

Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes

Evaluation of technologies for differential fertilizer application: new concepts in permanent pastures management

João Serrano, José Peça, José Marques da Silva e Shakib Shahidian

*Departamento de Engenharia Rural, Escola de Ciências e Tecnologia, Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas, Instituto de Investigação e Formação Avançada, Universidade de Évora, Núcleo da Mitra, 7002-554 ÉVORA, PORTUGAL.
E-mail: jmrs@uevora.pt, author for correspondence*

Recebido/Received: 2014.02.17
Aceitação/Accepted: 2014.04.24

RESUMO

A importância das pastagens permanentes no Alentejo justifica o interesse na aplicação de novas tecnologias que facilitem e promovam a sua gestão sustentada. A diversidade dos padrões de desenvolvimento das pastagens reflecte a variabilidade do solo, do relevo, das condições do ano agrícola e dos sistemas de pastoreio animal. A utilização de ferramentas expeditas de monitorização da variabilidade, baseadas em sensores e sistemas de localização no terreno, representa um potencial que abre novas perspectivas para o conhecimento, pilar da tomada de decisão. O conceito de agricultura de precisão encontra na tecnologia de aplicação diferenciada de fertilizantes o fechar de um ciclo que constitui um importante passo em direcção à modernização da agricultura. Este artigo apresenta alguns dos percursos de investigação na área das tecnologias aplicadas em pastagens em Portugal, realçando os resultados obtidos num projecto de demonstração desenvolvido entre 2004 e 2013 pela equipa de mecanização agrícola da Universidade de Évora.

Palavras-chave: gestão diferenciada, pastagens, tecnologia, VRT

ABSTRACT

The interest in application of new technologies that facilitate and promote integrated management of permanent pastures is justified by their importance in the Alentejo region. The diversity in the pasture development patterns reflects the variability in the soil, topography, annual climate conditions and animal grazing systems. The use of expedite variability monitoring tools, based on sensors and ground positioning systems open new perspectives for knowledge, a pillar of the decision making process. The concept of precision agriculture relies on the differentiated fertilizer application technology to close the cycle which constitutes an important step in the process of agriculture modernization. This article presents some of the research work carried out in the field of technologies applied to pastures in Portugal, with emphasis on the results obtained in a demonstration project carried out between 2004 and 2013 by the farm mechanization team of the University of Évora.

Keywords: differential management, pastures, technology, VRT

Introdução

As pastagens permanentes pastoreadas sob montado são uma imagem característica do Alto Alentejo. Para pôr em prática a tarefa de conservação e recuperação dos recursos através dos sistemas agro-silvo-pastoris é necessário conhecer potenciais factores limitantes, em especial o factor solo, e para tal é necessário conjugar com o conhecimento agrónomico as novas tecnologias disponíveis.

O interesse em transpor tecnologias originalmente utilizadas nos cereais para esta área representa um estímulo à pecuária extensiva e ao montado. O ecossistema solo-planta-animal é um exemplo de variabilidade, com a presença de árvores, afloramentos rochosos, relevo e outros aspectos notáveis. Esta variabilidade é acentuada pela presença dos animais em pastoreio (Alfaro *et al.*, 2003; Dahlin *et al.*, 2005; Kayser e Isselstein, 2005; Carvalho *et al.*, 2010) e acontece mesmo dentro de cada parcela, re-

flectindo-se na capacidade produtiva e sugerindo uma gestão diferenciada, nomeadamente da fertilização. Estes solos, devido às características da rocha mãe originária, normalmente não necessitam de fertilização potássica. Por outro lado, não é prática comum a fertilização azotada de pastagens que incluem leguminosas, para aproveitar e estimular a capacidade destas espécies para enriquecer o solo a partir da fixação do azoto atmosférico. Pelo que, o melhoramento das pastagens permanentes de sequeiro consiste tradicionalmente na aplicação homogénea de fertilizantes fosfatados (Efe Serrano, 2006). Depois do levantamento da variabilidade espacial e da estabilidade temporal dos parâmetros do solo e da pastagem, o fechar do ciclo de agricultura de precisão em pastagens poderá passar pela aplicação de fertilizantes de forma diferenciada no espaço.

O estudo realizado por esta equipa de investigação na área das pastagens teve início no âmbito de um projecto de Desenvolvimento Experimental e Demonstração (DE&D) financiado pelo programa AGRO (AGRO-390) intitulado “Demonstração de tecnologias de aplicação diferenciada de fertilizantes e de sementes no melhoramento de pastagens no Alentejo”, o qual decorreu entre 2004 e 2007. O trabalho agora divulgado inclui também os desenvolvimentos que foram realizados no período entre 2007 e 2013, financiados pela FCT, Fundação para a Ciência e Tecnologia através do centro de investigação ICAAM (Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas) e que permitiram testar equipamentos que visam facilitar a monitorização do solo, da pastagem e do pastoreio animal. A diversidade de informação recolhida ao longo de dez anos permitiu ainda analisar a dinâmica dos fluxos de nutrientes no solo nas condições do ecossistema Mediterrânico de pastagem pastoreada, aspecto fundamental para o cálculo dos balanços de nutrientes e para apoio à tomada de decisão no que concerne à aplicação diferenciada de fertilizantes. O desenvolvimento de sistemas robustos de apoio à decisão que possam converter a diversidade de dados obtidos pelas tecnologias aplicadas em informação útil à gestão é, segundo Schellberg *et al.* (2008), o factor chave para o sucesso do conceito de agricultura de precisão.

Neste artigo, que se pretende integrador das várias tecnologias utilizadas, são apresentados apenas os principais resultados, para não tornar o documento muito extenso. Maior pormenor de cada um dos ensaios pode ser consultado nos artigos respectivos, citados em cada tema.

Características do campo experimental

A avaliação das diversas tecnologias decorreu num campo experimental com cerca de 6 ha, situado na herdade da Revilheira, relativamente perto de Reguengos de Monsaraz (38°27'51,6"N e 7°25'46,2"W). O solo predominante desta parcela é classificado como Luvissole (FAO, 2006). Solo delgado, com relevo ondulado, onde, no ano 2000, foi instalada uma pastagem de gramíneas e leguminosas sujeita a pastoreio por ovinos. Trata-se de um solo franco-argiloso, com baixos teores de matéria orgânica, ligeiramente ácido, relativamente rico em potássio e pobre em azoto e em fósforo. A recolha de 76 amostras de solo no campo experimental (uma amostra composta em cada quadrícula de 28 m x 28 m) permitiu identificar as suas características na camada superficial (0-0,30 m). Os mapas da Figura 1 ilustram os teores médios de argila, limo, areia, matéria orgânica e o pH do solo do campo experimental em Junho de 2004. Procedeu-se também à recolha de amostras de pastagem para determinação da produtividade em termos de matéria seca (kg ha⁻¹), cujo mapa correspondente à amostragem de 2004 é também apresentado na Figura 1.

Os mapas apresentados 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). 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). A primeira tecnologia utilizada neste projecto foi um GPS-RTK (“Real Time Kinematic”; Trimble RTK/PP - 4700 GPS, Trimble Navigation Limited, USA), o qual, montado numa moto 4, permitiu o levantamento topográfico da parcela e o estabelecimento do modelo digital do terreno (Figura 2).

Monitorização do solo

A amostragem tradicional do solo e respectivo tratamento em laboratório é um processo caro e demorado. Para além do número elevado de amostras necessárias para caracterizar a variabilidade do solo numa parcela, a recolha manual exige um esforço físico importante, a que se sucede um trabalho laboratorial minucioso que requer a utilização de protocolos e de reagentes específicos. Com o objectivo de simplificar o processo de monitorização do solo, existem no mercado alguns equipamentos. A aplica-

