

EFICACIA DE LOS SISTEMAS AGROFORESTALES EN EL CONTROL DE LA LIXIVIACIÓN DE NITRATO

Gerardo Moreno Marcos^{1,3}, M^a Lourdes López Díaz¹, Flavio Oliveira² y Mario Chuna²

¹ Centro Universitario de Plasencia. Universidad de Extremadura. Avda. Virgen del Puerto 2. 10600-PLASENCIA (Cáceres, España). Correo electrónico: gmoreno@unex.es

² Secção Autónoma de Ciências Agrárias. Faculdade de Ciências. Rua de Campo Alegre 4099. Univ. Porto. 002-PORTO (Portugal)

Resumen

En este trabajo se estudia la eficacia de la silvoagricultura y el empleo de fertilizantes orgánicos en el control de la lixiviación de nitrato en cultivos de regadío. Se ha realizado un ensayo de invernadero en 120 contenedores de 20 cm de diámetro y 120 cm de alto, donde se ha sembrado pradera (*Trifolium repens*, *Dactylis glomerata*, *Lolium multiflorum*, *L. perenne*) con y sin presencia de estrato arbolado (*Prunus avium*), sometida a diferentes tipos y dosis de fertilización. Los sistemas estudiados son control (D: suelo desnudo), pasto (P), árbol (S) y combinación pasto-arbolado (A-P). Los regímenes de fertilización fueron control (sin fertilizar), fertilización mineral (M1 y M2 con 90 y 180 kg N.ha⁻¹; respectivamente) y aplicación de lodos de depuradora (L1 y L2 con 360 y 720 kg N.ha⁻¹, respectivamente, se asume que el 25% del N aplicado se mineraliza en el primer año). Se recogió el agua lixiviada semanalmente, analizándose mensualmente el nitrato lixiviado desde abril hasta noviembre 2006 mediante espectrometría UV. La presencia de arbolado redujo a menos del 50% la cantidad de nitrato lixiviado, mientras que el pasto apenas lo redujo en un 10%, sin detectarse interacción significativamente al combinar ambos estratos vegetales. Sorprendentemente, la aplicación de fertilizante mineral no produjo un aumento significativo de la cantidad de nitrato lixiviado, pero si lo hizo la aplicación de lodos de depuradora. Este último resultado podría estar afectado por la existencia de una mineralización anormalmente alta en las condiciones de invernaderos, con humedad constante y temperaturas altas.

Palabras Claves: Pradera, Cerezo, Silvopastoral, Fertilización, Lodos de depuradora

INTRODUCCIÓN

La pérdida de agua y nutrientes por debajo de la zona radicular es casi inevitable con los sistemas actuales de riego y fertilización, debido a su baja eficiencia y a la falta de uniformidad en la aplicación (PANG et al., 1997). Esta es una de las causas de que exista sobrefertilización en muchos cultivos. Así, en España se han medido pérdidas superiores a 100 kg N.ha⁻¹.año⁻¹ en cultivos de regadío (CARTAGENA et al., 1995; MORENO et al., 1996;

CAUSAPÉ et al., 2002). El problema de la lixiviación de nitratos no es sólo económico (pérdida de fertilizante) sino también ambiental, por la acumulación de nitratos en el subsuelo que, por lixiviación, pueden incorporarse a las aguas subterráneas o bien ser arrastrados hacia los cauces y reservorios superficiales. La lixiviación de nitratos constituye, por tanto, un riesgo ambiental que la agricultura debe superar. Las pérdidas de nitratos dependerán del tipo y dosis de fertilizante, del tipo de suelo (las pérdidas son mucho más elevadas en suelos areno-

sos), del tipo de cultivo, rotación y periodo del año (PRAATT, 1984; SOGBEDJI et al., 2000).

El Ministerio de Presidencia publicó en el BOE de 11 de marzo de 1996 el Real Decreto 261/1996 de 16 de Febrero, para incorporar la Directiva del Consejo 91/676/CEE sobre la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en la agricultura. Los Códigos de Buenas Prácticas Agrícolas están basados principalmente en un buen manejo del agua de riego para evitar pérdidas por escorrentía y lixiviación y en una correcta aplicación de los fertilizantes nitrogenados. Este conjunto de normativas nos da una idea precisa del problema que constituyen los nitratos en los medios agrícolas.

