

Variabilidade espacial e estabilidade temporal do carbono orgânico do solo num sistema silvo-pastoril Mediterrânico

Spatial variability and temporal stability of soil organic carbon in a Mediterranean silvo-pastoral system

João Serrano*, José Marques da Silva, Shakib Shahidian e Mário de Carvalho

*JCAAM, Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora, P.O. Box 94, 7002-554 Évora, Portugal, E-mail: *jmrs@uevora.pt, autor para correspondência*

<http://dx.doi.org/10.19084/RCA15012>

Recebido/received: 2015.02.10
Aceite/accepted: 2015.05.22

RESUMO

O carbono orgânico assume um papel vital na determinação da susceptibilidade do solo à degradação. O procedimento recomendado para recuperação dos solos pobres da região Sul de Portugal consiste na instalação de pastagens permanentes e na melhoria da fertilidade. Os objectivos deste estudo foram: i) identificar os padrões espaciais e temporais do carbono orgânico do solo (SOC) e do pH num período de 10 anos; ii) avaliar o potencial para gestão diferenciada da correcção orgânica do solo. Uma pastagem permanente bio diversa, pastoreada por ovinos e sujeita a adubação anual com super fosfato, foi instalada numa parcela de 6 ha, num solo delgado em condições Mediterrânicas. Foi avaliada a variabilidade espacial e a estabilidade temporal do SOC e do pH na camada superficial do solo. Os resultados obtidos indicam que o SOC e o pH apresentam grande potencial para implementação de gestão diferenciada. No caso do SOC, o mapa de classes de gestão mostra que mais de 80% da área do campo experimental apresenta estabilidade temporal e mais de 50% da área apresenta baixos valores de SOC (<10 g kg⁻¹), o que justifica o potencial para aplicação diferenciada de correctivos orgânicos no solo.

Palavras-chave: carbono orgânico do solo, estabilidade temporal, pastagens

ABSTRACT

Soil organic carbon (SOC) plays a vital role in determining the susceptibility to land degradation. The recommended procedure for the recovery of the characteristic poor soils of the Southern region of Portugal is the installation of grazed permanent pastures and increasing soil fertility. The objectives of this study were: i) to identify the spatial and temporal patterns of SOC and pH at four points in time over a 10-year period in a perennial pastureland; ii) to evaluate the potential for differential organic management. A 6 ha permanent bio-diverse pasture field, grazed by sheep and improved by annual application of super phosphate fertilizer, was installed on a shallow soil in Mediterranean conditions. Spatial variability and temporal stability of topsoil SOC and pH were measured. The results indicate that SOC and pH have great potential for implementing differential management. In the case of SOC, the management classes map shows that over 80% of the area has temporal stability, while more than 50% of the area has low levels of SOC (<10 g kg⁻¹), justifying the potential for differential application of C-rich organic soil amendments.

Keywords: pastures, temporal stability, soil organic carbon

Introdução

Na região Sul de Portugal, a utilização intensiva da terra com monocultura de cereais, sujeita a operações de mobilização do solo anuais, prevaleceu

durante décadas. O relevo ondulado característico na região, associado com estas formas de utilização da terra originou mecanismos de erosão e

transporte de solo, originando solos degradados, delgados e pedregosos, com baixos teores de matéria orgânica e tendência para a acidificação, todos factores limitantes da produtividade (Yuan *et al.*, 2007). Uma vez que os baixos teores de SOC podem ter impacto negativo nas propriedades do solo e no ciclo de nutrientes, têm sido desenvolvidos esforços no sentido de definir indicadores da degradação do solo baseados nos teores de SOC. É estimado que 16% do solo cultivado na Europa se encontra vulnerável à desertificação, podendo esta percentagem ser mais elevada em áreas de climas como o Mediterrânico, onde alternam Verões muito quentes com Invernos muito chuvosos (Romanya e Rovira, 2011).

A partir dos anos 1980s, foram implementadas políticas de conservação do solo, com preferência por itinerários de mobilização reduzida. Neste contexto, o processo *standard* para recuperação dos solos pobres e degradados consiste na sementeira de pastagens permanentes e a melhoria da fertilidade do solo através da adubação (Efe Serrano, 2006). A gestão da cobertura do solo com culturas permanentes tem sido uma estratégia com vista à conservação do solo através da redução das perdas de água, de solo e de nutrientes e o aumento da qualidade e fertilidade do solo (Yadav *et al.*, 2014). No Alto Alentejo mais de 200.000 ha encontram-se cobertos com pastagens permanentes (Serrano *et al.*, 2014), instaladas predominantemente em áreas com solos pobres e com riscos de erosão (Efe Serrano, 2006).

O conhecimento existente no que respeita à influência de diferentes sistemas de gestão do solo na dinâmica do SOC em ecossistemas agro-silvo-pastoris Mediterrânicos é insuficiente para desenvolver estratégias de conservação do solo (Seddaiu *et al.*, 2013). O SOC é o principal componente da fracção orgânica do solo e assume um papel vital nas propriedades químicas, biológicas e físicas do solo e na sua susceptibilidade à degradação (Mu *et al.*, 2014). O SOC em pastagens representa um dos maiores reservatórios de carbono (C) da terra e assume, por isso, uma importante contribuição no ciclo global do C (Rutledge *et al.*, 2014) e na mitigação das mudanças climáticas resultantes dos gases com efeito estufa (Mu *et al.*, 2014; Ritchie, 2014). A Figura 1 mostra o ciclo do C em pastagens. Através da fotossíntese, as plantas absorvem a energia solar e o dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera, produzindo oxigénio e hidratos de carbono, que são a base para o crescimento das plantas. Os ani-

mais e as plantas no processo de respiração usam a energia contida nos hidratos de carbono e libertam CO₂, devolvendo à atmosfera C biologicamente fixado no *stock* terrestre. Variações no armazenamento de C no solo ocorrem quando os *outputs* (e.g. respiração dos ecossistemas, pastoreio, erosão) não são balanceados pelos *inputs* (e.g. fotossíntese e fornecimentos de matéria orgânica) (Rutledge *et al.*, 2014). Variações climáticas, associadas a práticas de gestão do solo podem alterar este balanço entre *inputs* e *outputs* e, conseqüentemente o *stock* de C (Whitmore *et al.*, 2014). O *stock* de C do solo sob pastagem representa o balanço dinâmico entre a adição resultante da acumulação de material vegetal da cultura e as perdas por decomposição ou mineralização (Machado, 2005). Diversos estudos abordaram a contribuição da mineralização do C para o CO₂ atmosférico em solos submetidos a culturas intensivas (Yan *et al.*, 2012) e a consequente perda de SOC é bem conhecida (Rutledge *et al.*, 2014). Em contraste, pouco se sabe sobre o impacto do ecossistema de pastagens permanentes pasto-