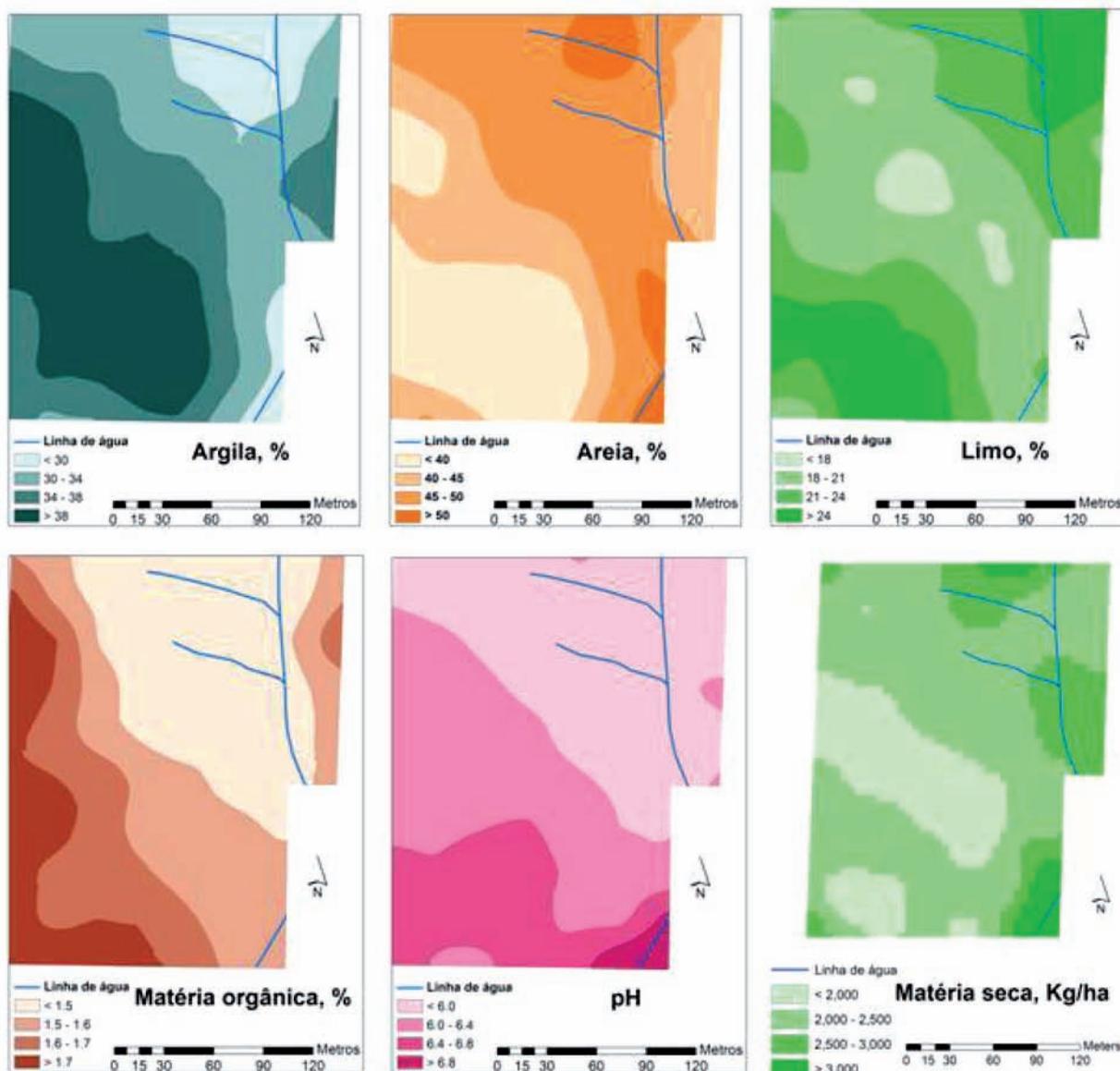


Figura 1 – Características do solo e produtividade da pastagem do campo experimental em 2004

ção de medições da condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a) combinadas com sistemas globais de navegação por satélite (GNSS, “Global Navigation Satellite Systems”) e sistemas de informação geográfica (GIS, “Geographical Information Systems”) é uma das técnicas mais utilizadas para caracterizar os padrões espaciais das propriedades do solo (Sudduth *et al.*, 2003; Bronson *et al.*, 2005; Corwin e Lesch, 2005; Robinson *et al.*, 2008). A EC_a apresenta correlações significativas com propriedades do solo como a concentração de sais, os teores de argila ou a humidade (Sudduth *et al.*, 2003; King *et al.*, 2005); parâmetros determinantes da produtividade das pastagens (Serrano *et al.*, 2013a). Para além da corre-

lação com propriedades do solo a EC_a pode também ser utilizada para delinear zonas de gestão diferenciada (Kühn *et al.*, 2009; Moral *et al.*, 2010).

Existem comercialmente dois tipos de sensores para medir a EC_a no campo: sensores com ou sem contacto com o solo, ambos com vantagens e desvantagens (Sudduth *et al.*, 2013). Os sensores de contacto introduzem uma corrente eléctrica no solo através de eléctrodos situados em discos que contactam com o solo e medem a resistência eléctrica deste (RE) (Sudduth *et al.*, 2003; Corwin e Lesch, 2005). Os sensores sem contacto ou não invasivos são baseados no princípio de indução electromagnética (EMI) (Corwin e Lesch, 2005; Abdu *et al.*, 2007; Simpson

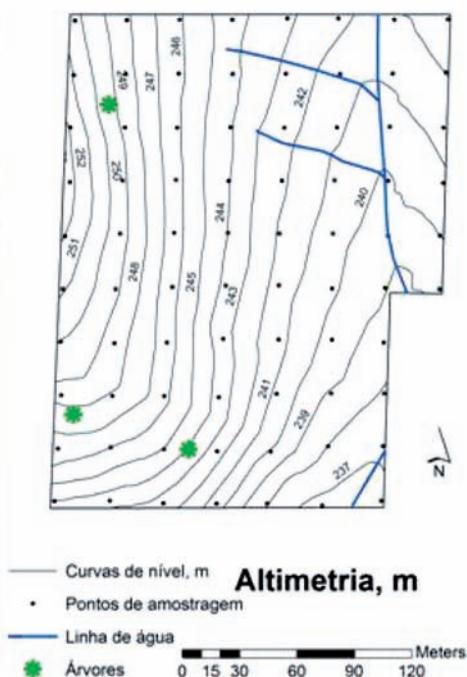


Figura 2 – GPS-RTK (à esquerda) instalado no campo experimental e respectivo mapa de altimetria (à direita)

et al., 2009). Os sensores não invasivos são leves e facilmente transportáveis, por isso adaptáveis a uma grande variedade de condições, nomeadamente em solos húmidos ou com culturas instaladas. Para Abdu *et al.* (2007) os sensores sem contacto têm a vantagem adicional de poderem ser usados para caracterizar a variabilidade espacial do solo em maiores áreas devido às maiores velocidades de operação permitidas. Os sensores de RE são mais pesados e requerem, normalmente, um tractor como fonte de potência, limitando o seu uso a condições de solo firme e sem culturas instaladas (Sudduth *et al.*, 2003). Por outro lado, estes sensores requerem bom contacto entre o solo e os eléctrodos, pelo que produzem medições menos fiáveis do que os sensores de indução electromagnética em solos secos ou muito duros (Corwin e Lesch, 2005).

O sensor de indução electromagnética DUALEM-1S (Figura 3) realiza medições da EC_a em duas camadas de solo (0-1,50 m e 0-0,50 m de profundidade). Este sensor foi utilizado no campo experimental em Junho de 2009, transportado por um veículo de quatro rodas, todo em PVC e que coloca o sensor 0,20 m acima do solo, pelo que as medições dizem respeito às camadas de solo 0-1,30 m e 0-0,30 m de profundidade. Neste estudo (Serrano *et al.*, 2010) apenas foram utilizados os valores das medições respeitantes à menor profundidade uma vez que as

amostras de solo foram recolhidas nessa mesma camada de solo. Os resultados permitiram identificar uma correlação negativa entre a EC_a e a altimetria do campo experimental e correlações positivas entre a EC_a e o pH do solo e entre a EC_a e a produtividade da pastagem. Apesar do potencial que estas correlações apresentam e contrariamente ao que seria de esperar, não foram encontradas correlações significativas entre a EC_a e parâmetros como os teores de argila e de matéria orgânica do solo.



Figura 3 – Sensor de indução electromagnética DUALEM-1S no campo experimental

Estes resultados demonstraram a necessidade de continuar a investigação nesta área. Atendendo a que a humidade do solo era relativamente baixa no momento da realização da determinação da EC_a (valor médio de 11,5 % em Junho de 2009) e uma vez que este parâmetro é considerado um dos factores determinantes da EC_a (Bronson *et al.*, 2005; Johnson *et al.*, 2005; King *et al.*, 2005), foi realizado um novo levantamento com o sensor DUALEM em Fevereiro de 2010, com o solo muito perto da sua capacidade de campo (teor médio de humidade de 24,5 %) (Serrano *et al.*, 2013b). Os resultados demonstraram uma forte correlação entre as medições de EC_a realizadas nas duas condições de humidade (Figura 4), o que confirma os resultados obtidos por King *et al.* (2005) em termos de estabilidade dos padrões básicos da EC_a independentemente dos teores de humidade no solo. Este aspecto é relevante uma vez que permite ao agricultor escolher o momento para realizar o levantamento da EC_a e também abre boas perspectivas para utilizar este tipo de sensores para estimar os teores de humidade do solo na gestão da rega e como ferramenta de apoio à definição de zonas de gestão homogénea.

