

Avaliação do potencial para aplicação diferenciada de potássio em pastagens permanentes no Alentejo – estudo de caso

Potential for differential potassium fertilizer application in permanent pastures in Alentejo – case study

João Serrano, José Marques da Silva e Shakib Shahidian

*ICAAM, Departamento de Engenharia Rural, Universidade de Évora, P.O. Box 94, 7002-554 Évora, Portugal.
E-mail: jmrs@uevora.pt, author for correspondence*

Recebido/Received: 2013.11.26
Aceitação/Accepted: 2013.12.18

RESUMO

As pastagens permanentes pastoreadas ocupam mais de 200 000 ha no Alto Alentejo. Estes solos normalmente não necessitam de adubação com potássio (K) devido à riqueza da rocha mãe. Este estudo teve por objectivo avaliar a dinâmica espacial e temporal do K no solo, durante dez anos, num determinado agro ecossistema e o potencial para implementar adubação diferenciada. A evolução da concentração média de K no solo sugere que as pastagens pastoreadas, no que concerne ao K, são um sistema em equilíbrio. Este estudo, contudo, mostrou que o campo experimental é dominado por uma importante tendência espacial anisotrópica. O efeito combinado do relevo ondulado, com árvores dispersas e animais em pastoreio selectivo e que produzem uma deposição heterogénea de fezes e urina, proporcionam uma notável variabilidade espacial da concentração de K no solo. A estabilidade temporal do K é confirmada pela predominância das áreas temporalmente estáveis no campo experimental. Dentro destas, cerca de 45% apresenta concentrações de K no solo abaixo da concentração média. Tendo por base as recomendações de K no solo, este estudo demonstra o interesse e o potencial para utilizar tecnologias de aplicação variável (VRT) na gestão da adubação potássica em pastagens no sul de Portugal.

Palavras-chave: gestão diferencial do potássio, pastagens, VRT

ABSTRACT

Alto Alentejo region in Portugal has over 200,000 ha of grazing permanent pastures. Here, the soils do not generally need potassium (K) fertilization due to the bedrock richness. The objective of this study was to evaluate the spatial and temporal soil K dynamics, over ten years, in an agro ecosystem and the potential for implementing site specific fertilizer management. The evolution of mean soil K concentration in the experimental field study suggests that grazed pastures, as far as the K cycle is concerned, are a “steady state” system. This study, however, shows that the experimental field is dominated by a large spatially anisotropic trend. It can be stated that the combined effects of an undulated landscape, with sparse trees and animals with selective grazing and heterogeneous deposition of dung and urine, provide a notable spatial variability of soil K concentration. The K temporal stability is confirmed by the predominance of stable areas in experimental field. Within these, around 45% shows soil K concentrations below average soil K concentration. Based on recommendation of K in the soil, this study demonstrates the interest and the potential for using variable rate technology (VRT) for site-specific K management in pastures in Southern Portugal.

Keywords: pastures, potassium differential management, VRT

Introdução

As pastagens permanentes pastoreadas ocupam mais de 200 000 ha no Alto Alentejo. Estes solos normalmente não necessitam de adubação potássica devido à riqueza deste nutriente na rocha mãe (Efe Serrano, 2006).

São reconhecidas tradicionalmente quatro formas de K no solo, estrutural, não-permutável, de troca e em solução (Askegaard e Eriksen, 2000; Jalali, 2007; Öborn *et al.*, 2005). Estas fracções constituem um sistema dinâmico em equilíbrio, com transferências reversíveis entre fracções (Askegaard e Eriksen, 2000). Todos os factores que afectam este equilíbrio afectam indirectamente a dimensão das diferentes fracções (Öborn *et al.*, 2005). O K de troca e o K em solução (medido como K disponível) são rapidamente absorvidos pelas raízes das plantas, enquanto o K não-permutável e o K estrutural apenas são potencialmente disponíveis, reservas que podem ser usadas para reabastecer o K de troca (Campkin, 1985; Öborn *et al.*, 2005; Øgaard *et al.*, 2002), e são uma indicação da capacidade de longo prazo de cada tipo de solo suprir a perda de K (Campkin, 1985).

Vários estudos mostraram que a libertação de K pelas fracções estrutural e não-permutável pode contribuir significativamente para o fornecimento às plantas (Öborn *et al.*, 2005). Contudo, a taxa de libertação de K a partir destas formas é muito lenta e depende do processo de desagregação da rocha originária. Holmqvist *et al.* (2003), Kayser e Isselstein (2005) e Øgaard *et al.* (2002) verificaram que esta taxa é maior em solos argilosos do que em solos arenosos.

Por outro lado, significativas quantidades de K podem ser perdidas por lixiviação em áreas pastoreadas, principalmente por fluxos associados à urina ou por percolação após precipitação atmosférica (Alfaro *et al.*, 2004). A lixiviação do K não é considerada um problema em solos com elevados níveis de argila, mas as perdas de K em solos de textura grossa, com baixos teores de argila e baixos *inputs* de K podem ser factores limitativos no desenvolvimento de balanços negativos de K devido à baixa capacidade de troca catiónica (Alfaro *et al.*, 2004; Jalali, 2007; Kayser *et al.*, 2007; Öborn *et al.*, 2005; Zhang *et al.*, 2013).

