

EVOLUCIÓN DE LAS PROPIEDADES DE UN SUELO DE CULTIVO REGADO CON AGUA REGENERADA

V. González-Naranjo^{1 y 2*}, M. Leal¹, A. de Miguel¹, V. Martínez-Hernández¹, J. Lillo^{3 y 1} y I. de Bustamante^{4 y 1}.

¹IMDEA Agua, Alcalá de Henares, España. e-mail: victor.naranjo@imdea.org, maria.leal@imdea.org, angel.demiguel@imdea.org, virtudes.martinez@imdea.org

²Departamento de Química I, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España.

³Departamento de Biología y Geología. Universidad Rey Juan Carlos, Móstoles, España. e-mail: javier.lillo@urjc.es

⁴Departamento de Geología, Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, España. e-mail: irene.bustamante@uah.es

RESUMEN. El uso de aguas regeneradas se presenta como una alternativa viable para mitigar los problemas de escasez de agua en las regiones áridas y semiáridas. El presente estudio se ha centrado en evaluar la evolución de las propiedades del suelo en una experiencia de reutilización para regadío. Para ello, se ha contado con dos parcelas de *Jatropha curcas* L., una regada con agua de abastecimiento y otra con agua regenerada. El objetivo principal ha sido el análisis de las diferencias encontradas en las propiedades del suelo de cada una de las dos parcelas. Se han realizado cuatro campañas de muestreo en las que se analizaron el pH, la conductividad eléctrica, la materia orgánica, el fósforo asimilable y los nitratos. Después de dos años de riego, los resultados muestran un suave descenso en el fósforo, los nitratos y la conductividad eléctrica; y un aumento en el contenido de materia orgánica.

ABSTRACT. The use of treated wastewater with the proper quality for crops irrigation could represent a feasible solution for many arid and semi-arid countries. The current study has been carried out in the Experimental Plant of Carrión de los Céspedes (Seville, Spain), where two plots of *Jatropha curcas* L., one irrigated with drinking water and the other one with reclaimed water, has been installed. The main objective of this study was to analyze the major differences between the two plots regarding the soil properties. Soil samples were collected before and after irrigation to control and monitor the evolution of soil properties. Particle size distribution, pH, electrical conductivity, organic matter, available phosphorus and nitrates were measured. After two years of irrigation, a slight decrease in available phosphorus, nitrates and electrical conductivity was observed, in contrast to the organic matter content, which increased. These trends here presented should be contrasted with other soil characteristics.

para el riego se considera, por tanto, una solución técnica y económicamente factible (Kiziloglu *et al.* 2008; Molinos-Senante *et al.* 2011). Por ello, muchos estudios se han enfocado en investigar los efectos que esta actividad produce en el propio cultivo así como en el medio receptor (suelo y aguas subterráneas). Esta práctica ha sido regulada en España con la entrada en vigor en el año 2007 del Real Decreto 1620/2007, que establece el régimen jurídico para la reutilización de aguas (BOE, 2007).

El riego con agua regenerada, en general, supone un aporte al suelo de nutrientes óptimos para el crecimiento de los cultivos (Mujeriego, 1990). Pero para analizar profundamente las modificaciones en las condiciones del suelo, se han de contemplar diversos factores como el clima, los parámetros agronómicos dependientes del cultivo, y, sobre todo, las propiedades tanto del agua a emplear como del suelo sobre el que se va aplicar dicha agua. La dinámica del agua a través del medio edáfico interviene tanto en la descomposición como en la liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas, nutrientes y otros microelementos (Simonete *et al.* 2003), y pueden incluso conllevar un enriquecimiento de las condiciones del medio, aumentando la productividad. Aunque también pueden inducirse ciertas afecciones: pérdida de estabilidad estructural, reduciendo consecuentemente la conductividad hidráulica, por un aumento de sodio (Qian y Mecham, 2005; Mandal *et al.* 2008); cambios en las relaciones dinámicas de los compuestos orgánicos e inorgánicos, por modificaciones en las condiciones de salinidad; o un aporte de metales que podría hacer alcanzar niveles de fitotoxicidad (Yadav *et al.* 2002; Gupta *et al.* 2008).