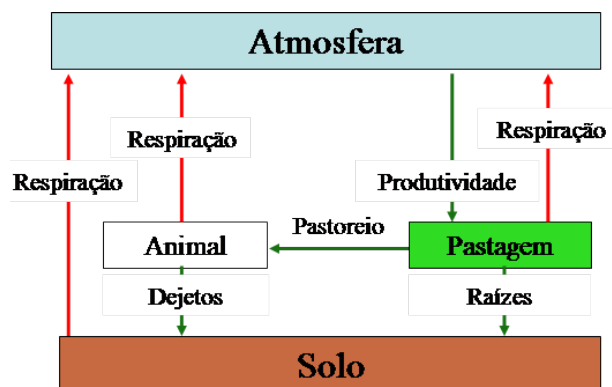


Figura 1 - Ciclo do carbono em pastagens.

readas na dinâmica do SOC (Rutledge *et al.*, 2014; Schipper *et al.*, 2014).

As crescentes necessidades alimentares da população mundial justificam o interesse também crescente pela compreensão da evolução das propriedades do solo nos diferentes sistemas de gestão (Schipper *et al.*, 2014). Estudos de longo prazo são essenciais para avaliar a magnitude da dinâmica temporal dos fluxos de SOC nos ecossistemas terrestres, para compreender o ciclo do C no solo e para obter respostas destes sistemas à gestão da fertilização (Rutledge *et al.*, 2014). Neste contexto, os objectivos deste estudo foram: i) identificar os padrões espaciais e temporais do SOC e do pH do solo, num período de 10 anos; ii) avaliar o potencial para gestão diferenciada da correcção orgânica do solo.

Material e métodos

Características do campo experimental

O campo experimental, com uma área de 6 ha, localiza-se na Herdade da Revilheira (coordenadas geográficas 38°27'51.6"N e 7°25'46.2"W), distrito de Évora. O solo predominante é classificado como *Luvissolo* (FAO, 2006). O perfil do *Luvissolo* é caracterizado por uma diferenciação textural, com baixos teores de argila na camada superficial e teores elevados no subsolo. Em encostas são muito susceptíveis à erosão em zonas com estações de Verão e de Inverno muito marcadas, como é o caso da região Mediterrânica, sendo habitual nessas zonas uma menor profundidade de solo arável em resultado de várias décadas de produção intensiva de cereais e frequentes mobilizações pesadas do solo. Nestas regiões estes solos delgados são usados principalmente para instalação de pastagens sob montado (Serrano *et al.*, 2014).

Uma pastagem permanente e bio diversa foi instalada neste campo em Setembro de 2000. Entre 2000 e 2003 o campo foi pastoreado por ovinos e foram aplicados anualmente, em Setembro/Outubro, 300 kg ha⁻¹ de adubo super fosfato 18% (SP18). No período experimental a que respeita este trabalho (10 anos, entre 2004 e 2013), o campo foi sujeito a dois períodos de intervenção: a) 2004-2007, o campo foi usado para pastoreio por ovinos e sujeito a aplicação diferenciada de adubo SP18; b) 2007-2013, o campo foi deixado em pousio.

Amostragem do solo e da pastagem

A variabilidade espacial do solo e da pastagem foi caracterizada a partir de setenta e seis amostras, geo-referenciadas com GPS (recolhidas numa grelha de 28 mx28 m).

As amostras de solo foram recolhidas entre Maio e Junho de cada ano (em 2004, 2007, 2010 e 2013) com uma sonda meia-cana na camada superficial (0-0,30 m). Cada amostra compósita resultou de cinco sub-amostras, recolhidas nos quatro cantos e no centro de cada quadrícula. As amostras de solo recolhidas no campo foram secas ao ar e analisadas num sedimentógrafo (Sedigraph 5100) para determinação da textura em 2004 e 2007. Em 2004, 2007, 2010 e 2013 foi determinado o pH do solo numa suspensão em água (1:2,5) utilizando o método potenciométrico. O SOC foi determinado por combustão a 1300°C num analisador Leco SC144DR.

As amostras de pastagem foram recolhidas em 2004, 2007 e 2013 com uma tesoura manual numa área de 1 m² no canto sudeste de cada quadrícula, onde se encontravam instaladas caixas de exclusão de pastoreio. A amostragem foi realizada em cada ano, sucessivamente entre Março e Maio, à medida que o estado vegetativo da pastagem o justificava. As amostras de pastagem foram processadas em laboratório para obtenção da produtividade da pastagem em termos de kg de matéria seca por hectare.

Tratamento estatístico

A análise estatística descritiva foi realizada para obtenção da média, desvio padrão (DP), coeficiente de variação (CV) e intervalo de variação de cada um dos parâmetros medidos. Os mapas da altimetria e das propriedades do solo foram desenvolvidos em ArcGIS 9.3 (ESRI, 2009).

Foi usado o teste de Welch's para separação de médias na comparação entre pontos de amostragem com e sem árvores. Foi utilizado um nível de significância estatística de 95% ($p < 0,05$).

A variabilidade espacial do pH e da concentração de SOC no solo foi calculada como o valor médio (y_i , Eq. 1) em cada ponto de amostragem i no pe-

$$\bar{y}_i = \frac{\sum_{t=1}^n y_{it}}{n} \quad (1)$$

ríodo de dez anos considerado (Blackmore, 2000; Shi *et al.*, 2002; Xu *et al.*, 2006):

em que y_{it} é o pH ou a concentração de SOC no solo (g kg⁻¹) em cada ponto de amostragem i no ano t e n é o número de anos de amostragem de solo.