Dada a comprovada importância do K na qualidade das culturas e atendendo a que a tradicional e uniforme aplicação de adubos em áreas com variabilidade espacial nas propriedades do solo pode resultar em pontos de aplicação acima e abaixo das doses requeridas (Bongiovanni e Lowenberg-Deboer, 2004; Mallarino e Witty, 2004), é importan-

te avaliar o potencial para implementação de VRT para adequar a aplicação de adubo às necessidades das culturas (Jalali, 2007). Modelos simplificados têm sido usados para calcular as quantidades de nutrientes necessárias às pastagens para compensar as perdas no solo (por exemplo, através da fixação e lixiviação) e perdas por transferência animal. A variação espacial do K disponível antes da aplicação de adubo, a capacidade de fixação do K pelo solo e a textura do solo necessitam ser tomados em consideração para manter no solo níveis de K adequados às necessidades das culturas e para reduzir o risco potencial de perdas do solo por lixiviação (Jalali, 2007). Vários processos estão envolvidos no ciclo do K e outros nutrientes no sistema solo-planta-animal. Estes processos geralmente são de conversão e/ou translocação, particularmente para os nutrientes predominantemente excretados via urina, como é o caso do K. Nestes agro ecossistemas o catalisador é o animal, que recicla o material vegetal e modifica a dinâmica do ciclo de nutrientes (Carvalho *et al.*, 2010). O pastoreio animal assume, por isso, um papel dominante na fertilidade do solo, onde a concentração de nutrientes na urina e nas fezes dentro das áreas de pastoreio e descanso causa um mosaico de níveis de nutrientes (Dahlin *et al.*, 2005; Kayser e Isselstein, 2005). A concentração de nutrientes no solo é particularmente alta nas zonas onde os animais congregam espontaneamente (Dahlin *et al.*, 2005). Este fluxo de nutrientes através das diferentes áreas do campo salienta o interesse da tecnologia de aplicação variável para restituir o equilíbrio e para promover a produtividade da pastagem, tendo em conta a variabilidade espacial do K no solo.

Diversos métodos têm sido usados por diferentes equipas de investigação para apoio aos gestores agrícolas na definição das tendências espaciais e temporais que se verificam dentro de um determinado campo (Blackmore, 2000; Blackmore *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2006). A variabilidade espacial e a estabilidade temporal dos nutrientes no solo são duas condições que podem justificar a gestão diferencial e são a base para a aplicação espacialmente variável de adubos. Um mapa de tendência espacial e temporal de um campo pode ajudar a desenvolver estratégias de gestão diferenciadas (Xu *et al.*, 2006). Blackmore *et al.* (2003) realçaram a dificuldade inerente à escolha dos valores que permitem distinguir entre estabilidade ou instabilidade temporal. Previamente, Blackmore (2000) utilizou um valor limite particular para o CV temporal de 30% para cereais, enquanto Xu *et al.* (2006) utilizaram dois valores limite (15 e 25%) para pastagens.

Poucos dados estão disponíveis para o balanço do K em pastagens, sendo reduzido o conhecimento acerca da sua dinâmica espacial nas condições do ecossistema Mediterrânico de pastagem pastoreada. Nesta perspectiva, a aplicação de medições geoespaciais da condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a), combinadas com a utilização do sistema global de navegação por satélite (GNSS) e com sistemas de informação geográfica (GIS), podem ser úteis para caracterizar os padrões espaciais das propriedades do solo (Bronson *et al.*, 2005; Corwin e Lesch, 2005), funcionando como ferramentas chave para apoio à tomada de decisão na gestão do balanço do K.

Este estudo teve como objectivo avaliar a especificidade da dinâmica espacial e temporal do K no solo, durante dez anos, num complexo agro ecossistema (uma pastagem bio-diversa instalada num solo delgado, pastoreado por ovinos, nas condições Mediterrânicas) e o potencial para implementar a gestão diferenciada da adubação.

Material e Métodos

Características do local e gestão do campo experimental

O campo experimental, com uma área de cerca de 6 ha, localiza-se na herdade da Revilheira (38°27'51.6"N e 7°25'46.2"W). O solo predominante deste campo é classificado como *Luvissolo* (FAO,

2006). Nesta região, os solos delgados são usados principalmente para instalação de pastagens permanentes com pastoreio animal extensivo. Uma pastagem bio-diversa foi instalada neste campo em Setembro de 2000. Entre 2000 e 2003 o campo foi pastoreado por ovinos e foram aplicados anualmente 300 kg ha⁻¹ de adubo superfosfato18% (SP18). 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.

Foi realizado um levantamento topográfico da área de ensaio utilizando um GPS-RTK (Trimble RTK/PP - 4700 GPS, Trimble Navigation Limited, USA). O mapa altimétrico (Figura 1) foi criado a partir de interpolação linear em ArcGIS 9.3 com uma grelha de 1 m de resolução.

Amostras de solo e de 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 28m x 28m).

As amostras de solo foram recolhidas entre Maio e Junho de cada ano (em 2004, 2005, 2006, 2007, 2010, 2012 e 2013) com uma sonda meia-cana na camada superficial (0-0,30m). Cada amostra compósita resultou de cinco sub-amostras, recolhidas nos quatro cantos e no centro de cada quadrícula. Foram reali-

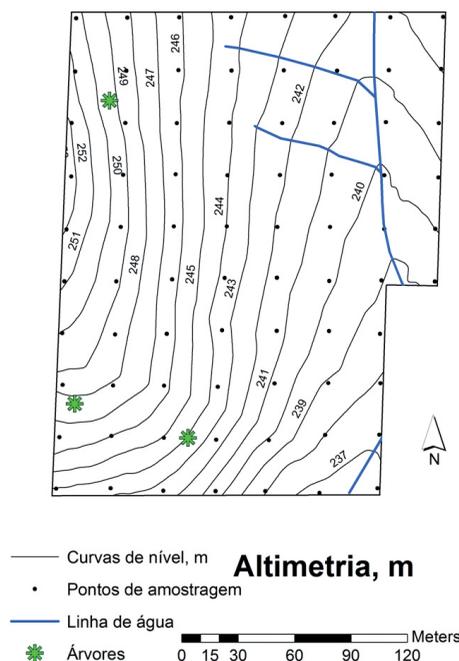


Figura 1 – Mapa de altimetria do campo experimental

zadas as seguintes determinações no solo: textura, pH, matéria orgânica e macronutrientes (N, P e K). O K (na forma de K_2O) foi extraído pelo método de Egner-Riehm.