En los últimos años, la agroselvicultura se está manifestando como un mecanismo promotor en el control de la lixiviación, debido a que buena parte de los nutrientes, que podrían perderse del alcance de las raíces de las herbáceas por lixiviación, son utilizados eficientemente por los árboles, que poseen raíces más profundas (VAN NOORDWIJK et al., 1996; LEHMANN et al., 1999; NAIR & GRAETZ, 2004; DEFAUW et al., 2005).

Con este trabajo pretendemos comprobar el papel del arbolado en el control de la lixiviación de nitrato en praderas de regadío sometidas bien a fertilización mineral bien a fertilización orgánica (lodos de depuradora). Nuestra hipótesis de partida es que el esperado mayor desarrollo radicular del arbolado en profundidad puede permitir que éste utilice nutrientes que escapan al alcance de las raíces de las prateras, produciéndose menores pérdidas netas de nutrientes en las parcelas silvopastorales que en las pastorales. Por otro lado, la menor lentitud de liberación de N en los fertilizantes orgánicos, y el mejor equilibrio nutricional que éstos implican, nos permiten prever que la lixiviación de nitrato será menor con la fertilización orgánica.

MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se ha llevado a cabo en los invernaderos del Centro Universitario de Plasencia, donde se instalaron un total de 120 contenedores de 20 cm de diámetro y 120 de largo (37 L), rellenos de tierra recogida de un suelo aluvial típico de pradera de

regadío. Este sustrato presentaba un pH medio de 4,7 (en agua), 1% de C orgánico y 0,1% de N, y textura arenosa (89,9% arena, 8% limo y 4,1% arcilla). En los 120 contenedores se simularon 4 sistemas y 5 niveles de fertilización, con 6 repeticiones para cada combinación de sistema x fertilizante (4x5x6 = 120). Los sistemas fueron Control (C: suelo desnudo), Pradera (P: mezcla de *Trifolium repens*, *Dactylis glomerata*, *Lolium multiflorum*, *L. perenne* en dosis de 5, 8, 2 y 6 kg.ha⁻¹, respectivamente, sembrado el 21 de marzo), Árbol (A: *Prunus avium* L. de 1 savia plantados el 18 de febrero), y combinación de Árbol y Pradera (A-P: en el mismo contenedor árbol y pradera de características similares a las ya descritas para P y S).

En cuanto a los tratamientos de fertilización, éstos fueron: Control (C: sin fertilizar); Mineral bajo (M1: 90 kg N.ha⁻¹.año⁻¹, dividido en cuatro aplicaciones, además de 56,25 kg de P₂O₅ y K₂O por ha al inicio del ensayo); Mineral alto (M2: 180 kg N.ha⁻¹ y año⁻¹, dividido en cuatro aplicaciones; además de 112,5 kg de P₂O₅ y K₂O por ha al inicio del ensayo); Lodo bajo (L1: lodo de depuradora equivalente a 360 kg N.ha⁻¹); Lodos alto (L2: lodo de depuradora equivalente a 720 kg N.ha⁻¹). El lodo se aplicó sólo al inicio del ensayo, incorporándolo en los 10 primeros cm del suelo, y asumiendo una tasa anual de mineralización del 25% para el primer año (EPA 1994). El lodo tenía un pH de 7,4 y 36,9 y 4,93% de materia seca y N, respectivamente.

Todos los contenedores eran regados semanalmente de acuerdo a los valores locales de evapotranspiración de referencia (ET_o) y los coeficientes de cultivo de las especies utilizadas, obteniendo las necesidades hídricas de cada sistema (ET_c). En los suelos desnudos se aplicó la dosis de riego de la pradera. Los contenedores estaban perforados en el centro de la base, para permitir la salida del agua sobrante, la cual era medida semanalmente. El agua era analizada una vez al mes para determinar el contenido de nitrato mediante espectrofotometría UV a 220 nm (Equipo Spectronic Unicam, modelo Heλλios β).

RESULTADOS

Se encontró un efecto muy significativo del arbolado en la reducción de la lixiviación del

nitrito ($F_{1-108} = 225$; $p < 0,001$), siendo el efecto del pasto mucho más moderado ($F_{1-108} = 5,2$; $p = 0,025$). Se redujo a menos del 50% y a algo más del 90%, respectivamente (Figura 1). El efecto de cada estrato de vegetación fue independiente de la presencia del otro, es decir, no hubo interacción significativa ($F_{1-108} = 0,17$; $p = 0,674$).