O coeficiente de variação espacial médio ($CV_{espacial}$) foi calculado como o valor médio do CV obtido no conjunto de todos os anos de amostragem (Eq. 2):

$$\overline{CV}_{espacial} = \frac{\sum_{i=1}^n CV_i}{n} \quad (2)$$

em que n é o número de anos de amostragem de solo.

A estabilidade temporal do pH e da concentração de SOC no solo foi determinada pelo cálculo do CV

de cada ponto de amostragem ao longo do tempo ($CV_{temporal}$, Eq. 3) utilizando o método previa-

$$CV_{i_temporal} = \frac{\left(\frac{n \sum_{t=1}^{t=n} y_{it}^2 - \left(\sum_{t=1}^{t=n} y_{it} \right)^2}{n(n-1)} \right)^{0.5}}{\bar{y}_i} \times 100 \quad (3)$$

mente apresentado por Blackmore (2000) e Xu *et al.* (2006) para determinar a estabilidade temporal da produtividade de culturas.

em que $CV_{i_temporal}$ é o coeficiente de variação ao longo do tempo em cada ponto de amostragem i .

O coeficiente de variação temporal médio do pH e da concentração de SOC no solo ($CV_{temporal}$) para cada ano no conjunto de todos os pontos de amostragem foi calculado de acordo com a equação seguinte (Eq. 4) (Xu *et al.*, 2006):

$$\overline{CV}_{temporal} = \frac{\sum_{i=1}^m CV_i}{m} \quad (4)$$

em que m é o número de pontos de amostragem do solo.

Apesar das duas técnicas descritas atrás quantificarem a tendência espacial e a estabilidade temporal do pH e da concentração de SOC no solo, estas podem ser combinadas num único mapa de classes de gestão, o qual pode ser usado para apoio a futuras tomadas de decisão. Este mapa é uma sinopse dos aspectos mais importantes encontrados nos mapas de tendência espacial e de estabilidade temporal (Blackmore, 2000). Neste estudo foram consideradas cinco classes, utilizadas previamente por Xu *et al.* (2006). Cada ponto de amostragem foi representado por um código. Os pontos de amostragem foram classificados pela aplicação da combinação lógica do conjunto de valores da variação espacial e da estabilidade temporal, considerando as seguintes condições: condição 1 (respeitante à concentração relativa do parâmetro no solo) identifica se o valor do ponto se encontra acima ou abaixo da média de todos os pontos no conjunto de todos os anos de amostragem; condição 2 (estabilidade temporal) identifica a estabilidade da concentração do parâmetro no solo num ponto particular pela

comparação do CV com um valor limite considerado. Neste caso foram considerados dois limites de CV: 15 e 25%. Um ponto é considerado dentro de uma classe particular se simultaneamente se verificarem ambas as condições, sendo-lhe, automaticamente, atribuído um código correspondente a essa classe: (1) acima da concentração média e estável ($CV < 15\%$); (2) acima da concentração média e moderadamente estável ($15\% \leq CV < 25\%$); (3) abaixo da concentração média e estável ($CV < 15\%$); (4) abaixo da concentração média e moderadamente estável ($15\% \leq CV < 25\%$); (5) instável ($CV \geq 25\%$).

Resultados e discussão

Propriedades do solo do campo experimental

O mapa topográfico (Figura 2, à esquerda) mostra a localização dos 76 pontos de amostragem do solo e da pastagem (numa grelha regular de "28m*28m"). Neste mapa os círculos identificam os pontos de amostragem realizados em quadrículas com árvores. O mapa de declive (Figura 2, ao centro) mostra três formas topográficas: uma zona de reduzido declive (<5%) no vale; uma zona de declive máximo (>7,5%), que faz a transição entre a linha de água e o cume; e uma terceira zona de declive intermédio (5-7,5%) na zona mais alta do campo experimental, onde também se observa maior concentração de árvores. A zona com declive mais elevado também corresponde a teores mais elevados de argila (Figura 2, à direita). Estes mapas mostram que a topografia exerce um efeito importante sobre o SOC, fenómeno também observado por Kumhálová *et al.* (2011). Os teores mais elevados de argila nas zonas altas do campo mostram que, nestes solos delgados, o horizonte B se encontra próximo da superfície do solo em resultado de processos erosivos, enquanto na zona de vale o mesmo horizonte se encontra localizado a maior profundidade (Serrano *et al.*, 2013).

O Quadro 1 apresenta a média, o desvio padrão e o intervalo de variação dos parâmetros do solo e da pastagem no campo experimental, nos anos de amostragem. As características gerais do solo são: textura franco-argilosa, ligeiramente ácido e com baixos teores de SOC (predominantemente entre 8-12 g kg⁻¹, correspondendo a uma concentração de matéria orgânica na camada superficial do solo inferior a 2%).

O Quadro 1 mostra que a produtividade da pastagem é baixa. A distribuição irregular da precipi-

