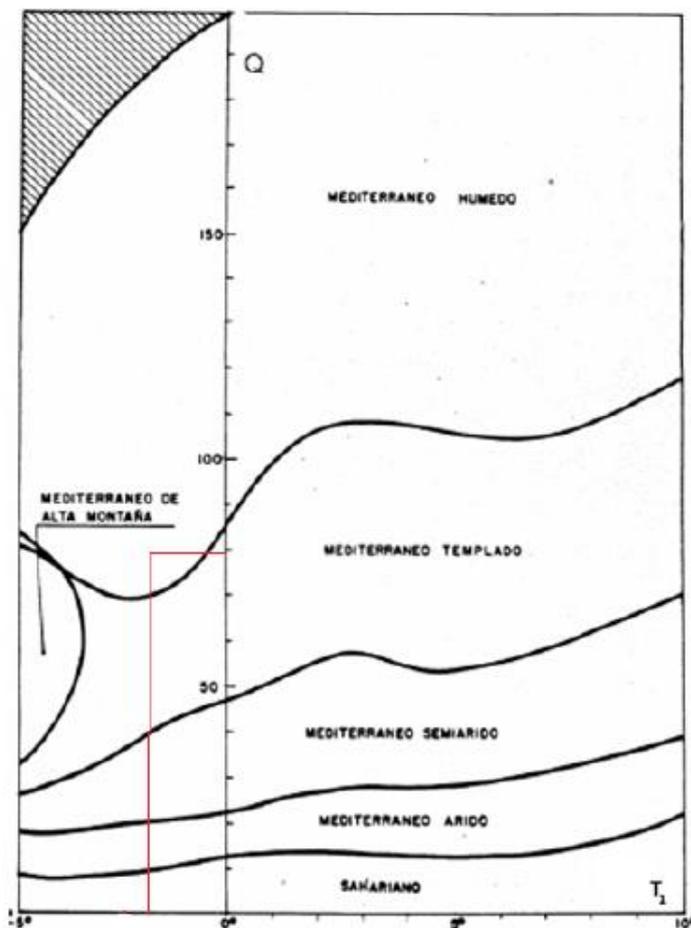


Figura IV.3. Interpretación del índice de Emberger.

También se sugiere una correspondencia entre el valor de “m” y el tipo de invierno según muestra la Tabla IV.8.

Tabla IV.8. Tipo de invierno en función del valor de m.

Tipo de invierno	m (°C)
Muy frío	<-3°C
Frío	>-3°C y < 0°C
Fresco	>0°C y < 3°C
Templado	>3°C y < 7°C
Cálido	>7°C

Según el índice de Emberger nos encontramos dentro de un clima mediterráneo húmedo, con inviernos fríos ( $m > -3^{\circ}\text{C}$ ) de heladas muy frecuentes.

- **Índice de Dantin y Revenga (1941)**

$$I = 100 \cdot \frac{T}{P} = 1,80$$

Donde:

- T: Temperatura media anual =  $9,5^{\circ}\text{C}$ .
- P: precipitación media anual = 528,1 mm.

Su interpretación es la siguiente:

- 0 - 2 Zona húmeda.
- 2 - 3 Zona semiárida.
- 3 - 6 Zona árida.
- > 6 Zona subdesértica.

Según el índice de Dantin y Revenga (1941) la zona de estudio pertenece a una zona húmeda.

- **Índice de aridez de la UNEP (1997)**

$$I = P/ETP = 0,85$$

Donde:

- P: precipitación media anual = 528.1 mm
- ETP: evapotranspiración potencial media anual = 618,59 mm

Su interpretación es la siguiente:

- > 0,65 Húmedo.
- 0,65 – 0,5 Subhúmedo – seco.
- 0,5 – 0,2 Semiárido.
- 0,2 – 0,05 Árido
- < 0,05 Hiperárido.

Según el índice de aridez de la UNEP (1997) la zona de estudio se encuentra dentro de un clima húmedo.

### b) Índice de Vernet (1966)

$$I = \pm 100 \cdot [(H - h)/P] \cdot \left(\frac{Mv}{Pv}\right) = -3,57$$

Donde:

- H: precipitación de la estación más lluviosa (mm) = 150,7mm.
- h: precipitación de la estación más seca (mm) = 84,7 mm.
- P: precipitación anual (mm) = 528,1 mm
- Mv: Temperatura media de las máximas estivales = 24,2 °C.
- Pv: Precipitación estival (mm) = 84,7 mm.
- La expresión toma el signo “-“ si el verano es el primero o el segundo de los mínimos pluviométricos y signo “+” en caso contrario. En nuestro caso toma el signo “-“.

Su interpretación será:

- >2 Clima continental.
- 0 a 2 Clima oceánico-continental.
- 1 a 0 Clima oceánico.
- 2 a -1 Clima pseudooceánico.
- 3 a -2 Clima oceánico-mediterráneo.
- 4 a -3 Clima submediterráneo.
- < -4 Clima mediterráneo.

Según el índice de Vernet (1966) la zona de estudio pertenece a un clima de tipo submediterráneo.

### c) Otros índices

#### - Índice de continentalidad de Gorezynski (1920)

$$I_g = 1,7 \cdot \left(\frac{A}{senL}\right) - 20,4 = 21,78$$

Donde:

- A: amplitud térmica anual en °C = 16,71
- L: latitud en grados = 42,31°

Su interpretación es la siguiente:

- < 10 Marítimo.
- 10 - 20 Semimarítimo.
- 20 - 30 Continental.
- > 30 Muy continental.

El resultado del índice de continentalidad de Gorezynski (1920) nos sitúa en un clima continental.

#### - Clasificación climática de Turc (1961)

Establece la clasificación basándose en unos límites establecidos a partir de los factores que intervienen en el cálculo del déficit de escorrentía, cuya expresión es:

$$D = \frac{P}{\sqrt{0,9 \cdot \left(\frac{P^2}{L^2}\right)}} = 603,7 \text{ mm}$$

Donde:

- D: déficit de escorrentía (mm) que en la práctica coincide con la evapotranspiración real anual.
- L = 300 + 25·T + 0,05·T<sup>3</sup>, siendo T, temperatura media anual en °C (9,5°C).
- P: Precipitación anual = 528, 1 mm.

Su interpretación es:

- P > 0,632·L: clima húmedo
- 0,316·L < P < 0,632·L: clima semiárido
- P < 0,316·L: clima árido

En el caso de estudio nos encontramos ante un clima húmedo ya que 0,632·L=580,4 es mayor que el valor de la precipitación anual.

- **Índice de Mediterraneidad de Rivas-Martínez (1987)**

Este índice permite expresar y deslindar los límites de la región Mediterránea con las regiones Eurosiberiana y Saharoarábica. Esta separación se evalúa mediante los siguientes índices:

$$I_{m1} = \frac{ETP_{julio}}{P_{julio}} = 5,42 \rightarrow I_{m1} > 4$$

$$I_{m1} = \frac{ETP_{julio+agosto}}{P_{julio+agosto}} = 5,24 \rightarrow I_{m1} > 3,5$$

$$I_{m1} = \frac{ETP_{junio+julio+agosto}}{P_{junio+julio+agosto}} = 3,77 \rightarrow I_{m1} > 2,5$$

Donde:

- ETP = evapotranspiración media mensual = 618,59 mm
- P = precipitación media mensual = 528,1 mm

Según las condiciones establecidas, el índice nos indica que estamos en la región mediterránea.

- **Índice de Termicidad (1987)**

Propuesto por Rivas-Martínez (1987), permite establecer los límites entre los diversos pisos y horizontes bioclimáticos.

$$I = (T + M + m) \cdot 10 = 130,3 \text{ t}$$

Donde:

- T = temperatura media anual en °C = 9,5° C.
- M = media de las máximas del mes más frío = 5,74° C.
- m = media de las mínimas del mes más frío = - 2,21° C.

Según los valores obtenidos estamos situados en el piso supramediterráneo, que se caracteriza por los siguientes valores:

$$8 < T < 13 \quad 2 < M < 9 \quad -4 < m < -1 \quad 60 < It < 210$$

Dentro de este piso, permite distinguir entre tres horizontes:

$$61 < It < 110 \text{ Superior} \quad 111 < It < 160 \text{ Medio} \quad 161 < It < 210 \text{ Inferior}$$

El índice de termicidad indica que estamos situados en un piso supramediterráneo medio.

- **Índice de Gandullo y Serrada (1977) o Índice de Productividad Potencial Forestal (IPPF):**

Este índice se basa en el índice de Paterson (1956) que trata de evaluar la productividad potencial de un bosque en una zona y para unas condiciones determinadas. Se aplica en áreas de clima predominantemente mediterráneo.

$$I = \frac{V \cdot f \cdot P \cdot G}{A \cdot 12} = 102,18$$

Donde:

- V: temperatura media mensual del mes más cálido = 18,48° C.

- f: factor de insolación:

$$f = \frac{2500}{n + 1000} = 0,705$$

$$n = n^{\circ} \text{ horas insolación} = \frac{76330,2}{30} = 2544,34$$

- P: precipitación media anual en mm = 528,1 mm.

- G: duración del periodo vegetativo, expresado en meses, considerando como mes activo para la vegetación forestal aquél en el que la media mensual, expresada en mm iguala o supera el doble de la temperatura media mensual (°C), siempre que ésta sea > 6° C. = 5 meses.

- A: Rango anual de temperaturas, estimado por la diferencia entre la media de las máximas del mes más cálido y la media de las mínimas del mes más frío = 28,02° C.

Con este índice Paterson establece la siguiente fórmula para la producción:

$$\text{Producción} = 5,3 \cdot (\log_{10} I - \log_{10} 25) = 3,24 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{año}$$

El problema de esta fórmula reside en que basa la producción sólo en el clima, cosa que no es cierta, ya que factores como el suelo, la morfología, el tratamiento silvícola, etc., son determinantes en el rendimiento de la masa.

Este problema queda resuelto con el Índice de Gandullo y Serrada (1977) o índice de Productividad Potencial Forestal (IPPF) que se calcula como la Producción según Paterson multiplicada por un coeficiente "K" que depende de la litofacies y viene reflejado en el Mapa de Productividad Potencial Forestal de la España Peninsular (1977). En nuestro caso K = 1,66 (aluviones calizos).

$$\text{IPPF} = K \cdot \text{Producción} = 5,38 \text{ m}^3/\text{ha} \cdot \text{año}$$

Lo que le asigna una Clase III: Tierras que tienen limitaciones moderadas para el crecimiento de bosques productivos.

#### d) Climodiagrama de Walter y Lieth (1960)

Realiza una comparación adimensional entre evapotranspiraciones y precipitaciones. Los principales parámetros que se deducen del climodiagrama (Figura xx) son los siguientes:

- Intervalo de sequía: es el intervalo de tiempo, en meses, en la que la precipitación está por debajo de las temperaturas.
- Intensidad de la sequedad: es el cociente entre el área seca y el área húmeda.
- Área húmeda: superficie comprendida entre la curva de precipitaciones y la curva de temperaturas, cuando la primera está por encima de la segunda.
- Intervalo de helada segura: es el tiempo, expresado en meses, en los que la temperatura media de las mínimas es inferior a 0° C.
- Intervalo de helada probable: es el número de meses en los cuales, aún siendo la temperatura media de las mínimas superior a 0° C, la temperatura mínima absoluta es menor a cero grados.