As amostras de pastagem foram recolhidas com uma tesoura manual numa área de $1m^2$ 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.

Avaliação da condutividade eléctrica aparente do solo

A condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a) do campo experimental foi medida em Fevereiro de 2013 por um sensor Véris 2000 XA, equipado com uma antena GPS. Este sensor foi regulado para realizar medições na camada superficial de solo (0-0,30m).

Dada a comprovada influência da humidade do solo sobre a EC_a , (Brevik *et al.*, 2006), este parâmetro também foi avaliado na camada superficial de solo no momento em que foi medida a EC_a .

Balanço do potássio

A Figura 2 mostra esquematicamente um balanço simplificado do K em pastagens pastoreadas, não fertilizadas, adaptado de Alfaro *et al.* (2003) e Campkin (1985). Neste estudo apenas foi considerada absorção de K pelas plantas nos anos em que os animais pastorearam o campo experimental (2004-2007) e no último ano (2013). No período entre 2007 e 2012 a pastagem não foi pastoreada pelo que, de

acordo com Campkin (1985) e Carvalho *et al.* (2010), todo o K absorvido pelas plantas foi reciclado no próprio campo. Em 2013, uma vez que as plantas se encontravam em avançado estado de desenvolvimento no momento da amostragem do solo, foi considerada no cálculo do balanço do K a absorção pelas plantas com base nos teores de matéria seca. Para este efeito foram seguidas as indicações de Öborn *et al.* (2005), que consideraram valores de K entre 2,5-3,5% da matéria seca da pastagem. No período entre 2004 e 2007 a eficiência do pastoreio (a quantidade de matéria seca ingerida pelos animais em relação ao total de matéria seca produzida) foi considerada 60%, valor médio do intervalo 50-70% estimado por Alfaro *et al.* (2003) como a diferença entre a produção de matéria seca das áreas pastoreadas e a matéria seca das áreas protegidas por caixas de exclusão de pastoreio. Estes assumiram que, por um lado, as exportações de K pelos animais representam 2-3% da ingestão animal e, por outro, 90% do K ingerido pelos animais retorna à pastagem em urina e fezes, dos quais 4-5% são em média transferidos para áreas não produtivas (Alfaro *et al.*, 2003).

Tratamento estatístico

Os mapas das propriedades do solo e da produtividade da pastagem foram desenvolvidos em ArcGIS 9.3 utilizando o interpolador com uma grelha de 5 m. Foram calculados coeficientes de correlação lineares entre o K e a altimetria do campo experimental, os parâmetros do solo e a produtividade da pastagem no conjunto dos anos de amostragem. Foi utilizado um nível de significância estatística de 95% ($p < 0,05$). A tendência espacial da concentração de K no solo foi calculada como o valor médio (\bar{y}_i , Eq. 1)

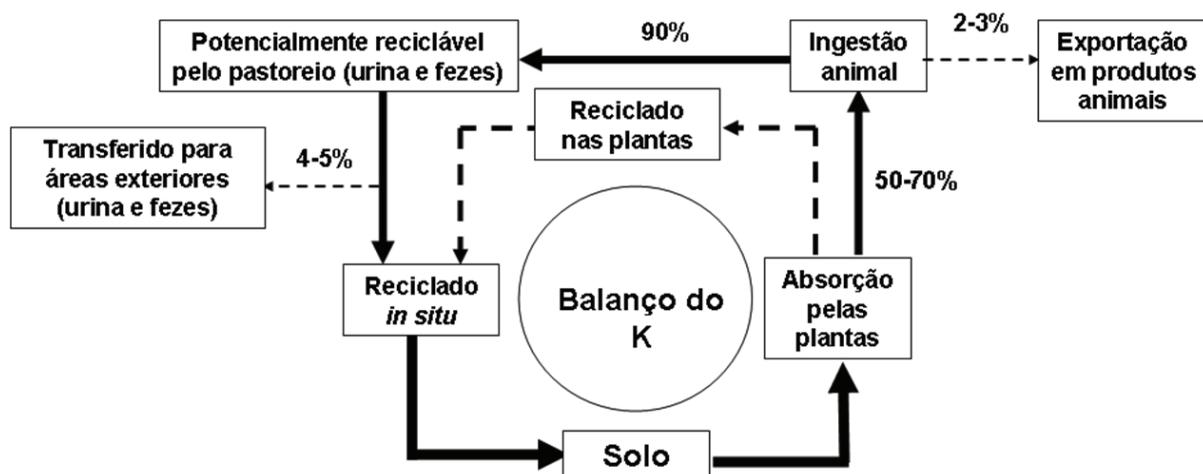


Figura 2 – Balanço simplificado do K em pastagens pastoreadas (adaptado de Alfaro *et al.*, 2003 e Campkin, 1985)

em cada ponto de amostragem i no período de dez anos considerado (Blackmore, 2000; Xu *et al.*, 2006):

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

onde y_{it} é a concentração de K no solo (mg 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 ($\overline{CV}_{\text{espacial}}$) foi calculado como o valor médio do CV obtido no conjunto de todos os anos de amostragem (Eq. 2):

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

onde n é o número de anos de amostragem de solo. A estabilidade temporal da concentração do K no solo foi determinada pelo cálculo do CV de cada ponto de amostragem ao longo do tempo ($CV_{i_temporal}$, Eq. 3) utilizando o método previamente apresentado por Blackmore (2000) e Xu *et al.* (2006) para determinar a estabilidade temporal da produtividade de culturas.