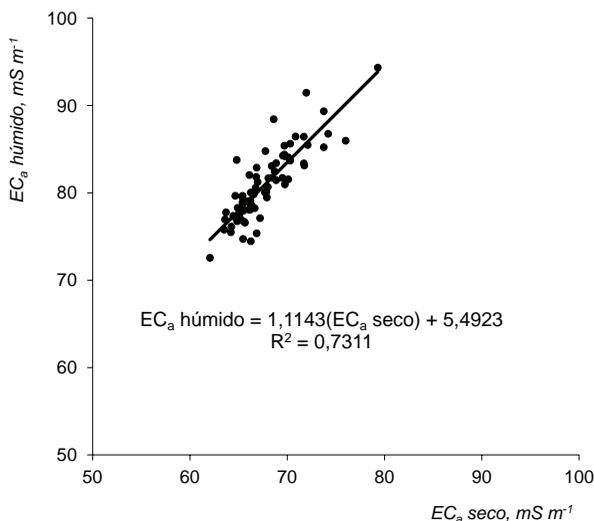


Figura 4 – Correlação entre medições da EC_a com o sensor DUALEM-1S em duas condições de humidade do solo do campo experimental

Com o objectivo de avaliar as potencialidades e limitações dos dois tipos de sensores apresentados foram realizados em Fevereiro de 2012 e de 2013 ensaios comparativos do sensor DUALEM-1S e do sensor de contacto Veris 2000 XA (Figura 5), que realiza medições na camada superficial de solo de 0-0,30 m de profundidade. No momento do ensaio

de 2012 o solo encontrava-se relativamente seco (teor médio de humidade de 11,1 %) e coberto de pastagem com uma altura de 20-30 cm, com importantes teores de humidade exterior e interior. Em 2013, o solo encontrava-se húmido (teor médio de humidade de 23,3 %) enquanto a pastagem, por se encontrar sob pastoreio animal, não ultrapassava 5 a 10 cm de altura. Foram registadas correlações significativas entre as medições de ambos os sensores nos dois anos de ensaio, no entanto, apresentaram diferente comportamento na correlação com propriedades do solo. Ao contrário do que se verificou com as medições realizadas pelo sensor DUALEM, a EC_a medida pelo sensor Veris apresentou correlação significativa com os teores de argila e de matéria orgânica do solo em ambos os anos de ensaio. Por outro lado, as medições do sensor DUALEM, por serem realizadas 20 cm acima do solo terão sofrido em 2012 efeito da humidade da pastagem, a qual terá mascarado as propriedades do solo. Este comportamento diferencial dos sensores deve ser considerado na selecção de um sistema para uma aplicação particular.

A forte correlação com propriedades do solo relacionadas com a capacidade produtiva deste (argila, matéria orgânica) e a estabilidade temporal das medições da EC_a realizadas com o sensor Veris, mesmo perante diferentes teores de humidade no solo e diferente cobertura vegetal, indicia boas perspectivas para a utilização deste sensor na monitorização do solo em pastagens permanentes.

A maior capacidade de trabalho do sensor sem contacto (DUALEM) e a possibilidade de utilização em situações de culturas instaladas ou em solos com elevados teores de humidade justificam a extensão deste estudo comparativo a outros tipos de solos na região e outros níveis de desenvolvimento vegetativo da pastagem.

Monitorização da produtividade da pastagem

O manejo das pastagens e o planeamento e gestão dos respectivos sistemas de produção animal são essencialmente baseados na estimativa da produção e acumulação de massa de erva. Para o manejo correcto e eficiente dessas pastagens, o controlo da oferta de forragem é um ponto decisivo. O método standard e directo para estimativa da massa de pastagem e de forragem baseado no corte da erva contida numa dada área é um método trabalhoso e demorado, especialmente na recolha de amostras que representem a variabilidade produtiva de uma pastagem, e os agricultores não têm disponibilidade para o usar na gestão do dia-a-dia das suas explorações.



Figura 5 – Levantamento com os sensores DUALEM-1S (em cima) e Veris 2000 XA (em baixo) no campo experimental (Fevereiro de 2012)

A utilização de métodos indirectos tem merecido atenção de diversas equipas de investigação com adaptações para uso comercial. É o caso da sonda electrónica de capacitância. Esta dispõe de um oscilador que emite um sinal eléctrico de 5 V numa área circular em torno do bastão, com um diâmetro de 0,1 m e até uma altura do solo de cerca de 0,4 m. O sinal eléctrico modificado pela mistura ar-pastagem é detectado pelo circuito electrónico da sonda como uma variação da capacitância (Currie *et al.*, 1987; Zanine *et al.*, 2006; Serrano *et al.*, 2011a). O seu princípio de funcionamento baseia-se na medição da diferença entre constantes dieléctricas: a do ar, que é alta e a da pastagem, que é baixa. Antes de qualquer recolha de informação com a sonda, para cada amostra é realizada uma prova para correcção do teor de humidade do ar. Em seguida, o aparelho é posicionado verticalmente sobre a vegetação, afastado 0,2 a 0,3 m do corpo do operador. A sonda utiliza um circuito electrónico de registo de dados que permite a organização das leituras por parcelas e a transferência para um computador de bancada para posterior tratamento. A prévia calibração do aparelho permite a determinação dos parâmetros duma equação de correlação, a qual programada na

consola, transforma as medições de capacitância realizadas pelo sensor em massa de matéria seca (MS) da pastagem por unidade de área (kg MS ha^{-1}) apresentadas no visor.

A sonda Grassmaster II (Figura 6, à esquerda) é leve e facilmente transportável, sendo de utilização manual pelo operador. Esta, programada com uma equação proposta pelo fabricante para pastagens típicas da Nova Zelândia foi utilizada em 40 pontos de amostragem do campo experimental (locais onde se encontravam as caixas de exclusão de pastoreio) em Março de 2007. Os resultados obtidos (Figura 6, à direita) revelaram que a equação proposta pelo fabricante não se adequa à pastagem do campo experimental (fraca correlação entre a MS prevista e a MS medida). Para além deste processo de avaliação da sonda, procedeu-se à sua calibração e à respectiva validação noutros locais e com outros tipos de pastagem (Serrano *et al.*, 2011a). Em cada ponto de amostragem com 1 m^2 de área procedeu-se a 10 medições com a sonda, realizando-se em seguida o corte da pastagem existente nessa área e a recolha em sacos para procedimento laboratorial com vista à determinação da produtividade da pastagem em termos de kg de MS ha^{-1} .

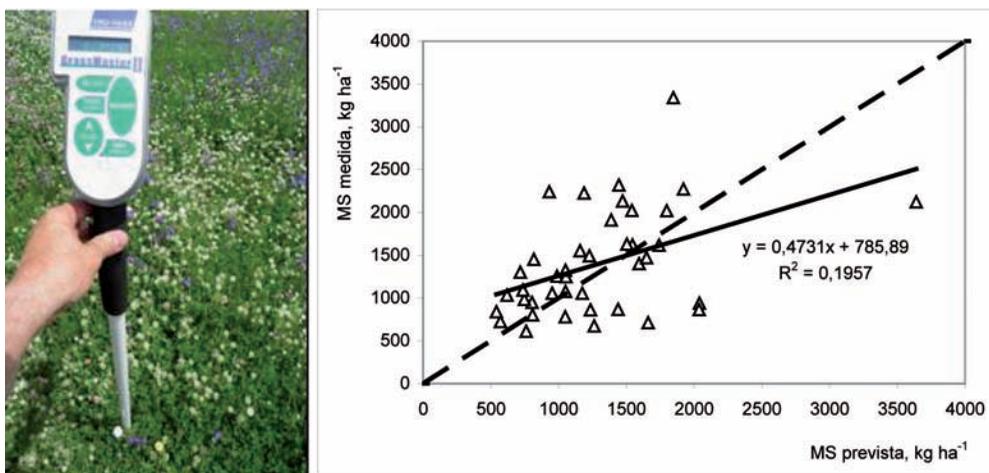


Figura 6 – Utilização da sonda Grassmaster II na estimativa da produtividade da pastagem do campo experimental em Março de 2007 (à esquerda) e respectiva equação de calibração (à direita)

A Figura 7 ilustra equações de calibração desenvolvidas para diferentes espécies botânicas, obtidas em ensaios realizados em diversas explorações agrícolas entre 2007 e 2009, com espécies representativas das pastagens típicas no Alentejo (gramíneas, leguminosas e mistura de diversas espécies).