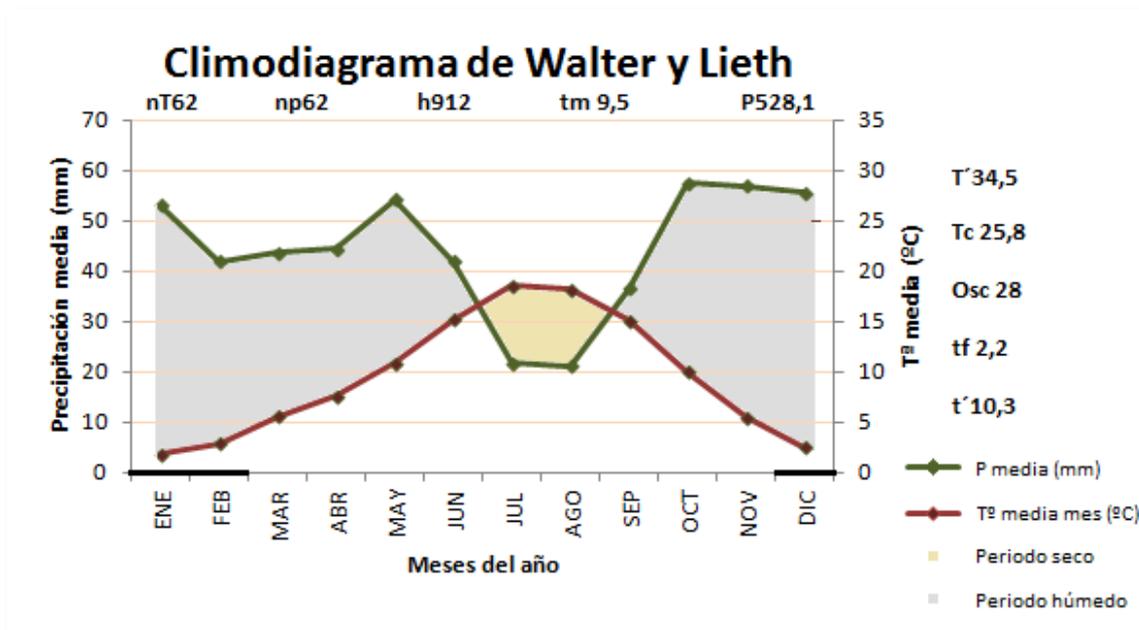


Figura IV.4. Climodiagrama de Saldaña (Palencia)

Donde:

- T': Tª media anual de máximas absolutas anuales.
- Tc: Tª media de las máximas del mes más cálido.

- Osc: Oscilación ( $T_c - t_f$ ).
- $t_f$ :  $T^a$  media de las mínimas del mes más frío.
- $t'$ :  $T^a$  media anual de las mínimas absolutas anuales.
- $n_T$ : Número de años de la serie de temperaturas.
- $n_P$ : Número de años de la serie de precipitaciones.
- $h$ : Altitud en metros.
- $t_m$ :  $T^a$  media anual de las medias ( $^{\circ}$  C).
- $P$ : Precipitación media anual (mm).
- $H_s$ : Periodo de helada segura. = 3 (Negro)
- $H_p$ : Periodo de helada probable. = 9 (Gris)
- $d$ : Periodo libre de heladas = 0
- Periodo húmedo: Área rayada.
- Periodo seco: Área punteada.

#### e) Índices pluviométricos

- **Índice de agresividad del clima (Índice de Fournier medio (1960))**

Este índice se determina año a año mediante la siguiente fórmula:

$$F_i = \frac{p_{ji}^2}{P_i}$$

Donde:

- $p_{ji}$ : precipitación del mes más lluvioso ( $j$ ) del año " $i$ " (mm).
- $P_i$ : precipitación total del año " $i$ " (mm).

La Tabla IV.9. recoge los valores anuales del índice de Fournier (1960) calculados.

Tabla IV.9. Valor anual del índice de Fournier.

Año	Fi	Año	Fi
1945	17,88	1976	17,95
1946	22,67	1977	36,80
1947	27,67	1978	49,61
1948	30,48	1979	25,05
1949	6,44	1980	13,63
1950	17,36	1981	18,56
1951	39,62	1982	26,03
1952	14,64	1983	25,12
1953	14,65	1984	44,69
1954	19,95	1985	27,74
1955	16,15	1986	44,06
1956	41,21	1987	22,36
1957	15,38	1988	21,50
1958	18,99	1989	31,63
1959	15,58	1990	13,62
1960	52,69	1991	15,04
1961	32,11	1992	20,06
1962	46,65	1993	18,66
1963	29,67	1994	25,34
1964	26,34	1995	31,09
1965	11,03	1996	42,06
1966	30,08	1997	23,48
1967	21,01	1998	15,44
1968	20,98	1999	36,05
1969	25,06	2000	36,69
1970	97,31	2001	45,46
1971	27,24	2002	27,16
1972	16,11	2003	38,72
1973	43,76	2004	17,29
1974	14,21	2005	47,87
1975	7,17	2006	38,01

El Índice de Agresividad del Clima medio de Fournier (1960), se obtiene a través de la media de los valores anuales:

$$F = \sum_{2006}^{1993} \frac{F_i}{n} = 27,69$$

El Índice de Agresividad Climática de Fournier medio es de 27,69. En el mapa de Isolíneas del Factor de Fournier nos encontramos entre la isolínea 20 y 30. Para este parámetro, la mayor parte de la cuenca del Duero queda por debajo de la isolínea de 75 y se reconocen mínimos inferiores a 50 en zonas aisladas de la meseta. En las zonas de montaña los valores aumentan rápidamente con máximos superiores a 200.

Por lo tanto la zona de estudio se encontraría en los valores mínimos de la cuenca.

- **Índice de Agresividad o Erosividad de la Lluvia. Factor R de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo (U.S.L.E.):**

La erosividad de la lluvia se define como el producto de la energía cinética de un aguacero por la intensidad máxima durante 30 minutos.

Para calcular el factor R anual se calcula el producto de la energía cinética de los aguaceros durante ese año por la intensidad máxima del aguacero respectivo durante 30 minutos:

$$R_i = \sum_1^n E_j \cdot I_{j30}$$

Donde:

- $R_i$ : factor de agresividad de la lluvia del año "i".
- $E_j$ : energía cinética del aguacero "j" del año "i".
- $I_{j30}$ : intensidad máxima en 30 minutos del aguacero "j" del año "i".
- n: número de aguaceros que se han producido en el año "i".

El Índice de Agresividad de la Lluvia medio, para una zona determinada, se obtiene a través de la media de los valores de los  $R_i$  anuales de la serie:

$$R = \sum_1^N \frac{R_i}{N}$$

Para el cálculo del Factor R de Erosividad de la Lluvia interanual, ICONA (1988) divide la península ibérica en 3 zonas cada una con su correspondiente expresión matemática. Para la zona de Saldaña la expresión a utilizar es:

$$R = e^{-0,834} \cdot PMEX^{1,314} \cdot MR^{-0,388} \cdot F24^{0,563}$$

Donde:

- PMEX: Valor medio anual de la máxima lluvia mensual (mm).
- MR: Precipitación media del periodo octubre-mayo (mm).

- F24: Valor medio de los cocientes entre la lluvia máxima en veinticuatro horas de cada año, elevada al cuadrado, y la suma de las máximas en veinticuatro horas de todos los meses de ese mismo año.

$$F24_i = \frac{P_{max,d}^2}{\sum_1^{12} P_{j,max,d}}$$

$$F24 = \sum_1^N \frac{R_i}{N}$$

El valor de R interanual calculado mediante esta expresión para nuestra serie de datos es de 62 hJ·cm·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup> siendo un valor de erosividad de la lluvia bajo a moderado.

### - Índice de Irregularidad Pluviométrica

Este índice se determina mediante el cociente entre el valor máximo y el mínimo precipitación anual de la serie observada de datos. En zonas de Europa de clima oceánico este índice no supera en tres veces el registro de menor precipitación anual, siendo mayor que tres en zonas mediterráneas de gran irregularidad pluviométrica.

$$I.I. = \frac{\text{max. valor pluv}}{\text{min. valor pluv.}} = \frac{841,5}{254} = 3,3$$

Como este índice es mayor de tres nos indica que estamos en una zona de acusada irregularidad pluviométrica acusada.

## f) Índices fitoclimáticos.

### - Clasificación fitoclimática de Allué (1990)

Su utilidad reside en la facilitación de un rápido acercamiento inicial a los tipos fitológicos y a las corologías fitoclimáticas de la Tierra. El modelo de clasificación parte de dos bases:

- La base fitológica: procedente del Mapa Mundial de Vegetación de C. Troll y K.H. Paffen (1964).

- La base climática: procedente de los climodiagramas de H. Walter y H. Lieth (1960).

Según la clasificación fitoclimática de Allué (1990), Saldaña se encuentra en el subtipo VI (IV)1 cerca de los límites del VI (IV)1, siendo ambos nemoromediterráneos genuinos. El subtipo VI (IV)1 puede existir en diferentes litologías predominando los grupos planicaducifolios marcescentes.

La serie a la que pertenece Saldaña es la del roble melojo (*Quercus pyrenaica*) llamada *Luzulo forseteri - Querceto pyrenaicae sigmetum* subhúmeda de las alisedas.

### **g) Conclusiones**

El análisis de los datos climáticos nos sitúa en un clima de marcada influencia mediterránea (Mediterráneo húmedo según Emberger (1932) o submediterráneo según Vernet (1966)). Las precipitaciones son moderadas (528,1 mm) encontrando el máximo pluviométrico en otoño (150,7 mm) y el mínimo en verano (84,7 mm). Existe una marcada irregularidad pluviométrica, pero estas precipitaciones poseen un poder erosivo bajo a moderado como así demuestra el valor del Factor R de Erosividad de la Lluvia (Wischmeier y Smith, 1978) ( $62 \text{ hJ}\cdot\text{cm}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ). Los diferentes índices calculados, como el de Lang (1915), clasifica la zona de estudio como húmeda al igual que el índice de Dantin y Revenga (1941), UNEP (1997) o Turc (1961). Sin embargo debemos tener en cuenta que nos encontramos en un clima con ombroclima seco.

La temperatura media anual es de 9,5°C. Esta está determinada por unos inviernos largos y fríos con frecuentes heladas como determina el índice de Emberger (1931). A partir del climodiagrama podemos observar que el periodo libre de heladas se extiende por los meses de verano.

Por tanto, podemos concluir que la zona de estudio se enmarca dentro de un clima mediterráneo continentalizado con precipitaciones suficientes repartidas a lo largo de todo el año y temperaturas frías, condicionadas por inviernos largos y fríos con frecuentes heladas.