Junto con la escasez de agua, otra causa de preocupación a nivel mundial son la producción de alimentos y el consumo energético. Por ello se plantea el cultivo de *Jatropha curcas* L., un cultivo bioenergético que no interfiere con los cultivos alimentarios, como una alternativa para la producción de energía renovable. *Jatropha curcas* L es una planta oleaginosa, cuyas semillas tienen una conversión a biodiesel entre un 30% y un 40%, generando un subproducto que además, puede ser utilizado como fertilizante y productor de biogás (Achten *et al.* 2008; FAO, 2010). Además, la capacidad que presenta la *Jatropha curcas* L. para crecer en regiones secas genera un especial interés tanto económico como

1.- Introducción

La agricultura es la actividad que más agua consume, suponiendo alrededor de un 70% del consumo total de agua dulce (FAO, 2007a; Zimmerman *et al.* 2008). En España este valor asciende a un 75% (INE, 2008). Consecuentemente, la reutilización de aguas en la mayoría de regiones áridas o semiáridas, es una práctica cada vez más extendida. El uso de aguas regeneradas de calidad apta

social, en el uso de este cultivo para la recuperación de zona degradadas (Abou Kheira y Atta, 2009).

El presente estudio, localizado en la Planta Experimental de Carrión de los Céspedes (PECC) (Sevilla), tiene como objetivo principal el análisis de las diferencias en las propiedades de un mismo suelo de cultivo, regado por un lado con agua regenerada y por otro con agua de red, para integrarlo como herramienta en la evaluación global de una experiencia de reutilización de agua para riego.

2.- Material y métodos

2.1.- Descripción del lugar

Las parcelas de estudio se localizan en la PECC (Sevilla). Se trata de una planta de tratamiento de aguas residuales provenientes de la población de Carrión de los Céspedes de 2.500 habitantes, que recibe un caudal medio de 400 m³/día, y gestiona el CENTA (www.centa.es). La media anual de precipitación y temperatura en el área son de 650 mm y 17,4 °C respectivamente (www.aemet.es). El clima se caracteriza por eventos de lluvia concentrados principalmente en primavera y otoño y un verano seco y caluroso. El suelo se clasifica como *Calcic Haploxeralf* (De Bustamante *et al.* 2010).

2.2.- Diseño experimental

Se ha trabajado en dos parcelas igualmente diseñadas, con un área de 300 m², un marco de plantación de 3,5x2 metros y una densidad de población de 1.430 unidad/ha. La única diferencia entre ambas parcelas es el agua de riego. En una de ellas se ha aplicado agua regenerada (AR) y en otra agua de red de abastecimiento (AA). Las parcelas fueron diseñadas y ubicadas de tal manera que se evitaran las interferencias debidas a flujos de agua subterránea. El agua regenerada proviene de un sistema de aireación prolongada seguida de un proceso de filtración en un filtro de arena a presión. El sistema de riego fue instalado en mayo de 2010, contando con una red de tuberías independiente para cada calidad de agua utilizada. El riego se realiza mediante sistema de goteo, utilizando tubería autocompensante con un caudal de 2,3 L/h, manteniéndose por debajo de la capacidad de infiltración del suelo. Los goteros se encuentran espaciados 0,5 m entre sí. En la parcela regada con AA se cuenta con un total de 5 líneas laterales de 20 metros de longitud y espaciadas 3,5 m. En la parcela regada con AR, las líneas laterales ascienden a 7, con 15 m de longitud e igualmente espaciadas 3,5 m. Los caudales de riego se estimaron aplicando el modelo CROPWAT (FAO, 2007b) ajustando el riego a ET₀. Las plantas fueron transplantadas en marzo de 2010, extendiendo la temporada de riego de junio a octubre, con un total de 380 mm de agua aplicados. La fertilización tuvo lugar en diciembre de 2010 para preparar al cultivo para las bajas temperaturas, seleccionando un complejo binario (52% P₂O₅ y 34% K₂O), aplicándose con una relación de 150 kg/ha en ambas parcelas.