É evidente o potencial deste sensor na monitorização da pastagem, contudo, o processo de calibração em futuros estudos deve estender-se a uma ampla diversidade de estados de desenvolvimento da pastagem e, atendendo ao seu princípio de funcionamento (uma vez que emite um sinal eléctrico e uma ponta metálica contacta sobre o solo), será interessante considerar o estado do solo em termos de humidade.

O interesse neste processo de avaliação foi demonstrado por vários trabalhos (Stockdale e Kelly, 1984; Hirata, 2000; Silva e Cunha, 2003; Cauduro *et al.*, 2006; Zanine *et al.*, 2006; Serrano *et al.*, 2011a) e permanece actual uma vez que cada pastagem é um ecossistema diferente, com características específicas, com plantas de espécies diferentes e em estados vegetativos diversos de acordo com o tipo de pastoreio implementado.

Outras técnicas para monitorização das culturas têm sido utilizadas em pastagens, como sensores ópticos (Hanna *et al.*, 1999) e ultra-sons (Hutchings, 1991), apresentando-se a detecção remota como uma possibilidade interessante. Sensores radiométricos, conhecidos vulgarmente como sensores de vegetação, medem a radiação, visível e no infra-vermelho próximo (NIR, “Near-Infrared Radition”), reflectida pela vegetação e permitem quantificar em tempo real a biomassa em grandes áreas com elevada resolução espacial (Hanna *et al.*, 1999).

Em Fevereiro de 2013 procedeu-se ao levantamento apenas com carácter exploratório dos índices de vegetação (NDVI) da pastagem no campo experimental (Figura 8, esquerda). Para o efeito foram utilizados dois sensores de vegetação “OptRx[®]” montados numa plataforma instalada numa moto 4, com um afastamento entre sensores de cerca de 5 m. Percorreu-se o campo experimental a uma velocidade de cerca de 3 km h⁻¹, realizando passagens sucessivas afastadas 10 m. A Figura 8 (à direita) ilustra o mapa de NDVI do campo experimental no momento do levantamento. É possível evidenciar um gradiente de índices que cresce de Norte para Sul, com valores mais baixos na zona de vale e valores mais elevados no cume. Depois deste estudo exploratório e atendendo à facilidade de obtenção desta informação georreferenciada, será interessante proceder à calibração destes sensores, correlacionando os índices (NDVI) com a produtividade da pastagem (kg de MS ha⁻¹) e com a identificação das diferentes espécies botânicas (as quais poderão ter respostas espectrais diferenciadas), procurando desenvolver algoritmos de apoio à tomada de decisão que permitam evidenciar zonas com diferente potencial vegetativo, que justifiquem, por exemplo, a gestão diferenciada da fertilização.

Sistemas de apoio à decisão

A tomada de decisão é um processo complexo que exige disponibilidade de dados, convertidos em informação, a qual deve estar à disposição do conhecimento agronómico. A quantidade de informa-

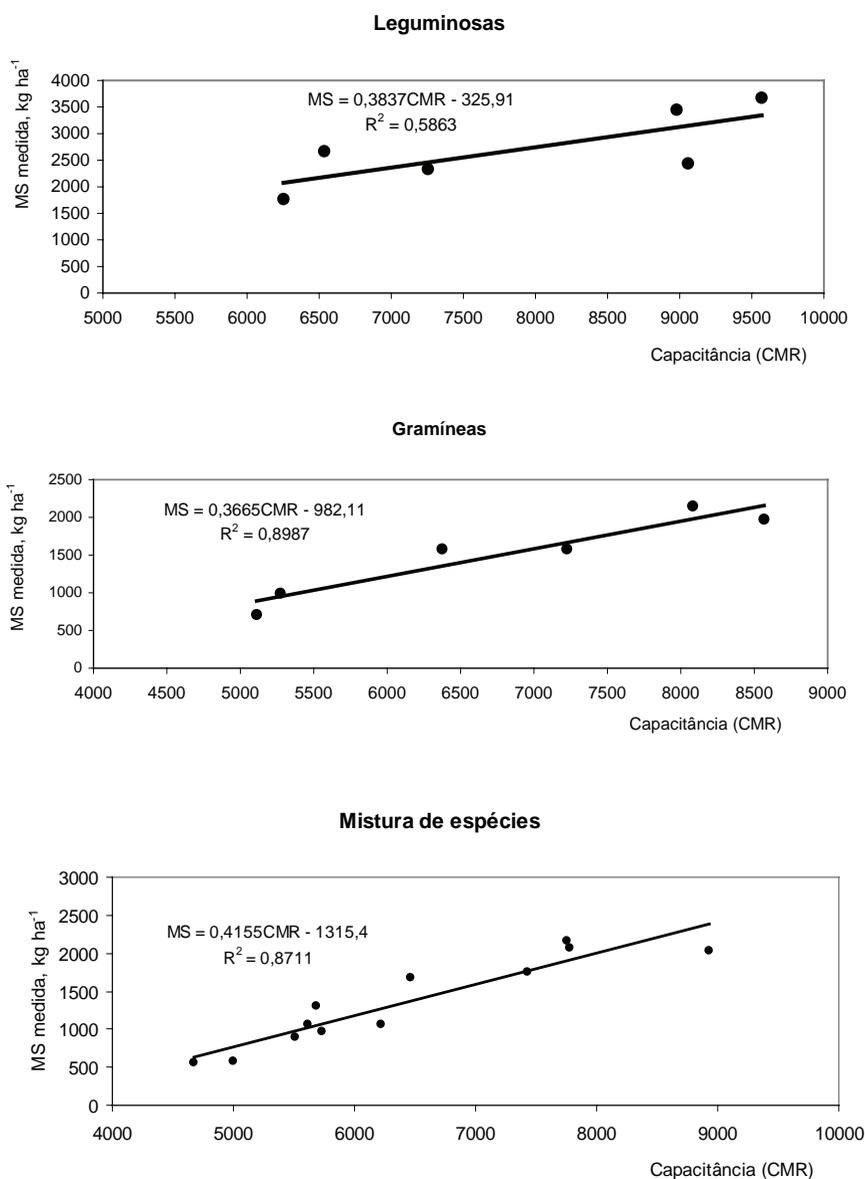


Figura 7 – Equações de calibração da sonda Grassmaster II em pastagens representativas do Alentejo (leguminosas, gramíneas e mistura de espécies botânicas)

ção georreferenciada disponibilizada por sensores diversos que medem vários parâmetros em intervalos muito curtos de tempo exige a utilização de ferramentas que permitam a sua organização espacial sistemática. “Idrisi”, “LandCad”, “ArcView”, “ArcGIS” são exemplos de SIG desenvolvidos para este efeito. A elaboração de mapas a partir das medições georreferenciadas realizadas por diferentes sensores, transporta a informação recolhida para a dimensão do conhecimento, do registo histórico da parcela e da tomada de decisão. Estas são as ferramentas que permitem fechar o ciclo (Figura 9) pela utilização de tecnologia de aplicação variável, a qual

pode ser uma interessante estratégia para garantir o equilíbrio de nutrientes no solo e para otimizar a produtividade da pastagem.

Tecnologia de aplicação variável

A aplicação de fertilizantes é o principal custo de manutenção em pastagens permanentes de sequeiro (Gillingham, 2001). A aplicação homogénea de fertilizante em solos cuja variabilidade é acentuada origina desperdício de fertilizantes nalgumas zonas e níveis de fertilização inadequados noutras (Malla-

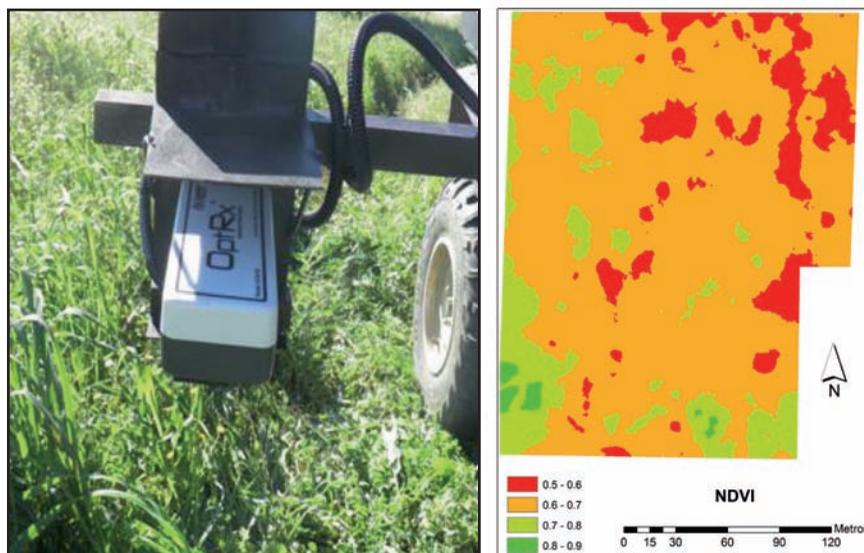


Figura 8 – Levantamento com os sensores de vegetação “OptRx®” (à esquerda) e respectivo mapa de índices de vegetação do campo experimental (mapa de NDVI, à direita) em Fevereiro de 2013

rino e Wittery, 2004). Os mercados agrícolas internacionais, altamente regulados e competitivos, exigem racionalidade na utilização de factores de produção. Por maiores desenvolvimentos que possam ocorrer nas tecnologias que permitem o levantamento da variabilidade do solo ou da cultura – pilar determinante e propulsor da ideia de gestão diferenciada –, quer nos sistemas de apoio à decisão, são as máquinas de aplicação de sementes, fertilizantes, produtos fitossanitários ou água que, em última instância, os concretizam, que fecham o ciclo.