# ANEJO V: Datos medidos en campo

## ANEJO V: Datos medidos en campo

En este anejo podemos observar todos los datos del estudio que se han tomado en campo. Estas medidas están organizadas en diferentes tablas de modo que en cada tabla se encuentran los diferentes ensayos realizados para las cuatro zonas de estudio y con los dos infiltrómetros utilizados.

Las tablas constan de cuatro columnas:

-Intervalo (min): Es el tiempo parcial en minutos que ha tardado en descender la lámina de agua en cada medida tomada.

-Tiempo ac. (min): Es el tiempo acumulado desde el inicio del ensayo hasta cada medida realizada.

-h infiltrada (mm): Es la distancia descendida por la lámina de agua en cada intervalo de medición medido en milímetros.

-h. ac (mm): Es la altura de lámina de agua descendida acumulada desde el inicio del ensayo, en milímetros.

Cabe recordar que la nomenclatura de las zonas utilizada es la siguiente:

- Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada.
- Zona 2: Área degradada de la cárcava natural.
- Zona 3: Zona de bosque restaurado de pino.
- Zona 4: Zona de bosque natural de roble.

### V.1. Datos Zona 1: Área degradada de la cárcava restaurada

#### V.1.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro

Tabla V.1. Datos de campo del ensayo 1, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
3,97	3,97	2,00	2,00
4,88	8,85	2,00	4,00
5,77	14,62	2,00	6,00
7,83	22,45	2,00	8,00
3,67	26,12	1,00	9,00
4,92	31,03	1,00	10,00
4,32	35,35	1,00	11,00
5,48	40,83	1,00	12,00
10,28	51,12	2,00	14,00

Tabla V.1. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
13,63	64,75	2,00	16,00
11,72	76,47	2,00	18,00
11,20	87,67	2,00	20,00
29,72	117,38	5,00	25,00
37,23	154,62	7,00	32,00
16,12	170,73	3,00	35,00
4,43	175,17	1,00	36,00
9,35	184,52	2,00	38,00
4,65	189,17	1,00	39,00
4,75	193,92	1,00	40,00
4,58	198,50	1,00	41,00
4,68	203,18	1,00	42,00
4,65	207,83	1,00	43,00

Tabla V.2. Datos de campo del ensayo 2, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,33	1,33	2,00	2,00
0,78	2,12	1,00	3,00
1,22	3,33	1,00	4,00
1,15	4,48	1,00	5,00
0,97	5,45	1,00	6,00
1,02	6,47	1,00	7,00
0,68	7,15	1,00	8,00
0,68	7,83	1,00	9,00
1,45	9,28	1,00	10,00
1,48	10,77	1,00	11,00
5,17	15,93	5,00	16,00
6,05	21,98	5,00	21,00
6,22	28,20	5,00	26,00
10,43	38,63	5,00	31,00
11,02	49,65	5,00	36,00
13,53	63,18	5,00	41,00
18,85	82,03	5,00	46,00
21,60	103,63	5,00	51,00
27,13	130,77	5,00	56,00

Tabla V.2. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
29,18	159,95	5,00	61,00
25,47	185,42	5,00	66,00
29,43	214,85	5,00	71,00
25,18	240,03	5,00	76,00

Tabla V.3. Datos de campo del ensayo 3, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,83	2,83	10,00	10,00
7,35	10,18	5,00	15,00
17,17	27,35	5,00	20,00
24,22	51,57	5,00	25,00
37,27	88,83	5,00	30,00
37,18	126,02	5,00	35,00
38,02	164,03	5,00	40,00
37,92	201,95	5,00	45,00

Tabla V.4. Datos de campo del ensayo 4, zona 1, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
7,83	7,83	2	2
28,09	35,92	2	4
19,01	54,93	2	6
33,09	88,02	2	8
29,98	118	1	9
47	165	1	10

### V.1.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro

Tabla V.5. Datos de campo del ensayo 1, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,35	0,35	1,00	1,00
0,67	1,02	1,00	2,00
0,67	1,68	1,00	3,00
0,57	2,25	1,00	4,00

Tabla V.5. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,68	2,93	1,00	5,00
0,93	3,87	1,00	6,00
1,00	4,87	1,00	7,00
14,02	18,88	5,00	12,00
23,85	42,73	5,00	17,00
60,00	102,73	3,00	20,00
20,92	123,65	1,00	21,00
41,32	164,97	2,00	23,00
20,68	185,65	1,00	24,00

Tabla V.6. Datos de campo del ensayo 2, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
13,70	13,70	5,00	5,00
9,83	23,53	2,00	7,00
13,88	37,42	1,00	8,00
8,62	46,03	1,00	9,00
27,83	73,87	1,00	10,00
27,35	101,22	1,00	11,00
29,50	130,72	1,00	12,00
28,40	159,12	1,00	13,00
28,22	187,33	1,00	14,00

Tabla V.7. Datos de campo del ensayo 3, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,80	2,80	3,00	3,00
3,95	6,75	2,00	5,00
2,72	9,47	1,00	6,00
5,77	15,23	2,00	8,00
4,32	19,55	1,00	9,00
3,92	23,47	1,00	10,00
4,13	27,60	1,00	11,00
5,57	33,17	1,00	12,00
5,57	38,73	1,00	13,00
22,45	61,18	2,00	15,00
11,15	72,33	1,00	16,00

Tabla V.7. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
11,83	84,17	1,00	17,00
8,93	93,10	1,00	18,00
12,40	105,50	1,00	19,00
12,83	118,33	1,00	20,00
12,88	131,22	1,00	21,00
13,28	144,50	1,00	22,00
12,33	156,83	1,00	23,00
12,67	169,50	1,00	24,00
13,52	183,02	1,00	25,00
26,80	209,82	2,00	27,00
13,49	223,31	1,00	28,00

Tabla V.8. Datos de campo del ensayo 4, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,75	0,75	5	5
0,83	1,58	5	10
1,42	3	5	15
1,42	4,42	5	20
1,58	6	5	25
1,58	7,58	5	30
1,58	9,16	5	35
1,58	10,74	5	40
1,33	12,07	5	45
1,5	13,57	5	50
1,67	15,24	5	55
1,83	17,07	5	60
1,83	18,9	5	65
1,92	20,82	5	70
1,42	22,24	5	75
1,42	23,66	5	80
1,75	25,41	5	85
1,67	27,08	5	90
1,75	28,83	5	95
1,83	30,66	5	100
2	32,66	5	105
1,67	34,33	5	110
1,58	35,91	5	115

Tabla V.8. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,83	37,74	5	120
1,83	39,57	5	125
2	41,57	5	130
2	43,57	5	135
1,92	45,49	5	140
2	47,49	5	145
2,17	49,66	6	151
1,83	51,49	5	156
1,83	53,32	5	161
2	55,32	5	166
2	57,32	5	171
2,17	59,49	5	176
2,17	61,66	5	181
2,33	63,99	5	186
2,58	66,57	6	192
2,25	68,82	5	197
2,17	70,99	5	202
2,2	73,19	5	207
2,3	75,49	5	212
2,33	77,82	5	217
2,3	80,12	5	222
2,5	82,62	5	227
2,42	85,04	5	232
2,42	87,46	5	237
2,42	89,88	5	242
2,42	92,3	5	247
2,42	94,72	5	252
2,42	97,14	5	257
2,42	99,56	5	262
2,42	101,98	5	267
2,5	104,48	5	272
2,5	106,98	5	277
2,5	109,48	5	282
2,33	111,81	5	287
2,5	114,31	5	292
2,58	116,89	5	297
2,5	119,39	5	302
3,25	122,64	7	309

Tabla V.8. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 1, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,75	125,39	5	314
2,75	128,14	5	319
2,75	130,89	5	324
2,75	133,64	5	329
2,83	136,47	5	334
2,75	139,22	5	339
2,75	141,97	5	344
2,75	144,72	5	349
2,83	147,55	5	354
2,92	150,47	5	359
3	153,47	5	364
17	170,47	28	392
16	186,47	27	419

## V.2. Datos Zona 2: Área degradada de la cárcava natural

### V.2.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro

Tabla V.9. Datos de campo del ensayo 1, zona 2, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
23,52	23,52	1	1
19,70	43,22	1	2
28,82	72,03	1	3
15,02	87,05	1	4
12,33	99,38	1	5
12,15	111,53	1	6
19,12	130,65	1	7
23,35	154,00	1	8
28,07	182,07	1	9

Tabla V.10. Datos de campo del ensayo 2, zona 2, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
41	41	1	1
27	68	1	2
63	131	1	3
71	202	1	4

Tabla V.11. Datos de campo del ensayo 3, zona 2, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
7,5	7,5	1	1
10,17	17,67	1	2
5,83	23,5	1	3
9	32,5	1	4
6,5	39	1	5
7	46	1	6
0	46	1	7
6	52	1	8
12	64	1	9
10	74	1	10
21	95	1	11
20	115	1	12
14	129	1	13
14	143	1	14
14	157	1	15
14	171	1	16
13	184	1	17

Tabla V.12. Datos de campo del ensayo 4, zona 2, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,00	0,00	0,00	0,00
0,57	0,57	1,00	1,00
2,08	2,65	1,00	2,00
2,13	4,78	1,00	3,00
2,57	7,35	1,00	4,00
2,30	9,65	1,00	5,00
2,63	12,28	1,00	6,00
4,63	16,92	1,00	7,00
3,98	20,90	1,00	8,00
4,75	25,65	1,00	9,00
3,82	29,47	1,00	10,00
5,08	34,55	1,00	11,00
4,60	39,15	1,00	12,00
4,08	43,23	1,00	13,00
4,62	47,85	1,00	14,00
3,85	51,70	1,00	15,00
5,43	57,13	1,00	16,00

Tabla V.12. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 2, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
7,78	64,92	1,00	17,00
8,67	73,58	1,00	18,00
9,10	82,68	1,00	19,00
9,05	91,73	1,00	20,00
8,60	100,33	1,00	21,00
8,07	108,40	1,00	22,00
11,25	119,65	1,00	23,00
11,27	130,92	1,00	24,00

### V.2.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro

Tabla V.13. Datos de campo del ensayo 1, zona 2, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,17	2,17	7	7
0,35	2,52	1	8
0,75	3,27	1	9
4,27	7,53	1	10
4,55	12,08	1	11
20,08	32,17	1	12
20,65	52,82	1	13
12,53	65,35	1	14
12,62	77,97	1	15
21,6	99,57	1	16
16,97	116,53	1	17
17,97	134,5	1	18
30,38	164,88	1	19
29,85	194,73	1	20

Tabla V.14. Datos de campo del ensayo 2, zona 2, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
23,7	23,7	1	1
76,3	100	1	2
55	155	1	3
52	207	1	4