2.3.- Análisis de las aguas de riego

Las aguas de riego se muestrearon dos veces por campaña de riego con un total de 4 muestras para cada agua. Estas muestras se recogieron en botellas de plástico y se mantuvieron refrigeradas a 4 °C para su conservación hasta su análisis. La calidad de ambas se determinó de acuerdo al Standard Method for the Examination of Water and Wastewater (Eaton *et al.* 2005), midiendo conductividad eléctrica (CE), potencial redox, pH, sólidos totales en suspensión (STS), carbono orgánico total, demanda biológica de oxígeno (DBO₅), turbidez, demanda química de oxígeno (DQO), y aniones y cationes disueltos (NO₂⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). Una vez realizados los análisis de pH, CE, potencial redox y turbidez, las muestras se filtraron a vacío, calculando los STS tras llevar los filtros a estufa durante 24 h a 105 °C, determinando este parámetro por diferencia de pesada. El nitrógeno inorgánico total se calculó mediante la suma de las especies NO₂⁻, NO₃⁻ y NH₄⁺. Para la determinación del carbono orgánico disuelto (*DOC-Disolved Organic Carbon*), las muestras se filtraron con un filtro de 0,45 µm y se analizaron con un Analizador TOC Shimadzu. Los iones se midieron en un Cromatógrafo Iónico Methrom Advanced Compact IC con dos canales. La DQO fue analizada en un espectrofotómetro Merck Spectroquant TR420 y Spectroquant NOVA6 y la DBO₅ se ha analizado por el método respirométrico Oxitop. La CE y el pH se midieron con un Multímetro Crison MM 41. Los metales se determinaron en un equipo de inducción de plasma acoplado con detector de masas (ICP-MS 7700X Agilent). Todas las muestras fueron analizadas en laboratorio de aguas del instituto IMDEA Agua.

2.4.- Análisis de los suelos

Se llevaron a cabo cinco campañas de muestreo de suelos en diciembre de 2010, marzo de 2011, diciembre de 2011, mayo de 2012 y noviembre de 2012, comenzando los muestreos antes del inicio de la experiencia (blanco). Los parámetros físico-químicos se determinaron de acuerdo con la Guía de Caracterización Edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales (González-Naranjo *et al.* 2012). Se tomaron un total de 4 muestras superficiales en cada campaña, de 0 a 20 cm de profundidad, dos de ellas a 10 cm de los goteros y 2 de ellas a 50 cm de los mismos. Fueron secadas al aire y tamizadas a través de un tamiz de 2 mm de luz de malla. La distribución del tamaño de partículas y la textura se determinaron mediante el método de Bouyoucos, utilizando hexametáfosfato de sodio ((NaPO₃)₆) como agente dispersante. El pH se midió en una suspensión suelo-agua 1:2,5 y la conductividad eléctrica (CE) en una suspensión suelo-agua 1:5. El contenido en materia orgánica (MO) fue determinado con el método del dicromato de potasio (K₂Cr₂O₇), analizando el contenido en carbono orgánico mediante valoración con Sal de Mohr. El fósforo disponible se

determinó mediante el método de Olsen and Dean, analizándose las soluciones resultantes mediante espectrofotometría. Los nitratos (NO_3^-) se analizaron en un Cromatógrafo Iónico Methrom Advanced Compact IC con dos canales tras ser extraídos con sulfato cálcico (CaSO_4). La distribución del tamaño de partículas y la textura fue determinada anualmente, mientras que el resto de parámetros se determinó para todas las campañas. Todas las muestras fueron analizadas en el laboratorio de suelos del instituto IMDEA Agua.

3.- Resultados y discusión

3.1.- Calidad del agua de riego

Las principales características físico-químicas de las dos calidades del agua de riego empleadas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de las dos calidades del agua empleadas en el riego del cultivo de *Jatropha curcas* L., agua regenerada y agua de red, expresadas como los valores medios durante el periodo de riego \pm el error estándar

Propiedad	Agua regenerada	Agua blanca
Conductividad eléctrica (dS/m)	1,030 \pm 0,053	0,242 \pm 0,026
Potencial Redox (mV)	130,71 \pm 18,58	234,45 \pm 22,15
pH	8,23 \pm 0,11	7,90 \pm 0,13
STS (mg/L)	13,54 \pm 2,44	ND
COT (mg/L)	10,42 \pm 1,24	1,91 \pm 0,50
DBO ₅ (mg/L)	3,36 \pm 0,69	0,50 \pm 0,10
DQO (mg/L)	37,54 \pm 3,26	7,00 \pm 0,20
Turbidez (UNT)	17,49 \pm 7,48	1,12 \pm 0,68
Cl ⁻ (mg/L)	126,81 \pm 8,74	19,85 \pm 1,01
NO ₂ ⁻ (mg/L)	4,00 \pm 0,87	ND
NO ₃ ⁻ (mg/L)	47,40 \pm 8,02	1,25 \pm 0,37
PO ₄ ³⁻ (mg/L)	13,67 \pm 1,29	ND
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	96,13 \pm 3,10	16,54 \pm 2,32
Na ⁺ (mg/L)	119,50 \pm 9,26	11,16 \pm 1,17
NH ₄ ⁺ (mg/L)	3,78 \pm 1,15	0,07 \pm 0,02
K ⁺ (mg/L)	23,67 \pm 1,38	2,29 \pm 0,05
Mg ²⁺ (mg/L)	21,20 \pm 11,28	9,26 \pm 1,15
Ca ²⁺ (mg/L)	54,39 \pm 1,71	29,45 \pm 2,49

