



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

ESCOLA DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA RURAL

Avaliação da variabilidade espacial numa pastagem permanente: novas tecnologias de apoio à gestão do ecossistema solo – planta – animal

Sérgio Emília Barreto

Orientador: Professor Doutor João Manuel Pereira Ramalho Serrano

Mestrado em Engenharia Agronómica

Dissertação

Évora, 2015

Agradecimentos

A realização e conclusão deste trabalho só foi possível com o apoio e colaboração de um grande número de pessoas, que directa ou indirectamente me ajudaram, e a quem quero expressar o meu sincero agradecimento. Sem os seus contributos eu nunca teria realizado e concluído este trabalho.

Quero agradecer ao Professor João Manuel Pereira Ramalho Serrano, o meu orientador, pela ajuda generosa, pela escolha do tema, pelo delineamento do trabalho, pela paciência na correcção da dissertação, pela boa vontade de me orientar e transmitir os conhecimentos e experiências de modo incansável para melhorar a minha formação, bem como pela simpatia e acompanhamento durante toda a realização deste trabalho.

Gostaria de agradecer ao Professor Shakib Shahidian, pela sua ajuda generosa na recolha de dados de campo e pelo apoio durante a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor José Rafael Marques da Silva por todo o apoio no tratamento de dados de campo.

Agradeço ao Professor Luís Leopoldo Silva, Director do Curso da Engenharia Agronómica, por ter aceite a minha candidatura para este curso, pelas ideias, sugestões e acompanhamento durante a realização da parte curricular e do trabalho.

Gostaria de agradecer com toda a minha sinceridade e humildade ao Professor Vasco Fitas da Cruz, pela sua grandeza e bondade, pelo facto de me ter ajudado na obtenção da bolsa de estudos e facilitado o contacto com a Universidade Évora.

Agradeço à Professora Ana Cristina Gonçalves, pelo seu apoio e ideias que me motivaram desde a minha chegada a Évora.

Gostaria de agradecer à instituição Camões IP, pela atribuição da bolsa de estudo.

Gostaria de agradecer também ao Eng.º Paulo Palma pelo contributo que deu na identificação das espécies botânicas estudadas.

Agradeço ao colega argentino Pablo Leandro Cicore (doutorando em Agricultura de Precisão), por me ter disponibilizado alguns artigos e pela sua ajuda e acompanhamento na recolha de dados de campo.

Agradeço também à colega Margarida Santos (mestranda em Engenharia Zootécnica) pela sua gentileza e auxílio na recolha de dados de campo.

A todos os Professores da Universidade Évora que fizeram parte do meu percurso académico em Évora.

Gostaria de agradecer também os meus amigos e colegas Tiago Campos, Teresa Mestre, Rui Carlos, Rui Queiroz, Marilina e Enoque pela ajuda e apoio concedidos durante a realização da parte curricular. Estiveram sempre prontamente disponíveis para me ajudar em várias vertentes, na realização dos trabalhos do grupo, disponibilizando apontamentos, na correcção do português.

Gostaria de agradecer à minha família (aos meus pais e aos meus irmãos), à minha mulher (Berta Tavares) e aos meus filhos (Vónio e Délio), pois quando decidi começar os meus estudos, foram os primeiros a dar-me apoio e incentivo. Pela paciência, compreensão e motivação e espírito de entreajuda inesgotável.

A todos os estudantes Timorenses em Évora.