No que se refere aos fertilizantes, os modernos distribuidores de adubo estão equipados com dispositivos electrónicos que permitem variar em trabalho e ao longo da parcela as quantidades de adubo aplicadas, adaptando-as às características do solo (VRT, “Variable Rate Technology”).

Wittery e Mallarino (2004) compararam a fertilização uniforme com a fertilização variável com fósforo numa rotação milho-soja, tendo resultado nesta última numa economia de fertilizante entre 12 e 41%, sem consequências sobre a produtividade das culturas e com menor variabilidade nos teores de fósforo no solo. No entanto, o erro na aplicação de nutrientes aumenta na aplicação variável quando em trabalho muda a taxa de aplicação (Chan *et al.*, 2004). Os componentes mecânicos do equipamento VRT não respondem instantaneamente para fazer variar a taxa de aplicação. Paice *et al.* (1996) salientaram a importância da resolução espacial, lateral (determinada pela largura de aplicação) e longitudinal (determinada pelo tempo de resposta do distribuidor

e pela velocidade de avanço do tractor) na precisão do equipamento VRT.

No mercado encontram-se disponíveis dois tipos de solução VRT: em pós-processamento ou em tempo real. Na primeira, a informação sobre a variabilidade espacial de factores considerados determinantes é obtida previamente, por exemplo, através da monitorização expedita de parâmetros do solo ou da cultura. Essa informação georreferenciada normalmente com GPS é organizada através de SIG, os quais facilitam a análise e posterior tomada de decisão com vista à actuação diferenciada. Mapas de prescrição são a base deste modo de funcionamento, os quais são transferidos para interfaces que comandam os equipamentos de aplicação diferenciada, determinando as quantidades dos factores de produção a utilizar em cada local da parcela. Este sistema é vulgarmente utilizado na aplicação de fertilizantes. O sistema em tempo real apresenta a vantagem de realizar numa só passagem o levantamento da variabilidade e a aplicação diferenciada. No entanto, para além de sensores e actuadores, exige o desenvolvimento de algoritmos capazes de interpretar a informação lida pelos sensores e transformá-la em decisões imediatas de aplicação ao nível dos actuadores. Este modo de funcionamento aplica-se quando a oportunidade de intervenção depende de uma janela temporal muito reduzida, quer pela alteração dinâmica das características que determinam a intervenção, quer pela sofisticação envolvida. É mais habitual na aplicação de produtos fitossanitários, herbicidas ou pesticidas para controlo de doenças,

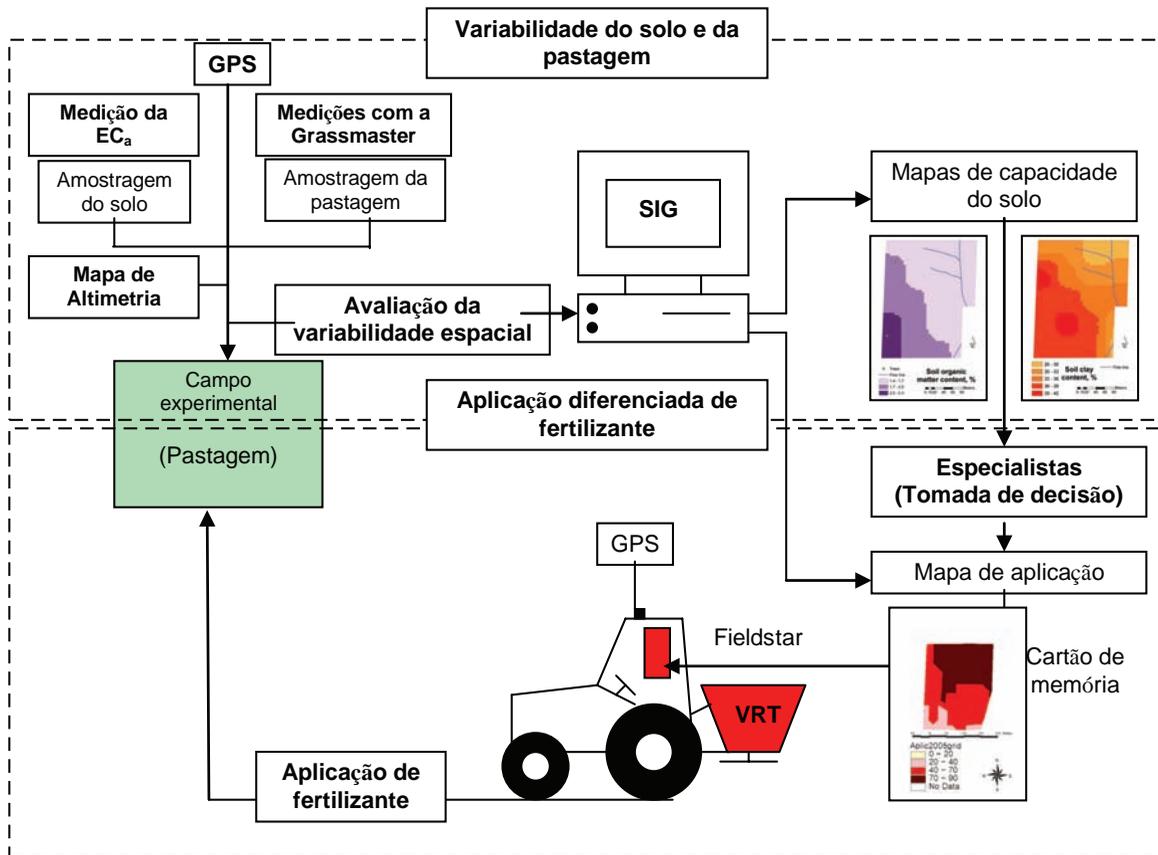


Figura 9 – Diagrama exemplificativo de um ciclo de Agricultura de Precisão em pastagens no campo experimental

infestantes ou pragas (por exemplo, pela utilização de sensores de ultra sons para determinar a proximidade da vegetação), também na gestão da rega (por termografia de infravermelhos ou pela utilização de sensores de humidade do solo) e na aplicação de cobertura de fertilizantes azotados (por exemplo, através da utilização de sensores de espectrometria óptica activa, como o “N-sensor”, que realiza um “scanner” do vigor vegetativo da cultura e a partir deste efectua a aplicação de N numa taxa variável). Os distribuidores de adubo mais frequentes são centrífugos, nos quais um ou dois discos animados de movimento de rotação transmitido pela tomada de força do tractor projectam o adubo, conferindo-lhe importantes larguras de trabalho, dependendo das características do adubo e de regulações no distribuidor. Para apoiar o operador no efectivo cumprimento do afastamento entre passagens sucessivas de forma a garantir a sobreposição adequada encontram-se disponíveis sistemas de apoio à condução, normalmente barras de luzes (“lightbar”), ligados a um receptor GPS com acesso a correcção diferencial. Estes sistemas permitem ao operador definir um alinhamento prévio junto a uma das extremidades da

parcela, o qual é replicado nas passagens sucessivas com um afastamento correspondente à largura efectiva de trabalho, disponibilizando ao operador uma linha de referência para este orientar a sua condução, dispensando a tradicional utilização de operadores com bandeirolas nas extremidades das parcelas.