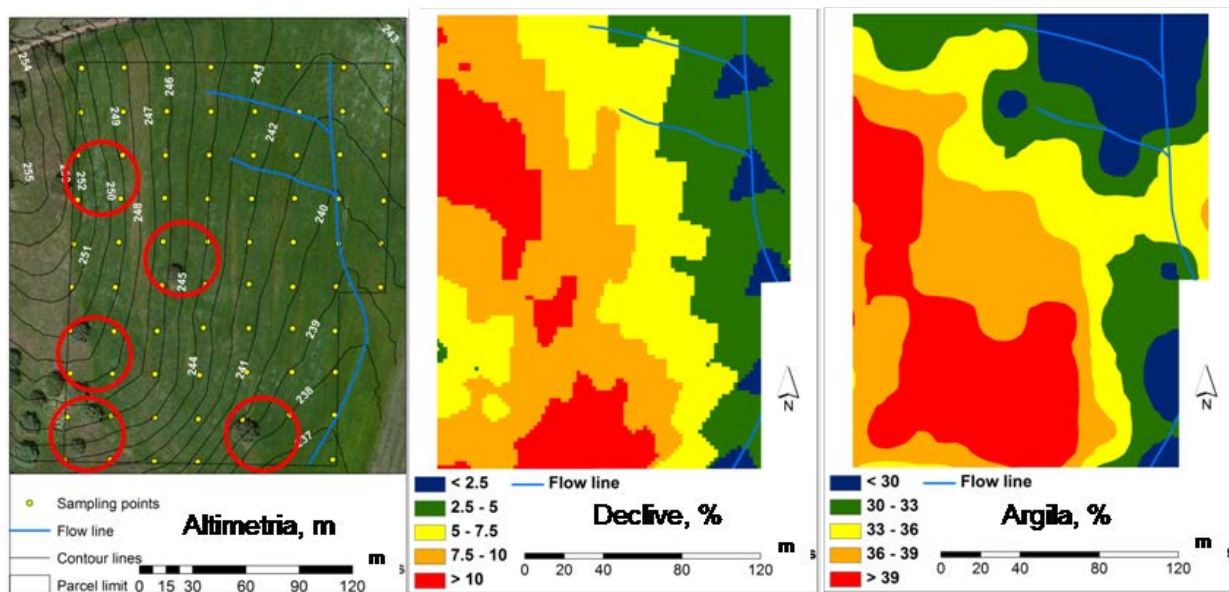


Figura 2 - Mapas de altimetria e pontos de amostragem (à esquerda; os círculos a vermelho identificam 20 pontos de amostragem em quadrículas com árvores), de declive (ao centro) e dos teores de argila no solo (à direita).

Quadro 1 - Média, desvio padrão (DP) e intervalo de variação dos parâmetros do solo e da pastagem no campo experimental nos anos de amostragem

Ano	2004		2007		2010		2013	
Parâmetro	Média ± DP	Intervalo	Média ± DP	Intervalo	Média ± DP	Intervalo	Média ± DP	Intervalo
Solo								
Areia, %	43,6 ± 7,3	[27,6 – 59,2]	43,5 ± 5,4	[30,5 – 55,5]	-	-	-	-
Limo, %	22,6 ± 2,6	[14,8 – 27,5]	20,7 ± 4,1	[14,1 – 30,4]	-	-	-	-
Argila, %	33,9 ± 6,2	[21,2 – 45,6]	35,8 ± 6,1	[23,0 – 49,2]	-	-	-	-
SOC, g kg ⁻¹	9,6 ± 1,6	[6,4 – 13,9]	8,9 ± 2,3	[4,6 – 22,0]	12,2 ± 2,9	[8,1 – 20,3]	10,7 ± 2,9	[3,5 – 18,6]
pH	6,2 ± 0,3	[5,7 – 7,4]	6,1 ± 0,4	[5,4 – 7,5]	6,0 ± 0,3	[5,4 – 6,9]	6,4 ± 0,2	[6,0 – 7,0]
Pastagem								
MS, kg ha ⁻¹	1659 ± 1045	301 – 7167	3232 ± 941	1861 – 6191	-	-	1637 ± 924	[628 – 3867]

MS - Produtividade da pastagem em termos de matéria seca.

tação, com quatro meses de estação quente e seca, combinada com solos delgados, conduz a baixas produções de matéria seca da pastagem (Efe Serrano, 2006). No entanto, verificou-se um claro aumento da produtividade da pastagem e redução da variabilidade espacial de 2004 (1659±1045 kg ha⁻¹) para 2007 (3232±941 kg ha⁻¹), como resultado da aplicação diferenciada de adubo super fosfato 18% (entre 2004 e 2007). De acordo com Schipper *et al.* (2014) a fertilização fosfatada tem um efeito positivo na produtividade das pastagens.

Simultaneamente verificou-se um acréscimo significativo do SOC (aumentou de 9,6±1,6 g kg⁻¹ em 2004 para 12,2±2,9 g kg⁻¹ em 2010), como sugerido por Liu *et al.* (2014) devido ao adequado fornecimento de fertilizante fosfatado à pastagem. De acordo com Orgill *et al.* (2014), para um dado solo e clima, a gestão da fertilização pode ser

utilizada para aumentar os *stocks* de C em pastagens permanentes. Nestas culturas perenes, a ausência de perturbação do solo e a importante reciclagem de resíduos orgânicos, vegetais e animais, tendem a aumentar os níveis de SOC no solo (Xavier *et al.*, 2013; Whitmore *et al.*, 2014).

Em 2013, depois de seis anos sem aplicação de fertilizantes e sem pastoreio animal, a produtividade da pastagem diminuiu para valores mais baixos do que os verificados em 2004 (Quadro 1), acompanhada de um decréscimo no SOC (para 10,7±2,9 g kg⁻¹). Para o decréscimo do SOC terão contribuído os seis anos sem aplicação de fertilizante (2008-2013) com o consequente decréscimo da produtividade, mas também a redução de *inputs* orgânicos pela suspensão do pastoreio animal no mesmo período (Seddaiu *et al.*, 2013).

Variabilidade espacial e estabilidade temporal das propriedades do solo

As Figuras 3 e 4 mostram a variabilidade espacial e a estabilidade temporal do pH e do SOC nos quatro momentos de amostragem, entre 2004 e 2013. É observável um padrão de acumulação do SOC e o acréscimo do pH nas zonas mais altas da parcela (canto Sudoeste), sendo esta acumulação particularmente evidente em 2010. Este padrão pode ser justificado pela localização das árvores preferencialmente nestas zonas do campo (ver Figura 2, à esquerda) e porque os animais tem tendência a permanecer mais tempo na sombra das árvores, especialmente no período de Primavera-Verão, resultando numa maior concentração de fezes (Serrano *et al.*, 2013).