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

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

O coeficiente de variação temporal médio do K ($\overline{CV}_{\text{temporal}}$) 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):

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

onde 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 K, 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 esta-

bilidade 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 (relativo à concentração relativa de K 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 de K no solo (mg kg^{-1}) 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 ($15\% \leq CV_i < 25\%$); (3) abaixo da concentração média e estável ($CV < 15\%$); (4) abaixo da concentração média e moderadamente estável ($15\% \leq CV_i < 25\%$); (5) instável ($CV_i \geq 25\%$).

Resultados e Discussão

O Quadro 1 resume os resultados da análise estatística clássica das características do solo (média e desvio padrão) no campo experimental na camada superficial de solo (0-0,30m), em 2004, 2007, 2013 e na média de todos os anos de amostragem.

A Figura 3 ilustra os mapas dos padrões espaciais dos teores de argila e matéria orgânica do campo experimental, obtidos a partir dos valores médios dos dados obtidos nos anos de amostragem. A Figura 4 ilustra os mapas da concentração de K no solo e da produtividade da pastagem, em termos de matéria seca, obtidos a partir dos valores médios dos dados obtidos nos anos de amostragem. A Figura 5 apresenta os mapas da EC_a e da humidade do solo do campo experimental em Fevereiro de 2013.

Variabilidade dos parâmetros do solo e da produtividade da pastagem

O CV espacial de algumas propriedades do solo é elevado, especialmente do N e do P ($\overline{CV}_{\text{espacial}} = 50-60\%$). A matéria orgânica e o K apresentam uma variabilidade espacial intermédia ($\overline{CV}_{\text{espacial}} = 20-25\%$), enquanto a textura ($\overline{CV}_{\text{espacial}} = 10-15\%$) e o pH ($\overline{CV}_{\text{espacial}} = 5\%$) apresentam variabilidades espaciais

Quadro 1 – Média \pm desvio padrão das propriedades do solo do campo experimental na camada de solo de 0-0,30m, entre 2004 e 2013

Propriedades	P ₂ O ₅ , mg kg ⁻¹	NO ₃ , mg kg ⁻¹	K ₂ O, mg kg ⁻¹	M.O., %	Argila, %	Limo, %	Areia, %	pH (H ₂ O)
2004	33 \pm 12	10 \pm 7	94 \pm 25	1,7 \pm 0,3	34 \pm 6	23 \pm 3	43 \pm 5	6,19 \pm 0,34
2007	53 \pm 43	4 \pm 2	76 \pm 37	1,5 \pm 0,4	35 \pm 5	21 \pm 3	44 \pm 4	6,12 \pm 0,41
2013	61 \pm 32	9 \pm 8	96 \pm 22	2,1 \pm 0,5	36 \pm 5	21 \pm 4	43 \pm 4	6,37 \pm 0,24
Média	48 \pm 28	20 \pm 12	96 \pm 21	1,7 \pm 0,4	35 \pm 5	22 \pm 3	43 \pm 4	6,18 \pm 0,33
Intervalo	[14-490]	[0-171]	[40-370]	[0,6-3,8]	[23-43]	[16-28]	[31-55]	[5,40-8,02]

M.O.- Matéria orgânica.

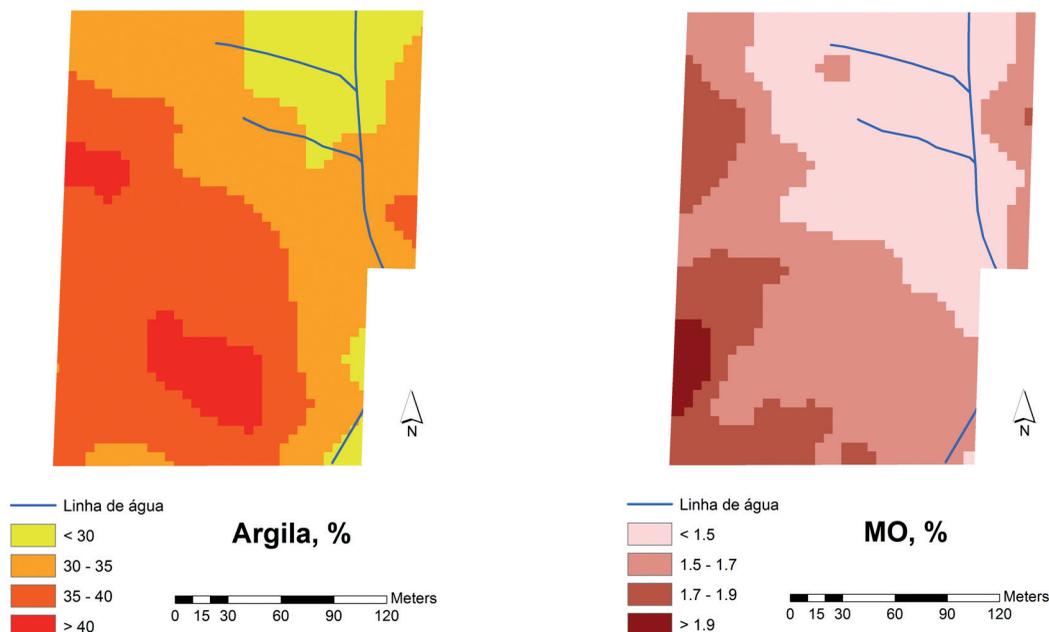


Figura 3 – Mapas dos teores médios de argila e matéria orgânica no campo experimental