Se produjeron fuertes diferencias en la cantidad de nitrato lixiviado con la aportación de diferentes tipos y dosis de fertilizantes ($F_{1-108} = 65,4$; $p < 0,001$). La lixiviación fue mucho más acusada

(hasta un 65% superior) con la presencia de los lodos que con el fertilizante mineral ($p < 0,001$), mientras que no hubo diferencias entre el fertilizante mineral y el control ($p = 0,294$). Las diferentes dosis de fertilizante mineral tampoco produjeron diferencias significativas entre ellas ($p < 0,104$). Estas diferencias fueron muy significativas entre las 2 dosis de lodos ($p < 0,001$), con valores hasta 40% superiores con la dosis mayor (Figura 2).

Los 4 sistemas mostraron una respuesta similar a los tipos y dosis de fertilizantes (inter-

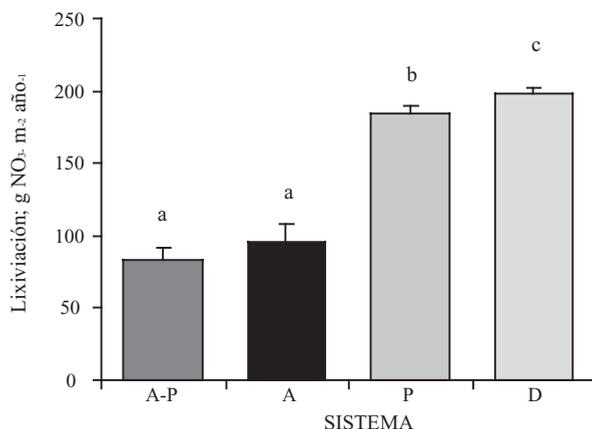


Figura 1. Cantidad de nitrato lixiviado en el ciclo vegetativo de 2006 (abril-noviembre) en los 4 sistemas estudiados (suelo Desnudo; Pasto; Árbol; y Árbol+Pasto). Ver Métodos para detalles de los sistemas. Las barras de error indican los intervalos de confianza al 5%, y las letras indican las diferencias significativas ($p < 0,05$)

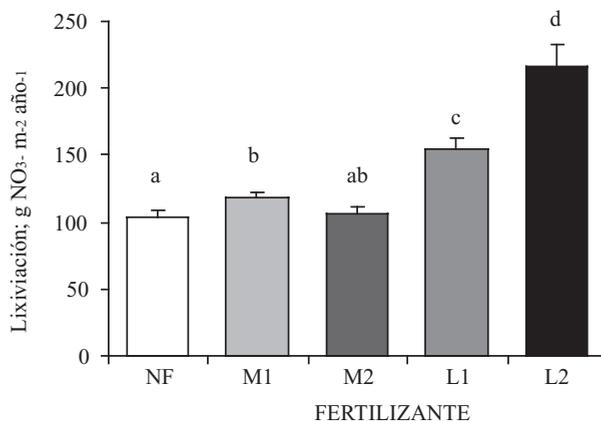


Figura 2. Cantidad de nitrato lixiviado en el ciclo vegetativo de 2006 (abril-noviembre) con los 5 tipos de fertilización aplicadas (No Fertilizado; Mineral bajo (M1); Mineral alto (M2); Lodo bajo (L1); y Lodo alto (L2)). Ver Métodos para detalles de los tipos y niveles de fertilización. Las barras de error indican los intervalos de confianza al 5%, y las letras indican las diferencias significativas ($p < 0,05$)

acción no significativa; $F_{2,108} = 0.69$; $p < 0.503$), aunque las diferencias fueron mucho más acusadas en el sistema silvopastoral y menor en el desnudo. Este resultado nos indica que la presencia del árbol fue muy efectiva en el control de la pérdida de nitrato bajo cualquier tipo y dosis de fertilización excepto en el caso de la dosis mayor de lodos, para la cual el árbol apenas fue capaz de utilizar el exceso de nitrato.

DISCUSIÓN

En España, existe un número creciente de praderas permanentes y cultivos forrajeros de regadío. Estos últimos ocupan 280.000 ha, con más de 22.000 ha en el Norte de Cáceres (MAPYA, 2003). En estas praderas y cultivos forrajeros se aplican cantidades altas de N para obtener una elevada producción de unidades forrajeras y un contenido importante de materias nitrogenadas totales. Para producciones medias de 10 t MS de forraje por ha, se recomienda fertilizar con 200-250 kg N.ha⁻¹, en 4-5 aplicaciones, la primera al final del invierno, y las siguientes tras cada explotación o siega (DOMÍNGUEZ VIVANCOS, 1997). La mayoría de las praderas permanentes se localizan en suelos aluviales, de textura generalmente gruesa, cerca de cauces de agua, y con abundante irrigación, por lo que son ambientes con alta probabilidad de presentar niveles críticos de lixiviación de nitratos, que son muy solubles.

