

Reutilización de aguas: más allá del Real Decreto 1620/2007

Caracterización de la zona no saturada, ensayo de trazadores y preparación de datos para la elaboración de un modelo de flujo 2D

Informe final de proyecto

30 de noviembre de 2016

AUTOORES

Luis Moreno Merino
Almudena de la Losa Román
Emilia Jiménez Hernández





Introducción y objetivos

El presente documento contiene el informe final y resumen de resultados del proyecto IGME titulado: Reutilización de aguas: más allá del Real Decreto 1620/2007, con número de CANOA: 51.3.00.10.00 y referencia 2288. Se engloba en un proyecto competitivo, de igual nombre, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Plan Nacional con referencia CGL2012-39520-C03-01 y cuyo investigador principal es F. Javier Lillo Ramos de la URJC.

El equipo de trabajo del IGME ha estado formado por Luis Moreno Merino, Almudena de la Losa Román y Emilia Jiménez Hernández, todos miembros del Área de Geología Ambiental y Geomatemáticas.

El objetivo general del proyecto, se basa en el hecho de que las aguas regeneradas pueden constituir un recurso hídrico alternativo que contribuiría a la conservación y gestión de los recursos hídricos convencionales. Se trata de una solución que presenta numerosas ventajas medioambientales por no requerir un gran consumo energético y por poder ser aplicada directamente en usos medioambientales y productivos. La actividad con mayor consumo de agua a nivel mundial es la agricultura, por lo que utilizar un recurso no convencional como es el agua residual depurada en este sector productivo, reduce la presión sobre el recurso y ayuda a preservar los ecosistemas hidrodépendientes. En España la reutilización está regulada por el RD 1620/2007, pero los potenciales usuarios no pueden asumir los costes que la implantación de esta regulación trae aparejados.

Partiendo de la hipótesis que el terreno (vegetación – suelo – ZNS) puede actuar como un tratamiento terciario extrayendo, inmovilizando, transformando y/o eliminando organismos patógenos, nutrientes y otros compuestos no deseados como prioritarios y emergentes, el proyecto pretende cuantificar, para distintas situaciones, los procesos que se producen en este sistema, el coste/beneficio del mismo y las operaciones necesarias para llevarlo a cabo, garantizando la preservación de la calidad tanto del suelo y de las aguas subterráneas como de los cultivos, todo ello con el fin de reducir los costes de su implantación para que los usuarios puedan asumirlos. Las diferentes situaciones contempladas resultan del producto de los dos tipos de especies que se han considerado óptimas para la reutilización (biocombustibles y gramíneas C4) cultivadas en diferentes condiciones agroecológicas ya que aportan diferentes capacidades de regeneración del agua reutilizada con el riego. La elección de especies productoras de biocombustibles se justifica también por la Directiva 2009/28/CE, por la que los países miembros deberán cumplir con una serie de requisitos de eficiencia energética entre los que cabe destacar la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en un 20% y el aumento de las energías renovables hasta llegar al 20% de su consumo, en el horizonte 2020. El manejo del agua condiciona también la capacidad regeneradora del sistema suelo/planta ya que en función de su manejo una misma calidad puede tener efectos diversos.

El objetivo específico del grupo del IGME ha sido diseñar el procedimiento experimental, obtener los datos y elaborar un modelo 2D de flujo en zona no saturada que permita modelizar el comportamiento del agua en su viaje desde la superficie del suelo hasta la zona saturada en la zona de aplicación de las aguas residuales en Carrión de los Céspedes. Se prestará una especial atención definir con la mayor precisión posible el tiempo de tránsito de los contaminantes bajo diversos escenarios climáticos.

Resultados obtenidos

En este apartado se presentan, de forma muy resumida, los resultados de los trabajos realizados ordenados por campañas.

a) Reconocimiento de calicatas en parcela experimental de Carrión de Los Céspedes (19.06.2013)

Calicata 1ETP

En la Figura 1 se muestra la localización de la calicata. Tiene 2 m de profundidad (Figura 2a y c). Presenta niveles más arcillosos cuya presencia disminuye en profundidad. Al hacer la excavación, la calicata estaba sin lámina de agua, pero tras media hora, empezó a aparecer agua en el fondo de la misma (Figura 2b). Al final del reconocimiento, el nivel alcanzaba unos 25 cm.



Figura 1. Mapa de localización de las parcelas de girasol y de las calicatas.

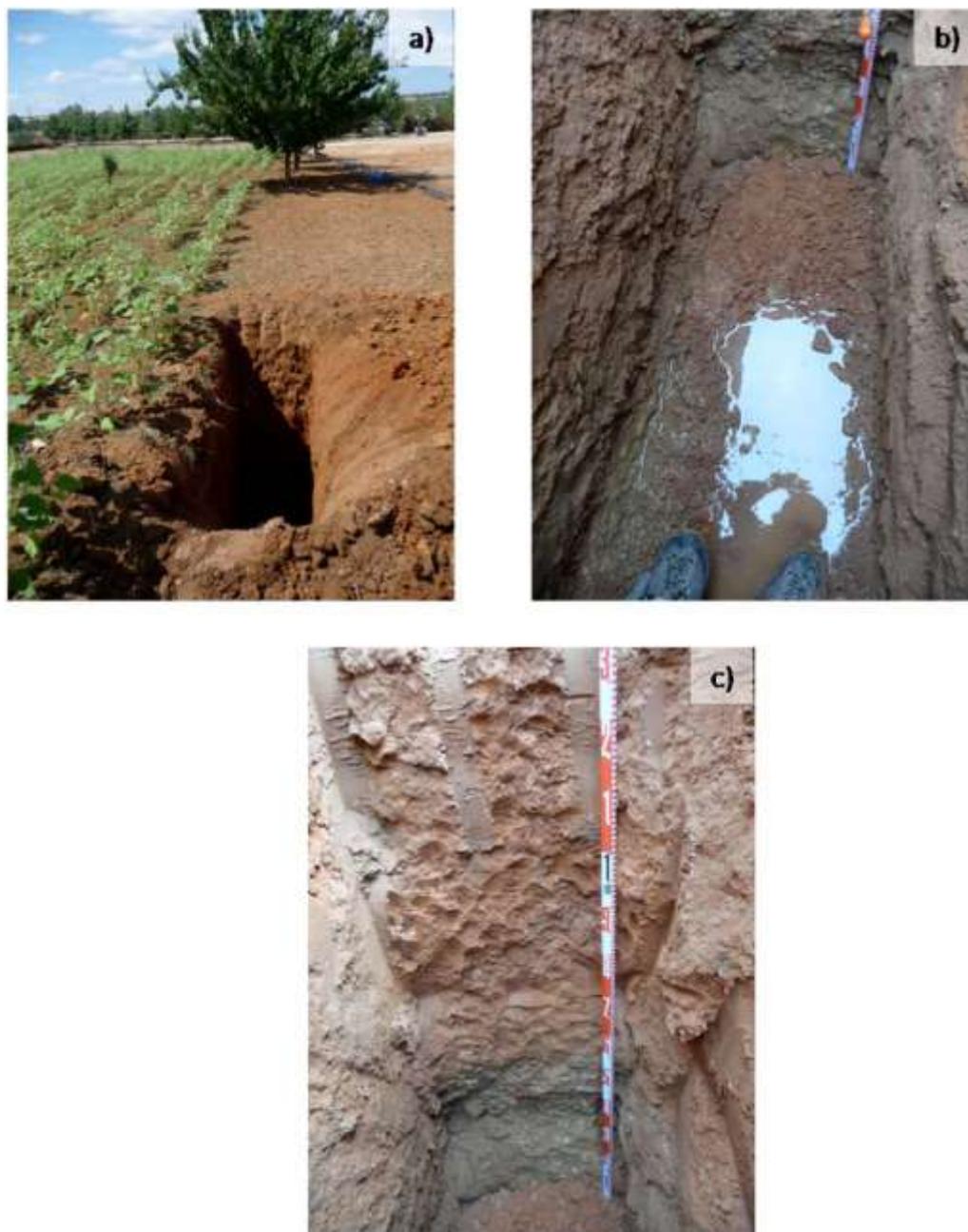


Figura 2. a) Localización de la calicata 1ETP; b) aparición de la lámina de agua en el fondo de la calicata; c) visión general del perfil de la calicata 1ETP.

Horizonte 0 – 0,20 m: horizonte agrícola Ap, de color amarillo-ocre, es un material limoso-arenoso (textura de tendencia arenosa) y estructura masiva, presencia abundante de raíces y artefactos (p.e. restos de cerámica) (Figura 3).

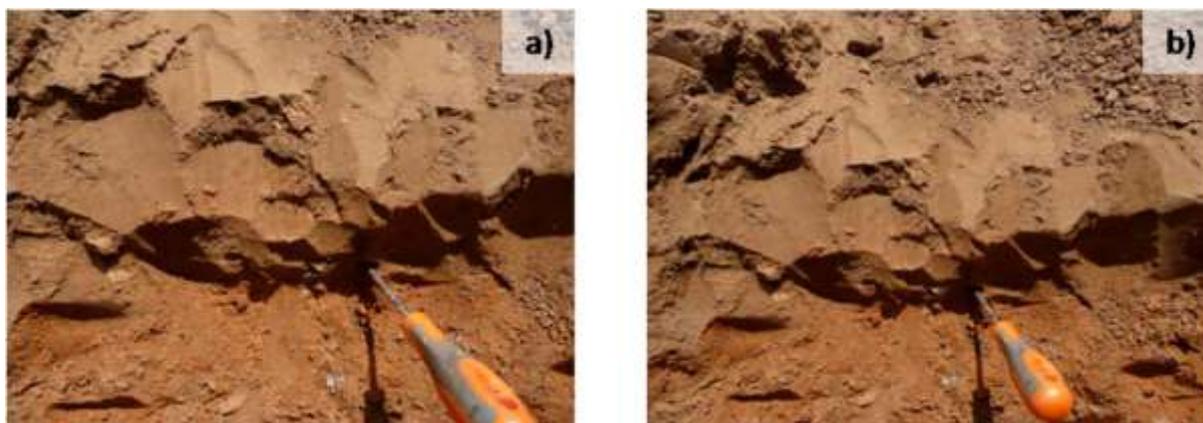
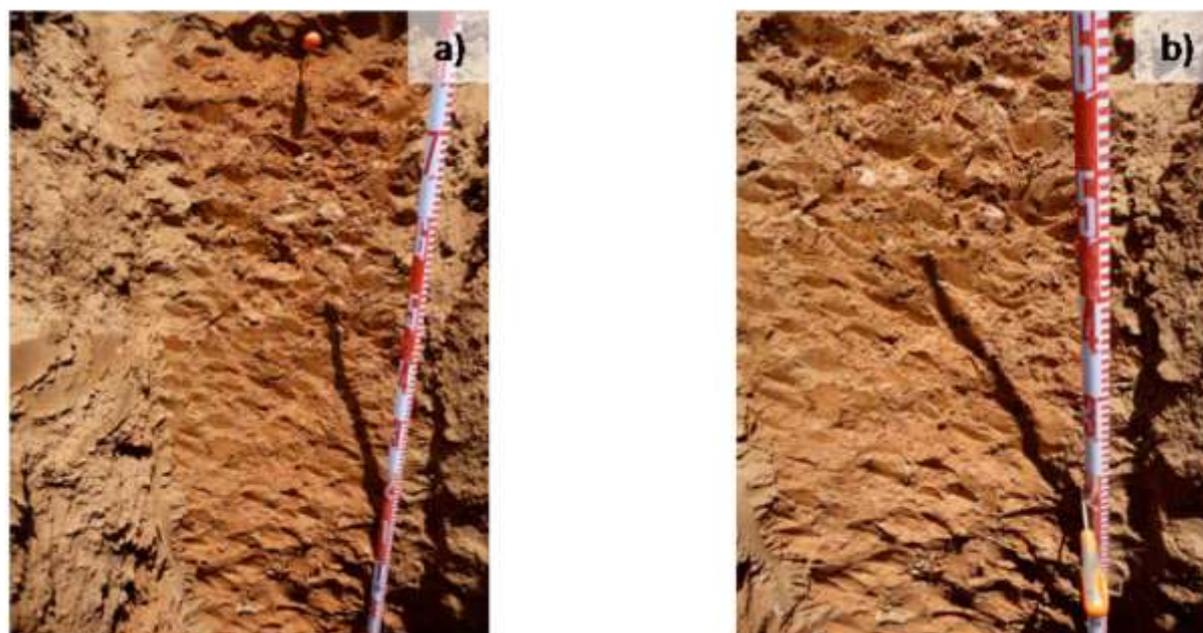


Figura 3. a) y b) horizonte 0 - 0,20 m de profundidad de la calicata 1ETP.

Límite con el horizonte suprayacente: es neto

Horizonte 0,20 – 0,80 m (Figura 4a y b): alternancia de colores rojizos y verdosos. Hay zonas con predominio verdoso y zonas con predominio de color rojizo distribuidas irregularmente por todo el perfil (Figura 4c y d). Indica condiciones redoximórficas, asociado a materiales arcillosos que en el pasado han estado tiempo encharcados (condiciones reductoras/anóxicas → decoloración) y tiempo expuestos al aire (colores rojos → condiciones oxidantes/óxicas). Este horizonte es más arcilloso que el subyacente. Textura de tendencia arcillosa. Estructura subpoliédrica con desarrollo de slickensides irregulares y de poco desarrollo. Agregados mal definidos. Los primeros 15 cm (0,20 -0,35 m de profundidad) presentan un color más rojizo. Presencia abundante de semillas y raíces. Las zonas rojizas se corresponden al color 2,5YR 4/8 de la tabla de Munsell y las zonas más verdosas se corresponden al color 10Y-5GY 6/4.