Resumo

A estimativa da produtividade das pastagens constitui uma etapa fundamental para o gestor agrícola em termos de planeamento do encabeçamento animal, organização dos lotes de animais e avaliação das necessidades de suplementação alimentar ao longo do ano. O objectivo principal deste trabalho consistiu na avaliação de tecnologias com potencial para monitorizar de forma expedita aspectos relacionados com a variabilidade da pastagem e apoiar a tomada de decisão do gestor agrícola. Foram avaliados dois tipos de sensores para monitorizar a variabilidade espacial e temporal da pastagem: um sensor óptico activo (“OptRx[®]”, que mede o índice NDVI, “Normalized Difference Vegetation Index”) e uma sonda de capacitância (“Grassmaster II”). Os resultados obtidos demonstraram o potencial que apresenta o índice NDVI para monitorizar a evolução do padrão espacial e temporal do estado vegetativo de uma pastagem biodiversa. Valores de NDVI mais elevados foram registados à medida que a pastagem se aproximava do seu maior vigor vegetativo, notando-se uma quebra significativa destes índices no final da Primavera, quando a pastagem começou a secar em virtude da conjugação de temperaturas mais elevadas com a redução dos teores de humidade no solo. Este índice foi também efectivo na identificação de diferentes coberturas vegetais do solo (gramíneas/leguminosas) e diferentes produtividades na pastagem. Por outro lado, foi possível desenvolver equações de calibração entre o NDVI e a capacitância e de qualquer destes parâmetros com a produção de matéria verde e de matéria seca (em kg/ha). Por fim, foi evidenciada uma relação inversa quer do NDVI quer da capacitância com o teor de matéria seca (em %) de pastagens de sequeiro Alentejo.

Evaluation of the spatial variability in a permanent pasture: new technologies to support soil-plant-animal ecosystem management

Abstract

The estimation of pasture productivity is an important step for the farmer in terms of planning animal stocking, organizing animal lots and determining supplementary feeding needs throughout the year. The main objective of this work was to evaluate technologies which have potential for monitoring aspects related to pasture variability and support to decision making for the farmer. Two types of sensors for monitoring the spatial and temporal pasture variability were evaluated: an active optical sensor ("OptRx®", which measures NDVI, "Normalized Difference Vegetation Index") and a capacitance probe ("GrassMaster II"). The results showed the potential of NDVI for monitoring the evolution of spatial and temporal patterns of the vegetative state of biodiverse pasture. The higher NDVI were registered as pasture approached its greatest vegetative vigor, with a significant fall in the measured NDVI at the end of Spring, when the pasture began to dry due to the combination of higher temperatures and lower soil moisture content. This index was also effective for identifying different plant species (grasses/legumes) and variability in pasture yield. Furthermore, it was possible to develop calibration equations between the capacitance and the NDVI and between these parameters and pasture green and dry matter yield (kg/ha). Finally, an inverse relationship was obtained between NDVI and capacitance with pasture dry matter content (in %) in Alentejo dry-land farming systems.

Índice

	Página
Agradecimentos.....	ii
Resumo.....	iv
Abstract	v
Índice de figuras	viii
Índice de quadros.....	xi
Lista de abreviaturas.....	xii
1. Introdução	1
1.1. <i>Objectivos</i>	2
2. Importância das pastagens no Alentejo: tipos de pastagem, ciclo vegetativo e melhoramento	3
3. Agricultura de precisão: conceito, tecnologias e aplicações	6
3.1. <i>O conceito de agricultura de precisão</i>	6
3.2. <i>Agricultura de precisão em pastagens</i>	7
3.3. <i>Tecnologias utilizadas em agricultura de precisão aplicada às pastagens</i>	8
3.3.1. <i>Sistemas de navegação global por satélite (GNSS)</i>	8
3.3.2. <i>Sensores electrónicos</i>	9
3.3.2.1. <i>Medidores de condutividade eléctrica aparente do solo</i>	9
3.3.2.2. <i>Sonda de capacitância para estimativa da produtividade da pastagem</i>	10
3.3.2.3. <i>Sensores ópticos</i>	11
3.3.3. <i>Sistemas de Informação Geográfica (SIG)</i>	13
3.3.4. <i>Da organização dos dados à tomada de decisão</i>	14
3.3.5. <i>Tecnologia de aplicação variável (VRT – “Variable Rate Technology”)</i>	14
	vi