Tabla V.15. Datos de campo del ensayo 3, zona 2, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,18	2,18	1	1
1,9	4,08	1	2
1,93	6,02	1	3
8,33	14,35	1	4
14,42	28,77	1	5
10,48	39,25	1	6
10,67	49,92	1	7
11,13	61,05	1	8
11,95	73	1	9
13,75	86,75	1	10
13,08	99,83	1	11
12,17	112	1	12
13,22	125,22	1	13
13,95	139,17	1	14

Tabla V.16. Datos de campo del ensayo 4, zona 2, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
4,73	4,73	1	1
9,95	14,68	1	2
15,82	30,5	1	3
24,5	55	1	4
28	83	1	5
56	139	1	6

### V.3. Datos Zona 3: Zona de bosque restaurado de pino

#### V.3.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro

Tabla V.17. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,12	0,12	5,00	5,00
0,38	0,50	5,00	10,00
0,17	0,67	5,00	15,00
0,33	1,00	5,00	20,00
0,77	1,77	5,00	25,00

Tabla V.17. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,53	2,30	5,00	30,00
0,97	3,27	5,00	35,00
0,77	4,03	5,00	40,00
0,83	4,87	5,00	45,00
0,95	5,82	5,00	50,00
1,12	6,93	5,00	55,00
0,88	7,82	5,00	60,00
0,72	8,53	5,00	65,00
0,97	9,50	5,00	70,00
0,93	10,43	5,00	75,00
0,72	11,15	5,00	80,00
0,93	12,08	5,00	85,00
0,93	13,02	5,00	90,00
1,02	14,03	5,00	95,00
0,67	14,70	5,00	100,00
0,87	15,57	5,00	105,00
0,87	16,43	5,00	110,00
0,82	17,25	5,00	115,00
1,17	18,42	5,00	120,00
1,28	19,70	5,00	125,00
2,15	21,85	5,00	130,00
1,45	23,30	5,00	135,00
1,18	24,48	5,00	140,00
1,10	25,58	5,00	145,00
1,70	27,28	5,00	150,00
1,65	28,93	5,00	155,00
1,93	30,87	5,00	160,00
2,23	33,10	5,00	165,00
2,37	35,47	5,00	170,00
2,32	37,78	5,00	175,00
2,17	39,95	5,00	180,00
1,47	41,42	5,00	185,00
1,63	43,05	5,00	190,00
1,02	44,07	5,00	195,00
1,67	45,73	5,00	200,00
1,42	47,15	5,00	205,00
2,50	49,65	5,00	210,00
1,83	51,48	5,00	215,00

Tabla V.17. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,80	53,28	5,00	220,00
2,25	55,53	5,00	225,00
2,35	57,88	5,00	230,00
2,40	60,28	5,00	235,00
2,15	62,43	5,00	240,00
2,27	64,70	5,00	245,00
2,80	67,50	5,00	250,00
3,13	70,63	5,00	255,00
2,93	73,57	5,00	260,00
3,22	76,78	5,00	265,00
2,20	78,98	5,00	270,00
1,72	80,70	5,00	275,00
1,43	82,13	5,00	280,00
3,20	85,33	5,00	285,00
2,35	87,68	5,00	290,00
2,68	90,37	5,00	295,00
2,38	92,75	5,00	300,00
2,63	95,38	5,00	305,00
3,23	98,62	5,00	310,00
2,28	100,90	5,00	315,00
2,85	103,75	5,00	320,00
3,20	106,95	5,00	325,00
2,82	109,77	5,00	330,00
3,05	112,82	5,00	335,00
3,27	116,08	5,00	340,00
4,05	120,13	5,00	345,00
4,23	124,37	5,00	350,00
3,37	127,73	5,00	355,00
4,88	132,62	5,00	360,00
3,23	135,85	5,00	365,00
3,72	139,57	5,00	370,00
5,20	144,77	5,00	375,00
4,18	148,95	5,00	380,00
2,73	151,68	5,00	385,00
2,17	153,85	5,00	390,00
2,32	156,17	5,00	395,00
1,90	158,07	5,00	400,00
3,07	161,13	5,00	405,00

Tabla V.17. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,85	163,98	5,00	410,00
2,47	166,45	5,00	415,00
2,63	169,08	5,00	420,00
3,08	172,17	5,00	425,00
2,87	175,03	5,00	430,00
3,38	178,42	5,00	435,00
2,27	180,68	5,00	440,00
2,13	182,82	5,00	445,00
2,43	185,25	5,00	450,00
2,50	187,75	5,00	455,00
2,62	190,37	5,00	460,00
3,70	194,07	5,00	465,00
3,22	197,28	5,00	470,00
3,63	200,92	5,00	475,00
3,18	204,10	5,00	480,00
4,78	208,88	7,00	487,00
3,33	212,22	5,00	492,00
2,65	214,87	5,00	497,00
2,47	217,33	5,00	502,00
2,30	219,63	5,00	507,00
3,45	223,08	6,00	513,00
3,17	226,25	5,00	518,00
2,87	229,12	5,00	523,00
2,97	232,08	5,00	528,00
3,12	235,20	5,00	533,00
3,83	239,03	6,00	539,00

Tabla V.18. Datos de campo del ensayo 2, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,68	0,68	5,00	5,00
0,95	1,63	5,00	10,00
1,80	3,43	5,00	15,00
3,78	7,22	5,00	20,00
2,17	9,38	5,00	25,00
2,72	12,10	5,00	30,00
2,15	14,25	5,00	35,00
3,27	17,52	5,00	40,00

Tabla V.18. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
3,15	20,67	5,00	45,00
3,32	23,98	5,00	50,00
3,23	27,22	5,00	55,00
3,47	30,68	5,00	60,00
4,38	35,07	5,00	65,00
4,03	39,10	5,00	70,00
3,53	42,63	5,00	75,00
3,98	46,62	5,00	80,00
4,23	50,85	5,00	85,00
4,27	55,12	5,00	90,00
4,38	59,50	5,00	95,00
4,45	63,95	5,00	100,00
4,55	68,50	5,00	105,00
3,58	72,08	5,00	110,00
2,38	74,47	5,00	115,00
2,95	77,42	5,00	120,00
3,25	80,67	5,00	125,00
3,03	83,70	5,00	130,00
2,93	86,63	5,00	135,00
3,32	89,95	5,00	140,00
3,18	93,13	5,00	145,00
3,07	96,20	5,00	150,00
3,13	99,33	5,00	155,00
3,82	103,15	5,00	160,00
3,35	106,50	5,00	165,00
3,60	110,10	5,00	170,00
3,80	113,90	5,00	175,00
3,87	117,77	5,00	180,00
3,28	121,05	5,00	185,00
3,65	124,70	5,00	190,00
2,47	127,17	5,00	195,00
2,95	130,12	5,00	200,00
3,13	133,25	5,00	205,00
3,05	136,30	5,00	210,00
3,30	139,60	5,00	215,00
3,17	142,77	5,00	220,00
2,70	145,47	5,00	225,00
3,50	148,97	5,00	230,00

Tabla V.18. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,97	151,93	5,00	235,00
3,20	155,13	5,00	240,00
3,07	158,20	5,00	245,00
2,88	161,08	5,00	250,00
3,38	164,47	5,00	255,00
3,82	168,28	5,00	260,00
3,93	172,22	5,00	265,00
2,88	175,10	5,00	270,00
2,97	178,07	5,00	275,00
2,75	180,82	5,00	280,00
2,42	183,23	5,00	285,00
3,00	186,23	5,00	290,00
2,85	189,08	5,00	295,00
3,25	192,33	5,00	300,00
2,80	195,13	5,00	305,00
2,83	197,97	5,00	310,00
3,25	201,22	5,00	315,00
7,02	208,23	10,00	325,00
2,98	211,22	5,00	330,00

Tabla V.19. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,22	0,22	5,00	5,00
0,12	0,33	5,00	10,00
0,22	0,55	5,00	15,00
0,23	0,78	5,00	20,00
0,22	1,00	5,00	25,00
0,32	1,32	5,00	30,00
0,38	1,70	5,00	35,00
0,32	2,02	5,00	40,00
0,38	2,40	5,00	45,00
0,63	3,03	5,00	50,00
0,42	3,45	5,00	55,00
0,52	3,97	5,00	60,00
0,73	4,70	5,00	65,00
0,63	5,33	5,00	70,00
0,82	6,15	5,00	75,00

Tabla V.19. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,68	6,83	5,00	80,00
0,85	7,68	5,00	85,00
1,10	8,78	5,00	90,00
0,63	9,42	5,00	95,00
0,98	10,40	5,00	100,00
1,42	11,82	5,00	105,00
1,02	12,83	5,00	110,00
0,78	13,62	5,00	115,00
0,67	14,28	5,00	120,00
0,93	15,22	5,00	125,00
0,83	16,05	5,00	130,00
0,58	16,63	5,00	135,00
1,08	17,72	5,00	140,00
0,68	18,40	5,00	145,00
0,77	19,17	5,00	150,00
0,72	19,88	5,00	155,00
0,80	20,68	5,00	160,00
1,37	22,05	5,00	165,00
0,77	22,82	5,00	170,00
1,22	24,03	5,00	175,00
1,03	25,07	5,00	180,00
1,47	26,53	5,00	185,00
0,97	27,50	5,00	190,00
1,38	28,88	5,00	195,00
1,32	30,20	5,00	200,00
0,98	31,18	5,00	205,00
1,12	32,30	5,00	210,00
0,85	33,15	5,00	215,00
0,88	34,03	5,00	220,00
0,98	35,02	5,00	225,00
1,33	36,35	5,00	230,00
1,30	37,65	5,00	235,00
1,08	38,73	5,00	240,00
1,50	40,23	5,00	245,00
1,43	41,67	5,00	250,00
1,17	42,83	5,00	255,00
1,82	44,65	5,00	260,00
1,25	45,90	5,00	265,00

Tabla V.19. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,77	47,67	5,00	270,00
1,93	49,60	5,00	275,00
2,15	51,75	5,00	280,00
1,87	53,62	5,00	285,00
2,10	55,72	5,00	290,00
2,63	58,35	5,00	295,00
1,43	59,78	5,00	300,00
2,03	61,82	5,00	305,00
1,48	63,30	5,00	310,00
1,23	64,53	5,00	315,00
1,00	65,53	5,00	320,00
1,10	66,63	5,00	325,00
1,08	67,72	5,00	330,00
3,30	71,02	10,00	340,00
1,27	72,28	5,00	345,00
1,52	73,80	5,00	350,00
1,77	75,57	5,00	355,00
1,38	76,95	5,00	360,00
3,83	80,78	10,00	370,00
2,02	82,80	5,00	375,00
2,00	84,80	5,00	380,00
2,02	86,82	5,00	385,00
2,00	88,82	5,00	390,00
2,05	90,87	5,00	395,00
2,05	92,92	5,00	400,00
2,13	95,05	5,00	405,00
1,73	96,78	5,00	410,00
1,68	98,47	5,00	415,00
1,65	100,12	5,00	420,00
1,68	101,80	5,00	425,00
3,93	105,73	10,00	435,00
1,32	107,05	5,00	440,00
2,10	109,15	5,00	445,00
2,27	111,42	5,00	450,00
2,02	113,43	5,00	455,00
4,05	117,48	10,00	465,00
2,32	119,80	5,00	470,00
2,10	121,90	5,00	475,00