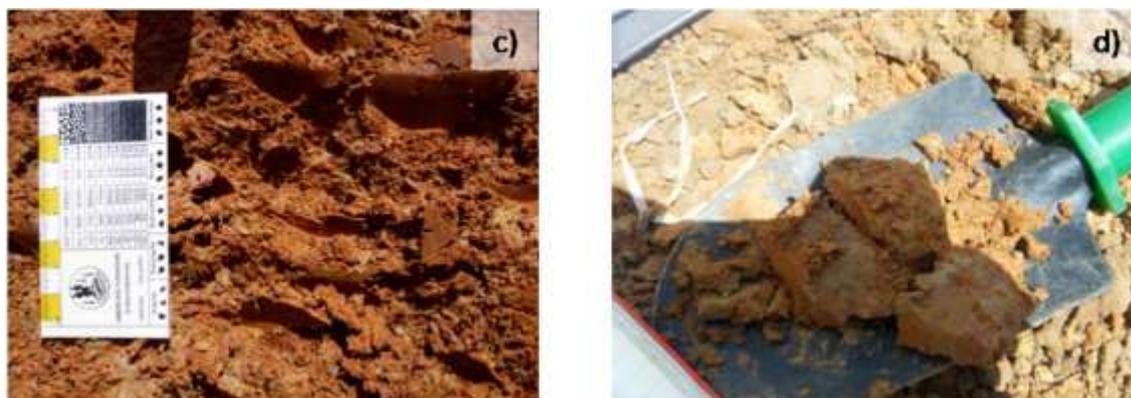


Figura 4. Horizonte 0,20 – 0,80 m de profundidad de la calicata 1ETP. a) Vista general del horizonte 0,20 – 0,80 m de la calicata 1ETP; b) vista del contacto con el horizonte infrayacente (0,80 – 1,10 m de profundidad); c) material indicador de condiciones redoximórficas; d) muestra que presenta condiciones redoximórficas.

Límite con el horizonte suprayacente gradual

Horizonte 0,80 – 1,10 m (Figura 5a): el material es similar al del nivel infrayacente (textura de tendencia franco-arcillosa, color parecido, presencia de raíces, etc.) Desarrollo incipiente de slickensides. Muchos nódulos de carbonatos irregulares en su morfología y distribución (hay zonas con más nódulos de carbonatos que otras). Color Munsell 5YR,4/6.



Figura 5. Horizonte 0,80 - 1,10 m de profundidad de la calicata 1ETP. a) Vista general del horizonte; b) detalle de un nódulo de carbonato.

Límite gradual con el horizonte suprayacente

Horizonte 1,10 - 1,50 m: unidad más arcillosa que la siguiente. Textura de tendencia franco arcillosa, de visu. Estructura subpoliédrica, masiva (más masiva cuanto mayor es la cantidad

de limo) (Figura 6a). Ausencia de slickensides. Posee muchas huellas de raíces de desarrollo vertical (Figura 6b) y fragmentos de carbón de 5 – 6 mm (Figura 6c). También tiene estructuras verticales algo más carbonosas. Color Munsell 5YR, 4/6.

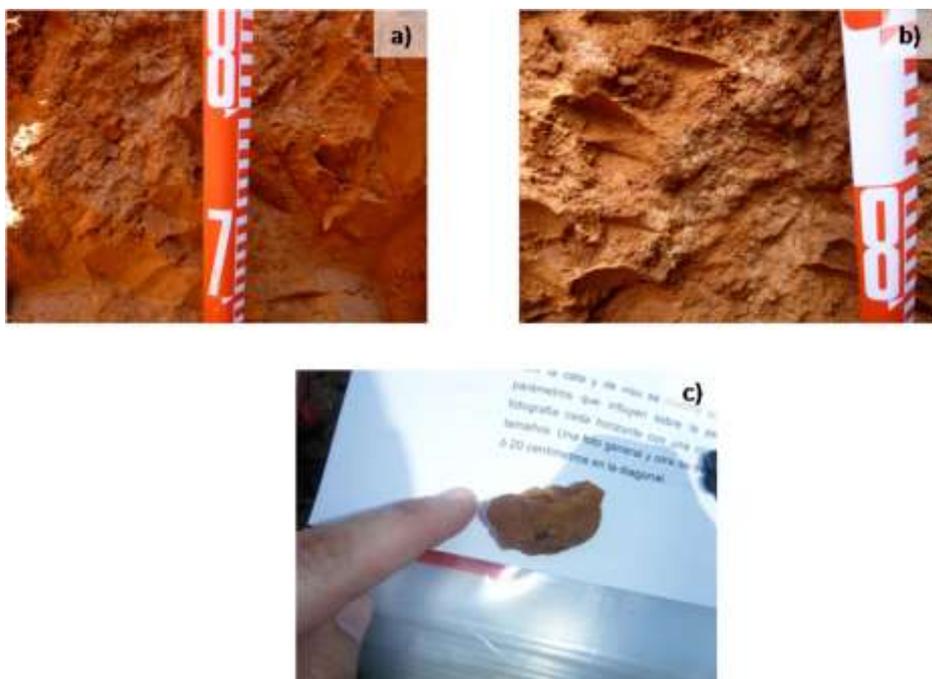


Figura 6. Horizonte 1,10 – 1,50 m de profundidad de la calicata 1ETP. a) Detalle de la unidad para apreciar la textura arcillosa y la estructura subpoliédrica; b) detalle de la presencia de raíces; c) detalle de un fragmento de carbón de 0,5 cm aproximadamente de tamaño.

Límite con el horizonte suprayacente: es bastante neto. El paso entre un horizonte y el otro se produce ende 3-4 cm.



Figura 7. Límite neto entre los horizontes 1,10 – 1,50 m y 1,50 – 2 m de profundidad de la calicata 1ETP.

Horizonte 1,50 – 2 m (Figura 6a): horizonte de carácter margoso (margas amarillas?) (color 10YR, 4/6 según la tabla de Munsell) con nódulos y precipitados irregulares de carbonato de tamaño centimétrico distribuidos irregularmente por el horizonte. Presenta zonas más arcillosas de coloración rojiza con textura masiva y estructura subpoliédrica (Figura 6c). Estructura subpoliédrica con desarrollo de slickensides (Figura 6b y d). Venas oscuras verticales de espesor milimétrico que podrían ser de manganeso. Presencia de pseudonódulos esféricos negros interpretados como agregados de carbono (Figura 6d). Presencia rasgos edáficos de raíces negras y pequeños conductos (3-4 cm de longitud y 1 cm de anchura) rellenos de arcilla roja procedente del horizonte suprayacente (Figura 6e).



Figura 8. Horizonte 1,50 – 2 m calicata 1ETP. a) Vista general del horizonte; b) detalle de slickenside; c) zona más arcillosa y rojiza; d) slickenside y detalle de agregados de carbono; e) detalle conducto relleno de arcilla y rasgos edáficos de raíces negras.

Calicata 2ETP

No se observa el límite inferior, con lo que el horizonte podría alcanzar un espesor superior a 0,50 m.

En la Figura 1 se muestra la localización aproximada de la calicata. Tiene 2 metros de profundidad y se localiza junto al borde de la parcela de girasol regada a 2ETP, a escasos centímetros de las plantas de girasol (Figura 9a). Tras la excavación, la calicata estaba sin lámina de agua, pero transcurridos 30 minutos empezó formarse una lámina de agua (Figura 9b), que alcanzó unos 25 cm de profundidad.



Figura 9. a) Localización y aspecto de la calicata 2ETP; b) aparición de la lámina de agua en el fondo de la calicata.

El perfil 2ETP presenta mayor número de nódulos carbonatados y también de mayor tamaño respecto a la calicata 1ETP. En la calicata se aprecian raíces de castañuelas (*Cyperus rotundus*) hasta 30 cm (máximo hasta 50 cm donde el desarrollo es testimonial, por lo que realmente se puede decir que el desarrollo radicular es hasta 30 cm). Las raíces de los girasoles se observan con más dificultad. Se ha visto que alguna llega a 25 cm de profundidad.

Horizonte 0 – 0,10 m: arenas limosas (textura de tendencia arenosa) muy homogéneas. Color amarillo-ocre. Horizonte de laboreo (Ap) (Figura 10).

Horizonte 0,10 – 0,80 m: textura franco arenosa (más limosa y arenosa que el horizonte infrayacente) con rasgos redoximórficos con colores rojizos a marrones y grisáceos (Figura 11a y c) (códigos de la tabla Munsell rojo \square 2,5YR 4/8; gris \square 10YR 6/2; marrón \square 10YR 5/6) distribuidos irregularmente. Hay restos carbonosos, algún nódulo y agregado aislado de carbonato de 2 – 3 cm (Figura 11b). Estructura poliédrica con cierta tendencia de los agregados a tener caras con cierto desarrollo vertical pero que no llega a ser prismática (Figura 11b). No se aprecian slickensides.



Figura 10. Horizonte 0 – 0,10 m de la calicata 2ETP



Figura 11. Horizonte 0,10 – 0,80 m de profundidad de la calicata 2ETP. a) Vista general del horizonte; b) detalle de la estructura poliédrica y de los nódulos aislados de carbonatos (esquina inferior derecha); c) detalle del perfil con condiciones redoximórficas. El límite con los horizontes supra e infrayacente es difuso.

Horizonte 0,80 – 1 m: horizonte de transición entre el horizonte carbonatado (infrayacente) y el horizonte redoximórfico (suprayacente) (Figura 12a). Prácticamente no presenta nódulos de carbonatos, ocasionalmente aparece alguno de tamaño centimétrico. Posee de tendencia textura franco arcillosa (igual que el horizonte carbonatado). Color predominantemente grisáceo-verdoso (color de la tabla Munsell 10Y/R 4/4) con alguna zona rojiza. Presenta inclusiones carbonosas, restos vegetales y huellas de raíces. Hay grietas de desarrollo vertical y morfología irregular por las que parece que ha habido circulación de agua ya que la superficie es más grisácea (debido a procesos de lavado). Tienen un desarrollo más evidente en la vertical que en cualquier otra dirección (Figura 12b). Desarrollo incipiente de slickensides.

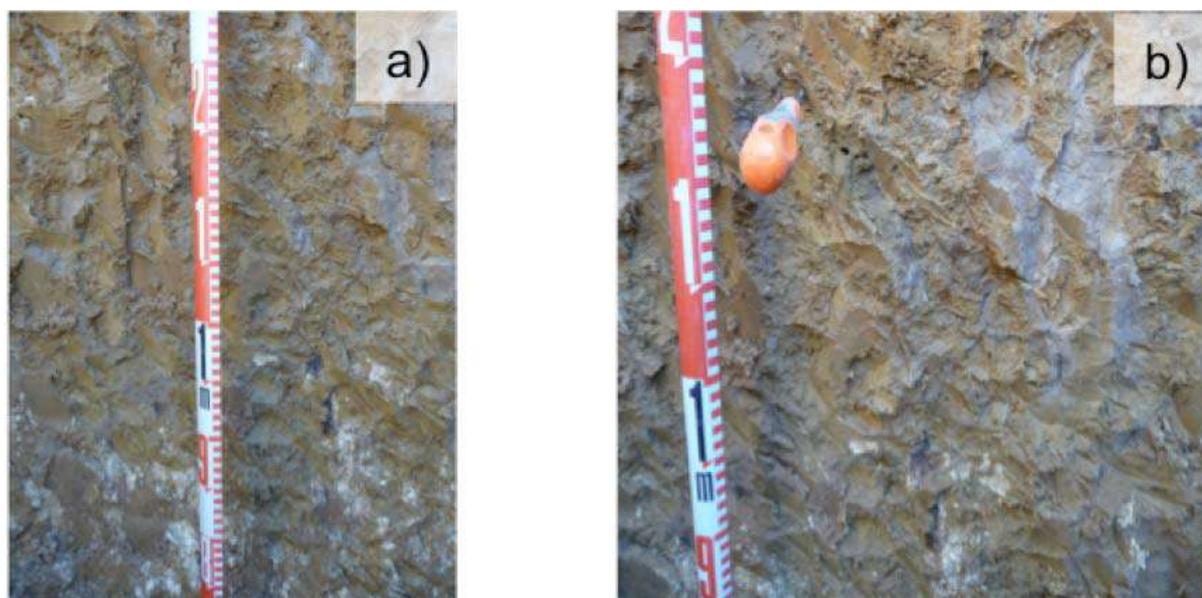


Figura 12. Horizonte 0,80 – 1 m de la calicata 2ETP. a) vista general del horizonte; b) detalle de superficies de lavado de desarrollo vertical, y que suponen vías de flujo preferencial a través de la matriz.

Límite con el horizonte suprayacente: es difuso. Los nódulos y agregados carbonatados son menos frecuentes y de menor tamaño. La presencia/ausencia lo que marca el límite entre ambos horizontes es la presencia/ausencia de carbonatos.

Horizonte 1 – 2 m: (Figura 13a) mezcla de colores marrones-rojizos (código Munsell 2,5YR 4/8) y verdosos (código Munsell 5Y 6/2) con predominio del verde. Esta mezcla de colores indica presencia de condiciones pasadas redoximórficas. Textura francoarcillosa, estructura subpoliédrica con desarrollo incipiente de slickensides irregulares. No se observa el límite superior definido, con lo que el horizonte podría alcanzar un espesor superior a 1 m (Figura 13b). Presencia de muchos agregados y nódulos de carbonato (mayor frecuencia de agregados frente a los nódulos), que son irregulares tanto en morfología como en su distribución (Figura 13c, d y e). Aparentemente son más abundantes hacia la mitad superior

del horizonte (Figura 13a). Tienen un mayor desarrollo en la vertical. Los bordes de los agregados son irregulares y en ocasiones poco diferenciados frente a la matriz francoarcillosa.

Presencia abundante de restos carbonosos, que en ocasiones tienen cierto desarrollo en la vertical (Figura 13f). Presencia también de huellas de raíces.