4. Material e métodos	16
4.1. Locais de estudo	16
4.2. Caracterização climática	17
4.3. Equipamentos utilizados	19
4.4. Metodologia dos ensaios	20
4.4.1. Ensaios na Quinta da Silveira	20
4.4.2. Ensaios complementares	23
4.5. Tratamento estatístico dos dados	27
5. Resultados e discussão	28
5.1. Ensaios na Quinta de Silveira	28
5.1.1. Índices de vegetação NDRE e NDVI	28
5.1.2. Correlação entre índices de vegetação (NDRE versus NDVI)	29
5.1.3. Medição da capacitância e da produtividade da pastagem.....	32
5.1.4. Correlação entre o NDVI, a capacitância e a produtividade da pastagem.....	36
5.2. Ensaios complementares	39
5.2.1. Ensaio complementar 1.....	39
5.2.2. Ensaio complementar 2.....	41
5.2.3. Ensaio complementar 3.....	44
5.2.4. Dados agregados dos ensaios complementares	48
6. Conclusões	50
7. Referências bibliográficas	52

Índice de figuras

	Página
Figura 1– Curva de crescimento anual da pastagem nas condições de sequeiro Mediterrânico em quatro anos típicos	5
Figura 2– Representação esquemática de um ciclo completo de agricultura de precisão em pastagens.....	8
Figura 3– Diagrama representativo do funcionamento de um sistema de informação geográfica, SIG	13
Figura 4 – Fotografia aérea da parcela da Quinta da Silveira (a linha branca traduz o limite exterior da parcela; a linha azul representa a linha de água; 1-ovil; 2-amoreira; 3-zona de oliveiras; 4- zona de sobreiros)	16
Figura 5 – Carta altimétrica da parcela de ensaio na Quinta da Silveira	17
Figura 6 – Diagrama termopluiométrico para a estação meteorológica de Évora (segundo dados climáticos dos anos 1951-1980	18
Figura 7 – Diagrama termopluiométrico para a estação meteorológica de Évora (segundo dados climáticos do ano agrícola 2014-2015)	18
Figura 8 – Sensor óptico (“OptRx [®] ”), receptor GPS (“Trimble”) e bateria portátil, utilizados nos ensaios de campo	19
Figura 9 – Princípio de funcionamento da sonda “Grassmaster II”.....	20
Figura 10 – Representação dos 47 pontos de amostragem na Quinta da Silveira	21
Figura 11 – Operador durante a recolha de dados com o sensor óptico “OptRx [®] ”	22
Figura 12 – Diagrama do ensaio complementar 1 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015.....	24
Figura 13 – Diagrama do ensaio complementar 2 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015.....	25
Figura 14 – Diagrama do ensaio complementar 3 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015	26

Figura 15 – Pormenor do ensaio complementar 3: identificação dos locais de recolha de amostras com diferentes produtividades	27
Figura 16 – Evolução dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) nos 47 pontos amostrados da pastagem da Quinta da Silveira, entre Março e Maio de 2015..	29
Figura 17 – Mapas dos índices de vegetação (NDVI) da pastagem na Quinta da Silveira, entre Março e Maio de 2015	31
Figura 18 – Mapas da capacitância (CMR), da produtividade da pastagem, em termos de kg de matéria verde (MV)/ha e de kg de matéria seca (MS)/ha e da percentagem de MS, na Quinta da Silveira em 21 de Maio de 2015.....	34
Figura 19 – Zonas tipo de desenvolvimento da pastagem na Quinta da Silveira em Maio de 2015	35
Figura 20 – Correlação entre o NDVI e a capacitância e entre o NDVI e a produtividade da pastagem (kg MV/ha)	37
Figura 21 – Correlação entre o NDVI e produtividade da pastagem (em termos de matéria seca por unidade de área) e entre o NDVI e a percentagem de matéria seca da pastagem	38
Figura 22 – Correlação entre a capacitância (CMR) e a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde e de matéria seca por unidade de área) e a percentagem de matéria seca da pastagem	38
Figura 23 – NDVI registado nas cinco repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 1	40
Figura 24 – NDVI registado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 1: identificação dos três patamares correspondentes a solo nu, gramíneas e leguminosas	41
Figura 25 – NDVI registado nas cinco repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 2	43
Figura 26 – NDVI registado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 2: identificação dos seis patamares correspondentes a solo nu (inicial e final), gramíneas (altas, baixas e secas) e leguminosas.....	43