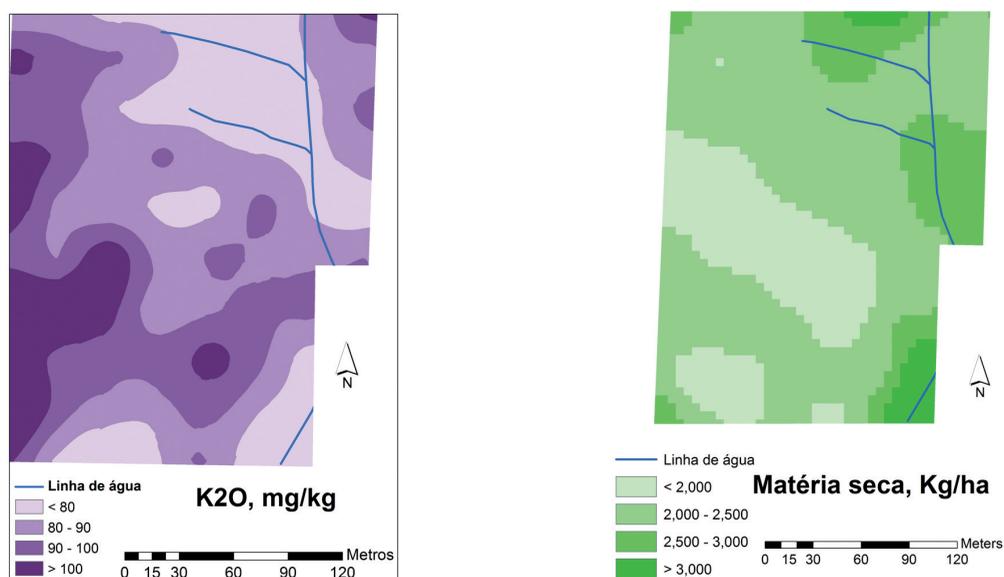


Figura 4 – Potássio (K₂O) médio do solo no conjunto dos anos de amostragem e produtividade da pastagem (em termos de matéria seca) do campo experimental em Fevereiro de 2013

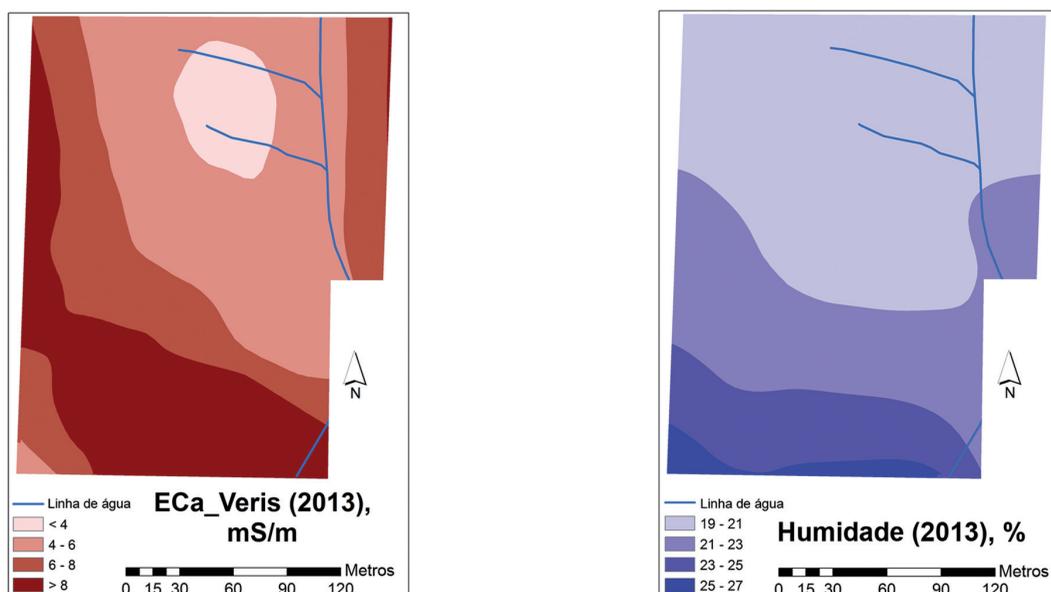


Figura 5 –Condutividade eléctrica aparente (Eca) e humidade do solo (SMC) no campo experimental em Fevereiro de 2013

baixas. Mallarino e Wittry (2004), em testes de campo com pastagens pastoreadas em solos semelhantes também encontraram CV mais elevados no P e mais baixos no pH, com o K e a matéria orgânica a apresentarem valores intermédios.

Os mapas (Figuras 3-5) mostram que o campo experimental é dominado por uma clara tendência anisotrópica. O relevo do terreno influencia os padrões espaciais dos parâmetros do solo e da produtividade da pastagem, situação também descrita por Kumhálová *et al.* (2011). Por um lado, maior produtividade da pastagem pode ser observada nas zonas baixas do campo experimental (zona Este da parcela) e, por outro, uma clara tendência para valores mais elevados da concentração de K nas zonas altas do campo experimental (zona Oeste da parcela). Diversos estudos mostraram maior produtividade de pastagens de sequeiro nas zonas baixas dos campos devido à menor restrição de humidade nessas áreas (Afyuni *et al.*, 1993).

Relativamente ao fluxo de K e outros nutrientes, de acordo com Page *et al.* (2005), este é resultado do pastoreio animal, o qual é mais intenso nas zonas mais produtivas, onde a extracção do solo pelas plantas é também maior, e do retorno ao solo, de forma descontínua e irregular através das fezes e da urina, principalmente nas áreas de descanso dos animais, debaixo das árvores situadas nas zonas altas da parcela. Este estudo confirma que, em pastagens pastoreadas, os animais têm um reduzido efeito na exportação do K (os animais apenas utilizam uma pequena proporção do que ingerem), mas

um importante impacto na reciclagem do K (Alfaro *et al.*, 2003). Dado que os animais pastorearam este campo experimental e permaneceram no mesmo, dia e noite, a absorção de nutrientes pelas plantas e o retorno via fezes e urina ocorrem simultaneamente e não de forma diferenciada como nas forragens conservadas (Kayser e Isselstein, 2005).