Tabla V.19. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,67	123,57	5,00	480,00
1,40	124,97	5,00	485,00
1,93	126,90	5,00	490,00
1,45	128,35	5,00	495,00
1,85	130,20	5,00	500,00
1,97	132,17	5,00	505,00
2,03	134,20	5,00	510,00
2,10	136,30	5,00	515,00
2,42	138,72	5,00	520,00
1,12	139,83	3,00	523,00
1,98	141,82	5,00	528,00
2,07	143,88	5,00	533,00
2,02	145,90	5,00	538,00

Tabla V.20. Datos de campo del ensayo 4, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,15	0,15	5,00	5,00
0,35	0,50	5,00	10,00
0,25	0,75	5,00	15,00
0,78	1,53	5,00	20,00
0,50	2,03	5,00	25,00
0,92	2,95	5,00	30,00
1,15	4,10	5,00	35,00
1,83	5,93	5,00	40,00
2,27	8,20	5,00	45,00
2,82	11,02	5,00	50,00
2,27	13,28	5,00	55,00
2,08	15,37	5,00	60,00
1,92	17,28	5,00	65,00
2,67	19,95	5,00	70,00
2,97	22,92	5,00	75,00
1,78	24,70	5,00	80,00
4,40	29,10	5,00	85,00
2,85	31,95	5,00	90,00
2,60	34,55	5,00	95,00
2,93	37,48	5,00	100,00
3,65	41,13	5,00	105,00

Tabla V.20. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,68	43,82	5,00	110,00
2,97	46,78	5,00	115,00
2,47	49,25	5,00	120,00
2,25	51,50	5,00	125,00
3,30	54,80	5,00	130,00
2,83	57,63	5,00	135,00
3,72	61,35	5,00	140,00
3,35	64,70	5,00	145,00
3,07	67,77	5,00	150,00
2,67	70,43	5,00	155,00
2,65	73,08	5,00	160,00
2,63	75,72	5,00	165,00
2,40	78,12	5,00	170,00
2,70	80,82	5,00	175,00
2,57	83,38	5,00	180,00
2,90	86,28	5,00	185,00
2,60	88,88	5,00	190,00
3,37	92,25	5,00	195,00
3,58	95,83	5,00	200,00
2,82	98,65	5,00	205,00
2,38	101,03	5,00	210,00
3,47	104,50	5,00	215,00
3,17	107,67	5,00	220,00
2,53	110,20	5,00	225,00
2,08	112,28	5,00	230,00
2,88	115,17	5,00	235,00
2,92	118,08	5,00	240,00
2,53	120,62	5,00	245,00
5,27	125,88	10,00	255,00
2,47	128,35	5,00	260,00
3,22	131,57	5,00	265,00
2,68	134,25	5,00	270,00
3,42	137,67	5,00	275,00
2,77	140,43	5,00	280,00
2,63	143,07	5,00	285,00
2,78	145,85	5,00	290,00
4,27	150,12	5,00	295,00
3,37	153,48	5,00	300,00

Tabla V.20. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 3, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,60	156,08	5,00	305,00
2,57	158,65	5,00	310,00
3,25	161,90	5,00	315,00
2,72	164,62	5,00	320,00
3,50	168,12	5,00	325,00
3,03	171,15	5,00	330,00
3,45	174,60	5,00	335,00
3,37	177,97	5,00	340,00
2,83	180,80	5,00	345,00
4,37	185,17	5,00	350,00
3,52	188,68	5,00	355,00
3,57	192,25	5,00	360,00
3,73	195,98	5,00	365,00
3,30	199,28	5,00	370,00
2,87	202,15	5,00	375,00
3,68	205,83	5,00	380,00
2,78	208,62	5,00	385,00
2,63	211,25	5,00	390,00

### V.3.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro

Tabla V.21. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,15	0,15	5,00	5,00
0,10	0,25	5,00	10,00
0,13	0,38	5,00	15,00
0,13	0,52	5,00	20,00
0,37	0,88	5,00	25,00
0,18	1,07	5,00	30,00
0,20	1,27	5,00	35,00
0,27	1,53	5,00	40,00
0,32	1,85	5,00	45,00
0,28	2,13	5,00	50,00
0,28	2,42	5,00	55,00
0,33	2,75	5,00	60,00
0,40	3,15	5,00	65,00
0,48	3,63	5,00	70,00

Tabla V.21. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,40	4,03	5,00	75,00
0,40	4,43	5,00	80,00
0,35	4,78	5,00	85,00
0,40	5,18	5,00	90,00
0,43	5,62	5,00	95,00
0,50	6,12	5,00	100,00
0,47	6,58	5,00	105,00
0,52	7,10	5,00	110,00
0,63	7,73	5,00	115,00
0,68	8,42	5,00	120,00
0,40	8,82	5,00	125,00
0,60	9,42	5,00	130,00
0,78	10,20	5,00	135,00
0,53	10,73	5,00	140,00
0,65	11,38	5,00	145,00
0,73	12,12	5,00	150,00
0,73	12,85	5,00	155,00
0,77	13,62	5,00	160,00
0,75	14,37	5,00	165,00
0,70	15,07	5,00	170,00
1,02	16,08	5,00	175,00
0,92	17,00	5,00	180,00
0,80	17,80	5,00	185,00
0,92	18,72	5,00	190,00
0,73	19,45	5,00	195,00
0,62	20,07	5,00	200,00
0,77	20,83	5,00	205,00
0,72	21,55	5,00	210,00
1,08	22,63	5,00	215,00
0,68	23,32	5,00	220,00
0,87	24,18	5,00	225,00
0,90	25,08	5,00	230,00
0,82	25,90	5,00	235,00
0,42	26,32	2,00	237,00
0,88	27,20	5,00	242,00
0,87	28,07	5,00	247,00
1,90	29,97	5,00	252,00
0,87	30,83	5,00	257,00

Tabla V.21. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,67	31,50	2,00	259,00
0,80	32,30	5,00	264,00
0,88	33,18	5,00	269,00
0,97	34,15	5,00	274,00
1,07	35,22	5,00	279,00
1,15	36,37	5,00	284,00
0,80	37,17	5,00	289,00
0,97	38,13	5,00	294,00
1,08	39,22	5,00	299,00
1,40	40,62	5,00	304,00
1,07	41,68	5,00	309,00
1,02	42,70	5,00	314,00
0,85	43,55	5,00	319,00
1,23	44,78	5,00	324,00
1,25	46,03	5,00	329,00
1,33	47,37	5,00	334,00
1,00	48,37	5,00	339,00
0,93	49,30	5,00	344,00
1,05	50,35	5,00	349,00
1,12	51,47	5,00	354,00
1,17	52,63	5,00	359,00
1,20	53,83	5,00	364,00
1,25	55,08	5,00	369,00
1,28	56,37	5,00	374,00
1,35	57,72	5,00	379,00
0,83	58,55	5,00	384,00
0,98	59,53	5,00	389,00
2,12	61,65	5,00	394,00
0,35	62,00	1,00	395,00
1,00	63,00	3,00	398,00
1,07	64,07	5,00	403,00
0,95	65,02	5,00	408,00
1,02	66,03	5,00	413,00
1,12	67,15	5,00	418,00
0,53	67,68	1,00	419,00
0,87	68,55	5,00	424,00
0,93	69,48	5,00	429,00
0,98	70,47	5,00	434,00

Tabla V.21. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,18	71,65	2,00	436,00
0,85	72,50	5,00	441,00
0,83	73,33	5,00	446,00
1,05	74,38	5,00	451,00
1,27	75,65	5,00	456,00
0,98	76,63	5,00	461,00
0,97	77,60	5,00	466,00
1,15	78,75	5,00	471,00
1,13	79,88	5,00	476,00
1,33	81,22	5,00	481,00
0,67	81,88	2,00	483,00
1,30	83,18	5,00	488,00
1,18	84,37	5,00	493,00
1,02	85,38	5,00	498,00
1,25	86,63	5,00	503,00
1,30	87,93	5,00	508,00
1,32	89,25	5,00	513,00
1,03	90,28	5,00	518,00
1,05	91,33	5,00	523,00
1,78	93,12	5,00	528,00
1,23	94,35	5,00	533,00
1,45	95,80	5,00	538,00
1,13	96,93	5,00	543,00
1,12	98,05	5,00	548,00
1,12	99,17	5,00	553,00
1,40	100,57	5,00	558,00
1,23	101,80	5,00	563,00
1,08	102,88	5,00	568,00
1,23	104,12	5,00	573,00
1,45	105,57	5,00	578,00
1,50	107,07	6,00	584,00
1,15	108,22	5,00	589,00
1,05	109,27	5,00	594,00
1,37	110,63	5,00	599,00
1,43	112,07	5,00	604,00
1,35	113,42	5,00	609,00
1,23	114,65	5,00	614,00
0,92	115,57	5,00	619,00

Tabla V.22. Datos de campo del ensayo 2, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,19	0,19	5,00	5,00
0,42	0,60	5,00	10,00
0,85	1,45	5,00	15,00
1,63	3,08	5,00	20,00
2,97	6,05	5,00	25,00
3,92	9,97	5,00	30,00
5,67	15,63	5,00	35,00
7,48	23,12	5,00	40,00
7,10	30,22	5,00	45,00
9,73	39,95	5,00	50,00
10,42	50,37	5,00	55,00
11,88	62,25	5,00	60,00
11,25	73,50	5,00	65,00
13,10	86,60	5,00	70,00
2,70	89,30	1,00	71,00
13,32	102,62	5,00	76,00
13,07	115,68	5,00	81,00
12,93	128,62	5,00	86,00
13,15	141,77	5,00	91,00
13,25	155,02	5,00	96,00
13,75	168,77	5,00	101,00
13,68	182,45	5,00	106,00
13,25	195,70	5,00	111,00
13,95	209,65	5,00	116,00
13,35	223,00	5,00	121,00
13,70	236,70	5,00	126,00
13,87	250,57	5,00	131,00