Figura 27 – NDVI registado nas três repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 3	44
Figura 28 – NDVI registado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 3: identificação dos quatro patamares correspondentes a ervas secas, leguminosas, gramíneas, e tronco de árvore	44
Figura 29 – NDVI registado nas três repetições realizadas em cada condição (erva baixa/alta) na zona das gramíneas, no âmbito do ensaio complementar 3	47
Figura 30 – NDVI registado nas três repetições realizadas em cada condição (erva baixa/alta) na zona das leguminosas, no âmbito do ensaio complementar 3....	47
Figura 31 – Correlação entre o NDVI e a capacitância e entre o NDVI e a produtividade da pastagem (kg MV/ha), nos ensaios complementares	48
Figura 32 – Correlação entre o NDVI e produtividade da pastagem (em termos de matéria seca por unidade de área) e entre o NDVI e a percentagem de matéria seca da pastagem, nos ensaios complementares	49
Figura 33 – Correlação entre a capacitância (CMR) e a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde e de matéria seca por unidade de área) e a percentagem de matéria seca da pastagem, nos ensaios complementares	49

Índice de quadros

	Página
Quadro 1 – Estatística descritiva dos índices de vegetação calculados (NDRE e NDVI) em diferentes datas, no conjunto dos 47 pontos de amostragem da pastagem da Quinta da Silveira	28
Quadro 2 – Coeficientes de correlação linear (r) entre os índices de vegetação NDRE e NDVI em diferentes datas de amostragem da pastagem da Quinta da Silveira	30
Quadro 3 – Estatística descritiva da capacitância e da produtividade da pastagem em termos de matéria verde (kg/ha) e de matéria seca (em kg/ha e em %) em 21 de Maio de 2015, no conjunto dos 47 pontos de amostragem da Quinta da Silveira	32
Quadro 4 – Características das diferentes zonas da pastagem da Quinta da Silveira em Maio de 2015	35
Quadro 5 – Valor médio das principais características das duas zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 1	39
Quadro 6 – Valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas três zonas consideradas no ensaio complementar 1	40
Quadro 7 – Valores médios das principais características das quatro zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 2 (gramíneas altas, leguminosas, gramíneas secas e gramíneas baixas)	42
Quadro 8 – Valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas seis zonas consideradas no ensaio complementar 2 (duas de solo nu, uma de leguminosas e três de gramíneas)	42
Quadro 9 – Valores médios das principais características das quatro zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 3 (gramíneas baixas e altas, leguminosas baixas e altas)	46

Lista de abreviaturas

AP – Agricultura de precisão

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

GNSS – Global Navigation Satellite System

VRT – Variable Rate Technology

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

GPS – Global Positioning System

NDRE – Normalized Difference RedEdge

MV – Matéria verde

MS – Matéria Seca

CMR – Capacitância

1. Introdução

A agricultura confronta-se actualmente com o desafio de aumentar a produção de alimentos em resposta ao crescimento da população mundial. Junta-se a este desafio de produtividade no contexto global do sector agrícola, a necessidade de reduzir custos de produção e de melhorar a eficiência na utilização dos recursos naturais e dos factores de produção, de modo a reduzir o impacto ambiental desta actividade. É neste contexto que surge a agricultura de precisão (AP), conceito que tem associado a utilização de tecnologias para recolha e registo de dados (por exemplo, sensores para levantamento da variabilidade do solo ou da cultura), ferramentas de gestão de informação e análise de dados (“Sistemas de Informação Geográfica”, SIG) e os meios para apoiar este sistema, entre outros, os “Sistemas de Navegação Global por Satélite” (GNSS, “*Global Navigation Satellite System*”) ou as “Tecnologias de Taxa Variável” (VRT, “*Variable Rate Technology*”) (Braga e Pinto, 2011; Serrano *et al.*, 2014b).