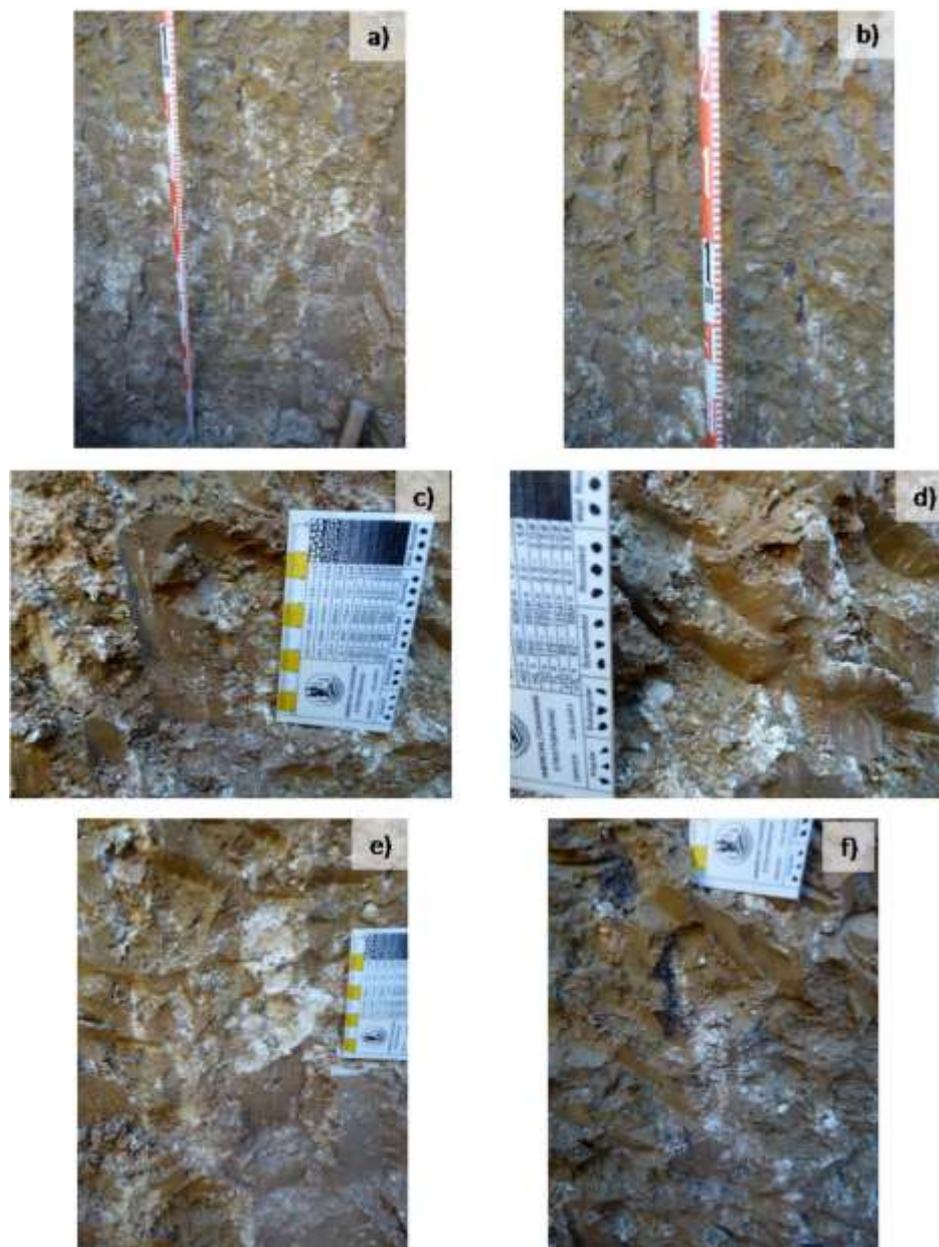


Figura 13. Horizonte 1 – 2 m de profundidad de la calicata 2ETP a) Vista general del horizonte; b) vista del límite entre el horizonte 0,80 – 1 m y el horizonte 1 – 2 m; c) y d) detalle de los nódulos carbonatados; e) detalle de un agregado de carbonatos; f) detalle de los restos carbonosos.

Instalación de las sondas de humedad y dataloggers

Las sondas (ECH2O EC-TM de Decagon) de la calicata 1ETP se instalan directamente en la pared de la misma a una profundidad de 0,30, 1,05 y 1,65 m (Figura 14a, b y c respectivamente y Figura 15). Las conexiones han sido:

- puerto 1 : sonda localizada a 30 cm de profundidad (rojo)
- puerto 2: sonda localizada 1,05 m de profundidad (azul-verdoso)
- puerto 3: sonda instalada a 1,65 m de profundidad (sin color)



Figura 14. Instalación de sondas de humedad en calicata 1ETP a) Sonda instalada a 0,30 m; b) sonda instalada a 1,05 m; c) sonda instalada a 1,65 m.

En la calicata 2ETP la sonda superficial e intermedia (S1 y S2) se instalan en perforaciones horizontales hechas en la pared de la calicata, según se describe a continuación (Figura 16). La S3 se instala directamente en la pared de la calicata, debido a la imposibilidad de clavar la sonda en una perforación horizontal que se hizo por la dureza del material haber carbonatos. Por ello se optó por clavar la sonda donde se pudiera garantizar que estaba clavada en toda su longitud. La distancia entre la pared de la calicata y la primer línea de riego es de 68 cm. La longitud de la sonda es de 5,5 cm.



Figura 15. Sondas instaladas en la calicata 1ETP.

S1: 0,40 m de profundidad. La perforación es de 50 cm (distancia horizontal desde la pared) (Figura 16a y b).

S2: 1,10 m de profundidad. La perforación es de 40 cm (distancia horizontal desde la pared) (Figura 16c y d).

S3: 1,50 m de profundidad directamente en la pared de la calicata (Figura 16e y f).

El datalogger toma muestras cada 2 horas. Las sondas se han instalado a 30 cm, 1,20m y 1,50m

Ensayo de infiltración zona 2ETP

Para la realización de los ensayos de infiltración se clavó el cilindro a 5 cm de la superficie del terreno, en una zona llana y relativamente plana (Figura 18). El primer test de infiltración (19.06.2013) se hizo utilizando una carga hidráulica de 15 cm.

Step	tiempo	Dh (cm)
T1	44 seg.	1
T2	29 min. 39 seg.	5
T3	1h 22 min. 42 seg.	5
T4	34 min. 55 seg.	1
T5	26 min. 50 seg.	1
T6	38 min. 24 seg.	1
T7	Desde h 20.17 hasta h 9.38 (19-20.06.2013) 13.5 (20.06.2013)	13.5



El segundo test de infiltración se hizo utilizando una carga hidráulica de 15 cm y se monitoreó el cambio de carga hidráulica de 1 cm (desde 15 a 14 cm).

Step	tiempo	Dh (cm)
T1	31 seg.	1
T2	2 min. 48 seg.	1
T3	10 min. 30 seg.	1
T4	31 min. 0.9 seg.	1
T5	46 min. 13 seg.	1
T6	1h 15 min. 25 seg.	1
T7	1h 25 min. 31 seg.	1
T8	1h 43 min. 25 seg.	1

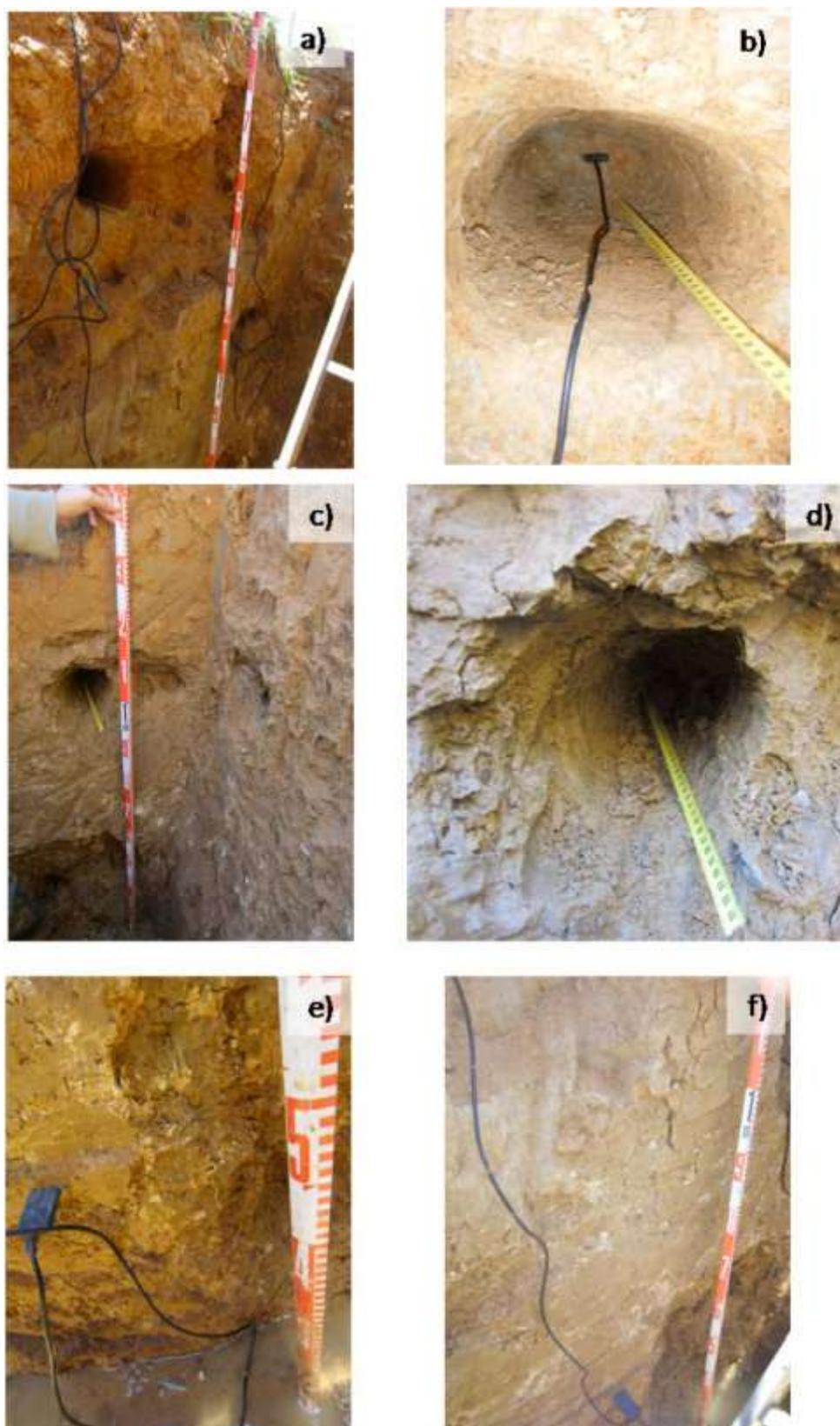


Figura 16. Sondas de la calicata 2ETP instaladas a distintas profundidades: a) sonda 0,40 m de profundidad; b) perforación horizontal sonda 0,40 m de profundidad; c) sonda 1,10 m de profundidad; d) perforación horizontal sonda 1,10 m; e) y f) sonda 1,50 m de profundidad.

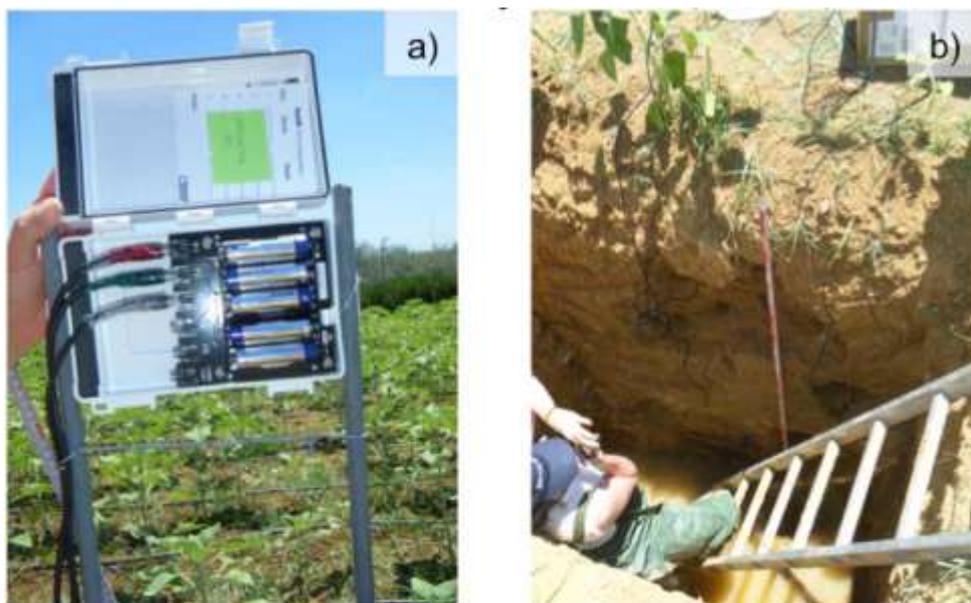


Figura 17. a) Datalogger instalado en la calicata 2ETP; b) calicata 2ETP con lassondas instaladas.

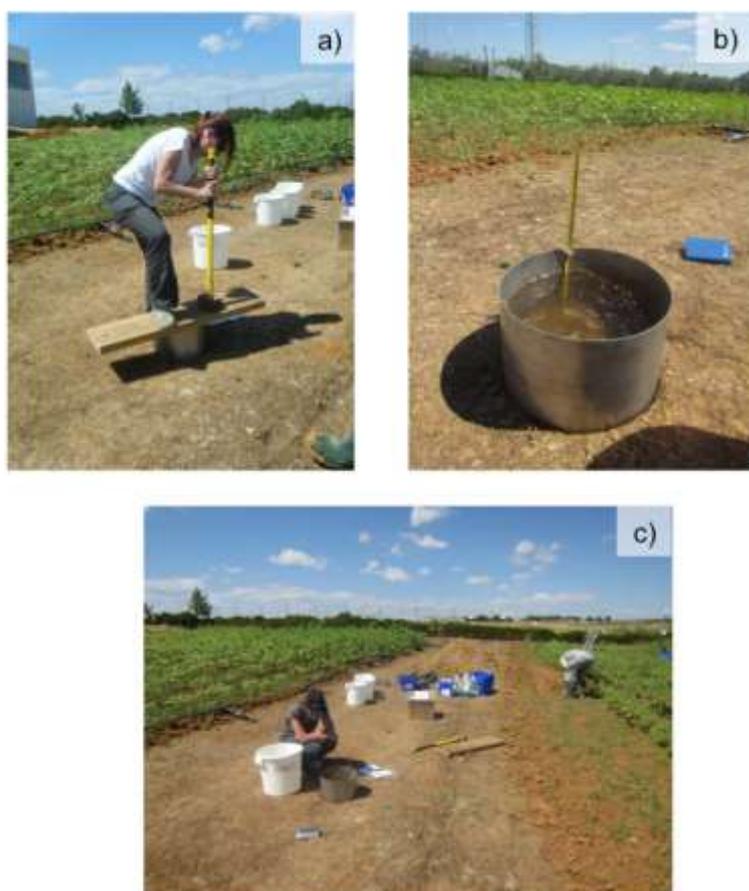


Figura 18. Ensayo de infiltración entre parcela 1ETP y 2ETP: a) clavando el anillo de infiltración; b) anillo con carga hidráulica de 15 cm; c) vista general de la zona del ensayo de infiltración.

b) Segunda campaña. 9-10 de octubre de 2013.