O Quadro 2 mostra a média \pm desvio padrão dos parâmetros do solo e da produtividade da pastagem para todos os pontos de amostragem de quadrículas com árvores (20 pontos de amostragem, Figura 2, à esquerda), em comparação com os pontos de amostragem de quadrículas sem árvores (56 pontos de amostragem, Figura 2, à esquerda). A análise de variância mostra que o efeito da presença de árvores na concentração de nutrientes na camada superficial do solo é significativo, confirmando que a presença de árvores, mesmo que com baixa densidade, pode afectar positivamente as propriedades do solo (Seddaiu *et al.*, 2013). Também Gómez-Rey *et al.* (2012) verificaram que os *stocks* de C no solo são influenciados pela distância às árvores. O potencial para aumento do sequestro do C em sistemas que combinam pastagens com árvores aumenta devido ao efeito das raízes secundárias das árvores e das folhas que caem gradualmente e que acumulam grandes quantidades de C no solo, levando ao aumento do SOC (Lozano-García e Parras-Alcántara, 2013). Este aspecto é particularmente importante uma vez que não se verificaram diferenças significativas na produtividade da pastagem entre pontos de amostragem de quadrículas com e sem árvores (Quadro 2).

Por outro lado, é amplamente aceite que as partículas de argila podem proteger fisicamente o SOC contra a decomposição por estabilização de compostos orgânicos dentro dos micro e meso-agregados (Romanya e Rovira, 2011). Valores mais altos de SOC foram também registados neste estudo em áreas com maiores concentrações de argila, o que pode resultar do facto do C ligado à fracção fina

do solo se encontrar mais protegido do processo de degradação microbiana do que o C armazenado em fracções grosseiras (Römken *et al.*, 1999) (ver Figura 2, à direita e Figura 4). De acordo com Corral-Fernández *et al.* (2013), quando os teores de argila do solo aumentam, aumenta também o número e a dimensão dos agregados, conduzindo a uma diminuição da oxidação do SOC e da mineralização do N. O efeito positivo da argila sobre a acumulação de SOC pode ser acentuado em locais com baixa precipitação, como são as áreas Mediterrânicas, com a redução da actividade microbiana associada a solos secos (Seddaiu *et al.*, 2013).

Classes de gestão dos nutrientes

A estabilidade temporal pode ser muito importante porque se os padrões espaciais dos parâmetros do solo variarem muito significativamente de ano para ano, a gestão intra-parcelar (ou gestão diferenciada dentro da parcela) pode não ser praticável (Xu *et al.*, 2006).

A Figura 5 mostra que o SOC e o pH são parâmetros com potencial para discriminar situações que merecem gestão diferenciada. Em particular no caso do SOC, mais de 80% da área do campo experimental apresenta estabilidade temporal e mais de 50% da área apresenta valores baixos de SOC ($<10 \text{ g kg}^{-1}$), sugerindo o interesse na aplicação diferenciada de correctivos orgânicos. No clima Mediterrânico, com períodos significativos de escassez de água, solos com baixos teores de carbono orgânico dificilmente permitem acréscimos importantes de produtividade (Liu *et al.*, 2014). O sequestro de C pelo solo através do aumento dos teores de SOC é, por isso, uma importante forma de limitar a degradação ambiental nestas regiões (Liu *et al.*, 2014). O estrume é o principal correctivo orgânico utilizado em explorações agrícolas. A sua utilização pode ser especialmente interessante nestas regiões onde o acréscimo de matéria orgânica produz um efeito benéfico sobre a estrutura e a fertilidade do solo, reduzindo também os riscos de erosão (Lozano-García e Parras-Alcántara, 2013). Técnicas de gestão do solo que combinem a restrição de processos de mobilização com a aplicação de correctivos orgânicos apresentam um interesse potencial para melhorar as propriedades do solo e diminuir as concentrações de CO_2 atmosférico pelo armazenamento de C na forma orgânica (Nieto *et al.*, 2010).