Entre Outubro e Novembro de 2004 a 2007 procedeu-se à aplicação diferenciada de adubo superfato 18% no campo experimental. Foi utilizado o distribuidor de adubo Vicon-RS-EDW (com o sistema de controlo “Ferticontrol”, Figura 10), montado no tractor Massey-ferguson 6130. Este tractor encontrava-se equipado com o sistema de informação “Datatronic II”, radar, sistema de apoio à condução (“lightbar”), antena DGPS “Garmin” e uma interface “Fieldstar”, programável com cartão de memória. Neste cartão foram memorizados os mapas de aplicação diferenciada de adubo estabelecidos em cada ano (coordenadas geográficas e densidade de aplicação pretendida) em função da variabilidade do fósforo na camada superficial do solo, aplicando maiores quantidades nas zonas onde tinham sido identificados menores teores deste nutriente no

solo e vice-versa. Em cada momento e em função da localização na parcela obtida pelo receptor DGPS instalado sobre a cabina do tractor, o sistema “Ferticontrol” assume a densidade de aplicação de adubo preconizada no mapa (D , em kg ha^{-1}) e recebe as seguintes informações: o operador introduz a largura de trabalho (l , em m); o radar fornece a velocidade de deslocamento do tractor (v , em km h^{-1}); as células de carga colocadas na base do depósito do distribuidor indicam o caudal de adubo que está a distribuir (Q , kg min^{-1}). A unidade electrónica “Ferticontrol” procede ao ajustamento automático das placas de dosagem tendo por base o algoritmo da equação 1, garantindo o caudal de adubo pretendido. Um sinal eléctrico é transmitido a actuadores eléctricos situados junto à base dos discos, promovendo uma maior abertura dos orifícios de escoamento do adubo sempre que for necessário aumentar o caudal a aplicar e no sentido inverso quando for necessário diminuir o caudal a aplicar.

$$D = \frac{Q * 600}{l \times v} \quad (1)$$

A eficiência do distribuidor e a sua regulação interferem na precisão da aplicação, com maiores ou menores desvios entre a densidade de adubação desejada e a densidade efectivamente aplicada (Adamchuk *et al.*, 2004). Por essa razão, em 2004, previamente à aplicação de adubo Superfosfato 18% no campo experimental, foram realizados diversos ensaios (Serrano *et al.*, 2011b): de calibração estática para comprovar a capacidade do sistema para dosar o caudal adequado (Figura 11); de avaliação do perfil transversal de distribuição do distribuidor para determinação da largura efectiva de trabalho (Figura 11); e de avaliação do perfil longitudinal de distribuição (Figura 11) para determinar o tempo de resposta do sistema perante alterações na densidade a aplicar. Neste primeiro ano, durante a aplicação



Figura 10 – Sistemas “Ferticontrol”, “Fieldstar” e “Datatronic II” instalados no tractor Massey-ferguson 6130 utilizado nos ensaios de aplicação de fertilizante no campo experimental

diferenciada foram também realizadas recolhas de adubo em conjuntos de 12 caixas colocadas em 4 quadrículas com diferentes densidades de aplicação programadas, para confirmação da densidade efectivamente aplicada (I, II, III e IV na Figura 12).

Os ensaios de calibração estática do distribuidor mostraram uma tendência sistemática para maior caudal (cerca de 20%) de um dos discos. Deve salientar-se que na compra do distribuidor apenas é fornecido pelo vendedor um recipiente de calibração, no entanto, esta evidência só foi possível utilizando recipientes de calibração e recolha de adubo em ambos os discos em simultâneo. A anomalia resultava de uma inadequada regulação do curso da haste de um dos actuadores eléctricos responsáveis pela abertura das placas de dosagem, situação corrigida pelo fabricante do equipamento. Depois desta correcção o distribuidor respondeu de forma equilibrada em termos de débito de ambos os discos de distribuição.

Os ensaios de campo realizados para avaliação do perfil transversal de distribuição permitiram esta-



Figura 11 – Ensaio do distribuidor de adubo Vicon RS-EDW: calibração estática (à esquerda), determinação do perfil transversal de distribuição (ao centro) e do perfil longitudinal de distribuição (à direita)

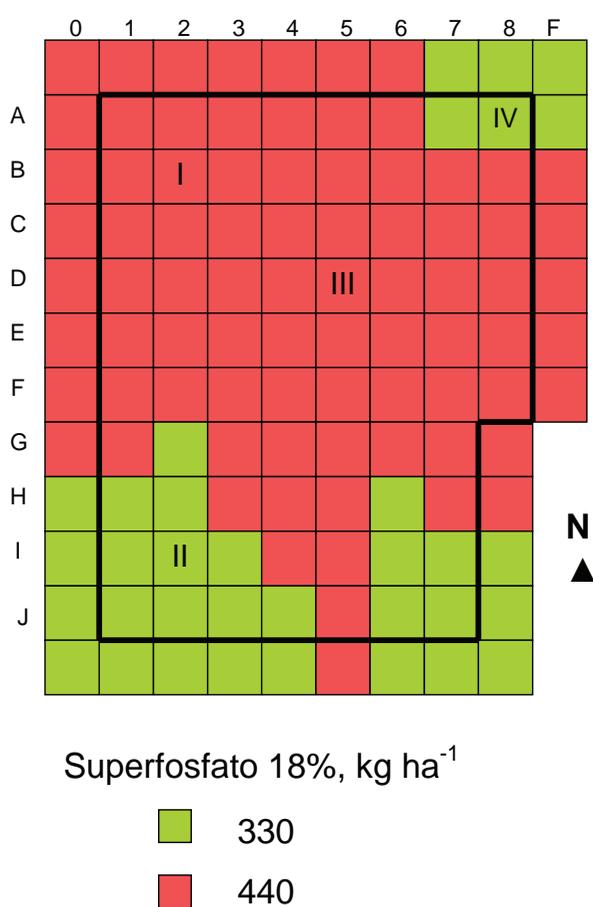


Figura 12 – Mapa de aplicação diferenciada de adubo Superfosfato 18% no campo experimental em 2004; indicação dos locais de recolha de adubo (I, II, III e IV) para validação da densidade efectivamente aplicada

belecer a largura efectiva de trabalho de 28 m para o adubo em causa (Superfosfato 18%), para as regulações do distribuidor, recomendadas no manual de operador do distribuidor e para diversas densidades de aplicação (kg ha⁻¹). Esta largura foi determinada após vários ensaios, com diferentes regulações no distribuidor e após tratamento dos dados do perfil transversal de distribuição recolhidos em Excel, com simulação de larguras de trabalho desde 12 a 36 m, tendo como critérios: a) o menor desvio entre a densidade de aplicação real e a densidade de aplicação pretendida (desvio máximo de 10%); b) o menor coeficiente de variação (CV) transversal (CV máximo de 15%).

Os ensaios de campo para avaliação do perfil longitudinal de distribuição foram realizados a uma velocidade de trabalho de 7 km h⁻¹ (considerada pelo operador a velocidade adequada em termos de segurança e conforto), tendo revelado um tempo de resposta do sistema de controlo a alterações da densidade programada entre 6 e 7 segundos, valores se-

melhantes aos obtidos por Schueller e Wang (1994). Os resultados obtidos nos ensaios de campo dinâmicos (perfil transversal e perfil longitudinal de distribuição) foram tidos em consideração no interface “Fieldstar” para elaboração dos mapas de prescrição diferenciada de fertilizante a aplicar no campo experimental.

O ensaio final foi realizado durante a aplicação diferenciada de adubo no campo experimental com o objectivo de avaliar a correspondência entre a densidade programada e a densidade efectivamente aplicada. Os resultados obtidos mostraram uma variação da densidade de aplicação entre 74 e 90% da densidade pretendida em cada local amostrado. A principal razão para este desvio terá a ver com a largura das quadrículas de amostragem (28 m), uma vez que este distribuidor centrífugo apresentava uma largura da mancha de distribuição de adubo no campo superior a 50 m. Pequenas perdas nas caixas de recolha de adubo (por salpico durante a projecção), o CV da distribuição transversal (até 15%) e pequenos desvios nas coordenadas GPS entre o momento do estabelecimento das quadrículas de amostragem no campo experimental (Maio) e o momento da aplicação (Outubro) poderão justificar estas diferenças entre a densidade programada e a densidade aplicada.

Este conjunto de resultados confirma que o distribuidor de adubo Vicon RS-EDW pode ser utilizado em agricultura de precisão, na aplicação diferenciada de fertilizantes. No entanto, em futuros trabalhos será vantajoso basear os mapas de aplicação em zonas de gestão homogénea (Zhang *et al.*, 2010) e não em quadrículas, reduzindo os custos de amostragem e aumentando a precisão da aplicação em zonas de maiores dimensões.