Durante esta campaña se inició el ensayo de trazadores, para ello se prepararon diversos sectores de 1m²:

parcela en secano: 5 sectores de 1m²
parcela 2ETP: 5 sectores de 1 m²

En cada sector se aplican 5 L de disolución de trazadores que contiene 10 g de Br (como KBr) y 5 g de N (como KNO₃).

Además se muestreo el horizonte superficial 0 -10 cm:

12 cilindros de muestra inalterada, para permeámetro de laboratorio y curvas pF
4 muestras para humedad y densidad aparente
1 Kg de muestra para otras determinaciones.

En la figura 19 se puede observar la situación de los muestras y ensayos realizados en esta segunda campaña.

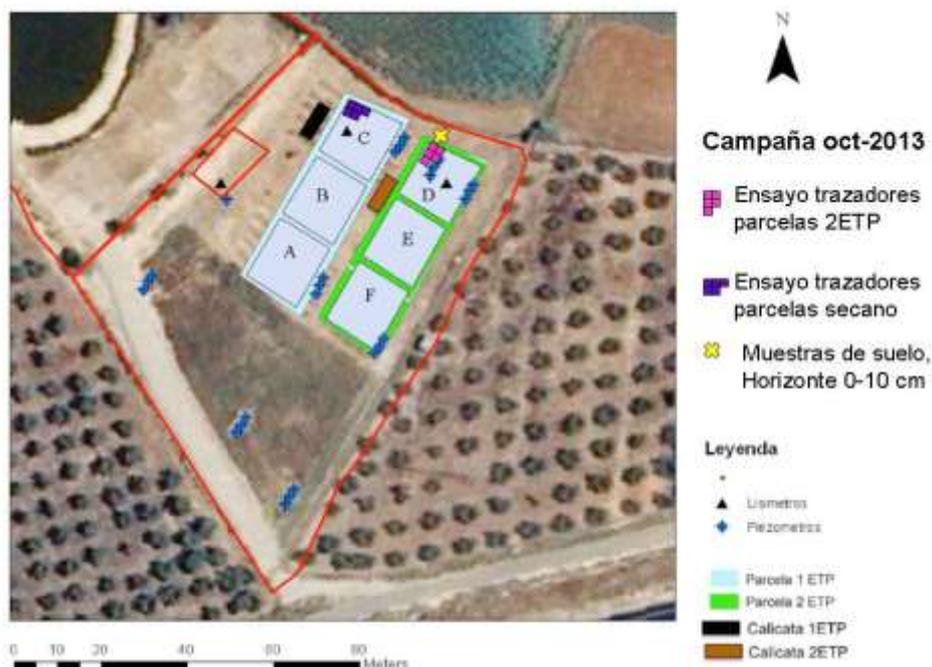


Figura 1. Mapa de localización de las parcelas de girasol y de las calicatas.

Figura 19. Situación de las parcelas de girasol, de las catas de muestreo y de las zonas de inyección de trazador.

c) Tablas de crecimiento de los girasoles.

A lo largo del año 2014 se midió el crecimiento y desarrollo radicular de los girasoles plantados en la finca de ensayo. En la tabla 1 y 2 se muestran los resultados obtenidos y en la figura 20 una vista de alguno de los ejemplares analizados.

Tabla 1. Desarrollo aéreo y radicular de los girasoles

Tratamiento	Mayo			Junio			Julio		
	Tallo	Raiz	% R/T	Tallo	Raiz	% R/T	Tallo	Raiz	% R/T
Secano							131	17	13%
Secano	27	13	48%	116	29	25%	158	14	9%
ETP1	46	17	37%	145	27	19%	189	20	11%
ETP1	26	9	35%	132,5	29,5	22%	203	19	9%
ETP2	31	12	39%	129,5	45,5	35%	170	9	5%
ETP2	18	4	22%	141	39	28%	160	9,5	6%



Figura 20.- Alguno de los ejemplares empleados en las medidas sobre los girasoles.

En la figura 21 se pueden observar mediante gráficos la evolución temporal de las tasas de crecimiento de los girasoles, y en especial su desarrollo radicular.

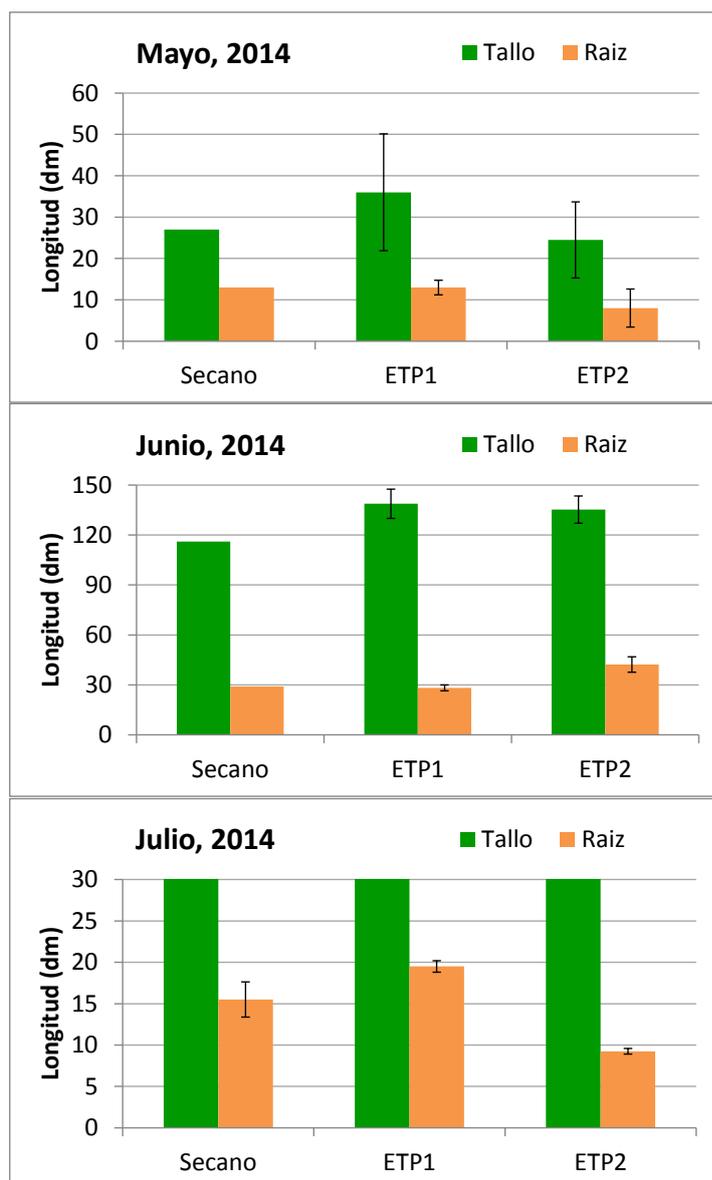


Figura 21.- Evolución temporal del desarrollo de biomasa aérea y longitud de raíces.

d) Ensayo de infiltración marzo 2014

En marzo de 2014 se realizó un ensayo de infiltración mediante la técnica del doble anillo, los resultados obtenidos se exponen a continuación. La TBI calculada se encuentra en un rango, para una carga hidráulica de 15 cm, situado entre 41,5 y 173,5 cm/día. Como se puede observar la gran heterogeneidad del terreno y la presencia de bioturbación hace que en distancias muy cortas los valores de permeabilidad superficial varíen en más de 4 veces.

Tabla 2.- Resultados ensayo de infiltración técnica del doble anillo.

ANILLO 1				ANILLO 2			
Δh (cm)	Δt (dia)	t (dia)	v(cm/dia)	Δh (cm)	Δt (dia)	t (dia)	v(cm/dia)
		0				0	
1	0,02	0,02	56,95	1	0,00	0,00	209,71
1	0,03	0,04	39,27	1	0,00	0,01	236,71
1	0,03	0,07	39,34	1	0,00	0,01	218,18
1	0,03	0,10	31,33	1	0,00	0,02	222,68
1	0,03	0,13	34,27	1	0,01	0,02	192,00
1	0,03	0,15	39,54	1	0,00	0,03	228,57
1	0,03	0,18	35,51	1	0,00	0,03	261,82
2,9	0,07	0,25	41,41	1	0,00	0,04	206,70
				1	0,00	0,04	208,19
				1	0,00	0,05	225,59
				1	0,01	0,05	179,63
				1	0,00	0,06	203,77
				1	0,00	0,06	211,76
				1	0,00	0,07	205,23
				1	0,01	0,07	197,71
				1	0,00	0,08	220,41
				1	0,01	0,08	187,83
				1	0,01	0,09	166,15
				1	0,01	0,09	154,84
				1	0,01	0,10	164,57
				1	0,01	0,10	196,36
				1	0,01	0,11	155,68
				1	0,01	0,12	169,41
				1	0,01	0,12	161,50
				1	0,01	0,13	187,83
				1	0,01	0,13	183,83
				1	0,01	0,14	173,49

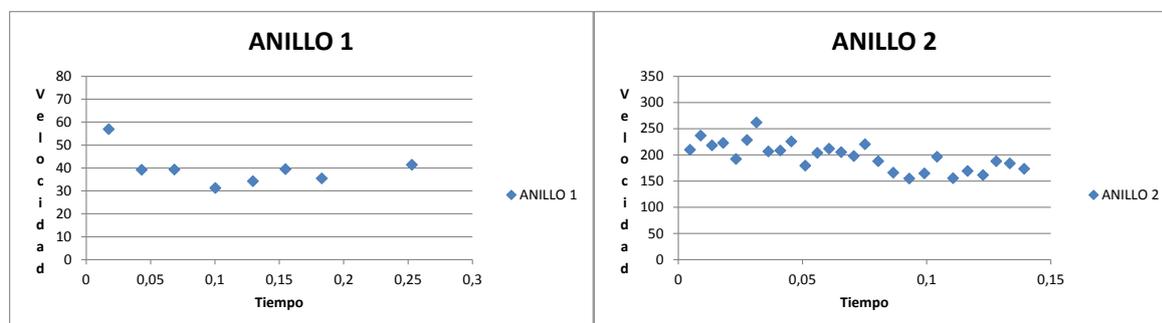


Figura 22.- Ensayos de infiltración, cilindro de doble anillo carga 15 cm.

e) Resultados finales ensayo trazador

A continuación, en las figuras 23 y 24, se presenta en forma gráfica y como tablas los resultados del ensayo de trazador.

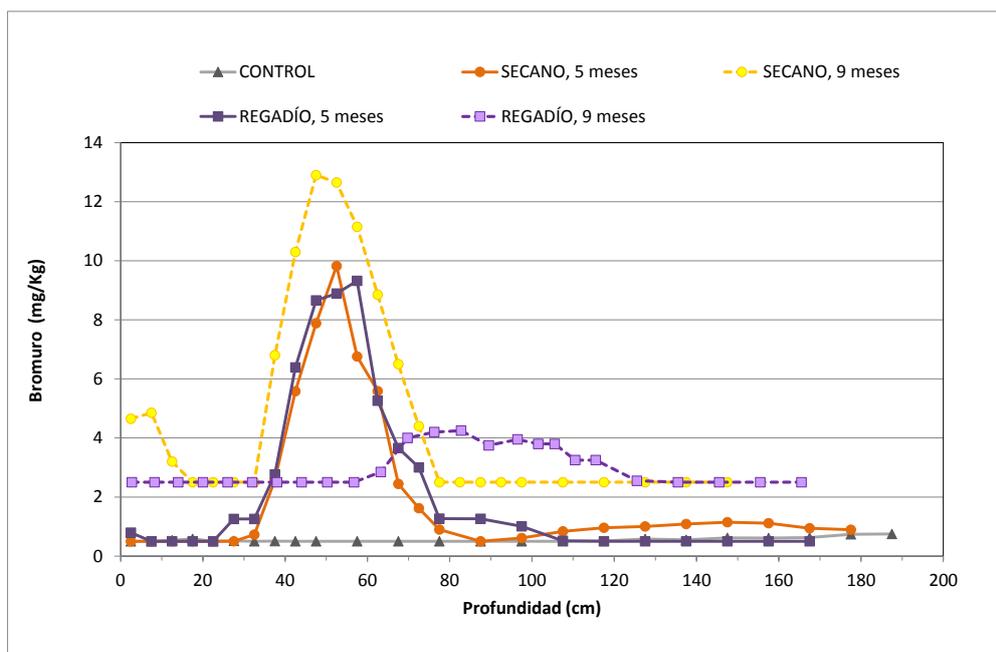


Figura 23.- Evolución de la concentración de bromuro en las parcelas de regadío y de secano a los 5 y 9 meses del ensayo.

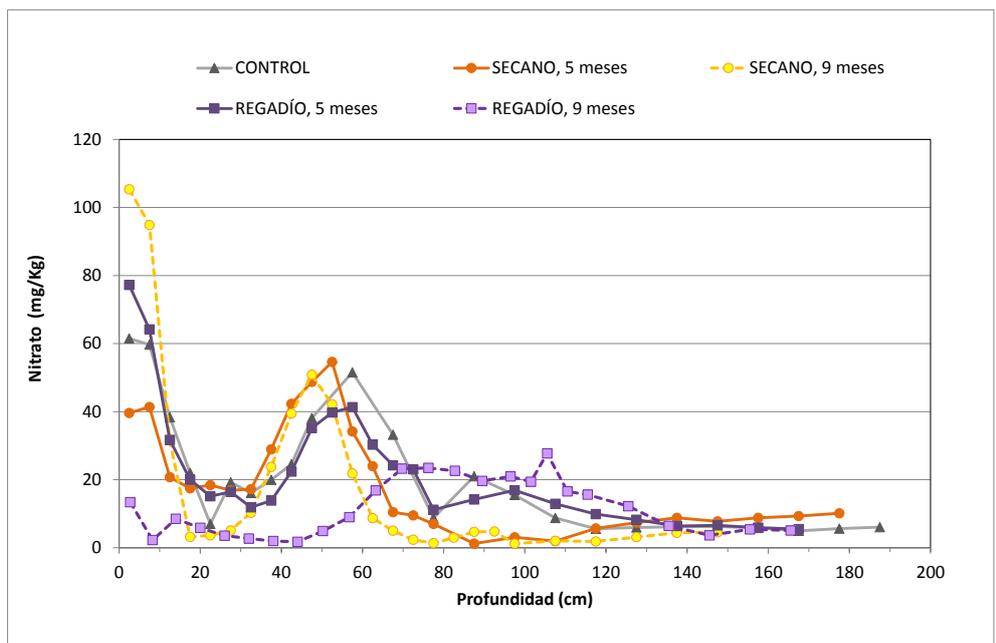


Figura 24.- Evolución de la concentración de nitrato en las parcelas de regadío y de secano a los 5 y 9 meses del ensayo.