ND: No Detectado

Las dos muestras son ligeramente alcalinas, con un pH superior para el AR. Por su parte, el potencial redox es el único parámetro cuyo valor es mayor para el AA. Sólo se detectaron STS en el AR, alcanzando un valor de 13,54 mg/L. La salinidad, relacionada directamente con el valor de la conductividad eléctrica, evidencia grandes diferencias entre ambas aguas, siendo mucho mayor para el AR. La salinidad se ve altamente afectada por las concentraciones

de los iones presentes en la muestra, existiendo una contribución bastante importante, en este caso, por parte de los nitratos, sulfatos y cloruros. Para los nitratos, las concentraciones en AA y en AR son de 1,25 y 47,40 mg/L, para los cloruros 19,85 y 126,81 y para los sulfatos estas ascienden a 16,54 y 96,13 mg/L. A pesar de ello, se puede considerar que el agua regenerada es apta para el riego, ya que la salinidad de un agua afectará, como máximo, a un 25% de la producción en las especies más sensibles (Mass y Grattan, 1999). Todos los parámetros determinados toman valores mayores en el caso de AR, destacando las diferencias para los iones Cl⁻, Na⁺ y K⁺. También el NH₄⁺ presenta diferencias considerables, siendo de 0,07 mg/L para el AA y 3,78 mg/L para el AR, así como el contenido de carbono, observándose como la concentración del COT es 5 veces mayor para el AR que para el AA.

3.2.- Propiedades del suelo antes del riego

Los resultados correspondientes a todos los parámetros físico-químicos determinados para las muestras de suelo de las dos parcelas utilizadas se presentan en la Tabla 2. La muestra correspondiente al blanco, antes de la plantación de la *Jatropha curcas* L. y del riego, posee un pH de 7,87, por lo que se trata de un suelo básico, y una conductividad eléctrica de 0,17 dS/m, siendo, por tanto, deseable para plantas sensibles a las sales (USDA, 1996). La materia orgánica, con un porcentaje de 1,84, al tratarse de un suelo destinado a un regadío intensivo, se puede considerar baja. En cuanto al fósforo asimilable (o fósforo Olsen), presenta una concentración de 19,52 mg/kg. La caracterización textural realizada sobre la muestra inicial (blanco) determinó una clasificación textural franca. Teniendo en cuenta esta clasificación, podemos afirmar que se trata de un suelo con contenido medio-alto de fósforo asimilable. Por último, el contenido de nitratos se estableció en 152,72 mg/kg.

3.3.- Evolución de las propiedades de los suelos en el periodo de riego

Para el pH (Fig. 1), se ha observado un leve aumento en las dos parcelas, pero dentro de un rango muy limitado, con un paso de moderadamente básico a básico, pudiendo considerarse como constante, como ya se demostró en varios trabajos que estudiaron el efecto del riego con agua reutilizada (Ramírez-Fuentes *et al.* 2002; Heidarpour *et al.* 2007; Tzanakakis *et al.*, 2011). Esta ausencia de variación del pH debe estar relacionada con la capacidad tampón del propio suelo. Además no se observa diferencia entre las evoluciones de ambas parcelas, lo que se debe a que ambas calidades tenían un pH ligeramente básico (8,23 AR y 7,90 AA).

Tabla 2. Propiedades de los suelos de la parcela regada con agua regenerada (AR) y de la parcela regada con agua blanca (AA), presentados como las medias de las 4 muestras tomadas para cada parcela \pm el error estándar

		pH	CE (dS/m)	MO (%)	P asimilable (mg/kg)	NO ³ (mg/kg)
31/12/10	Blanco	7,87 \pm 0,09	0,17 \pm 0,02	1,84 \pm 0,18	19,52 \pm 1,52	152,72 \pm 15,83
10/03/11	AR	8,38 \pm 0,37	0,09 \pm 0,01	5,39 \pm 0,34	11,40 \pm 1,98	8,78 \pm 3,18
	AA	8,20 \pm 0,05	0,09 \pm 0,01	5,40 \pm 0,45	11,77 \pm 1,09	7,70 \pm 0,79
01/12/11	AR	7,84 \pm 0,19	0,03 \pm 0,02	1,97 \pm 0,48	42,20 \pm 1,86	22,09 \pm 2,38
	AA	7,71 \pm 0,11	0,02 \pm 0,01	5,27 \pm 0,44	29,38 \pm 1,08	20,50 \pm 3,10
22/05/12	AR	8,13 \pm 0,12	0,12 \pm 0,02	0,43 \pm 0,22	16,13 \pm 1,67	12,70 \pm 2,31
	AA	8,19 \pm 0,04	0,07 \pm 0,01	0,94 \pm 0,08	14,71 \pm 0,36	16,52 \pm 4,65
28/11/12	AR	8,33 \pm 0,04	0,12 \pm 0,01	1,37 \pm 0,18	22,89 \pm 2,43	35,5 \pm 10,40
	AA	8,19 \pm 0,06	0,07 \pm 0,01	1,47 \pm 0,11	21,73 \pm 4,46	17,17 \pm 3,48