Os sistemas agro-florestais extensivos (“montado” em Portugal e “dehesa” em Espanha) cobrem 3,5-4 milhões de hectares em Portugal e Espanha (Seddaiu *et al.*, 2013). Esta forma de ocupação do solo representa 33% da área total de floresta em Portugal (David *et al.*, 2013), sendo uma imagem característica do Alto Alentejo (Serrano *et al.*, 2014a). A produção de pastagens e forragens para além de suporte à pecuária extensiva de ruminantes (bovinos, ovinos e caprinos) e de outras espécies de interesse zootécnico, hoje em dia tem vindo a reflectir novas preocupações de cariz ambiental e novas tendências no consumo alimentar. A importância das pastagens é hoje reconhecida na protecção do meio ambiente, na conservação da biodiversidade e dos recursos naturais, na prevenção dos fogos florestais, no combate à erosão do solo, no sequestro de dióxido de carbono (CO₂), na melhoria da fertilidade dos solos, no embelezamento e humanização da paisagem, na saúde e no bem-estar animal. Esta importância relevante justifica a aplicação de tecnologias adequadas face à diversidade dos padrões relacionados com a variabilidade do solo e da cultura, as características do relevo, os sistemas de pastoreio ou as condições climáticas. Ferramentas expeditas estão disponíveis para monitorização e avaliação da variabilidade,

utilizando sensores e sistemas de posicionamento e constituindo um pilar no apoio à tomada de decisão (Serrano *et al.*, 2014b).

1.1. Objectivos

O objectivo principal desta dissertação consistiu na avaliação de tecnologias com potencial para monitorizar aspectos relacionados com a variabilidade da pastagem e apoiar a tomada de decisão do gestor agrícola. A partir deste objectivo geral foram definidos os seguintes objectivos específicos: (i) avaliar a capacidade do sensor óptico activo “OptRx[®]” para monitorizar a evolução do padrão espacial e temporal do estado vegetativo de uma pastagem tendo por base a medição dos índices de vegetação (NDVI); (ii) testar a capacidade do sensor óptico activo “OptRx[®]” para identificar diferentes coberturas vegetais do solo e diferentes produtividades na pastagem; (iii) desenvolver equações de calibração para a sonda de capacitância “Grassmaster II” e para o sensor de vegetação “OptRx[®]” na estimativa da produtividade de pastagens de sequeiro do Alentejo.

2. Importância das pastagens no Alentejo: tipos de pastagem, ciclo vegetativo e melhoramento

Os prados ou pastagens são culturas compostas por comunidades de plantas, geralmente herbáceas, aproveitadas predominantemente no próprio local em que crescem e se desenvolvem pelos animais em pastoreio (Moreira, 2002). Os animais, com especificidades anatómicas e fisiológicas diferentes, enquanto pastoreiam ou repousam promovem na pastagem acções de desfoliação e pisoteio, pelo que estas são normalmente constituídas por plantas de estrutura baixa, de porte sub-prostrado e prostrado, com maior resistência ao pisoteio animal.

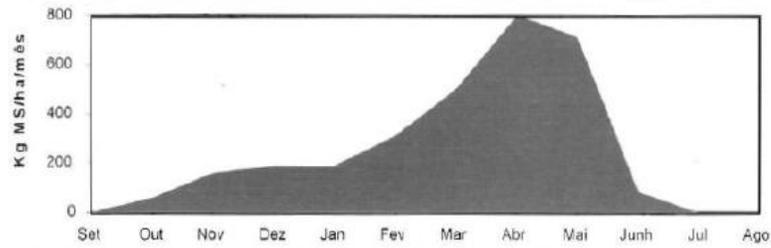
As pastagens, para além de fornecerem um substrato alimentar aos animais, especialmente ruminantes, também proporcionam o uso sustentado do solo, permitindo a sua cobertura vegetal ao longo de todo o ano, reduzindo os riscos de erosão (Efe Serrano, 2006). Do ponto de vista agronómico é conhecida a sua importância no estabelecimento de rotação de culturas e, em face do pastoreio directo, na reciclagem de nutrientes, no sequestro de carbono e na redução da emissão de gases com efeito de estufa para a atmosfera. Em termos ecológicos, contribui para a formação de uma paisagem mais harmoniosa, facilita a fixação das populações rurais e o combate à desertificação.