BROMURO (mg/Kg)									
CONTROL		SECANO, 5 meses		REGADÍO, 5 meses		SECANO, 9 meses		REGADÍO, 9 meses	
Profundidad (cm)	t = 0	Profundidad (cm)	t = 5 meses	Profundidad (cm)	t = 5 meses	Profundidad (cm)	t = 9 meses	Profundidad (cm)	t = 9 meses
2,5	0,50	2,5	0,50	2,5	0,80	2,5	4,65	2,75	2,50
7,5	0,50	7,5	0,50	7,5	0,50	7,5	4,85	8,25	2,50
12,5	0,54	12,5	0,50	12,5	0,50	12,5	3,20	14	2,50
17,5	0,59	17,5	0,50	17,5	0,50	17,5	2,50	20	2,50
22,5	0,50	22,5	0,50	22,5	0,50	22,5	2,50	26	2,50
27,5	0,52	27,5	0,50	27,5	1,26	27,5	2,50	32	2,50
32,5	0,50	32,5	0,73	32,5	1,26	32,5	2,50	38	2,50
37,5	0,51	37,5	2,58	37,5	2,77	37,5	6,80	44	2,50
42,5	0,50	42,5	5,58	42,5	5,26	42,5	10,30	50,25	6,39
47,5	0,50	47,5	7,89	47,5	8,66	47,5	12,90	56,75	2,50
57,5	0,50	52,5	9,83	52,5	8,89	52,5	12,65	63,25	2,85
67,5	0,50	57,5	6,76	57,5	9,32	57,5	11,15	69,75	4,00
77,5	0,50	62,5	5,59	62,5	5,26	62,5	8,85	76,25	4,20
87,5	0,50	67,5	2,45	67,5	3,66	67,5	6,50	82,75	4,25
97,5	0,50	72,5	1,62	72,5	3,01	72,5	4,40	89,5	3,75
107,5	0,50	77,5	0,90	77,5	1,27	77,5	2,50	96,5	3,95
117,5	0,51	87,5	0,50	87,5	1,27	82,5	2,50	101,5	3,80
127,5	0,58	97,5	0,61	97,5	1,01	87,5	2,50	105,5	3,80
137,5	0,55	107,5	0,84	107,5	0,52	92,5	2,50	110,5	3,25
147,5	0,62	117,5	0,96	117,5	0,50	97,5	2,50	115,5	3,25
157,5	0,61	127,5	1,01	127,5	0,50	107,5	2,50	125,5	2,55
167,5	0,63	137,5	1,09	137,5	0,50	117,5	2,50	135,5	2,50
177,5	0,74	147,5	1,15	147,5	0,50	127,5	2,50	145,5	2,50
187,5	0,75	157,5	1,12	157,5	0,50	137,5	2,50	155,5	2,50
		167,5	0,95	167,5	0,50	147,5	2,50	165,5	2,50
		177,5	0,90						

NITRATO (mg/Kg)									
CONTROL		SECANO, 5 meses		REGADÍO, 5 meses		SECANO, 9 meses		REGADÍO, 9 meses	
Profundidad (cm)	t = 0	Profundidad (cm)	t = 5 meses	Profundidad (cm)	t = 5 meses	Profundidad (cm)	t = 9 meses	Profundidad (cm)	t = 9 meses
2,5	61,53	2,5	39,59	2,5	77,24	2,5	105,35	2,75	13,40
7,5	59,66	7,5	41,34	7,5	64,16	7,5	94,85	8,25	2,25
12,5	38,32	12,5	20,70	12,5	31,70	12,5	31,55	14	8,50
17,5	21,99	17,5	17,43	17,5	20,01	17,5	3,20	20	5,85
22,5	7,00	22,5	18,38	22,5	15,13	22,5	3,65	26	3,55
27,5	19,27	27,5	16,87	27,5	16,42	27,5	5,10	32	2,70
32,5	16,09	32,5	17,20	32,5	11,87	32,5	10,25	38	1,95
37,5	19,97	37,5	28,93	37,5	13,85	37,5	23,75	44	1,75
42,5	24,54	42,5	42,33	42,5	22,37	42,5	39,45	50,25	4,90
47,5	38,15	47,5	48,74	47,5	35,16	47,5	50,85	56,75	9,00
57,5	51,53	52,5	54,60	52,5	39,76	52,5	42,15	63,25	16,85
67,5	33,21	57,5	34,17	57,5	41,31	57,5	21,85	69,75	23,25
77,5	8,72	62,5	23,98	62,5	30,29	62,5	8,70	76,25	23,45
87,5	21,00	67,5	10,46	67,5	24,21	67,5	5,00	82,75	22,60
97,5	15,52	72,5	9,51	72,5	23,04	72,5	2,35	89,5	19,65
107,5	8,73	77,5	6,99	77,5	11,14	77,5	1,35	96,5	20,95
117,5	5,56	87,5	1,21	87,5	14,21	82,5	2,95	101,5	19,40
127,5	5,94	97,5	3,04	97,5	16,87	87,5	4,65	105,5	27,70
137,5	6,12	107,5	1,90	107,5	12,92	92,5	4,75	110,5	16,55
147,5	6,23	117,5	5,68	117,5	9,90	97,5	1,20	115,5	15,60
157,5	5,80	127,5	7,35	127,5	8,24	107,5	2,00	125,5	12,20
167,5	4,95	137,5	8,80	137,5	6,38	117,5	1,85	135,5	6,40
177,5	5,62	147,5	7,74	147,5	6,56	127,5	3,10	145,5	3,65
187,5	6,06	157,5	8,81	157,5	5,92	137,5	4,40	155,5	5,40
		167,5	9,32	167,5	5,49	147,5	4,55	165,5	5,05
		177,5	10,12						

Tablas 3 y 4, representación de la distribución de los elementos trazados (boro y nitratos) a lo largo de los perfiles de muestreo y a T0)

En la figura 25 se presenta la reconstrucción de la recuperación teórica porcentual del bromuro inyectado a 5 y 9 meses de ensayo.

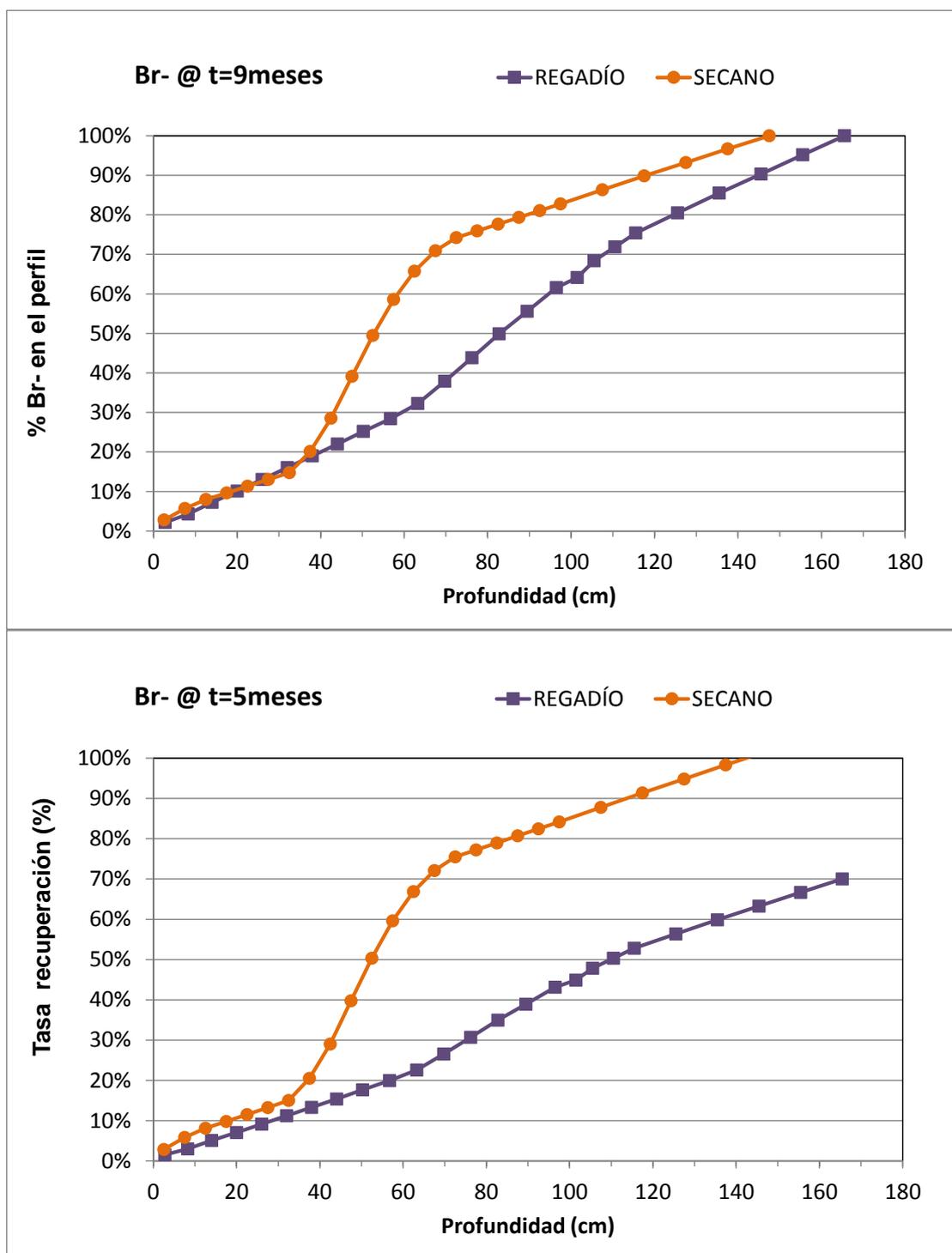


Figura 25. Recuperación de Br en el ensayo de trazado a 5 y 9 meses.



f) Caracterización física de los suelos de la zona experimental.

En este estudio se han empleado muestras inalteradas de suelo recogidas en cilindros metálicos normalizados de 100 cm³ (dimensiones: 53 mm de diámetro exterior y 50 mm de altura). Las campañas de muestreo se realizaron en los meses de Junio y Octubre de 2013 (Tabla 5). Las muestras de los horizontes h2, h3 y h4 (Figura 26a) se tomaron en la calicata 2ETP (Figura 26b) en la campaña del IMDEA en Junio de 2013. Las muestras del horizonte superficial h1 (Figura 26a) se tomaron en las proximidades del ensayo de trazadores en la parcela 2ETP (Figura 26b) en la campaña del IGME de Octubre de 2013. Sobre estas muestras se han realizado las siguientes determinaciones:

densidad aparente
permeabilidad saturada
curvas de retención hídrica (rango de pF: 0 – 4.2).

En los siguientes apartados se detallan los resultados de cada una de estas determinaciones.

En el último apartado se incluyen las tablas-resumen y las principales conclusiones de los análisis realizados.

Tabla 5. Muestras de suelo empleadas en la caracterización física de la ZNS.

Horizonte	Campaña	Densidad aparente	Permeabilidad saturada	Curva pF (rango 0 – 2.7)	Curva pF (rango 3.0 – 4.2)
h1 (0 - 0.1 m)	Oct/2013	4 (en bolsa)	5 cilindros	5 cilindros	2 cilindros
h2 (0.1 - 0.8 m)	Jun/2013	4 (en bolsa)	5 cilindros	5 cilindros	2 cilindros
h3 (0.8 – 1 m)	Jun/2013	4 (en bolsa)	5 cilindros	5 cilindros	2 cilindros
h4 (1 – 2 m)	Jun/2013	4 (en bolsa)	5 cilindros	5 cilindros	2 cilindros

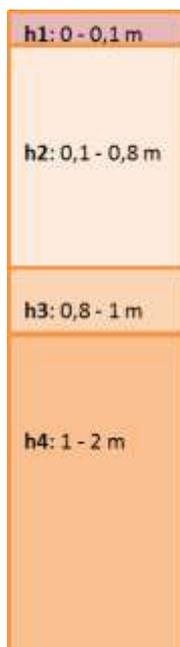


Figura 26a. Horizontes en la ZNS hasta 2 m de profundidad.

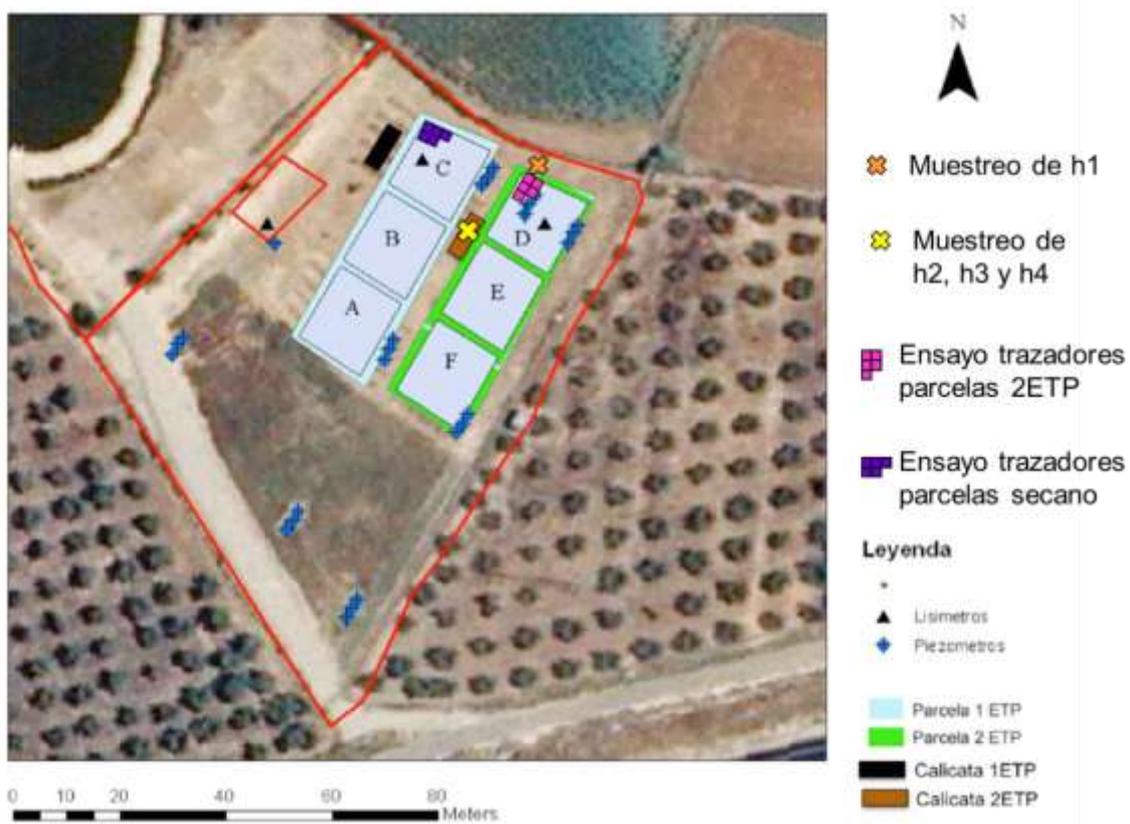


Figura 26b. Localización de los puntos de muestreo de la ZNS en la zona de estudio.