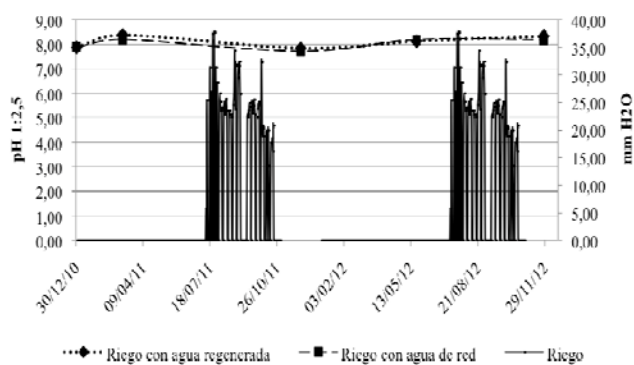


Fig. 1. Evolución del pH del suelo de las dos parcelas en el periodo de estudio. Se representan datos de riego (mm)

La CE (Fig. 2), aunque con la misma tendencia en ambas parcelas, siempre presenta valores menores para la parcela regada con AA. Este parámetro sufrió una disminución muy acusada tras las dos campañas de riego, coincidentes con el verano, con un mínimo para el invierno de 2012. Los valores finales, de 0,12 dS/m para AR y 0,07 dS/m para AA, muestran que podríamos encontrarnos en un medio con escasos nutrientes para el cultivo (USDA, 1996). Las reducciones se pueden deber al lavado de las sales que tenía el suelo inicialmente por la incorporación de un sistema de riego, con aporte de agua en temporada baja de lluvias para la zona de estudio (Tzanakakis *et al.* 2011). Resultados opuestos fueron los encontrados por otros autores, como Nunes *et al.* (2007), que observaron un aumento en la salinidad de los suelos de su estudio. Como se puede observar en la Fig.2, los valores de la parcela regada con AR son siempre ligeramente superiores a los de la parcela regada con AA, acusándose más la diferencia al final del periodo de riego. Este hecho se encuentra directamente relacionado con el valor de la conductividad de las aguas de riego, siendo 5 veces mayor para el agua regenerada respecto al agua de abastecimiento (Tabla 1).

Por su parte, la MO (Fig. 3) mostró un gran aumento para

el periodo correspondiente con el primer año de riego (2011) en las dos parcelas, constituyendo un periodo de acumulación seguramente debido al aporte de carbono orgánico que este riego supone. A partir de estos máximos, ambos entre el 5 y el 6%, se observó un descenso hasta aproximadamente un 0,5% para la campaña de mayo de 2012, comenzando un ligero ascenso llegando a porcentajes mayores a 1 para la última campaña. Como en los trabajos de Tarchouna *et al.* (2010) y Nunes *et al.* (2007), la tendencia general de la MO fue descendente, explicado por el incremento de la actividad microbiana del suelo, respuesta al aporte continuo tanto de carbono como de nitrógeno, produciendo la mineralización de esta MO. Se puede ver en el gráfico como este descenso es más acusado en el caso del riego con AR, correspondiéndose con la parcela que más carbono y nitrógeno recibe. Como ocurría en el caso de la CE, los valores de la MO son siempre superiores en la parcela regada con AA. Puede deberse a que en la parcela de AR el aporte de nutrientes (nitrógeno, fósforo y materia orgánica) es muy superior a los valores del AA, por lo que el crecimiento microbiano se ve favorecido, y con ello, tal y como se ha indicado anteriormente, la mineralización de la materia orgánica.