Em termos de perspectivas interessará ainda quantificar a efectiva redução das quantidades de adubo utilizado associada com as tecnologias de aplicação variável e as implicações na produtividade da cultura. Por exemplo, Norton *et al.* (2005) encontraram reduções da ordem dos 27 % na quantidade de adubo fosfatado utilizado na cultura do algodão pela aplicação diferenciada de fertilizante, relativamente à aplicação uniforme, sem perdas significativas de produtividade. No campo experimental da Revilheira durante 4 anos (2000-2003) procedeu-se à aplicação homogénea de 300 kg de Superfosfato 18% ha⁻¹, o que correspondeu a 1788 kg de fertilizante por ano (7152 kg no conjunto dos 4 anos). Nos 4 anos seguintes (2004-2007), de aplicação diferenciada (maiores quantidades aplicadas nas zonas com menores concentrações de fósforo na camada superficial de solo e vice-versa), foram aplicados no total,

2500 kg (em 2004), 2178 kg (em 2005), 1664 kg (em 2006) e 1930 kg (em 2007), que corresponde a um total acumulado em 4 anos de 8272 kg. No entanto, a produtividade média da pastagem em termos de matéria seca verificou a seguinte evolução entre 2004 e 2007: 1858 kg ha⁻¹ (em 2004), 1395 kg ha⁻¹ (em 2005), 2560 kg ha⁻¹ (em 2006), 3532 kg ha⁻¹ (em 2007). O acréscimo de produtividade não pode imputar-se directamente ao acréscimo de fertilizante aplicado, uma vez que em pastagens permanentes de sequeiro, como é o caso, o ano agrícola e a consequente disponibilidade de água para as plantas durante a Primavera condicionam a produtividade. O balanço de ganhos e de perdas em pastagens pastoreadas é um processo de longo prazo, onde também é determinante a influência do pastoreio animal.

Monitorização dos animais em pastoreio

A dinâmica de transferência de nutrientes em solos de pastagens resultante do pastoreio animal foi demonstrada por várias equipas de investigação. Esta dinâmica, na qual o animal é o catalisador uma vez que recicla o material vegetal (Carvalho *et al.*, 2010), assume um papel importante na fertilidade da pastagem, originando, via urina e fezes, zonas de maior concentração de nutrientes nas principais áreas de pastoreio e de descanso dos animais, resultando num verdadeiro mosaico de níveis de nutrientes no

solo (Haynes e Williams, 1993; Dahlin *et al.*, 2005; Kayser e Isselstein, 2005).

A Figura 13 ilustra a concentração média de fósforo (P₂O₅) e de potássio (K₂O) no campo experimental durante o período de ensaio (2004-2013), sendo evidente a maior concentração destes nutrientes nas zonas altas da parcela. De acordo com Page *et al.* (2005), o fluxo de nutrientes é resultado do pastoreio animal, o qual é mais intenso nas zonas mais produtivas (zonas próximas da linha de água no caso do campo experimental), onde a extracção de nutrientes 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 do campo experimental. Este estudo confirma que, em pastagens, os animais têm um importante impacto na reciclagem do fósforo e do potássio, facto referenciado também por Alfaro *et al.* (2003).

Os fluxos de nutrientes no campo experimental causados pelos animais, quer através do pastoreio, quer do retorno nas fezes e urina, dificultam o estabelecimento de balanços entre *inputs* e *outputs* com o propósito de estabelecer as necessidades fertilizantes, afigurando-se esta como uma tarefa lenta e irregular. Esta dinâmica de transferência de nutrientes abre as portas para novos estudos que permitam monitorizar o comportamento dos animais em pastoreio. A importância deste tema é demonstrada por vários

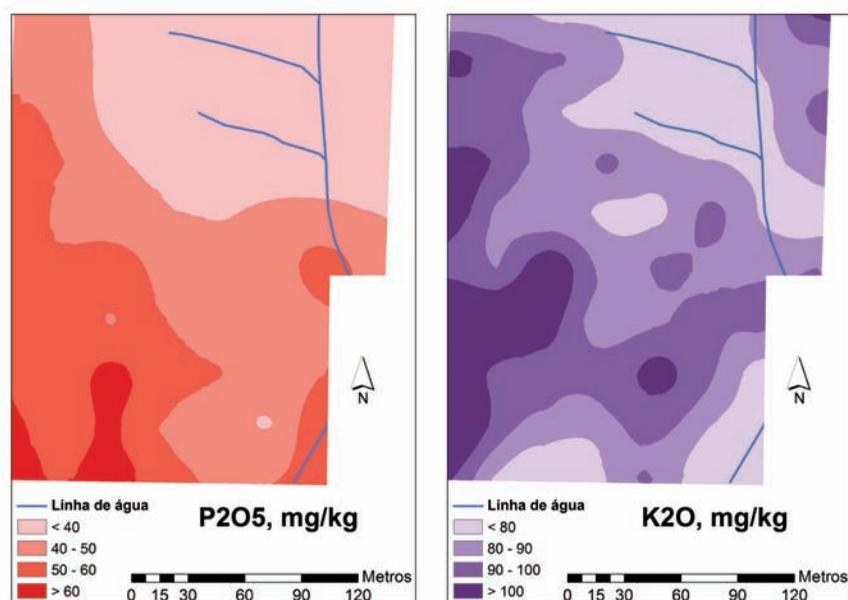


Figura 13 – Mapa da concentração média de fósforo (P₂O₅) e de potássio (K₂O) na camada superficial de solo do campo experimental entre 2004 e 2013

estudos sobre a utilização de colares com receptores GPS (“Global Positioning System”) em animais (Agouridis *et al.*, 2004; Schlecht *et al.*, 2004; Schellberg *et al.*, 2008; Carvalho *et al.*, 2009; Laca, 2009), procurando monitorizar a posição dos animais, o seu comportamento em pastoreio e a utilização que fazem da pastagem. Barbari *et al.* (2006) mostraram que metodologia de investigação que combina estes colares com SIG tem um grande potencial no apoio a estudos de comportamento animal em pastagens. Uma equipa de investigação da Universidade de Évora realizou em 2013 um primeiro estudo piloto de monitorização dos ovinos em pastoreio na Quinta das Silveiras (Évora) através de colares GPS no âmbito do projecto INALENTEJO. A Figura 14 ilustra a utilização do colar GPS num animal e um exemplo da informação georreferenciada recolhida, permitindo identificar os percursos do animal durante o pastoreio, perspectivando-se para breve uma primeira publicação internacional sobre este assunto.

Conclusões

Este estudo demonstra o potencial associado à utilização de novas tecnologias que poderão gradualmente substituir ou complementar os métodos tradicionais de monitorização exaustiva do solo ou da pastagem. É evidente também que a diversidade de situações e a variabilidade daí resultante, exigem a calibração dos equipamentos para que estes possam

dar a melhor resposta em cada contexto específico. Os custos de aquisição associados e o conhecimento técnico que requer a utilização destas tecnologias, especialmente ao nível do tratamento da informação georreferenciada obtida, indiciam um mercado preferencial para os prestadores de serviços. Novas questões que a investigação levanta, nomeadamente as relacionadas com a dinâmica da transferência de nutrientes causada pelo pastoreio animal ou a evidência de diversidade de desenvolvimento das diferentes espécies vegetais em função das condições do ano agrícola, encontram resposta no mercado com soluções como a utilização de colares GPS para monitorizar o pastoreio animal ou a tecnologia de sementeira diferenciada de espécies botânicas. A avaliação que se pode fazer actualmente em Portugal é a de que a adopção de tecnologias de agricultura de precisão é menor do que o esperado. Possíveis razões encontram-se relacionadas com os custos de aquisição dos equipamentos, com a incompleta demonstração dos benefícios que poderão resultar pela sua utilização, algum conservadorismo por parte dos agricultores e a falta de apoio qualificado prestado pelos fornecedores nas várias fases de utilização destas tecnologias (nomeadamente nas fases de instalação, calibração e tratamento dos dados obtidos). O princípio subjacente à utilização de tecnologias de aplicação variável, seja de fertilizantes, de sementes ou de produtos fitossanitários encontra-se, do ponto vista ambiental, fundamentado. Carece, no entanto, de estudos que demonstrem a sua viabilidade económica no médio e longo prazo.



Figura 14 – Utilização de um colar GPS numa ovelha (à esquerda) e mapa de posições do animal na Quinta das Silveiras, em Évora, em Junho de 2013 (à direita)

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Fundos FEDER através do Programa Operacional Factores de Competitividade – COMPETE - e por Fundos Nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito dos Projectos Estratégicos PEst-C/AGR/UI0115/2011 e PEst-OE/AGR/UI0115/2014.