El empleo de fertilizantes orgánicos, de lenta liberación es una estrategia que podría permitir la reducción de la contaminación por nitratos sin renunciar a parte de la productividad del sistema (e.g., HAAS *et al.*, 2002; GUILLARD & KOPP, 2004; BERNTSEN *et al.*, 2005; KRAMER *et al.*, 2006). En este trabajo hemos ensayado el empleo de un fertilizante orgánico, como los lodos de depuradora urbana, que han confirmado un incremento de la producción del pasto y del crecimiento del arbolado (LÓPEZ DÍAZ & MORENO MARCOS, 2007), pero a costa de un incremento muy significativo de la lixiviación de nitratos. Aunque este incremento podría estar exagerado por las condiciones experimentales favorables a la mineralización de la materia orgánica (el invernadero y el contenedor mantienen una temperatura y humedad edáfica anormalmente alta), nuestros resultados recomiendan precaución a la hora de aplicar en campo fertilizantes orgánicos en general (ERIKSEN *et al.*, 1999; FLORES *et al.*, 2005; BAKHSH *et al.*, 2007), y lodos de depuradora en particular (ANDREWS *et al.*, 1997; VOGELER *et al.*, 2006).

En cambio la eficacia del arbolado en el control de la lixiviación ha sido puesta de manifiesto por diversos autores (e.g., LIVESLEY *et al.*, 2002; VOGELER *et al.*, 2006; VAN DER SALM *et al.* 2006), contribuyendo a su desarrollo y al control de la contaminación de acuíferos y cauces de agua. Esta eficacia ha sido conformada en nuestro ensayo, donde la se redujo la lixiviación

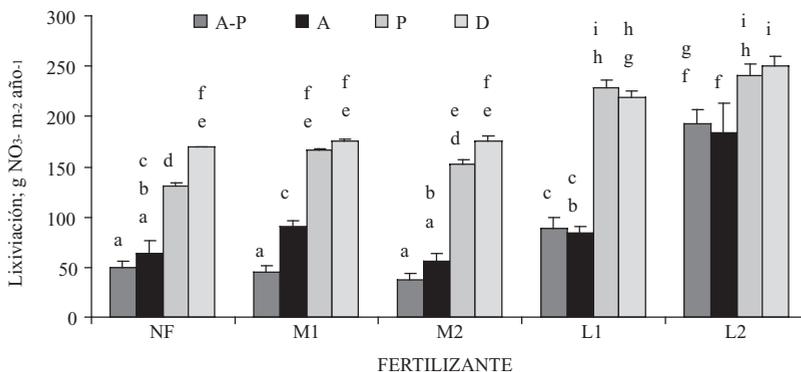


Figura 3. Cantidad de nitrato lixiviado en el ciclo vegetativo de 2006 (abril-noviembre) con los 4 sistemas (D, P, A, A-P) y los 5 tipos de fertilización aplicadas (NF, M1, M2, L1, L2). Las barras de error indican los intervalos de confianza al 5%, y las letras indican las diferencias significativas

de nitrato a menos del 50% con la presencia del arbolado. Los árboles se mostraron eficaces en el control de la lixiviación en todos los tratamientos de fertilización, excepto para la dosis alta de lodos, donde la gran cantidad de nitrato lixiviado debió superar con creces la capacidad de absorción del arbolado. La eficacia en el control de la lixiviación se produjo sin que el arbolado redujera significativamente la producción de pasto (2240 vs 2177 kg MS.ha⁻¹ en P y A-P, respectivamente), y sin que el arbolado redujera significativamente su crecimiento por la presencia de la pradera (crecimiento anual del diámetro de 0.84 y 0.81 cm en A y A-P, respectivamente) (LÓPEZ DÍAZ & MORENO MARCOS, 2007).