Densidad aparente

La densidad aparente se ha determinado por gravimetría tras secar el suelo en estufa a 105 °C durante 24-48 horas (Van Reeuwijk, 2002. Procedures for Soil Analysis, ISRIC (Internacional

Soil Reference and Information Centre), 6ª Edición, 120p). Se ha determinado la densidad aparente en las 4 réplicas de cada horizonte recogidas para este fin. Los resultados se muestran en la Tabla 6a y en la Figura 27a. Se ha medido también la densidad aparente de las muestras empleadas en las determinaciones de permeabilidad y curvas pF, aunque empleando solamente aquellas muestras que completaban el volumen del cilindro y se mantenían íntegras una vez finalizados los ensayos correspondientes. Los resultados de todas las determinaciones realizadas se muestran en la Tabla 6b y en la Figura 27b.

6a. Resultados de la determinación de la densidad aparente en 4 réplicas.

Horizonte	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)			
	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Réplica 1	1.37	1.78	1.90	1.87
Réplica 2	1.37	1.75	1.78	1.68
Réplica 3	1.22	1.63	1.86	1.75
Réplica 4	1.49	1.61	1.59	1.90
n	4	4	4	4
Min	1.22	1.61	1.59	1.68
Max	1.49	1.78	1.90	1.90
Promedio	1.36	1.69	1.78	1.80
Desv.Std.	0.11	0.08	0.13	0.11
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.11</i>	<i>0.08</i>	<i>0.13</i>	<i>0.10</i>
Mediana	1.37	1.69	1.82	1.81

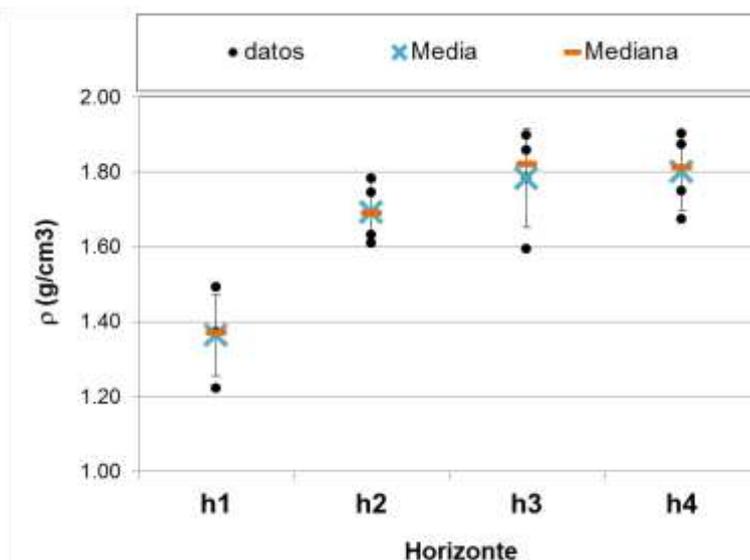


Figura 27a. Densidad aparente basada en el análisis de 4 réplicas.

Tabla 6b. Resultados de la determinación de la densidad en todas las muestras disponibles.

	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)			
Horizonte	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
datos	1.37	1.78	1.90	1.87
datos	1.37	1.75	1.78	1.68
datos	1.22	1.63	1.86	1.75
datos	1.49	1.61	1.59	1.90
datos	1.35	1.80	1.69	1.58
datos	1.31	1.76	1.71	1.64
datos	1.31	1.76	1.76	1.61
datos	1.36	1.73	1.72	1.67
datos	1.28	1.80	1.68	1.70
datos	1.40		1.70	
datos	1.39			
datos	1.36			
datos	1.41			
Promedio	1.36	1.74	1.74	1.71
Desv.Std.	0.07	0.07	0.09	0.11
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.06</i>	<i>0.07</i>
Min	1.22	1.61	1.59	1.58
Max	1.49	1.80	1.90	1.90
Max/Min	1.2	1.1	1.2	1.2
n	13	9	10	9
Mediana	1.36	1.76	1.72	1.68

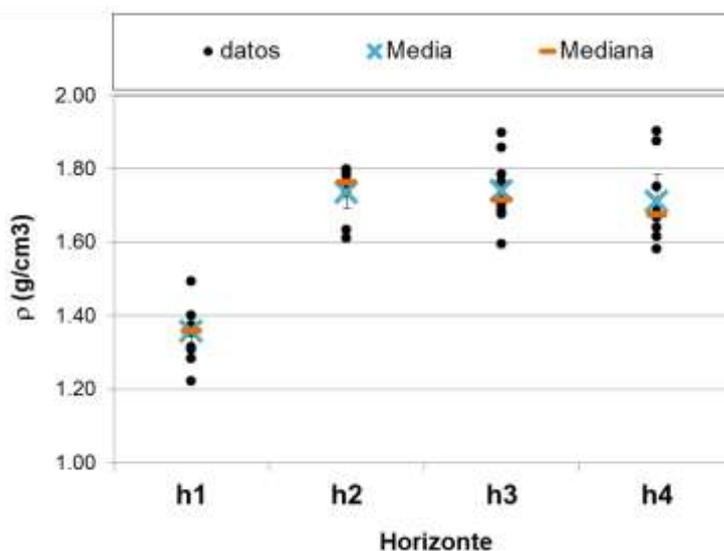


Figura 27b. Densidad aparente basada en el análisis de todas las muestras disponibles.

Permeabilidad saturada

La conductividad hidráulica saturada se ha medido en un permeámetro de laboratorio (Eijkelkamp, modelo 09.02) empleando 5 réplicas de cada horizonte. Siguiendo los protocolos descritos por el fabricante, se aplicó la metodología de carga constante en las muestras que presentaban valores de permeabilidad saturada superior a 10 cm/d y la metodología de carga variable en las muestras con permeabilidad saturada inferior a este valor. Previamente a las medidas, las muestras se saturaron lentamente elevando progresivamente el nivel de agua en el tanque del permeámetro. El tiempo de saturación antes de comenzar las muestras varió entre 6 días (horizonte h1) y algo más de 2 meses (horizonte h4). Los resultados de estas determinaciones se muestran en la Tabla 7 y en la Figura 28.

Tabla 7. Resultados de la determinación de la permeabilidad saturada en 5 réplicas.

Horizonte	PERMEABILIDAD SATURADA, K_s (cm/d)			
	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Réplica 1	74	0.17	0.14	0.08
Réplica 2	186	3.6	0.3	16
Réplica 3	106	2.0	5.6	< 0.04
Réplica 4	107	9.4	0.1	0.04
Réplica 5	274	10	158	20
Min	74	0.17	0.05	0.04
Max	274	10	158	20.0
Promedio	150	5.1	33	7
Desv.Std.	81	4.6	70	10
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>71</i>	<i>4.0</i>	<i>61</i>	<i>9</i>
Mediana	107	3.6	0.33	0.01

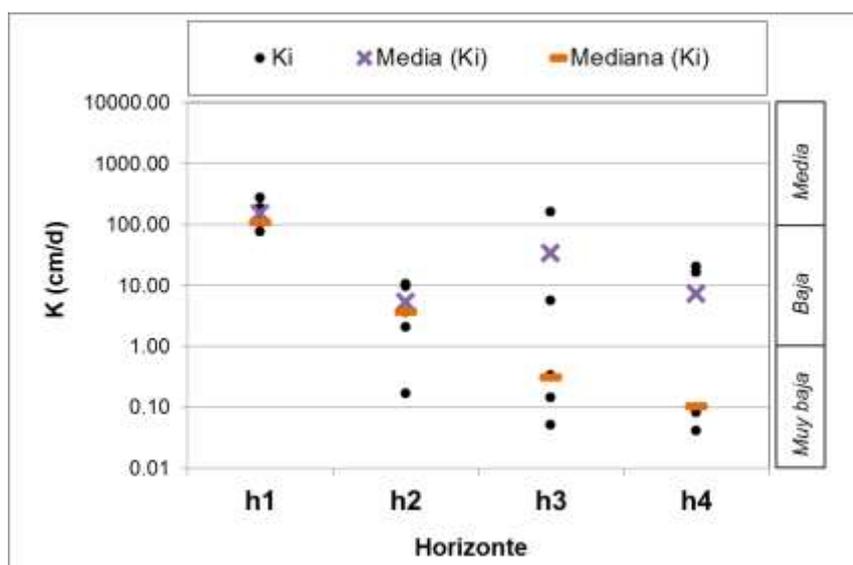


Figura 28. Permeabilidad saturada basada en el análisis de 5 réplicas.

Curvas pF

Las determinaciones de los puntos de las curvas de retención hídrica, o curvas pF, se han realizado empleando el método del recipiente de tensión hídrica para valores de $pF \leq 2,7$ y el método de la membrana a presión para valores de $pF \geq 3,0$. El contenido hídrico de la muestra en equilibrio a cada valor de pF se determina gravimétricamente, en relación con la masa del suelo secado en horno a $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante 24-48 horas (Van Reeuwijk, 2002. Procedures for Soil Analysis, ISRIC (Internacional Soil Reference and Information Centre), 6ª Edición, 120p). Para los puntos de $pF = 0$ (saturación) y $pF 2,0$ (100 hPa) se ha utilizado la caja de arena (Eijkelkamp, modelo 08.01), continuando la succión hasta $pF 2,7$ (500 hPa) en la caja de arena/caolín (Eijkelkamp, modelo 08.02.SA). Las determinaciones de $pF 3,0$ (1000 hPa) y $pF 4,2$ (15500 hPa) se han realizado en un aparato de membrana a presión o cámara de Richards (Eijkelkamp, modelo 08.03). Los ensayos se han llevado a cabo de acuerdo a los procedimientos descritos por el fabricante para cada una de estas técnicas, empleando al menos 5 réplicas para cada profundidad ensayada (Figuras 29a – 29c).

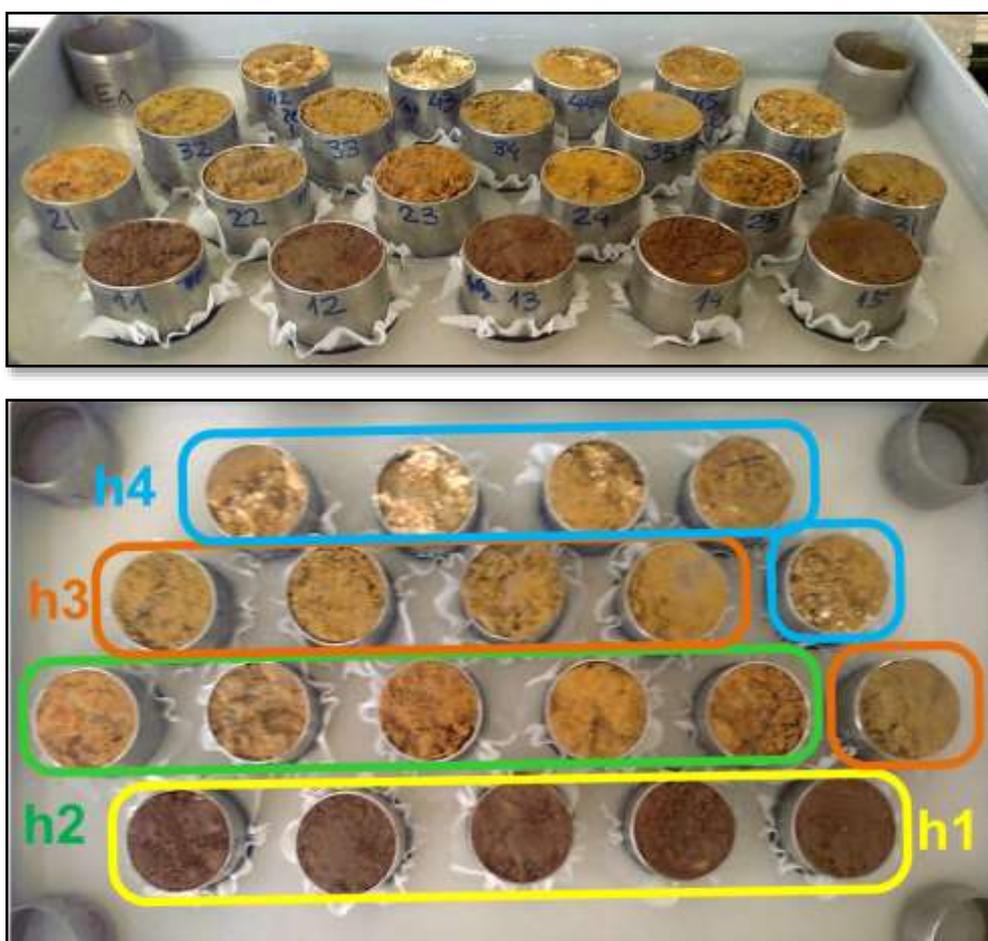


Figura 29a. Muestras de los cuatro horizontes al iniciar el estudio en la caja de arena.