Referências bibliográficas

- Abdu, H.; Robinson, D.A. e Jones, S.B. (2007) - Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments. *Soil Science Society of America Journal*, vol. 71, n. 1, p. 189-196.
- Adamchuk, V.I.; Hummel, J.W.; Morgan, M.T. e Upadhyaya, S.K. (2004) - On-the-go soil sensors for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 44, n. 1, p. 71-91.
- 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.
- Agouridis, C.; Stombaugh, T.; Workman, S.; Koostera, B.; Edwards, D. e Vanzan, E. (2004) - Suitability of a GPS collar for grazing studies. *Transactions of the ASAE*, vol. 47, n. 4, p. 1321-1329.
- 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.
- Barbari, M.; Conti, L.; Koostera, B.; Masi, G.; Sorbeti Guerri, F. e Workman, S. (2006) - The use of global positioning and geographical information systems in the management of extensive cattle grazing. *Biosystems Engineering*, vol. 95, n. 2, p. 271-280.
- 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.
- Carvalho, P.; Trindade, J.; Mezzalana, J.; Poli, C.; Nambinger, C.; Genro, T. e Gonda, H. (2009) - From the bite to precision grazing: understanding the plant-animal interface to exploit the multi-functionality of grasslands. *Revista Brasileira de Zootecnia*, vol. 38, n. spe, p. 109-122.
- 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.
- Cauduro, G.F.; Carvalho, P.; Barbosa, C.; Lunardi, R.; Pilau, A.; Freitas, F. e Silva, J. (2006) - Comparação de métodos de medida indirecta de massa de forragem em pasto de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.). *Ciência Rural*, vol. 36, n. 5, p. 1617-1623.
- Chan, C.; Schueller, J.; Miller, W.; Whitney, J. e Cornell, J. (2004) - Error sources affecting variable rate application of nitrogen fertilizer. *Precision Agriculture*, vol. 5, n. 6, p. 601-616.
- 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.
- Currie, P.O.; Hilken, T.O. e White, R.S. (1987) - Evaluation of a single probe capacitance meter for estimating herbage yield. *Journal of Range Management*, vol. 40, n. 6, p. 537-541.
- 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) - *Pastagens do Alentejo: bases técnicas sobre caracterização, pastoreio e melhoramento*. Évora, Universidade de Évora - ICAM (Ed.), Portugal, p. 165-178.
- FAO (2006) - *World reference base for soil resources*. World soil resources reports N°103. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Gillingham, A.G. (2001) - Precision management of fertilizer application to pasture. In: *Proceedings of the First Australian Geospatial Information and Agriculture Conference*. Sydney, Australia: NSW Agriculture, p. 534-541.
- Hanna, M.; Steyn-Ross, D. e Steyn-Ross, M. (1999) - Estimating biomass for New Zealand pasture using optical remote sensing techniques. *Geocarto International*, vol. 14, n. 3, p. 89-94.
- Haynes, R.J. e Williams, P.H. (1993) - Nutrient cycling and soil fertility in the grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*, vol. 49, n. 1, p. 119-199.
- Hirata, M. (2000) - Quantifying spatial heterogeneity in herbage mass and consumption in pastures. *Journal of Range Management*, vol. 53, n. 3, p. 315-321.
- Hutchings, N. (1991) - Spatial heterogeneity and other sources of variance in sward height as measured by the sonic and HFRO sward stick. *Grass Forage Science*, vol. 46, n. 3, p. 277-282.

- Johnson, C.; Eskridge, K. e Corwin, D. (2005) - Apparent soil electrical conductivity: applications for designing and evaluating field-scale experiments. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 46, n. 1-3, p. 181-202.
- 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.
- King, J.; Dampney, P.; Lark, R.; Wheeler, H.; Bradley, R. e Mayr, T. (2005) - Mapping potential crop management zones within fields: use of yield-map series and patterns of soil physical properties identified by electromagnetic induction sensing. *Precision Agriculture*, vol. 6, n. 2, p. 167-181.
- Kühn, J.; Brenning, A.; Wehrhan, M.; Koszinski, S. e Sommer, M. (2009) - Interpretation of electrical conductivity patterns by soil properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture*, vol. 10, n. 6, p. 490-507.
- 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 Wittery, 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.
- Moral, F.; Terrón, J. e Marques da Silva, J. (2010) - Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil & Tillage Research*, vol. 106, n. 2, p. 335-343.
- Norton, E.R.; Clark, L.J. e Borrego, H. (2005) - Evaluation of variable rate fertilizer applications in an Arizona cotton production system. *Arizona Cotton Report*, vol. 142, p. 145-151.
- Paice, M.E.R.; Miller, P.C.H. e Day, W. (1996) - Control requirements for spatially selective herbicide sprayers. *Computers and Electronic in Agriculture*, vol. 14, n. 2-3, p. 163-177.
- 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.
- Robinson, D.A.; Abdu, H.; Jones, S.B.; Seyfried, M.; Lebron, I. e Knight, R. (2008) - Eco-geophysical imaging of watershed-scale soil patterns links with plant community spatial patterns. *Vadose Zone Journal of Soil Science Society of America*, vol. 7, n. 4, p. 1132-1138.
- Schellberg, J.; Hill, M.J.; Gerhards, R.; Rothmund, M. e Braun, M. (2008) - Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, vol. 29, n. 2-3, p. 59-71.
- 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.
- Schueller, J.K. e Wang, M.W. (1994) - Spatially-variable fertilizer and pesticide application with GPS and DGPS. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 11, n. 1, p. 69-83.
- Serrano, J.M.; Peça, J.O.; Marques da Silva, J. e Shakib, S. (2010) - Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 73, n. 1, p. 7-16.
- Serrano, J.M.; Peça, J.O.; Marques da Silva, J. e Shakib, S. (2011a) - Calibration of a capacitance probe for measurement and mapping of dry matter yield in Mediterranean pastures. *Precision Agriculture*, vol. 12, n. 6, p. 860-875.
- Serrano, J.M.; Peça, J.O. e Shahidian, S. (2011b) - Evaluation of variable rate technology for fertilizer application in permanent pastures. *Journal of Agricultural Science and Technology A*, vol. 1, n. 4A, p. 489-499.
- Serrano, J.M.; Shakib, S. e Marques da Silva, J. (2013a) - Small scale soil variation and its effect on pasture yield in Southern Portugal. *Geoderma*, vol. 195-196, n. 1, p. 173-183.
- Serrano, J.M.; Shakib, S. e Marques da Silva, J. (2013b) - Apparent electrical conductivity in dry versus wet soil conditions in a shallow soil. *Precision Agriculture*, vol. 14, n. 1, p. 99-114.
- Silva, S.C. e Cunha, W.F. (2003) - Métodos indiretos para estimar a massa de forragem em pastos de *Cynodon* spp. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 38, n. 8, p. 981-989.
- Simpson, D.; Lehouck, A.; Verdonck, L.; Vermeersch, H.; Van Meirvenne, M.; Bourgeois, J.; Tohen, E. e Docter, R. (2009) - Comparison between electromagnetic induction and fluxgate gradiometer measurements on the buried remains of a 17th century castle. *Journal of Applied Geophysics*, vol. 68, n. 2, p. 294-300.
- Stockdale, C. e Kelly, K. (1984) - A comparison of a rising-plate meter and an electronic capacitance

- meter for estimating the yield of pastures grazed by dairy cows. *Grass and Forage Science*, vol. 39, n. 4, p. 391-394.
- Sudduth, K.A.; Kitchen, N.R.; Bollero, G.A.; Bullock, D.G. e Wiebold, W.J. (2003) - Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, vol. 95, n. 3, p. 472-482.
- Sudduth, K.A.; Myers, D.B.; Kitchen, N.R. e Drummond, S.T. (2013) - Modeling soil electrical conductivity–depth relationships with data from proximal and penetrating ECa sensors. *Geoderma*, vol. 199, n. 1, p. 12-21.
- Wittery, D.J. e Mallarino, A.P. (2004) - Comparison of uniform and variable rate phosphorus fertilization for corn-soybean rotations. *American Society of Agronomy Journal*, vol. 96, n. 1, p. 26-33.
- Zanine, A.M.; Santos, E.M. e Ferreira (2006) - Principales métodos de evaluación de pasturas. *Revista Electrónica de Veterinaria REDVET*, vol. VII, n. 11, p. 1-13.
- Zhang, X.; Shi, L.; Jia, X.; Seielstad, G. e Helgason, C. (2010) - Zone mapping application for precision-farming: a decision support tool for variable rate application. *Precision Agriculture*, vol. 11, n. 2, p. 103-114.