Este fluxo de nutrientes deu um contributo decisivo para a moderada a forte variabilidade espacial do K, com um valor médio do $\overline{CV}_{espacial}$ de $29,8 \pm 12,3\%$, o qual, reforçado por uma estabilidade temporal moderada deste nutriente durante os dez anos de estudo ($\overline{CV}_{temporal} = 18,1 \pm 8,6\%$), pode justificar a aplicação diferenciada de adubo.

Balanço do potássio

O campo experimental, durante os dez anos de ensaio, não recebeu adubação com K. A evolução da concentração de K no solo do campo experimental no período de dez anos considerado varia, em termos médios, entre -21% e +16% da concentração média na globalidade do período considerado ($96 \pm 21 \text{ mg kg}^{-1}$). Este comportamento pode ser explicado pelos modelos propostos por Heming (2004) e Kayser *et al.* (2007), segundo os quais existe uma correlação positiva e linear entre o saldo do K e as variações no K medido no solo, e um saldo próximo de zero não produz variações significativas no K disponível (como é o caso deste estudo). Também Campkin (1985) sugere que pastagens pastoreadas, no que concerne ao ciclo do K, representam um sistema em estado estacionário, i.e. *inputs* \approx *outputs*.

Esta é a convicção dos agricultores nesta região, pelo que baseiam a determinação das necessidades de K numa ou duas análises compósitas de solo, as quais não têm em conta a variabilidade espacial do solo. Este aparente estado estacionário pode ser questionado quando é realizada uma amostragem detalhada do solo.

De acordo com Andersson *et al.* (2007) e Holmqvist *et al.* (2003), quando não são efectuadas aplicações regulares de K em solos argilosos ou franco argilosos (como é o caso do solo deste campo experimental), estes não apresentam uma significativa diminuição da concentração de K na camada superficial do solo K uma vez que a libertação deste nutriente a partir dos minerais primários e as perdas por lixiviação se encontram estritamente relacionadas com o teor de argila do solo. Neste estudo, a libertação de K a partir da desagregação dos minerais de argila foi o único *input* significativo, enquanto a absorção pelas plantas e a exportação pelos animais para fora do sistema foram os *output* deste ciclo.

Interacção do K com outros parâmetros

A interacção do K com outros parâmetros foi também demonstrada através de análise de correlação, a qual reforça a tendência anisotrópica do campo experimental. Foram encontrados coeficientes de correlação altamente significativos ($p < 0,01$) entre a concentração de K no solo e a altimetria (0,614), a

argila (0,651), o P (0,749) e a matéria orgânica (0,882) e coeficientes de correlação significativos ($p < 0,05$) entre a concentração de K no solo e a EC_a (0,436) e a produtividade da pastagem em termos de matéria seca (-0,499). Zhang *et al.* (2013) também encontraram uma correlação significativa e positiva da concentração de K no solo com a altimetria. A correlação significativa e positiva com os teores de argila e de matéria orgânica do solo e a correlação significativa e negativa com a produtividade da pastagem reflectem os padrões espaciais destes parâmetros (ver mapas das Figuras 3 e 4). A correlação significativa dos teores de K no solo com a EC_a abre boas perspectivas em termos de simplificação do processo de monitorização do solo, no entanto, algumas reservas devem ser consideradas nesta análise uma vez que a EC_a reflecte neste estudo, fundamentalmente, os padrões dos teores de humidade e de argila no solo, o que é consistente com a literatura em geral (Brevik *et al.*, 2006).

Classes de gestão do K

A Figura 6 apresenta a sinopse dos aspectos mais importantes identificados em termos de variação espacial e de estabilidade temporal do K no solo do campo experimental. Tendo por base os valores limite do CV de 15 e 25% considerados neste estudo para classificar a estabilidade temporal do K, a reduzida expressão das áreas instáveis (classe 5; 18,4%)

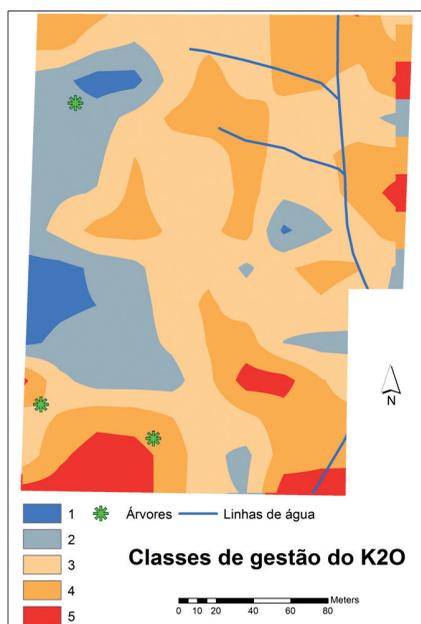


Figura 6 – Mapa das classes de gestão de K20 do campo experimental

(1- Acima da concentração média e estável; 2- Acima da concentração média e moderadamente estável; 3- Abaixo da concentração média e estável; 4- Abaixo da concentração média e moderadamente estável; 5- Instável;)

mostra que existe uma oportunidade real para implementar a gestão intra-parcelar da adubação do K (Xu *et al.*, 2006). Como implicação prática destes mapas de tendências pode justificar-se a avaliação das áreas instáveis na tentativa de identificar os mecanismos que podem ter causado a instabilidade temporal da concentração do K no solo. Um aspecto que afecta a estabilidade temporal do K encontra-se relacionado com a presença de animais (ovinos) em pastoreio no campo experimental; estes tendem a concentrar as suas fezes e urina, ricas em K, nas zonas de descanso, que correspondem às zonas altas do campo experimental, onde as concentrações de K atingem valores superiores a 125 mg kg⁻¹ e onde o CV temporal é mais elevado (áreas instáveis, Figura 6). A dinâmica de transferência de nutrientes demonstrada neste estudo abre portas para novos estudos utilizando colares GPS para monitorizar o comportamento animal em pastoreio. Os estudos de Laca (2009) ou de Schlecht *et al.* (2004) demonstram a importância e o relevo deste tema.