Además, la introducción de arbolado en los espacios agrarios contribuye de manera significativa a mejorar las condiciones ambientales del mismo, por mejora del paisaje, control de erosión y lixiviación, incremento de la biodiversidad y sumidero de carbono (NAIR *et al.*, 2004), aspectos todos ellos de gran actualidad en las políticas ambientales europeas, nacionales y regionales. Además, la plantación de árboles productivos en estas tierras puede reportar importantes beneficios económicos, al incrementar y diversificar la actividad y la renta agraria de tierras marginales (GORDON & NEWMAN, 1997). Por último, el empleo de frondosas productoras de madera de calidad se contempla como una vía con grandes perspectivas de mercado futuro. Esta opinión se basa en varios hechos señalados por MONTERO *et al.* (2003). Por último, existe un argumento adicional que es el bienestar animal (criterio de ecocondicionalidad para la percepción de las primas ganaderas; R.D. 2352/2004). Tampoco hay que olvidar que en las zonas de clima Mediterráneo la producción óptima de los pastos tiene lugar bajo un régimen de sombra de hasta un 50% (MONTARD *et al.*, 1999).

CONCLUSIONES

Los árboles producen una reducción drástica de la lixiviación de nitratos, además de originar una disminución de la cantidad de agua drenada. Esta disminución se mantuvo de manera evidente durante todo el periodo de estudio.

Las herbáceas apenas se mostraron eficaces en el control de la lixiviación.

La fertilización mineral provocó una lixiviación de nitratos parecida al control, mientras que la fertilización con lodos de depuradora produjo una lixiviación de nitratos muy superior a la del ensayo control, habiendo una relación directa entre la dosis de lodo aplicada y la cantidad de nitratos lixiviados.

BIBLIOGRAFÍA

- ANDREWS, R.J.; LLOYD, J.W. & LERNER, D.N.; 1997. Modelling of nitrate leaching from arable land into unsaturated soil and chalk: 2. Model confirmation and application to agricultural and sewage sludge management. *J. Hydrology* 200: 198-221.
- BAKSH, A.; KANWAR, R.S.; PEDERSON, C. & BAILEY, T.B.; 2007. N-Source Effects on Temporal Distribution of NO₃-N Leaching Losses to Subsurface Drainage Water. *Water Air Soil Pollut.* 181: 35-50.
- BERNTSEN, J.; PETERSEN, B.M.; OLESEN, J.E.; ERIKSEN, J. & SØEGAARD, K.; 2005. Simulation of residual effects and nitrate leaching after incorporation of different ley types. *European J. Agron.* 29: 290-304.
- CARTAGENA, M.C.; VALLEJO, A.; DÍEZ, J.A.; BUSTOS, A.; CABALLERO, R. & ROMAN, R.; 1995. Effect of the type of fertilizer and source of irrigation water on N use in a maize crop. *Field Crops Res.* 44: 33-39.
- CAUSAPÉ, J.; ISIDORO, D.; QUÍLEZ, D. & ARAGÜÉS, R.; 2002. Water and nitrogen management in the irrigation district n° V of Bardenas (Zaragoza, Spain) and environmental impact on water resources. In: F.J. Villalobos & L. Testi (eds.), *Proc. VII Congr. European Soc. Agron.*: 69-70. Junta de Andalucía. Córdoba.
- DEFAUW, S.L.; SAUER, T.J.; KRISTOFOR, R.B.; SAVIN, M.C.; HAYS, P.D.; BRAHANA, J. VAN.; 2005. Nitrate-N distributions and denitrification potential estimates for an agroforestry site in the ozark highlands, USA. In: *AFTA 2005 Conference Proceedings*: 13.
- DOMÍNGUEZ VIVANCOS, A.; 1997. *Tratado de fertilización*. Mundi Prensa. Madrid.