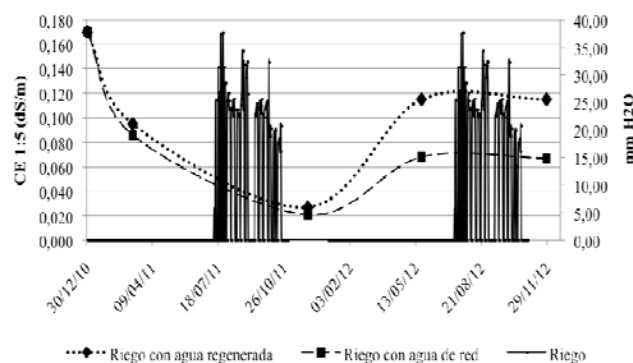


Fig. 2. Evolución de la CE del suelo de las dos parcelas en el periodo de estudio. Se representan datos de riego (mm)

Para el fósforo asimilable (Fig. 4) se encontró una tendencia a incrementar su concentración, con mayores valores para el AR, cuyos máximos se corresponden con el invierno de 2012, tras el primer periodo de riego. El aumento, como ya demostraron Adrover *et al.* 2012, se debe al aporte del nutriente por medio de las aguas de riego, siendo mayor para el AR. Además, es un elemento fácilmente fijado en el suelo, sobre todo cuando la presencia de partículas finas es elevada, ya que poseen las superficies adecuadas para esta fijación (Nilsson, 1990).

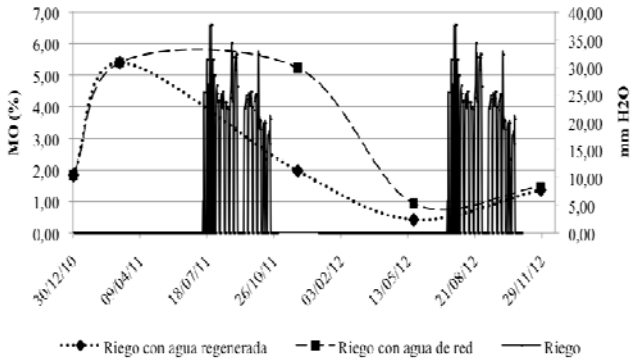


Fig. 3. Evolución de la MO del suelo de las dos parcelas en el periodo de estudio. Se representan datos de riego (mm)

Además, si atendemos al pH del suelo, siendo básico, podemos suponer que el fósforo lo encontraremos en sus formas insolubles (García-Serrano *et al.* 2010), lo que facilita por un lado esta adsorción, y por otro, la baja efectividad del lavado y consecuente lixiviado a las aguas subterráneas, ocasionado tanto por la lluvia como por el riego. Si bien ambas parcelas siguen la misma tendencia, en diciembre de 2011 la concentración de fósforo asimilable en la parcela regada con AR es 20 mg/kg mayor a la que presenta AA. Parece estar relacionado con el mayor aporte de fosfatos por el AR (Tabla 1) (16,95 kg/ha-año), frente al nulo aporte de dicho elemento por el AA. Se podría resumir que en líneas generales no existen diferencias entre ambas parcelas.

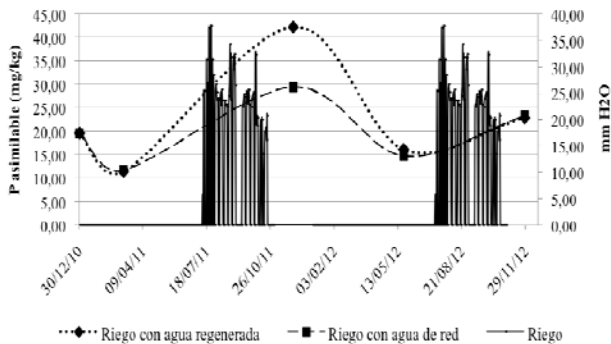


Fig. 4. Evolución del fósforo asimilable del suelo de las dos parcelas en el periodo de estudio. Se representan datos de riego (mm)

Para los nitratos (Fig. 5) se ha observado un descenso muy pronunciado desde el estado inicial del suelo, cuando contaba con más de 150 mg/kg, descendiendo por igual en ambas parcelas hasta niveles de entre 17,17 y 35,50 mg/kg para la parcela regada con AA y la parcela regada con AR respectivamente. Aunque la cantidad de nitrógeno aportada en cada una de las parcelas es muy diferente, (180,12 kg/ha-año en la parcela regada con AR y 4,75 kg/ha-año en la parcela regada con AA), ambas muestran la misma evolución y los mismos niveles finales de nitratos en el suelo, siendo la propiedad que presentó la variación más acusada en ambas parcelas. Tanto los lavados en la capa superficial del suelo, lixivando hasta llegar a niveles más

profundos (de Miguel *et al.*, 2013) como la asimilación por parte de las plantas cultivadas, son posiblemente las causas principales de este descenso, hasta alcanzar unos niveles en los que se mantienen constantes.