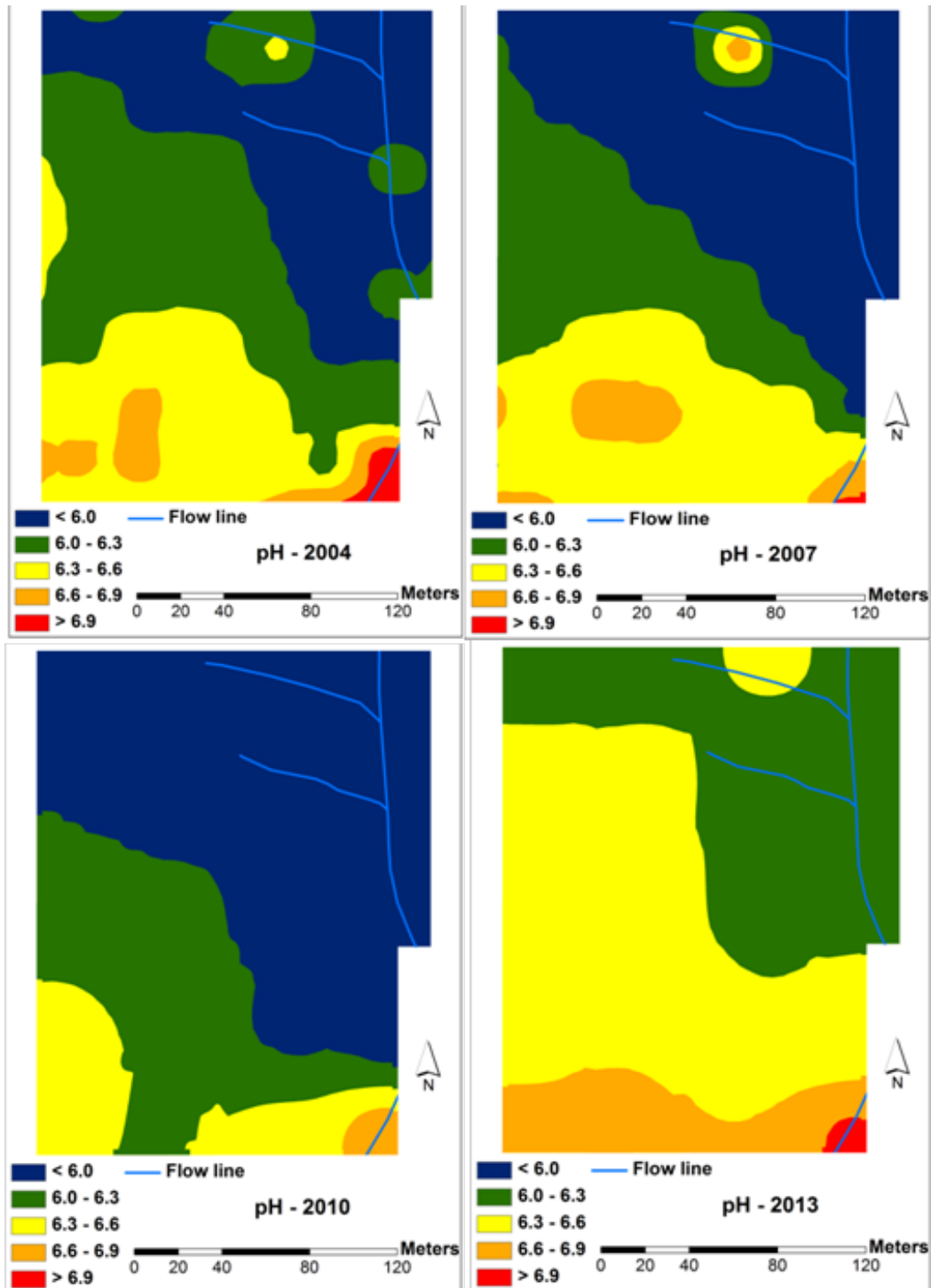


Figura 3 - Padrões espaciais do pH no solo do campo experimental nos anos de amostragem (2004, 2007, 2010 e 2013).

Conclusões

Estudos de longo prazo são essenciais para avaliar a dinâmica espacial e temporal dos nutrientes no solo e para ajudar os agricultores e os decisores políticos na tomada de decisão em termos de gestão do solo. A definição de indicadores de degradação do solo baseados no SOC é considerado essencial

para desenvolver estratégias de conservação para solos em risco, como é o caso de muitos solos da região Mediterrânica.

Este estudo mostrou que o SOC e o pH, ambos factores decisivos na produtividade das culturas, apresentam potencial para discriminar situações que merecem gestão diferenciada. No caso do

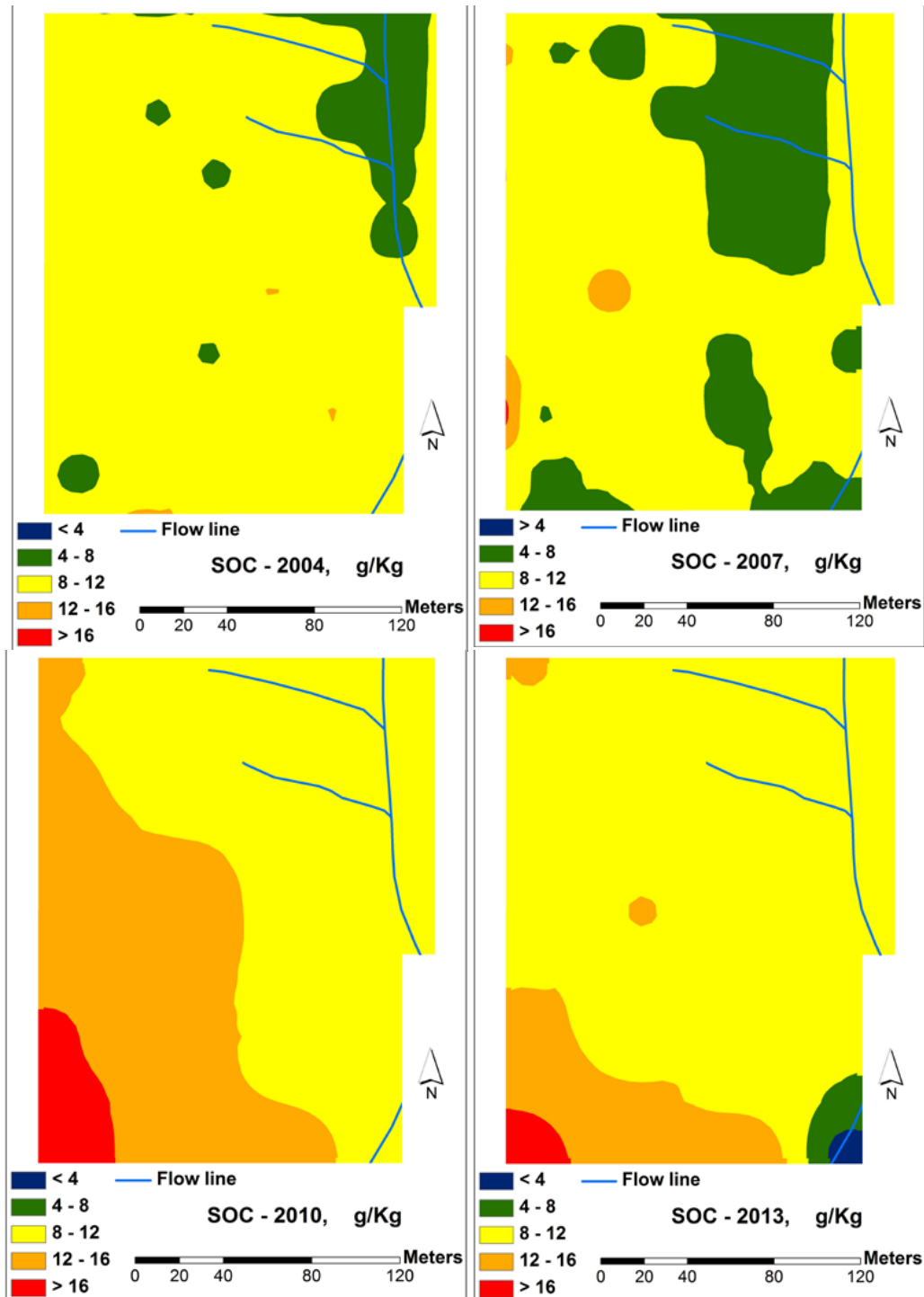
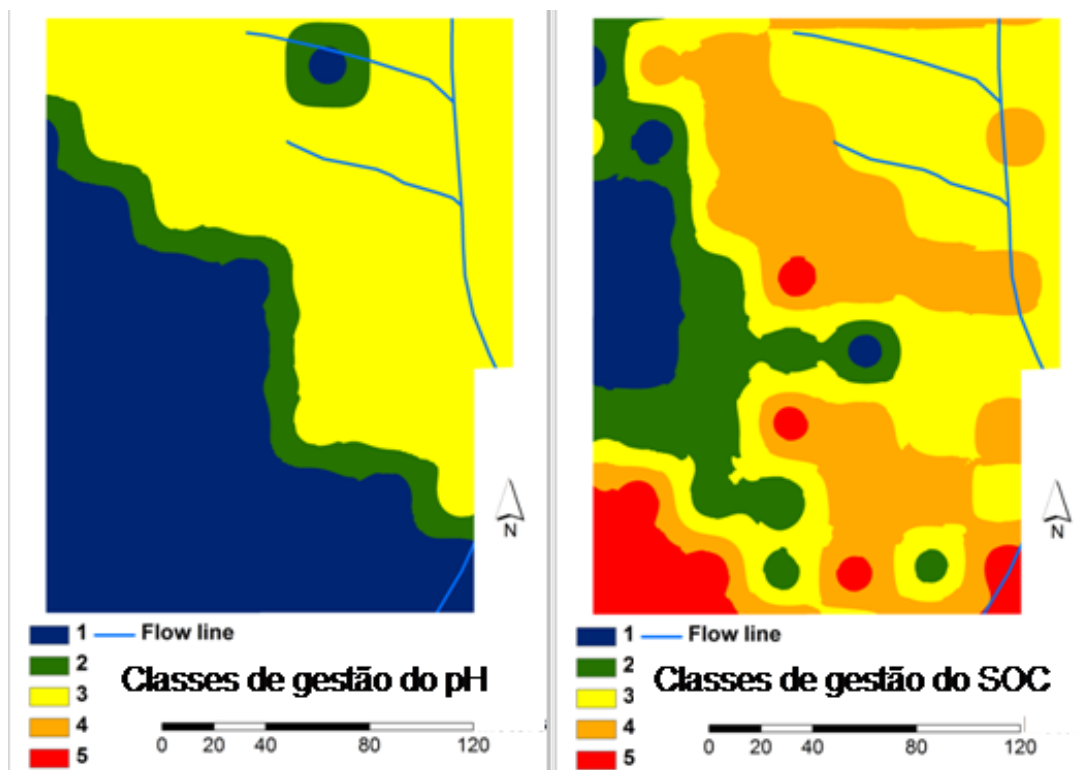