Na Figura 7 é apresentado o histograma das diferentes classes de estabilidade do K. A predominância de classes de áreas moderadamente estáveis (56,6% do campo experimental) e estáveis (25,0% do campo experimental) também reforça o interesse da gestão diferenciada da adubação potássica. Dentro das classes identificadas como moderadamente estáveis e estáveis, cerca de 45% do campo experimental (classes 3 e 4) apresenta concentrações de K no solo abaixo da concentração média (96 ± 21 mg kg⁻¹). Vários trabalhos publicados indicam os níveis de K (em mg K kg⁻¹ de solo) adequados para as culturas (Heming, 2004; Jalali, 2007; Zhang *et al.*, 2013).

O limite inferior destes intervalos varia entre 120 e 150 mg K kg⁻¹ de solo. Tendo em conta as recomendações regionais de 125-150 mg K kg⁻¹ de solo para promover o adequado desenvolvimento de pastagens permanentes de sequeiro (Efe Serrano, 2006), os mapas da concentração de K no solo demonstram o interesse e o potencial para utilizar tecnologia de aplicação variável (VRT) na adubação potássica nesta região. Uma estratégia de gestão específica pode ser desenvolvida neste campo para criar duas ou três subunidades de gestão, com diferentes densidades de aplicação de adubo, otimizando a sua utilização e minimizando a variação espacial da produtividade da pastagem.

As formas do K, a libertação a partir da rocha mãe, a dinâmica de transformações entre fracções e a transferência nutrientes pelos animais constituem a base do ciclo do K no ecossistema Mediterrânico solo/planta/animal e confirmam que o estabelecimento de um balanço entre *inputs* e *outputs* com o propósito de estabelecer as necessidades nutritivas é uma tarefa lenta e irregular (Efe Serrano, 2006). A tecnologia de aplicação variável pode ser uma interessante estratégia para garantir o equilíbrio de nutrientes no solo e para otimizar a produtividade da pastagem.

Conclusões

A evolução da concentração média de K no campo experimental durante os dez anos de estudo sugere que as pastagens pastoreadas são um sistema em equilíbrio no que respeita ao ciclo do K. Este estu-

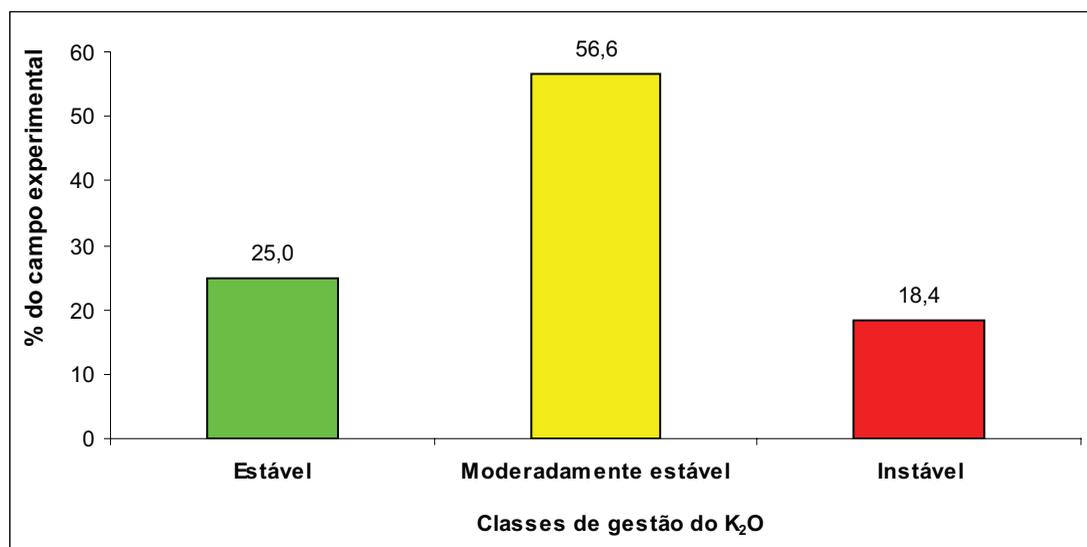


Figura 7 – Classes de gestão do potássio em percentagem da área do campo experimental

do, contudo, mostra que o campo experimental é dominado por uma acentuada tendência anisotrópica. O efeito combinado do relevo ondulado, com árvores dispersas e animais em pastoreio selectivo e que produzem uma deposição heterogénea de fezes e urina, proporciona uma notável variabilidade espacial da concentração de K no solo. A estabilidade temporal do K é confirmada pela predominância das áreas temporalmente estáveis no campo experimental. Tendo por base as recomendações de K no solo, este estudo demonstra o interesse e o potencial para utilizar tecnologias de aplicação variável (VRT) na gestão da adubação potássica em pastagens no Sul de Portugal. Os progressos para a utilização mais eficiente do K e, conseqüentemente, para a sustentabilidade dos sistemas baseados em pastagens pastoreadas requerem que as recomendações tenham em consideração os processos que regulam a dinâmica do K no solo e a sua variabilidade espacial e temporal.

Agradecimentos

Este trabalho foi suportado por fundos do FEDER, através do Programa COMPETE, e através de fundos nacionais através da FCT, Fundação para a Ciência e Tecnologia, projecto estratégico - C/AGR/U10115/2011.