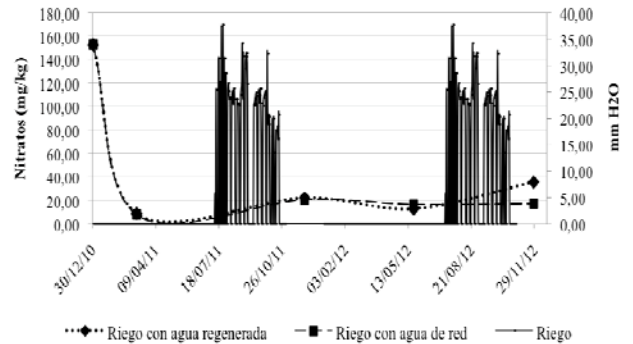


Fig. 5. Evolución de los nitratos del suelo de las dos parcelas en el periodo de estudio. Se representan datos de riego (mm)

4.- Conclusiones

Tras dos años de riego se ha observado un suave descenso en el fósforo, los nitratos y la conductividad eléctrica y un aumento en el contenido de materia orgánica. En líneas generales, no se han obtenido diferencias entre las evoluciones de los parámetros de las parcelas regadas con AA y AR. Por lo tanto, el riego con aguas regeneradas no parece haber causado, por el momento, ningún cambio de las propiedades del suelo, al ser comparado con el riego con agua de abastecimiento. La ausencia de aporte de nutrientes en el agua de abastecimiento determina la evolución de varios de los parámetros analizados en la parcela regada con AA, tales como materia orgánica, nitratos y fósforo asimilable, lo que parece estar relacionado con una menor actividad microbiana respecto a la parcela regada con agua regenerada. Para poder establecer la viabilidad del agua regenerada como fuente alternativa para el riego, son necesarios estudios a largo plazo y en el que se evalúen más parámetros, como metales, capacidad de cambio catiónico, bases de cambio o ecotoxicidad, evaluando así mismo todas las propiedades edáficas también en el perfil del suelo en profundidad. A su vez, sería necesario contemplar las implicaciones en el crecimiento vegetativo, la asimilación de nutrientes y la contaminación de las aguas subterráneas por los retornos del riego para poder tener una visión global sobre el efecto de las aguas regeneradas en el riego de cultivos.

Agradecimientos. La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la financiación del Subprograma CONSOLIDER-INGENIO (CSD2006-00044) y a los Subprogramas de Investigación No Orientada REAGUAM (CGL2009-13168-C03-01) y REAGUA2 (CGL2012-39520-C03-01). Los autores desean agradecer el apoyo del Programa de Postgrado de Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos de la Universidad de Alcalá y la Universidad Rey Juan Carlos.