Figura 4 - Padrões espaciais do carbono orgânico do solo (SOC) do campo experimental nos anos de amostragem (2004, 2007, 2010 e 2013).

Quadro 2 - Média \pm desvio padrão dos parâmetros do solo e da pastagem no campo experimental nos anos de amostragem; comparação de pontos de amostragem de quadrículas com e sem árvores

Ano	2004			2007			2010			2013		
	CA	SA	p	CA	SA	p	CA	SA	p	CA	SA	p
SOC, g kg ⁻¹	10,2 \pm 1,4	9,4 \pm 1,6	0,058	10,2 \pm 3,4	8,5 \pm 1,5	0,003	15,4 \pm 2,9	11,0 \pm 1,8	0,000	13,3 \pm 3,0	9,8 \pm 2,3	0,000
pH	6,4 \pm 0,3	6,1 \pm 0,3	0,002	6,4 \pm 0,4	6,0 \pm 0,4	0,001	6,2 \pm 0,2	5,9 \pm 0,3	0,000	6,5 \pm 0,1	6,3 \pm 0,3	0,000
MS, kg ha ⁻¹	1749 \pm 1090	1585 \pm 457	0,540	3519 \pm 1447	3024 \pm 804	0,402	-	-	-	1707 \pm 832	1623 \pm 634	0,567

MS- Produtividade da pastagem em termos de matéria seca; CA- Pontos de amostragem em quadrículas com árvores; SA- Pontos de amostragem em quadrículas sem árvores; são indicados a negrito as médias com diferenças significativas entre tratamentos ($p < 0,05$).



(1 – Maior do que a concentração média e estável; 2 – Maior do que a concentração média e moderadamente estável; 3 – Menor do que a concentração média e estável; 4 – Menor do que a concentração média e moderadamente estável; 5 – Instável).

Figura 5 - Mapas de classes de gestão do pH do solo (à esquerda) e do SOC (à direita) do campo experimental.

SOC, o mapa de classes de gestão mostra que mais de 80% da área do campo experimental apresenta estabilidade temporal e mais de 50% da área apresenta baixos valores de SOC (<10 g kg⁻¹), demonstrando o potencial para a aplicação diferenciada de correctivos orgânicos. Outras estratégias para recuperação destes solos, como a aplicação de fertilizantes para aumentar a produtividade das pastagens em áreas pobres em SOC ou a distribuição balanceada de árvores, podem também dar um contributo relevante. Os resultados obtidos demonstram o efeito positivo das árvores e a sua importância na dinâmica dos nutrientes no solo em sistemas agro-silvo-pastoris. Sai reforçada a importância de uma correcta gestão da pastagem e do pastoreio animal em termos de sequestro de C como medida potencial para mitigar as alterações climáticas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pelo programa FEDER através do “Operational Programme for Competitiveness Factors – COMPETE” e por fundos nacio-

nais da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia através dos projectos estratégicos PEst-C/AGR/UI0115/2011 e EXCL_AGR-TEC_0336_2012.

Referências bibliográficas

- Blackmore, S. (2000) - The importance of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 26, n. 1, p. 37–51.
- Corral-Fernández, R.; Parras-Alcantára, L. e Lozano-García, B. (2013) - Stratification ratio of soil organic C, N and C:N in Mediterranean evergreen oak woodland with conventional and organic tillage. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 164, p. 252–259.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.11.002>
- Efe Serrano, J. (2006) - *Pastures in Alentejo: technical basis for characterization, grazing and improvement*. Universidade de Évora- ICAM, Évora, Portugal, p. 165–178.
- ESRI (Environmental Systems Research Institute) Inc. (2009). ArcView 9.3 GIS Geostatistical Analyst. Redlands: ESRI.
- FAO (2006) - *World reference base for soil resources*.