Tabla V.23. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,27	0,27	10,00	10,00
0,15	0,42	5,00	15,00
0,07	0,48	5,00	20,00
0,07	0,55	5,00	25,00
0,10	0,65	5,00	30,00
0,07	0,72	5,00	35,00
0,17	0,88	5,00	40,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,10	0,98	5,00	45,00
0,18	1,17	5,00	50,00
0,22	1,38	5,00	55,00
0,12	1,50	5,00	60,00
0,13	1,63	5,00	65,00
0,13	1,77	5,00	70,00
0,17	1,93	5,00	75,00
0,17	2,10	5,00	80,00
0,18	2,28	5,00	85,00
0,15	2,43	5,00	90,00
0,17	2,60	5,00	95,00
0,18	2,78	5,00	100,00
0,20	2,98	5,00	105,00
0,20	3,18	5,00	110,00
0,15	3,33	5,00	115,00
0,32	3,65	5,00	120,00
0,40	4,05	5,00	125,00
0,32	4,37	5,00	130,00
0,28	4,65	5,00	135,00
0,30	4,95	5,00	140,00
0,35	5,30	5,00	145,00
0,22	5,52	5,00	150,00
0,38	5,90	5,00	155,00
0,58	6,48	5,00	160,00
0,37	6,85	5,00	165,00
0,38	7,23	5,00	170,00
0,25	7,48	5,00	175,00
0,28	7,77	5,00	180,00
0,28	8,05	5,00	185,00
0,38	8,43	5,00	190,00
0,38	8,82	5,00	195,00
0,43	9,25	5,00	200,00
0,23	9,48	5,00	205,00
0,43	9,92	5,00	210,00
0,28	10,20	5,00	215,00
0,33	10,53	5,00	220,00
0,38	10,92	5,00	225,00
0,40	11,32	5,00	230,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,35	11,67	5,00	235,00
0,45	12,12	5,00	240,00
0,42	12,53	5,00	245,00
0,47	13,00	5,00	250,00
0,38	13,38	5,00	255,00
0,40	13,78	5,00	260,00
0,43	14,22	5,00	265,00
0,47	14,68	5,00	270,00
0,38	15,07	5,00	275,00
0,40	15,47	5,00	280,00
0,50	15,97	5,00	285,00
0,45	16,42	5,00	290,00
0,48	16,90	5,00	295,00
0,53	17,43	5,00	300,00
0,43	17,87	5,00	305,00
0,38	18,25	5,00	310,00
0,50	18,75	5,00	315,00
0,45	19,20	5,00	320,00
0,53	19,73	5,00	325,00
0,37	20,10	2,00	327,00
0,47	20,57	5,00	332,00
0,52	21,08	5,00	337,00
0,57	21,65	5,00	342,00
0,42	22,07	5,00	347,00
0,50	22,57	5,00	352,00
0,42	22,98	5,00	357,00
0,45	23,43	5,00	362,00
0,55	23,98	5,00	367,00
0,43	24,42	5,00	372,00
0,57	24,98	5,00	377,00
0,73	25,72	6,00	383,00
0,50	26,22	5,00	388,00
0,60	26,82	5,00	393,00
0,47	27,28	5,00	398,00
0,57	27,85	5,00	403,00
0,48	28,33	5,00	408,00
0,67	29,00	5,00	413,00
0,62	29,62	5,00	418,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,70	30,32	5,00	423,00
0,53	30,85	5,00	428,00
0,37	31,22	3,00	431,00
0,78	32,00	5,00	436,00
0,45	32,45	5,00	441,00
0,63	33,08	5,00	446,00
0,55	33,63	5,00	451,00
0,62	34,25	5,00	456,00
0,55	34,80	5,00	461,00
0,72	35,52	5,00	466,00
0,70	36,22	5,00	471,00
0,87	37,08	5,00	476,00
0,68	37,77	5,00	481,00
0,58	38,35	5,00	486,00
0,60	38,95	5,00	491,00
0,70	39,65	5,00	496,00
0,72	40,37	5,00	501,00
0,63	41,00	5,00	506,00
0,73	41,73	5,00	511,00
0,65	42,38	5,00	516,00
0,68	43,07	5,00	521,00
0,70	43,77	5,00	526,00
0,55	44,32	5,00	531,00
0,62	44,93	5,00	536,00
0,75	45,68	5,00	541,00
0,77	46,45	5,00	546,00
0,67	47,12	5,00	551,00
0,78	47,90	5,00	556,00
0,90	48,80	6,00	562,00
0,60	49,40	3,00	565,00
0,78	50,18	5,00	570,00
0,72	50,90	5,00	575,00
0,63	51,53	5,00	580,00
0,78	52,32	5,00	585,00
0,83	53,15	5,00	590,00
0,70	53,85	5,00	595,00
0,77	54,62	5,00	600,00
0,83	55,45	5,00	605,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,77	56,22	5,00	610,00
1,23	57,45	8,00	618,00
0,78	58,23	5,00	623,00
0,85	59,08	5,00	628,00
0,72	59,80	5,00	633,00
0,78	60,58	5,00	638,00
0,70	61,28	5,00	643,00
0,88	62,17	5,00	648,00
0,90	63,07	5,00	653,00
0,85	63,92	5,00	658,00
1,28	65,20	7,00	665,00
0,82	66,02	5,00	670,00
0,72	66,73	5,00	675,00
0,75	67,48	5,00	680,00
0,78	68,27	5,00	685,00
0,85	69,12	5,00	690,00
0,72	69,83	5,00	695,00
0,90	70,73	5,00	700,00
0,92	71,65	5,00	705,00
0,82	72,47	5,00	710,00
0,80	73,27	5,00	715,00
0,77	74,03	5,00	720,00
0,88	74,92	5,00	725,00
0,78	75,70	5,00	730,00
0,87	76,57	5,00	735,00
0,85	77,42	5,00	740,00
0,73	78,15	5,00	745,00
0,98	79,13	5,00	750,00
1,02	80,15	5,00	755,00
1,05	81,20	5,00	760,00
0,93	82,13	5,00	765,00
0,78	82,92	5,00	770,00
0,83	83,75	5,00	775,00
0,70	84,45	5,00	780,00
0,97	85,42	5,00	785,00
0,82	86,23	5,00	790,00
0,87	87,10	5,00	795,00
0,88	87,98	5,00	800,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,05	89,03	5,00	805,00
0,83	89,87	5,00	810,00
0,62	90,48	5,00	815,00
1,03	91,52	5,00	820,00
0,80	92,32	5,00	825,00
1,03	93,35	5,00	830,00
0,78	94,13	5,00	835,00
0,97	95,10	5,00	840,00
0,92	96,02	5,00	845,00
1,50	97,52	5,00	850,00
1,00	98,52	5,00	855,00
0,82	99,33	5,00	860,00
0,80	100,13	5,00	865,00
0,95	101,08	5,00	870,00
1,23	102,32	5,00	875,00
0,73	103,05	5,00	880,00
1,03	104,08	5,00	885,00
1,15	105,23	5,00	890,00
1,07	106,30	5,00	895,00
1,23	107,53	5,00	900,00
0,98	108,52	5,00	905,00
1,03	109,55	5,00	910,00
0,80	110,35	5,00	915,00
1,02	111,37	5,00	920,00
0,97	112,33	5,00	925,00
0,90	113,23	5,00	930,00
1,00	114,23	5,00	935,00
1,10	115,33	5,00	940,00
1,35	116,68	5,00	945,00
0,87	117,55	4,00	949,00
0,90	118,45	5,00	954,00
0,85	119,30	5,00	959,00
0,90	120,20	5,00	964,00
0,93	121,13	5,00	969,00
0,92	122,05	5,00	974,00
0,97	123,02	5,00	979,00
1,02	124,03	5,00	984,00
1,10	125,13	5,00	989,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,02	126,15	5,00	994,00
1,08	127,23	5,00	999,00
1,10	128,33	5,00	1004,00
0,98	129,32	5,00	1009,00
0,95	130,27	5,00	1014,00
0,95	131,22	5,00	1019,00
1,02	132,23	5,00	1024,00
1,05	133,28	5,00	1029,00
1,05	134,33	5,00	1034,00
1,57	135,90	7,00	1041,00
1,12	137,02	5,00	1046,00
0,67	137,68	2,00	1048,00
1,07	138,75	5,00	1053,00
0,97	139,72	5,00	1058,00
0,95	140,67	5,00	1063,00
1,07	141,73	5,00	1068,00
1,00	142,73	5,00	1073,00
1,03	143,77	5,00	1078,00
1,02	144,78	5,00	1083,00
1,02	145,80	5,00	1088,00
0,98	146,78	5,00	1093,00
0,98	147,77	5,00	1098,00
1,07	148,83	5,00	1103,00
1,02	149,85	5,00	1108,00
1,00	150,85	5,00	1113,00
1,02	151,87	5,00	1118,00
1,00	152,87	5,00	1123,00
1,03	153,90	5,00	1128,00
1,02	154,92	5,00	1133,00
1,00	155,92	5,00	1138,00
1,10	157,02	6,00	1144,00
1,03	158,05	5,00	1149,00
0,98	159,03	5,00	1154,00
1,02	160,05	5,00	1159,00
0,98	161,03	5,00	1164,00
1,02	162,05	5,00	1169,00
1,03	163,08	5,00	1174,00
1,02	164,10	5,00	1179,00

Tabla V.23. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,98	165,08	5,00	1184,00
1,00	166,08	5,00	1189,00
1,03	167,12	5,00	1194,00
1,02	168,13	5,00	1199,00
1,03	169,17	5,00	1204,00
0,98	170,15	5,00	1209,00
1,03	171,18	5,00	1214,00
0,98	172,17	5,00	1219,00
1,03	173,20	5,00	1224,00
1,05	174,25	5,00	1229,00
1,02	175,27	5,00	1234,00
1,03	176,30	5,00	1239,00
1,03	177,33	5,00	1244,00
1,03	178,37	5,00	1249,00
1,02	179,38	5,00	1254,00
1,03	180,42	5,00	1259,00
0,97	181,38	5,00	1264,00
1,02	182,40	5,00	1269,00
1,03	183,43	5,00	1274,00
1,00	184,43	5,00	1279,00

Tabla V.24. Datos de campo del ensayo 4, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,07	0,07	3,00	3,00
0,28	0,35	5,00	8,00
0,33	0,68	5,00	13,00
0,77	1,45	5,00	18,00
1,03	2,48	5,00	23,00
1,05	3,53	5,00	28,00
1,90	5,43	5,00	33,00
1,97	7,40	5,00	38,00
2,02	9,42	5,00	43,00
2,18	11,60	5,00	48,00
2,17	13,77	5,00	53,00
1,85	15,62	3,00	56,00
4,12	19,73	5,00	61,00
3,58	23,32	5,00	66,00

Tabla V.24. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 3, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
3,55	26,87	5,00	71,00
4,43	31,30	5,00	76,00
4,53	35,83	5,00	81,00
4,52	40,35	5,00	86,00
4,73	45,08	5,00	91,00
5,23	50,32	5,00	96,00
5,92	56,23	5,00	101,00
5,07	61,30	5,00	106,00
6,55	67,85	5,00	111,00
5,67	73,52	5,00	116,00
5,87	79,38	5,00	121,00
5,02	84,40	5,00	126,00
8,02	92,42	5,00	131,00
7,20	99,62	5,00	136,00
5,70	105,32	5,00	141,00
6,12	111,43	5,00	146,00
7,35	118,78	5,00	151,00
7,18	125,97	5,00	156,00
5,78	131,75	5,00	161,00
7,83	139,58	5,00	166,00
6,48	146,07	5,00	171,00
10,37	156,43	5,00	176,00
12,20	168,63	5,00	181,00
7,95	176,58	5,00	186,00
6,08	182,67	5,00	191,00
5,37	188,03	5,00	196,00
6,30	194,33	5,00	201,00
6,68	201,02	5,00	206,00
6,03	207,05	5,00	211,00
6,17	213,22	5,00	216,00
6,65	219,87	5,00	221,00
6,97	226,83	5,00	226,00
5,67	232,50	5,00	231,00
6,10	238,60	5,00	236,00