- ERIKSEN, J.; ASKEGAARD, M. & KRISTENSEN, K. 1999. Nitrate leaching in an organic dairy/crop rotations affected by organic manure type, livestock density and crop. *Soil Use Manage.* 15(3): 176-182.
- FLORES, P.; CAUTELAR, I. & NAVARRO, J.; 2005. Nitrate leaching in pepper cultivation with organic manure and supplementary additions of mineral fertilizer. *Commun. soil sci. plant anal.* 36: 2889-2898.
- GORDON, A.M. & NEWMAN, S.M.; 1997. *Temperate Agroforestry Systems*. CAB International. Oxon.
- GUILLARD, K. & KOPP, K.L.; 2004. Nitrogen Fertilizer Form and Associated Nitrate Leaching from Cool-Season Lawn Turf. *J. Environ. Qual.* 33:1822-1827.
- HAAS, G.; BERG, M. & KÖPKE, U.; 2002. Nitrate leaching: comparing conventional, integrated and organic agricultural production systems. In: J. Steenvoorden F. Claessen & J. Willems (eds.), *Agricultural Effects on Ground and Surface Waters: Research at the Edge of Science and Society*: 131-136. International Association of Hydrological Sciences, IAHS Publ. 273. Oxfordshire.
- KRAMER, S.B.; REGANOLD, J.P.; GLOVER, J.D.; BOHANNAN, B.J.M. & MONEY, H.A.; 2006. Reduced nitrate leaching and enhanced denitrifier activity and efficiency in organically fertilized soils. *PNAS (Proc. Natl. Acad. Sci. USA)* 103: 4522-4527.
- LEHMANN, J.; WEIGL, D.; DROPELMANN, K.; HUWE, B. & ZECH, W.; 1999. Nutrient cycling in an agroforestry system with runoff irrigation in Northern Kenya. *Agroforestry Systems* 43: 49-70.
- LIVESLEY, S.J.; GREGORY, P.J. & BURESH, R.J.; 2002. Competition in tree row agroforestry systems. 2. Distribution, dynamics and uptake of soil inorganic N. *Plant and Soil* 247: 177-187.
- LÓPEZ DÍAZ, M.L. & MORENO MARCOS, G.; 2007. Efecto de la fertilización orgánica y mineral en la productividad de un sistema agroforestal. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.* 22: 79-85.
- MAPYA; 2003. *Anuario de Estadística Agroalimentaria*. Ministerio de Agricultura y Pesca. www.mapya.es.
- MONTARD DE, F.X.; RAPEY, H.; DELPY, R. & MASSEY, P.; 1999. Competition for light and nitrogen in an association of hazel (*Coryllus avellana* L.) and cocksfoot (*Dactylis glomerata* L.). *Agroforestry Systems* 43: 135-150.
- MONTERO, G.; CISNEROS, O. & CAÑELLAS, I.; 2003. *Manual de selvicultura para plantaciones de especies productoras de madera de calidad*. Mundi Prensa. Madrid.
- MORENO, F.; CAYUELA, J.A.; FERNÁNDEZ, J.E.; FERNÁNDEZ BOY, E.; MURILLO, J.M. & CABRERA, F.; 1996. Water balance and nitrate leaching in an irrigated maize crop in SW Spain. *Agric. Water Manage.* 32:71-83.
- NAIR, P.K.R.; RAO, M.R. & BUCK, L.E.; 2004. *New Vistas in Agroforestry: Compendium for 1st World Congress of Agroforestry, 2004*. Series: Advances in Agroforestry. Springer. New York.
- NAIR, V.D. & GRAETZ, D.A.; 2004. Agroforestry as an approach to minimizing nutrient loss from heavily fertilized soils: The Florida experience. *Agroforestry systems* 61: 269-279.
- PANG, X.P.; LETEY, J. & WU, L.; 1997. Irrigation quantity and uniformity and nitrogen application effects on crop yield and nitrogen leaching. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61: 257-261
- PRATT, P.F.; 1984. Nitrate use and nitrate leaching in irrigated agriculture. In: R.D. Hauck (ed.) *Nitrogen in crop production*: 319-333. ASA, CSSA, and SSSA. Madison.
- SOGBEDJI, J.M.; VAN ES, H.M.; YANG, C.L.; GEOHRING, L.D. & MAGDOFF, F.R.; 2000. Nitrate leaching and nitrogen budget as affected by maize nitrogen rate and soil type. *J. Environ. Qual.* 29: 1813-1820.
- VAN DER SALM, C.; VAN DER GON, H.D.; WIEGERS, R.; BLEEKER, A. & VAN DEN TOORN, A.; 2006. The effect of afforestation on water recharge and nitrogen leaching in The Netherlands. *Forest Ecol. Manage.* 221: 170-182.
- VAN NOORDWIJK, M.; LAWSON, G.; SOUMARE, A.; GROOT, J.J.R. & HAIRIAH, A.; 1996. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. In: C.K. Ong & P. Huxley (eds.), *Tree-crop interactions: A Physiological approach*: 319-364. CAB International. Wallingford.
- VOGELER, I.; GREEN, S.R.; MILLS, T. & CLOTHIER, B.E.; 2006. Modelling nitrate and bromide leaching from sewage sludge. *Soil and Tillage Research* 89: 177-184.