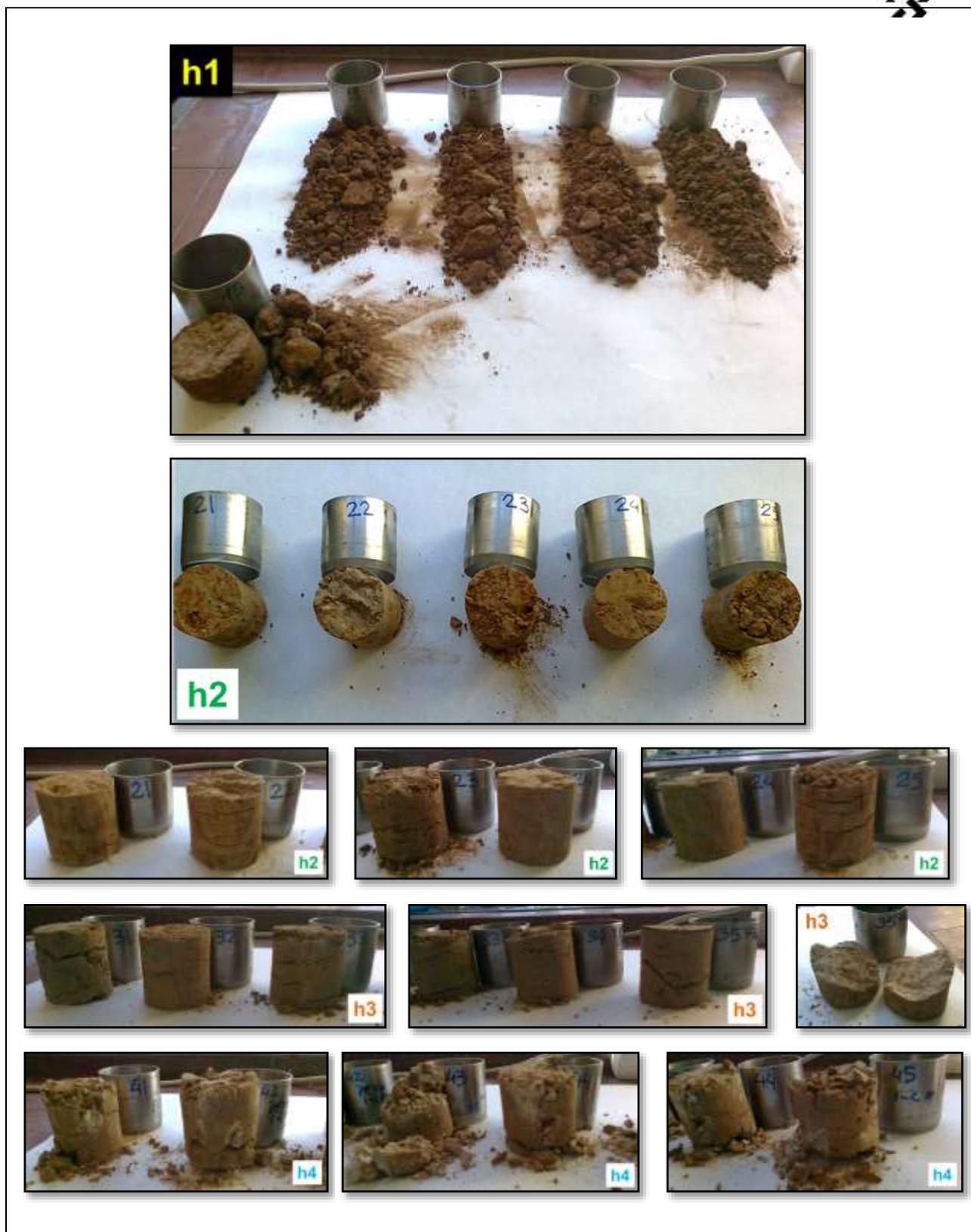


Figura 29b. Muestras de los cuatro horizontes tras finalizar el análisis en la caja de arena-caolín.

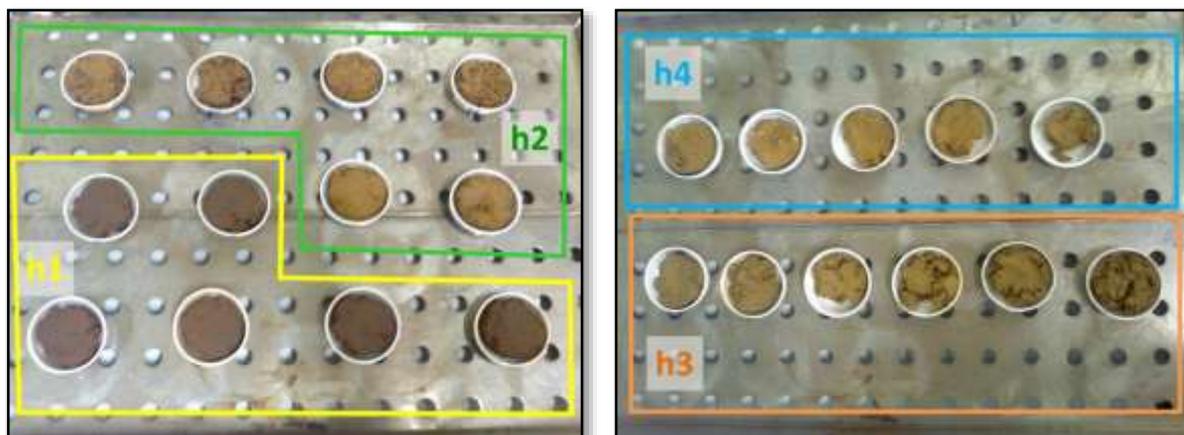


Figura 29c. Muestras de los cuatro horizontes tras finalizar el análisis en la cámara de Richards.

En la tabla 8a se muestran los valores de humedad gravimétrica determinados a los diferentes valores de pF ensayados.

Tabla 8a. Resultados de la humedad gravimétrica (g/g) a los diferentes valores de pF ensayados.

Horizonte	HUMEDAD SATURACIÓN (pF = 0) (g/g)				HUMEDAD (pF = 2,0) (g/g)				HUMEDAD (pF = 2,7) (g/g)			
	h1	h2	h3	h4	h1	h2	h3	h4	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Réplica 1	0.36	0.19	0.24	0.23	0.24	0.17	0.21	0.22	0.16	0.16	0.19	0.21
Réplica 2	0.32	0.22	0.22	0.22	0.23	0.18	0.20	0.20	0.16	0.16	0.19	0.18
Réplica 3	0.33	0.27	0.23	0.22	0.23	0.22	0.20	0.19	0.16	0.19	0.19	0.18
Réplica 4	0.34	0.19	0.22	0.21	0.24	0.18	0.20	0.19	0.15	0.16	0.19	0.18
Réplica 5	0.32	0.20	0.22	0.27	0.24	0.18	0.20	0.22	0.16	0.16	0.19	0.21
Min	0.32	0.19	0.22	0.21	0.23	0.17	0.20	0.19	0.15	0.16	0.19	0.18
Max	0.36	0.27	0.24	0.27	0.24	0.22	0.21	0.22	0.16	0.19	0.19	0.21
Promedio	0.34	0.21	0.23	0.23	0.24	0.19	0.20	0.20	0.16	0.17	0.19	0.19
Desv.Std.	0.02	0.03	0.01	0.03	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.01</i>	<i>0.03</i>	<i>0.01</i>	<i>0.02</i>	<i>0.00</i>	<i>0.02</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>
Mediana	0.33	0.20	0.22	0.22	0.24	0.18	0.20	0.20	0.16	0.16	0.19	0.18

Horizonte	HUMEDAD (pF = 3,0) (g/g)				HUMEDAD (pF = 4,2) (g/g)			
	h1	h2	h3	h4	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Réplica 1	0.14	0.18	0.19	0.23	0.09	0.11	0.14	0.12
Réplica 2	0.15	0.17	0.19	0.21	0.09	0.12	0.13	0.11
Réplica 3	0.14	0.18	0.20	0.22	0.09	0.12	0.14	0.13
Réplica 4	0.14	0.18	0.19	0.22	0.09	0.12	0.14	0.14
Réplica 5	0.15	0.17	0.20	0.22	0.09	0.12	0.14	0.13
Réplica 6	0.15	0.17	0.21			0.12	0.13	0.10
Réplica 7								0.15
Min	0.14	0.17	0.19	0.21	0.09	0.11	0.13	0.10
Max	0.15	0.18	0.21	0.23	0.09	0.12	0.14	0.15
Promedio	0.14	0.18	0.20	0.22	0.09	0.12	0.14	0.13
Desv.Std.	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>	<i>0.01</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.00</i>	<i>0.01</i>
Mediana	0.14	0.18	0.20	0.22	0.09	0.12	0.14	0.13

Las medidas de humedad gravimétrica se han multiplicado por la densidad aparente correspondiente a cada horizonte para calcular los valores de humedad volumétrica (θ , en cm^3/cm^3) a los diferentes pF ensayados. En la tabla 4b se muestran los valores de la humedad volumétrica empleando los valores promedio de densidad aparente de la Tabla 2b (obtenido del análisis de $n > 9$ datos). En la tabla 8c se muestran los valores de la humedad volumétrica empleando los valores promedio de densidad aparente de la Tabla 2a (obtenido del análisis de $n = 4$ datos). La variabilidad en los valores de θ viene determinada principalmente por la variabilidad en los datos de la densidad aparente.

Tabla 8b. Resultados de la humedad volumétrica (θ , cm^3/cm^3) a los diferentes valores de pF ensayados calculada con los datos de densidad aparente de la Tabla 2b.

	HUMEDAD θ (cm^3/cm^3) empleando densidad aparente calculada con $n > 9$							
	h1		h2		h3		h4	
pF	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)
0.0	0.46	0.03	0.37	0.06	0.39	0.02	0.39	0.05
2.0	0.32	0.01	0.32	0.04	0.35	0.02	0.35	0.04
2.7	0.21	0.01	0.29	0.03	0.33	0.02	0.33	0.04
3.0	0.20	0.01	0.31	0.01	0.34	0.02	0.37	0.03
4.2	0.12	0.01	0.21	0.01	0.24	0.01	0.22	0.03

Tabla 8c. Resultados de la humedad volumétrica (θ , cm^3/cm^3) a los diferentes valores de pF ensayados calculada con los datos de densidad aparente de la Tabla 8a.

	HUMEDAD θ (cm^3/cm^3) empleando densidad aparente calculada con $n = 4$							
	h1		h2		h3		h4	
pF	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)	θ	I.C. (95%)
0.0	0.46	0.06	0.36	0.07	0.40	0.04	0.41	0.06
2.0	0.32	0.03	0.32	0.05	0.36	0.03	0.37	0.05
2.7	0.21	0.02	0.29	0.03	0.34	0.03	0.34	0.04
3.0	0.20	0.02	0.30	0.02	0.35	0.04	0.39	0.04
4.2	0.12	0.01	0.20	0.02	0.24	0.02	0.23	0.04

Las curvas pF correspondientes a los cuatro horizontes estudiados se muestran en la Figura 29d. Para cada uno de los horizontes se han determinado las fracciones de volumen que corresponden al agua total o porosidad ($\theta(\text{pF}=0)$), agua drenable ($\theta(\text{pF}=0) - \theta(\text{pF}=2)$), agua disponible para las plantas ($\theta(\text{pF}=2) - \theta(\text{pF}=4.2)$) y al agua no disponible ($\theta(\text{pF}=4.2)$). Estos datos se representan en Figura 4e expresados en unidades de %.

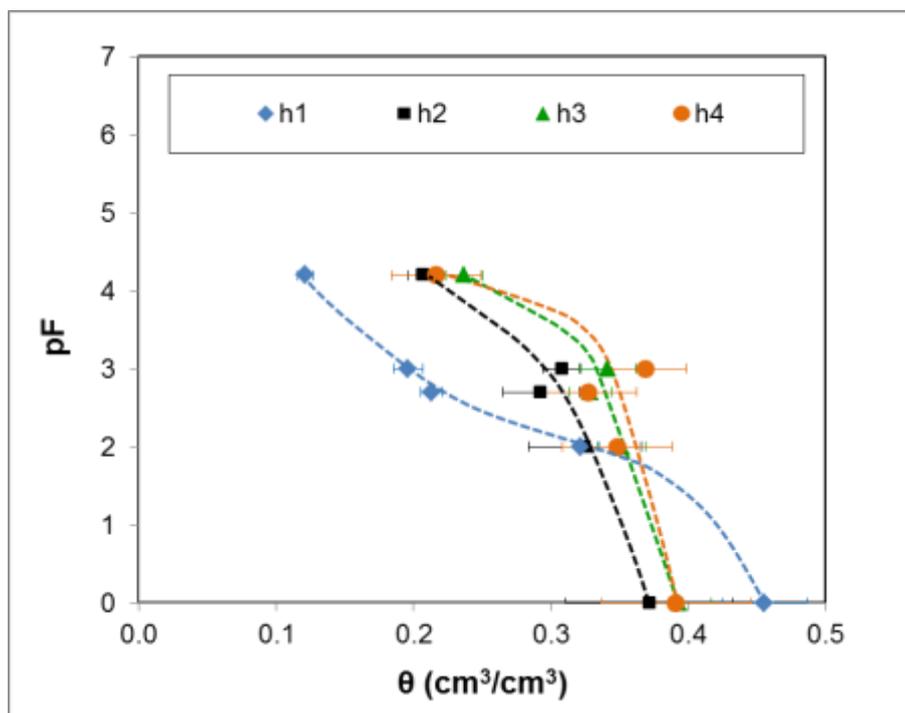


Figura 29d. Curvas de retención hídrica basadas en los datos de la Tabla 4b.