## V.4. Datos Zona 4: Zona de bosque natural de roble

### V.4.1. Infiltrómetro de 8 cm de diámetro

Tabla V.25. Datos de campo del ensayo 1, zona 4, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,25	0,25	5,00	5,00
0,25	0,50	5,00	10,00
0,42	0,92	5,00	15,00
0,42	1,33	5,00	20,00
0,37	1,70	5,00	25,00
0,42	2,12	5,00	30,00
0,35	2,47	5,00	35,00
0,37	2,83	5,00	40,00
0,53	3,37	5,00	45,00
0,62	3,98	5,00	50,00
0,40	4,38	5,00	55,00
7,62	12,00	1,00	56,00
5,42	17,42	1,00	57,00
11,30	28,72	4,00	61,00
5,40	34,12	1,00	62,00
6,23	40,35	1,00	63,00
6,20	46,55	1,00	64,00
5,87	52,42	1,00	65,00
6,20	58,62	1,00	66,00
5,33	63,95	1,00	67,00
7,22	71,17	1,00	68,00

Tabla V.26. Datos de campo del ensayo 2, zona 4, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,73	1,73	5,00	5,00
2,20	3,93	5,00	10,00
2,17	6,10	5,00	15,00
2,20	8,30	5,00	20,00
3,00	11,30	5,00	25,00
2,90	14,20	5,00	30,00
7,57	21,77	7,00	37,00
3,50	25,27	5,00	42,00
3,80	29,07	5,00	47,00

Tabla V.26. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 4, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
3,68	32,75	5,00	52,00
4,05	36,80	5,00	57,00
4,22	41,02	5,00	62,00
4,45	45,47	5,00	67,00
4,22	49,68	5,00	72,00
4,20	53,88	5,00	77,00
4,25	58,13	5,00	82,00
5,22	63,35	5,00	87,00
4,42	67,77	5,00	92,00
4,75	72,52	5,00	97,00
10,38	82,90	10,00	107,00
10,03	92,93	10,00	117,00
5,03	97,97	5,00	122,00
5,27	103,23	5,00	127,00

Tabla V.27. Datos de campo del ensayo 3, zona 4, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,80	1,80	10	10
21,18	22,98	10	20
18,78	41,76	5	25
19,63	61,4	5	30
28,96	90,36	5	35
12,41	102,78	2	37

Tabla V.28. Datos de campo del ensayo 4, zona 4, infiltrómetro 8 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
4,25	4,25	20,00	20,00
1,75	6,00	5,00	25,00
9,25	15,25	5,00	30,00
5,63	20,88	5,00	35,00
15,00	35,88	5,00	40,00
9,23	45,12	5,00	45,00
9,87	54,98	5,00	50,00
12,40	67,38	6,00	56,00
9,28	76,67	5,00	61,00
8,92	85,58	5,00	66,00
9,50	95,08	5,00	71,00

### V.4.2. Infiltrómetro de 30 cm de diámetro

Tabla V.29. Datos de campo del ensayo 1, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,07	0,07	1,00	1,00
0,02	0,08	1,00	2,00
0,07	0,15	1,00	3,00
0,05	0,20	1,00	4,00
0,08	0,28	1,00	5,00
0,05	0,33	1,00	6,00
0,03	0,37	1,00	7,00
0,03	0,40	1,00	8,00
0,22	0,62	1,00	9,00
0,10	0,72	1,00	10,00
0,08	0,80	1,00	11,00
0,05	0,85	1,00	12,00
0,08	0,93	1,00	13,00
0,07	1,00	1,00	14,00
0,07	1,07	1,00	15,00
0,05	1,12	1,00	16,00
0,05	1,17	1,00	17,00
0,07	1,23	1,00	18,00
0,08	1,32	1,00	19,00
0,07	1,38	1,00	20,00
0,08	1,47	1,00	21,00
0,08	1,55	1,00	22,00
0,07	1,62	1,00	23,00
0,15	1,77	1,00	24,00
0,07	1,83	1,00	25,00
0,07	1,90	1,00	26,00
0,05	1,95	1,00	27,00
0,08	2,03	1,00	28,00
0,08	2,12	1,00	29,00
0,13	2,25	1,00	30,00
0,08	2,33	1,00	31,00
0,08	2,42	1,00	32,00
0,12	2,53	1,00	33,00
0,10	2,63	1,00	34,00
0,57	3,20	1,00	35,00
0,22	3,42	1,00	36,00

Tabla V.29. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,18	3,60	1,00	37,00
0,10	3,70	1,00	38,00
0,10	3,80	1,00	39,00
0,07	3,87	1,00	40,00
0,23	4,10	1,00	41,00
0,13	4,23	1,00	42,00
0,10	4,33	1,00	43,00
0,13	4,47	1,00	44,00
0,10	4,57	1,00	45,00
0,13	4,70	1,00	46,00
0,10	4,80	1,00	47,00
0,08	4,88	1,00	48,00
0,20	5,08	2,00	50,00
0,18	5,27	1,00	51,00
0,12	5,38	1,00	52,00
0,12	5,50	1,00	53,00
0,25	5,75	1,00	54,00
0,22	5,97	1,00	55,00
0,20	6,17	1,00	56,00
0,15	6,32	1,00	57,00
0,08	6,40	1,00	58,00
0,15	6,55	1,00	59,00
0,22	6,77	1,00	60,00
0,10	6,87	1,00	61,00
0,30	7,17	1,00	62,00
0,15	7,32	1,00	63,00
0,42	7,73	1,00	64,00
0,30	8,03	1,00	65,00
0,30	8,33	1,00	66,00
0,20	8,53	1,00	67,00
0,23	8,77	1,00	68,00
0,20	8,97	1,00	69,00
0,23	9,20	1,00	70,00
0,22	9,42	1,00	71,00
0,32	9,73	1,00	72,00
0,23	9,97	1,00	73,00
0,22	10,18	1,00	74,00

Tabla V.29. Continuación. Datos de campo del ensayo 1, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,22	10,40	1,00	75,00
0,20	10,60	1,00	76,00
0,52	11,12	1,00	77,00
0,30	11,42	1,00	78,00
0,32	11,73	1,00	79,00
0,23	11,97	1,00	80,00
0,28	12,25	1,00	81,00
0,20	12,45	1,00	82,00
0,10	12,55	1,00	83,00
0,17	12,72	1,00	84,00
0,15	12,87	1,00	85,00
0,25	13,12	1,00	86,00
0,23	13,35	1,00	87,00
0,20	13,55	1,00	88,00
0,22	13,77	1,00	89,00
0,32	14,08	1,00	90,00
0,30	14,38	1,00	91,00
0,37	14,75	1,00	92,00
0,92	15,67	1,00	93,00
0,15	15,82	1,00	94,00
0,17	15,98	1,00	95,00
0,32	16,30	1,00	96,00
0,25	16,55	2,00	98,00
0,27	16,82	1,00	99,00
0,30	17,12	1,00	100,00
0,45	17,57	1,00	101,00
0,32	17,88	1,00	102,00
0,22	18,10	1,00	103,00
0,20	18,30	1,00	104,00
0,23	18,53	1,00	105,00
0,22	18,75	1,00	106,00
0,23	18,98	1,00	107,00
0,18	19,17	1,00	108,00
0,22	19,38	1,00	109,00
0,33	19,72	1,00	110,00
0,27	19,98	1,00	111,00
0,27	20,25	1,00	112,00

Tabla V.30. Datos de campo del ensayo 2, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,12	0,12	1,00	1,00
0,08	0,20	1,00	2,00
0,05	0,25	1,00	3,00
0,10	0,35	1,00	4,00
0,07	0,42	1,00	5,00
0,05	0,47	1,00	6,00
0,10	0,57	1,00	7,00
0,07	0,63	1,00	8,00
0,10	0,73	1,00	9,00
0,07	0,80	1,00	10,00
0,08	0,88	1,00	11,00
0,07	0,95	1,00	12,00
0,05	1,00	1,00	13,00
0,08	1,08	1,00	14,00
0,43	1,52	4,00	18,00
0,45	1,97	5,00	23,00
0,73	2,70	5,00	28,00
0,43	3,13	5,00	33,00
0,42	3,55	5,00	38,00
0,47	4,02	5,00	43,00
0,50	4,52	5,00	48,00
0,48	5,00	5,00	53,00
0,52	5,52	5,00	58,00
0,50	6,02	5,00	63,00
0,62	6,63	5,00	68,00
0,62	7,25	5,00	73,00
0,47	7,72	2,00	75,00
0,57	8,28	5,00	80,00
0,63	8,92	5,00	85,00
0,63	9,55	5,00	90,00
0,62	10,17	5,00	95,00
0,63	10,80	5,00	100,00
0,67	11,47	5,00	105,00
0,85	12,32	5,00	110,00
0,62	12,93	5,00	115,00
0,62	13,55	5,00	120,00
0,62	14,17	5,00	125,00
0,65	14,82	5,00	130,00

Tabla V.30. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,63	15,45	5,00	135,00
0,67	16,12	5,00	140,00
0,48	16,60	1,00	141,00
0,75	17,35	5,00	146,00
1,38	18,73	10,00	156,00
1,42	20,15	10,00	166,00
1,47	21,62	10,00	176,00
0,65	22,27	5,00	181,00
0,57	22,83	1,00	182,00
0,78	23,62	5,00	187,00
1,38	25,00	10,00	197,00
1,50	26,50	10,00	207,00
1,52	28,02	10,00	217,00
0,77	28,78	2,00	219,00
1,50	30,28	10,00	229,00
1,47	31,75	10,00	239,00
1,57	33,32	10,00	249,00
1,60	34,92	10,00	259,00
1,78	36,70	10,00	269,00
0,77	37,47	1,00	270,00
1,62	39,08	10,00	280,00
1,57	40,65	10,00	290,00
1,68	42,33	10,00	300,00
1,85	44,18	10,00	310,00
1,67	45,85	7,00	317,00
1,57	47,42	10,00	327,00
1,67	49,08	10,00	337,00
1,87	50,95	10,00	347,00
1,63	52,58	10,00	357,00
2,70	55,28	10,00	367,00
0,90	56,18	2,00	369,00
0,83	57,02	5,00	374,00
1,98	59,00	10,00	384,00
1,72	60,72	10,00	394,00
2,25	62,97	10,00	404,00
0,75	63,72	3,00	407,00
0,85	64,57	5,00	412,00
5,07	69,63	30,00	442,00