- World soil resources reports N°103. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gómez-Rey, M.X.; Garcês, A. e Madeira, M. (2012) - Soil organic-C accumulation and N availability under improved pastures established in Mediterranean oak woodlands. *Soil Use and Management*, vol. 28, n. 4, p. 497–507. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2012.00428.x>
- Kumhálová, J.; Kumhála, F.; Kroulík, M. e Matejková, S. (2011) - The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, vol. 12, n. 6, p. 813–830. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-011-9221-x>
- Liu, D.L.; Anwar, M.R.; O’Leary, G. e Conyers, M.K. (2014) - Managing wheat stubble as an effective approach to sequester soil carbon in a semi-arid environment: Spatial modelling. *Geoderma*, vol. 214–215, p. 50–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.003>
- Lozano-García, B. e Parras-Alcántara, L. (2013) - Land use and management effects on carbon and nitrogen in Mediterranean Cambisols. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 179, p. 208–214. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.07.009>
- Machado, P. (2005). Soil carbon and the mitigation of global climate change. *Química Nova*, vol. 28, n. 2, p. 329–334. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422005000200026>
- Mu, L.; Liang, Y.; Xue, Q.; Chen, C. e Lin, X. (2014) - Using the DNDC model to compare soil organic carbon dynamics under different crop rotation and fertilizer strategies. *Spanish Journal of Agricultural Research*, vol. 12, n. 1, p. 265–276. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2014121-4895>
- Nieto, O.M.; Castro, J.; Fernandez, E. e Smith, P. (2010) - Simulation of soil organic carbon stocks in a Mediterranean olive grove under different soil-management systems using the RothC model. *Soil Use and Management*, vol. 26, n. 2, p. 118–125. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00265.x>
- Orgill, S.E.; Condon, J.R.; Conyers, M.K.; Greene, R.S.B.; Morris, S.G. e Murphy, B.W. (2014) - Sensitivity of soil carbon to management and environmental factors within Australian perennial pasture systems. *Geoderma*, vol. 214–215, p. 70–79. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.10.001>
- Ritchie, M.E. (2014). Plant compensation to grazing and soil carbon dynamics in a tropical grassland. *PeerJ*, vol. 2, p. e233. <http://dx.doi.org/10.7717/peerj.233>
- Römken, P.; Plicht, J. e Hassink, J. (1999) - Soil organic matter dynamics after the conversion of arable land to pasture. *Biology and Fertility of Soils*, vol. 28, n. 3, p. 277–284. <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050494>
- Romanya, J. e Rovira, P. (2011) - An appraisal of soil organic C content in Mediterranean agricultural soils. *Soil Use and Management*, vol. 27, n. 3, p. 321–332. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2011.00346.x>
- Rutledge, S.; Mudge, P.L.; Wallace, D.F.; Campbell, D.I.; Woodward, S.L.; Walla, A.M. e Schipper, L.A. (2014) - CO₂ emissions following cultivation of a temperate permanent pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 184, p. 21–33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.005>
- Schipper, L.A.; Parfitt, R.L.; Fraser, S.; Littler, R.A.; Baisden, W.T. e Ross, C. (2014) - Soil order and grazing management effects on changes in soil C and N in New Zealand pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 184, n. 1, p. 67–75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.012>
- Seddaiu, G.; Porcu, G.; Ledda, L.; Roggero, P.P.; Agnelli, A. e Cortic, G. (2013) - Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 167, p. 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2013.01.002>
- Serrano, J.; Shahidian, S. e Marques da Silva, J. (2013) - Small scale soil variation and its effect on pasture yield in Southern Portugal. *Geoderma*, vol. 195–196, p. 173–183. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.12.001>
- Serrano, J.; Marques da Silva, J. e Shahidian, S. (2014). Spatial and temporal patterns of potassium on grazed permanent pastures – management challenges. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 188, p. 29–39. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.012>
- Shi, Z.; Wang, K.; Bailey, J.S.; Jordan, C. e Higgins, A. H. (2002) - Temporal changes in the spatial distributions of some soil properties on a temperate grassland site. *Soil Use and Management*, vol. 18, n. 4, p. 353–362. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00252.x>

- Whitmore, A.P.; Kirk, G.J.D. e Rawlins, B.G. (2014) - Technologies for increasing carbon storage in soil to mitigate climate change. *Soil Use and Manangement, in press*.
<http://dx.doi.org/10.1111/sum.12115>
- Xavier, F.; Maia, S.; Ribeiro, K.; Mendonça, E. e Oliveira, T. (2013) - Effect of cover plants on soil C and N dynamics in different soil management systems in dwarf cashew culture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 165, p. 173–183.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2012.12.003>
- Xu, H.-W.; Wang, K.; Bailey, J.; Jordan, C. e Withers, A. (2006) - Temporal stability of sward dry matter and nitrogen yield patterns in a temperate grassland. *Pedosphere*, vol. 16, n. 6, p. 735–744.
- Yadav, R.P.; Sharma, P.; Arya, S.L. e Panwar, P. (2014) - *Acacia nilotica*-based silvipastoral systems for resource conservation and improved productivity from degraded lands of the Lower Himalayas. *Agroforestry Systems*, vol. 88, n. 5, p. 851–853.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10457-014-9730-5>
- Yan, Y.; Tian, J.; Fan, M.; Zhang, F.; Li, X.; Christie, P.; Chen, H.; Lee, J.; Kuzyakov, Y. e Six, J. (2012) - Soil organic carbon and total nitrogen in intensively managed arable soils. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 150, p. 102–110.
<http://dx.doi:10.1016/j.agee.2012.01.24>
- Yuan, X.; Chai, X.; Gao, R.; He, Y.; Jin, H. e Huang, Y. (2007) - Temporal and spatial variability of soil organic matter in a county scale agricultural ecosystem. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, vol. 50, n. 5, p. 1157–1168.
<http://dx.doi.org/10.1080/00288230709510398>