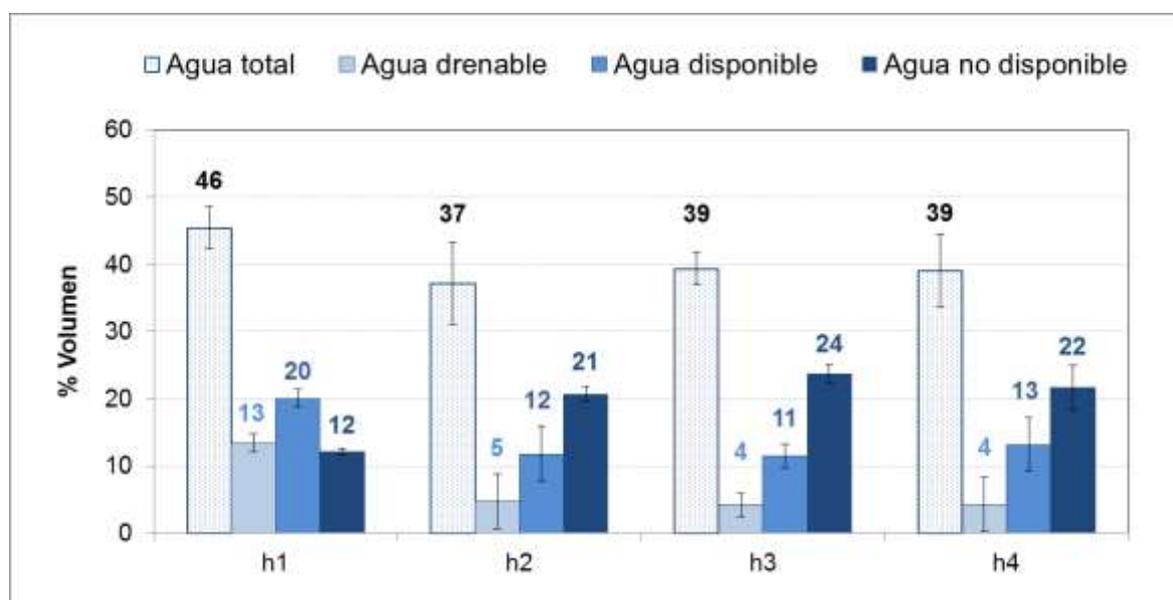


Figura 29e. Porcentajes de agua total, drenable, disponible y no disponible calculados a partir de los datos de la Tabla 4b.



Resumen final

Las medidas de densidad aparente realizadas se resumen en la Tabla 9a.

- El horizonte superficial h1 presenta menor densidad aparente que el resto de los horizontes.
- La densidad aparente de los horizontes h2, h3 y h4 es similar.
- No hay diferencias significativas entre la media y la mediana de cada conjunto de observaciones.
- Al analizar mayor número de muestras, los resultados varían de forma diferente en los diferentes horizontes, siendo los cambios más notables en los horizontes más potentes (h2 y h4). Posiblemente con $n \geq 9$ está mejor representada la variabilidad en cada horizonte (como los nódulos de carbonato en h4). Aunque previamente a la determinación de la densidad aparente las muestras adicionales se habían sometido a otros ensayos, la manipulación consistió únicamente en saturación y desaturación de las muestras, y aquellas en las que el volumen de muestra era inferior al volumen del cilindro no se emplearon para determinaciones de densidad aparente.

Los resultados obtenidos para la permeabilidad saturada se resumen en la Tabla 9b.

- El horizonte superficial h1 presenta la mayor permeabilidad saturada. Se observa una tendencia de permeabilidad decreciente con la profundidad.
- Existe una notable variabilidad en los valores de K_s de las diferentes muestras de un mismo horizonte, especialmente en los horizontes h3 ($K_s(\max)/K_s(\min) > 3000$) y h4 ($K_s(\max)/K_s(\min) > 500$).
- Las diferencias entre la media y la mediana de cada conjunto de observaciones es significativa, especialmente en los horizontes h3 y h4.
- Dada la variabilidad observada, en rangos que superan los dos órdenes de magnitud en algunos horizontes, sería necesario medir más réplicas para tener valores representativos. Con tan sólo cinco determinaciones, posiblemente la mediana sea una medida más representativa de la permeabilidad saturada de cada horizonte que el valor promedio.

Los resultados obtenidos para los puntos característicos de la curva pF se resumen en la Tabla 9c.

- La curva del horizonte h1 se aproxima a la característica de textura limosa mientras que la de los horizontes h2, h3 y h4 se aproxima a la de textura arcillosa.
- Se ha observado una variabilidad relativamente baja en las determinaciones de la humedad gravimétrica correspondiente a cada horizonte y cada valor pF. La variabilidad en los valores de la humedad volumétrica viene determinada principalmente por la variabilidad en los datos de la densidad aparente.

- Por otro lado, no se observan diferencias significativas entre la medida y la mediana en cada conjunto de determinaciones.

Tabla 9a. Resumen de los resultados de densidad aparente con $n = 4$ (izquierda) y $n \geq 9$ (derecha).

Horizonte	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)				Horizonte	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)			
	h1	h2	h3	h4		h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2	Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Promedio	1.36	1.69	1.78	1.80	Promedio	1.36	1.74	1.74	1.71
Desv.Std.	0.11	0.08	0.13	0.11	Desv.Std.	0.07	0.07	0.09	0.11
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.11</i>	<i>0.08</i>	<i>0.13</i>	<i>0.10</i>	<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>0.04</i>	<i>0.04</i>	<i>0.06</i>	<i>0.07</i>
Min	1.22	1.61	1.59	1.68	Min	1.22	1.61	1.59	1.58
Max	1.49	1.78	1.90	1.90	Max	1.49	1.80	1.90	1.90
n	4	4	4	4	n	13	9	10	9
Mediana	1.37	1.69	1.82	1.81	Mediana	1.36	1.76	1.72	1.68

Tabla 9b. Resumen de los resultados de permeabilidad saturada.

Horizonte	PERMEABILIDAD SATURADA, Ks (cm/d)			
	h1	h2	h3	h4
Profundidad (m)	0-0,1	0,1-0,8	0,8-1	1-2
Promedio	150	5.1	33	7
Desv.Std.	81	4.6	70	10
<i>Int.Conf (95%)</i>	<i>71</i>	<i>4.0</i>	<i>61</i>	<i>9</i>
Min	74	0.17	0.05	< 0.04
Max	274	10	158	20
Max/Min	4	63	3160	>500
n	5	5	5	5
Mediana	107	3.6	0.3	0.01

Tabla 9c. Resumen de los resultados correspondientes a la curva de retención hídrica.

pF	HUMEDAD θ (cm ³ /cm ³) empleando densidad aparente calculada con $n > 9$							
	h1		h2		h3		h4	
	θ	<i>I.C. (95%)</i>	θ	<i>I.C. (95%)</i>	θ	<i>I.C. (95%)</i>	θ	<i>I.C. (95%)</i>
0.0	0.46	<i>0.03</i>	0.37	<i>0.06</i>	0.39	<i>0.02</i>	0.39	<i>0.05</i>
2.0	0.32	<i>0.01</i>	0.32	<i>0.04</i>	0.35	<i>0.02</i>	0.35	<i>0.04</i>
2.7	0.21	<i>0.01</i>	0.29	<i>0.03</i>	0.33	<i>0.02</i>	0.33	<i>0.04</i>
3.0	0.20	<i>0.01</i>	0.31	<i>0.01</i>	0.34	<i>0.02</i>	0.37	<i>0.03</i>
4.2	0.12	<i>0.01</i>	0.21	<i>0.01</i>	0.24	<i>0.01</i>	0.22	<i>0.03</i>



Bibliografía

Al Kuisi, M., Aljazzar, T., Rude, T., Margane, A., 2008. Impact of the Use of Reclaimed Water on the Quality of Groundwater Resources in the Jordan Valley, Jordan. *Clean-Soil Air Water*. 36, 1001-1014.

Bhardwaj, A.K., Goldstein, D., Azenkot, A., Levy, G.J., 2007. Irrigation with treated wastewater under two different irrigation methods: Effects on hydraulic conductivity of a clay soil. *Geoderma*. 140, 199-206. Ayers RS y Westcot DW (1985). *Water quality for agriculture*. Irrigation and Drainage Paper 29, 1st revision, Food and Agriculture Organisation of the United Nations, Rome.

Blowes, D.W.; Ptacek, C.J.; Benner, S.G.; McRae, C.W.T.; Benner, T.A. y Puls, R.W., 2000. Treatment of inorganic contaminants using permeable reactive barriers. *Journal of Contaminant Hydrology*, 45, pp. 123-137.

BOE (1992). Real Decreto 1315/1992, de 30 de octubre, por el que se modifica parcialmente el reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminares I, IV, V, VI y VII de la Ley 29/1995, de 2 de agosto, de Aguas aprobada por el Real Decreto 849/1986 de 11 de abril. BOE nº 288, de 1 de diciembre de 1992, pp 40563-40565.

BOE (2001). Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Aguas. BOE nº 176 de 24 de Julio de 2001, pp 26791-26818

BOE (2005). Real Decreto 9/2005, de 14 de enero, por el que se establece la relación de actividades potencialmente contaminantes del suelo y los criterios y estándares para la declaración de suelos contaminados.

BOE (2007). Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de las aguas depuradas. BOE nº 294 de 8 de diciembre, pp 50639-50661.

Camp, R.C., 1998. Subsurface drip irrigation: a review. *Trans. of ASAE* 41,1353-1367.

Casas, A.; Tapias, J.; De Bustamante, I.; Iglesias, J.A.; De Miguel, A.; Lillo, J.; Leal, M.; Candela, L.; Cabrera, M.C.; Palacios, M.P.; Mas, J. (2011). *Guía metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y recarga de acuíferos*. Edit. Consolider-Tragua. 48 pp. Madrid.

Chiou, R.J., 2008. Risk assessment and loading capacity of reclaimed wastewater to be reused for agricultural irrigation. *Environ Monit Assess*. 142, 255-262.

De Bustamante, I., Dorado, M., Vera, S.; Oliveros, C., (1998). Filtros verdes. Un sistema para la depuración y reutilización de aguas residuales. *Tecnoambiente*, 79: 73-76.

El Ayni, F., Cherif, S., Jrad, A., Trabelsi-Ayadi, M., 2011. Impact of Treated Wastewater Reuse on Agriculture and Aquifer Recharge in a Coastal Area: Korba Case Study. *Water Resources Management*. 25, 2251-2265.

Folch, M., Salgot, M., Brissaud, F. La infiltración-percolación como sistema de depuración avanzada de aguas residuales por zona vadosa. in: Rojas O.S., Ramírez J.C., eds. *Estudios de la Zona no Saturada*. Barcelona; 2009

Leal, R.M.P., Firme, L.P., Herpin, U., da Fonseca, A.F., Montes, C.I.R., dos Santos Dias, C.T., Melfi, A.J., 2010. Carbon and nitrogen cycling in a tropical Brazilian soil cropped with sugarcane and irrigated with wastewater. *Agric Water Manage*. 97, 271-276.

Leal, M.; Pachecho, R.G.; de Miguel, A. & Martínez-Hernández, V. (2011) TOC, nitrogen and phosphorus adsorption by different reactive materials: application to the wastewater reuse through horizontal permeable



reactive barriers. Comunicación Oral en: 2nd IWA Spain National Young Water Professionals Conference. Madrid, 15-17 Junio.

Magesan, G., Williamson, J., Sparling, G., Schipper, L. y Lloyd-Jones, A. (1999). "Decreased hydraulic conductivity in soils irrigated with waste waters of different strengths: field and laboratory studies". *Austr J of Soil Res* 37, 391-402.

Martín, I. 2010. Efectividad de distintos sistemas de depuración de aguas residuales en la eliminación de patógenos con vistas a la reutilización planificada del agua. 2010. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla.

Martín, I. Ariza, C., Úbeda, J.M., Santos, M.N., Sánchez, L., Trujillo, E.M., Guevara, D.C., Cutillas, C. and de Rojas, M. 2009. Comparative study on removal of pathogenic and parasitic organisms using extended wastewaters treatment technologies. *Desalination and Water Treatment*, 4, 135-142.

Mendoza-Grimón, V., Rodríguez-Martín, R., Fernández-Vera, J.R., Palacios-Díaz, M.P., Hernández-Moreno, J.M., 2003. Estudio de la disponibilidad del fósforo y boro aportados por las aguas depuradas en la isla de Gran Canaria: Metodología y resultados preliminares. In: Alvarez-Benedí, J., Marinero, P. (Eds.), *Estudios en la zona no saturada del suelo. Proceedings of the Symposium. VI*, 355-359. ISBN: 84-688-3698-2

Metcalf, R. y Eddy, J. (1985). *Ingeniería sanitaria. Tratamiento, evacuación y reutilización de aguas residuales*. Ed. Labor, 2ª edic, Barcelona, 969 pp.

Navarro Garnica, N. (1987). La depuración por aplicación de aguas residuales al terreno. En: *Congreso sobre tecnologías de bajo coste para la depuración de aguas residuales*, Madrid.

Nicolás Isasa, J. y Fernández Casals, M.J. (1984). Experiencias de filtros verdes en Madrid y Castilla-La Mancha. En: *II Congr. Nac. Recuperación de recursos de los residuos*, Soria.

Rahil, M.H., Antonopoulos, V.Z., 2007. Simulating soil water flow and nitrogen dynamics in a sunflower field irrigated with reclaimed wastewater. *Agric Water Manage.* 92, 142-150.

Rauch-Williams, T., Hoppe-Jones, C., Drewes, J.E., 2010. The role of organic matter in the removal of emerging trace organic chemicals during managed aquifer recharge. *Water Res.* 44, 449-460.

Simunek, J., Jarvis, N.J., van Genuchten, M.T., Gardenas, A., 2003. Review and comparison of models for describing non-equilibrium and preferential flow and transport in the vadose zone. *J Hydrol.* 272, 14-35.

Torrentó, C., Otero, N., Menció, A., Soler, A., Mas-Pla, J. El papel de la zona no saturada en la contaminación por nitratos en las aguas subterráneas de Osona (NE España). in: Rojas O.S., Ramirez J.C., eds. *Estudios en la Zona no Saturada del Suelo*. Barcelona; 2009

TRAGUA (2011). Presentación de la "Guía Metodológica para el uso de aguas regeneradas en riego y recarga de acuíferos" en la Confederación Granadina de Empresarios. URL: <http://www.consolider-tragua.com/noticias/noti20.html>

van Genuchten, M.T., Simunek, J., 2004. Integrated modeling of vadose-zone flow and transport processes. In: Feddes R.A., Derooij G.H., Vandam J.C., *Unsaturated-Zone Modeling: Progress, Challenges and Applications*. Springer. 6, pp.

Vengosh, A., Keren, R., 1996. Chemical modifications of groundwater contaminated by recharge of treated sewage effluent. *J Contam Hydrol.* 23, 347-360.