5.- Bibliografía

- Abou Kheira, A.A., y N.M.M., Atta, 2009. Response of *Jatropha curcas* L. to water deficits: Yield, water use efficiency and oilseed characteristics. *Biomass Bioenerg.* 33, 1343-1350.
- Achten, W.M.J., L., Verchot, Y.J., Franken, E., Mathijs, V.P., Singh, R., Aerts, y B., Muys, 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass Bioenerg.* 32, 1063-1084.
- Adrover, M., E., Farrús, G., Moyá, G., y J., Vadell, 2012. Chemical properties and biological activity in soils of Mallorca following twenty years of treated wastewater irrigation. *J Environ Manage.* 95 (Supplement), S188-S192.
- BOE, 2007. *Real Decreto 1620/2007, de 7 de diciembre, por el que se establece el régimen jurídico de la reutilización de aguas depuradas.* BOE nº294 de 08/12/2007, 50639-50661.
- De Bustamante, I., J., Lillo, A., De Miguel, y M., Leal, 2010. Hacia una definición de las buenas prácticas en la regeneración de aguas mediante tecnologías extensivas: la caracterización del medio geológico. *Seguridad y Medio Ambiente.* 117, 36-49.
- Eaton, A.D., L.S., Clesceri, E.W., Rice, A.E., Greenberg, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21s ed. American Public Health Association/American Water Works Association/Water Environment Federation, 1325.
- FAO, 2007a. *Coping with water scarcity-Challenge of the twenty-first Century.* En: Food and Agriculture Organization of the United Nations, Land and water discussion paper.
- FAO, 2007b. *CROPWAT decision support system—Food and Agricultural Organization.* En: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO, 2010. *Jatropha: A Smallholder Bioenergy Crop. The Potential for Pro-Poor Development.* En: Integrated Crop Management.
- García-Serrano P., S., Ruano, J.J., Lucena, y M., Nogales, 2010. *Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid.
- González-Naranjo, V., M., Leal, J., Lillo, I., de Bustamante, y M.P., Palacios, 2012. *Guía de caracterización edáfica para actividades de regeneración de aguas residuales en usos ambientales.* Ed: Consolider-Tragua, Madrid.
- Gupta, S., S., Nayek, R.N., Saha, y S., Satpati, 2008. Assessment of heavy metal accumulation in macrophyte, agricultural soil, and crop plants adjacent to discharge zone of sponge iron factory. *Environ Geol.* 55, 731-739.
- Heidarpour, M., B., Mostafazadeh-Fard, J., Abedi Koupai, y R., Malekian, 2007. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. *Agr Water Manage.* 90 (1-2), 87-94.
- INE, 2008. *Estadísticas medioambientales sobre el agua.* En: Instituto Nacional De Estadística (National Institute of Statistics), Anuario Estadístico de España.
- Kiziloglu, F.M., M., Turan, U., Sahin, Y., Kuslu, y A., Dursun, 2008. Effects of untreated and treated wastewater irrigation on some chemical properties of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. botrytis) and red cabbage (*Brassica oleracea* L. var. rubra) grown on calcareous soil in Turkey. *Agr Water Manage.* 95, 716-724.
- Mandal, U.K., A.K., Bhardwaj, D.N., Warrington, D., Goldstein, A., Bar Tal, y G.J., Levy, 2008. Changes in soil hydraulic conductivity, runoff, and soil loss due to irrigation with different types of saline-sodic water. *Geoderma.* 144, 509-516.
- Mass, E.V., y S.R., Grattan, 1999. Crop yields as affected by salinity, en Skaggs R.W., Schilfgaard J.V., *Agricultural drainage.* 55-108.
- Molinos-Senante, M., F., Hernandez-Sancho, y R., Sala-Garrido, 2011. Cost-benefit analysis of water-reuse projects for environmental purposes, A case study for Spanish wastewater treatment plants. *J Environ Manage.* 92, 3091-3097.
- Mujeriego, R. 1990. *Manual Práctico de Riego con Agua Residual Municipal Regenerada.* Ediciones de la Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona.
- Nilsson, P., 1990. *Infiltration of wastewater. An applied study of treatment of wastewater by soil infiltration.* Lund. Report / Avdelningen för VA-Teknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, 1002.
- Nunes, J.M., A., López-Piñeiro, A., Albarrán, A., Muñoz, y J., Coelho, 2007. Changes in selected soil properties caused by 30 years of continuous irrigation under Mediterranean conditions. *Geoderma.* 139, 321-328.
- Qian Y., y B., Mecham, 2005. Long-term effect of recycled wastewater irrigation on soil chemical properties on golf course fairways. *Ame Soc of Agro.* 97, 717-721.
- Ramirez-Fuentes, E., C., Lucho-Constantino, E., Escamilla-Silva, L., y Dendooven, 2002. Characteristics, and carbon and nitrogen dynamics in soil irrigated with wastewater for different lengths of time. *Bioresource Technol.* 85, 179-187.
- Simonete, M.A., J.C., Kiehl, C.A, Andrade, y C.F., Almeida-Teixeira, 2003. Effects of sewage sludge una Ultisol and on growth and nutrition of maize. *Pesqui Agropecu Bras.* 38, 1187-1195.
- Tarchouna, L.G., P., Merdy, y Y., Lucas, 2010. Effects of long-term irrigation with treated wastewater. Part II: Role of organic carbon on Cu, Pb and Cr behaviour. *Appl Geochem.* 25, 1711-1721.
- Tzanakakis, V.A., N.V., Paranychianakis, P.A., Londra, y A.N., Angelakis, 2011. Effluent application to the land: changes in soil properties and treatment potential. *Ecol Eng.* 37, 1757-1764.
- U.S.D.A, 1996. Soil survey laboratory methods manual. Soil Survey Investigations Report Nº 42. Versión 3.0. Washington DC, United States of America.
- Yadav, R.K., B., Goyal, R.K., Sharma, S.K., Dubey, y P.S., Minhas, 2002. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water—A case study. *Environ Int.* 28, 481-486.
- Zimmerman, J.B., J.R., Mihelcic, y J., Smith, 2008. Global stressors on water quality and quantity. *Environ Sci Technol.* 42, 4247-4254.