Referências bibliográficas

- Alfaro, M.A.; Jarvis, S.C. e Gregory, P.J. (2003) - Potassium budgets in grassland systems as affected by nitrogen and drainage. *Soil Use and Management*, vol. 19, n. 2, p. 89–95.
- Alfaro, M.A.; Jarvis, S.C. e Gregory, P.J. (2004) - Factors affecting potassium leaching in different soils. *Soil Use and Management*, vol. 20, n. 2, p. 182–189.
- Afyuni, M.M.; Cassel, D.K. e Robarge, W. P. (1993) - Effect of landscape position on soil water and corn silage yield. *Soil Science Society America Journal*, vol. 57, n. 6, p. 1573–1580.
- Andersson, S.; Simonsson, M.; Mattsson, L.; Edwards, A. C. e Öborn, I. (2007) - Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil Use and Management*, vol. 23, n. 1, p. 10–19.
- Askegaard, M. e Eriksen, J. (2000) - Potassium retention and leaching in an organic crop rotation on loamy sand as affected by contrasting potassium budgets. *Soil Use and Management*, vol. 16, n. 3, p. 200–205.
- Blackmore, S. (2000) - The importance of trends from multiple yield maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 26, n. 1, p. 37–51.
- Blackmore, S.; Godwin, R. e Fountas, S. (2003) - The analysis of spatial and temporal trends in yield map data over six years. *Biosystems Engineering*, vol. 84, n. 4, p. 455–466.
- Bongiovanni, R. e Lowenberg-Deboer, J. (2004) - Precision agriculture and sustainability. *Precision Agriculture*, vol. 5, n. 4, p. 359–387.
- Brevik, E.C.; Fenton, T.E. e Lazari, A. (2006) - Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. *Precision Agriculture*, vol. 7, n. 6, p. 393–404.
- Bronson, K.; Booker, J.; Officer, S.; Lascano, R.; Maas, S.; Searcy, S. e Booker, J. (2005) - Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U.S. southern high plains. *Precision Agriculture*, vol. 6, n. 3, p. 297–311.
- Campkin, R. (1985) - Model for calculating potassium requirements for grazed pastures. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, vol. 13, n. 1, p. 27–37.
- Carvalho, P.; Anghinoni, I.; Moraes, A.; Souza, E.; Sulc, R.; Lang, C.; Flores, J.; Lopes, M.; Silva, J.; Conte, O.; Wesp, C.; Levien, R. e Fontaneli, R. (2010) - Managing grazing animals to achieve nutrient cycling and soil improvement in no-till integrated systems. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 88, n. 2, p. 259–273.
- Corwin, D. e Lesch, S. (2005) - Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, n. 1, p. 11–43.
- Dahlin, A.S.; Emanuelsson, U. e McAdam, J.H. (2005) - Nutrient management in low input grazing-based systems of meat production. *Soil Use and Management*, vol. 21, n. 1, p. 122–131.
- Efe Serrano, J. (2006) - *Pastures in Alentejo: technical basis for characterization, grazing and improvement*. Universidade de Évora- ICAM (Ed.), Évora, Portugal, p. 165–178. (in Portuguese)
- FAO (2006) - *World reference base for soil resources*. World soil resources reports Nº103. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Heming, S.D. (2004) - Potassium balances for arable soils in southern England 1986–1999. *Soil Use and Management*, vol. 20, n. 4, p. 410–417.
- Holmqvist, J.; Øgaard A.F.; Öborn, I.; Edwards, A.C.; Mattsson, L. e Sverdrup, H. (2003) - Ap-

- plication of the PROFILE model to estimate potassium release from mineral weathering in Northern European agricultural soils. *European Journal of Agronomy*, vol. 20, n. 1–2, p. 149–163.
- Jalali, M. (2007) - Site-specific potassium application based on the fertilizer potassium availability index of soil. *Precision Agriculture*, vol. 8, n. 4–5, p. 199–211.
- Kayser, M. e Isselstein, J. (2005). Potassium cycling and losses in grassland systems: a review. *Grass and Forage Science*, vol. 60, n. 3, p. 213–224.
- Kayser, M.; Muller, J. e Isselstein, J. (2007) - Potassium leaching from cut grassland and from urine patches. *Soil Use and Management*, vol. 23, n. 4, p. 384–392.
- 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.
- Laca, E.A. (2009) - Precision livestock production: tools and concepts. *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 38, n. spe, p. 123–132.
- Mallarino, A.P. e Wittry, D.J. (2004) - Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site-specific assessment of phosphorus, potassium, pH, and organic matter. *Precision Agriculture*, vol. 5, n. 2, p. 131–144.
- Öborn, I.; Andrist-Rangel, Y.; Askegaard, M.; Grant, C. A.; Watson, C.A. e Edwards, A.C. (2005) - Critical aspects of potassium management in agricultural systems. *Soil Use and Management*, vol. 21, n. 1, p. 102–112.
- Øgaard, A.F.; Krogstad, T. e Lunnan, T. (2002) - Ability of some Norwegian soils to supply grass with potassium (K) - soil analyses as predictors of K supply from soil. *Soil Use and Management*, vol. 18, n. 4, p. 412–420.
- Page, T.; Haygarth, P.M.; Beven, K.J.; Joynes, A.; Butler, T.; Keeler, C.; Freer, J.; Owens, P.N. e Wood, G. A. (2005) - Spatial variability of soil phosphorus in relation to the topographic index and critical source areas: sampling for assessing risk to water quality. *Journal of Environmental Quality*, vol. 34, n. 6, p. 2263–2277.
- Schlecht, E.; Ulsebusch, C.; Mahler, F. e Becker, K. (2004) - The use of differentially corrected global positioning system to monitor activities of cattle at pasture. *Applied Animal Behaviour Science*, vol. 85, n. 3–4, p. 185–202.
- 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.
- Zhang, S.; Zhang, X.; Liu, X.; Liu, W. e Liu, Z. (2013) - Spatial distribution of soil nutrient at depth in black soil of Northeast China: a case study of soil available potassium. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, vol. 95, n. 3, p. 319–331.