Tabla V.30. Continuación. Datos de campo del ensayo 2, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,83	71,47	10,00	452,00
1,97	73,43	10,00	462,00
1,02	74,45	5,00	467,00
1,60	76,05	7,00	474,00
1,05	77,10	5,00	479,00
1,93	79,03	10,00	489,00
2,30	81,33	10,00	499,00
1,72	83,05	7,00	506,00
3,75	86,80	20,00	526,00
3,93	90,73	20,00	546,00
2,02	92,75	10,00	556,00
2,15	94,90	10,00	566,00
3,90	98,80	20,00	586,00
4,12	102,92	20,00	606,00
2,25	105,17	10,00	616,00
2,25	107,42	10,00	626,00
10,65	118,07	50,00	676,00
2,02	120,08	9,00	685,00
10,25	130,33	50,00	735,00
0,88	131,22	4,00	739,00
10,82	142,03	50,00	789,00

Tabla V.31. Datos de campo del ensayo 3, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,58	0,58	1,00	1,00
0,20	0,78	5,00	6,00
0,25	1,03	5,00	11,00
0,10	1,13	5,00	16,00
0,15	1,28	5,00	21,00
0,12	1,40	5,00	26,00
0,15	1,55	1,00	27,00
0,17	1,72	1,00	28,00
0,17	1,88	1,00	29,00
0,20	2,08	1,00	30,00
0,18	2,27	1,00	31,00
0,23	2,50	1,00	32,00
0,53	3,03	1,00	33,00

Tabla V.31. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,10	3,13	1,00	34,00
0,12	3,25	1,00	35,00
0,23	3,48	1,00	36,00
0,15	3,63	1,00	37,00
0,23	3,87	1,00	38,00
0,17	4,03	1,00	39,00
0,22	4,25	1,00	40,00
0,18	4,43	1,00	41,00
0,20	4,63	1,00	42,00
0,27	4,90	1,00	43,00
0,35	5,25	1,00	44,00
0,23	5,48	1,00	45,00
0,30	5,78	1,00	46,00
0,23	6,02	1,00	47,00
0,25	6,27	1,00	48,00
0,32	6,58	1,00	49,00
0,35	6,93	1,00	50,00
0,37	7,30	1,00	51,00
0,40	7,70	1,00	52,00
0,28	7,98	1,00	53,00
0,27	8,25	1,00	54,00
0,28	8,53	1,00	55,00
0,28	8,82	1,00	56,00
0,27	9,08	1,00	57,00
0,35	9,43	1,00	58,00
0,25	9,68	1,00	59,00
0,42	10,10	1,00	60,00
0,33	10,43	1,00	61,00
0,37	10,80	1,00	62,00
0,32	11,12	1,00	63,00
0,30	11,42	1,00	64,00
0,45	11,87	1,00	65,00
0,42	12,28	1,00	66,00
0,37	12,65	1,00	67,00
0,73	13,38	1,00	68,00
0,37	13,75	1,00	69,00
0,72	14,47	10,00	79,00
0,70	15,17	10,00	89,00

Tabla V.31. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
2,37	17,53	30,00	119,00
0,92	18,45	10,00	129,00
0,72	19,17	20,00	149,00
0,75	19,92	10,00	159,00
0,68	20,60	10,00	169,00
0,83	21,43	10,00	179,00
1,23	22,67	15,00	194,00
0,52	23,18	5,00	199,00
1,20	24,38	10,00	209,00
0,73	25,12	10,00	219,00
0,70	25,82	20,00	239,00
0,82	26,63	10,00	249,00
0,77	27,40	10,00	259,00
0,92	28,32	20,00	279,00
1,92	30,23	10,00	289,00
0,98	31,22	10,00	299,00
1,05	32,27	10,00	309,00
2,07	34,33	10,00	319,00
0,85	35,18	10,00	329,00
1,02	36,20	10,00	339,00
0,97	37,17	10,00	349,00
1,02	38,18	10,00	359,00
1,12	39,30	10,00	369,00
2,35	41,65	20,00	389,00
0,90	42,55	10,00	399,00
0,88	43,43	10,00	409,00
1,10	44,53	10,00	419,00
2,10	46,63	10,00	429,00
1,20	47,83	10,00	439,00
1,37	49,20	10,00	449,00
1,25	50,45	10,00	459,00
2,93	53,38	10,00	469,00
1,48	54,87	10,00	479,00
1,60	56,47	10,00	489,00
1,22	57,68	10,00	499,00
1,27	58,95	10,00	509,00
1,23	60,18	10,00	519,00
1,57	61,75	10,00	529,00

Tabla V.31. Continuación. Datos de campo del ensayo 3, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,53	63,28	10,00	539,00
1,60	64,88	10,00	549,00
1,68	66,57	10,00	559,00
1,27	67,83	10,00	569,00
1,32	69,15	10,00	579,00
1,52	70,67	10,00	589,00
1,50	72,17	10,00	599,00
1,37	73,53	10,00	609,00
1,65	75,18	10,00	619,00
1,73	76,92	10,00	629,00
2,92	79,83	10,00	639,00
1,47	81,30	10,00	649,00
1,33	82,63	10,00	659,00
1,38	84,02	10,00	669,00
1,48	85,50	10,00	679,00
1,72	87,22	10,00	689,00
2,28	89,50	10,00	699,00
2,52	92,02	10,00	709,00
1,87	93,88	10,00	719,00
1,70	95,58	10,00	729,00
1,43	97,02	10,00	739,00
1,38	98,40	10,00	749,00
1,45	99,85	10,00	759,00
1,50	101,35	10,00	769,00
1,20	102,55	10,00	779,00
1,43	103,98	10,00	789,00
1,52	105,50	10,00	799,00
1,47	106,97	10,00	809,00
1,67	108,63	10,00	819,00
1,82	110,45	10,00	829,00

Tabla V.32. Datos de campo del ensayo 4, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
0,28	0,28	5,00	5,00
0,85	1,13	10,00	15,00
0,97	2,10	10,00	25,00
1,17	3,27	10,00	35,00

Tabla V.32. Continuación. Datos de campo del ensayo 4, zona 4, infiltrómetro 30 cm. Intervalo: intervalo de tiempo en minutos; tiempo ac.: tiempo acumulado en minutos; h infiltrada: altura de lámina de agua infiltrada en mm; h ac.: altura de agua acumulada en mm.

Intervalo (min)	tiempo ac. (min)	h infiltrada (mm)	h ac. (mm)
1,15	4,42	10,00	45,00
0,98	5,40	5,00	50,00
0,72	6,12	2,00	52,00
1,32	7,43	10,00	62,00
2,82	10,25	20,00	82,00
3,58	13,83	20,00	102,00
1,00	14,83	5,00	107,00
1,13	15,97	4,00	111,00
3,65	19,62	20,00	131,00
4,33	23,95	20,00	151,00
6,22	30,17	25,00	176,00
3,50	33,67	15,00	191,00
2,60	36,27	10,00	201,00
3,53	39,80	12,00	213,00
1,20	41,00	5,00	218,00
2,48	43,48	10,00	228,00
2,67	46,15	10,00	238,00
3,05	49,20	10,00	248,00
1,42	50,62	5,00	253,00
5,28	55,90	20,00	273,00
2,98	58,88	10,00	283,00
3,15	62,03	10,00	293,00
2,90	64,93	7,00	300,00
5,58	70,52	20,00	320,00
3,18	73,70	10,00	330,00
3,18	76,88	10,00	340,00
4,27	81,15	12,00	352,00
4,70	85,85	15,00	367,00
3,20	89,05	10,00	377,00
3,62	92,67	10,00	387,00
3,55	96,22	10,00	397,00
13,47	109,68	40,00	437,00
3,38	113,07	10,00	447,00
6,62	119,68	20,00	467,00
7,28	126,97	22,00	489,00

## ANEJO VI: Glosario

## ANEJO VI. GLOSARIO

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
<b>A</b>	Sección
<b>a,b</b>	Coefficientes de una regresión
<b>ACP</b>	Análisis de Componentes Principales
<b>ANOVA</b>	Análisis de la varianza
<b>Corr.</b>	Corregido
<b><math>d_r</math></b>	Porosidad relativa entre horizontes, adimensional
<b>D</b>	Diámetro
<b>Error Est.</b>	Error estándar
<b>f</b>	Capacidad de infiltración, general
<b><math>f_c</math></b>	Tasa de infiltración final según distintos autores (Horton, Green-Ampt...)
<b><math>f_i</math></b>	Tasa de infiltración en un intervalo concreto
<b><math>f_i</math> med</b>	Tasa de infiltración media
<b>F</b>	Infiltración real acumulada
<b>Gl</b>	Grados de libertad
<b>G</b>	Factor adimensional de forma
<b>h ac</b>	Altura de agua acumulada
<b><math>i_f</math></b>	Tasa de infiltración final
<b><math>i_z</math></b>	Gradiente hidráulico en la dirección vertical
<b><math>I_a</math></b>	Abstracción inicial: precipitación ocurrida antes del inicio de la escorrentía

---

**Símbolo**    **Significado**

---

<b>k</b>	Índice de decaimiento de la tasa de infiltración
<b>K</b>	Conductividad hidráulica en medio no saturado
<b>K<sub>s</sub></b>	Conductividad hidráulica saturada
<b>K<sub>r</sub></b>	Permeabilidad relativa entre horizontes, adimensional
<b>k<sub>z</sub></b>	Permeabilidad respecto a la fase de agua en dirección z
<b>L</b>	Altura de lámina de agua infiltrada
<b>LSD</b>	Procedimiento de diferencia mínima significativa; método estadístico que sirva para discriminar entre las medias de diferentes grupos.
<b>MA</b>	Cociente de la capacidad de infiltración entre la permeabilidad, número de Martínez de Azagra, adimensional.
<b>n</b>	Número de muestras
<b>N</b>	Porosidad
<b>NC</b>	Número de curva
<b>P</b>	Precipitación
<b>Pe</b>	Profundidad de inserción del anillo
<b>p<sub>e</sub></b>	Porosidad eficaz de la superficie del suelo, adimensional
<b>P<sub>efec</sub></b>	Precipitación efectiva
<b>Q</b>	Caudal
<b>r</b>	Radio
<b>Re</b>	Número de Reynolds, adimensional
<b>S</b>	Infiltración potencial

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>
$S_o$	Sortividad
$t$	Tiempo
$t_c$	Tiempo requerido para alcanzar la tasa de infiltración final
$V_c$	Volumen del frente húmedo
$V_{cap}$	Volumen húmedo bajo un infiltrómetro de anillo
$V_{cyl}$	Fracción del volumen húmedo bajo un infiltrómetro de anillo que corresponde a la parte vertical bajo el mismo.
$V_t$	Volumen húmedo total
$v_{wz}$	Velocidad media de un fluido a través de un medio poroso
$\delta h / \delta z$	Ver $i_z$ , sinónimos
$\epsilon$	Constante que toma parte en la ecuación de Green-Ampt
$\theta$	Contenido en humedad del suelo, adimensional
$\theta_o$	Humedad inicial
$\xi_r$	Tortuosidad relativa, adimensional
$\rho$	Densidad, general
$\Phi$	Función genérica
$\Psi$	Potencial de succión, potencial hídrico
$\Psi_h$	Potencial hidráulico
$\Psi_p$	Potencial matricial
$\Psi_g$	Potencial gravitacional