Segundo Efe Serrano (2006), as pastagens podem ser: a) naturais ou semeadas, entendendo por naturais aquelas que crescem e se desenvolvem sem a intervenção do homem, enquanto as semeadas são as que emergem devido à colocação das suas sementes no solo de forma propositada; b) permanentes ou temporárias, as primeiras, devido ao seu potencial de qualidade, quantidade e à sua capacidade de persistência, ocupam o terreno durante longos períodos de tempo (vários anos), enquanto as temporárias são instaladas por um período curto e variável, normalmente inferior a um ano, em rotação de culturas, em função dos objectivos e critérios aplicados para a rotação; c) de sequeiro ou de regadio, relativamente ao regime hídrico: nas primeiras não é realizada rega, enquanto as segundas são instaladas em zonas com disponibilidade de água para regar.

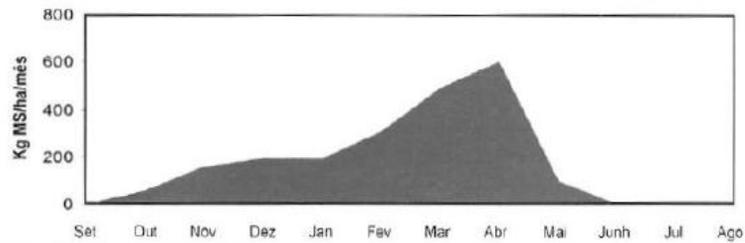
Nas condições de clima Mediterrânico não é possível manter uma pastagem de sequeiro verde durante todo o ano, pois durante a época das chuvas de Inverno não se fazem sentir as temperaturas ideais ao crescimento das plantas, enquanto no Verão, as altas temperaturas e a precipitação praticamente nula induzem um stress hídrico nas plantas que inviabiliza a disponibilidade de pastagem para os animais. Verificam-se, portanto, dois picos de produção, um no Outono e o principal na Primavera (figura 1). Neste sentido, na região do Alentejo uma pastagem tem duas fases de pastoreio: (i) a primeira no início do desenvolvimento vegetativo da planta, quando esta já tem algum porte e suporta o pisoteio, correspondendo normalmente a princípios de Novembro, devendo ser este um pastoreio pouco intensivo e podendo estender-se até o início da floração, que acontece normalmente em Fevereiro; (ii) a segunda, no período pós floração, depois das plantas libertarem as suas sementes no solo, garantindo a ressementeira natural do ano seguinte.

O melhoramento das pastagens permanentes de sequeiro, típicas do Alentejo, é proporcionado tradicionalmente pela introdução de leguminosas em consociação com gramíneas e outras espécies (pastagens biodiversas) e pela aplicação homogénea de fertilizantes fosfatados (Efe Serrano, 2006).

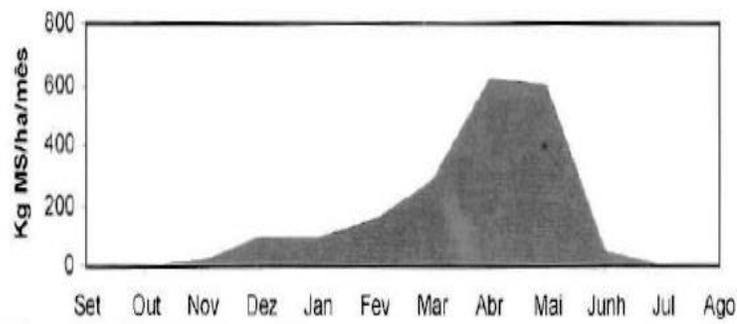
As leguminosas permitem aumentar o valor proteico da pastagem, para além de contribuírem para a incorporação de azoto atmosférico no solo (Efe Serrano, 2006). Por outro lado, o sistema silvo pastoril, que integra pastagens biodiversas, diferentes espécies de árvores, afloramentos rochosos e animais em pastoreio revela todo o potencial de variabilidade deste ecossistema para a gestão diferenciada, designadamente da fertilização, e projecta-o no cenário de agricultura de precisão (Serrano *et al.*, 2014a).



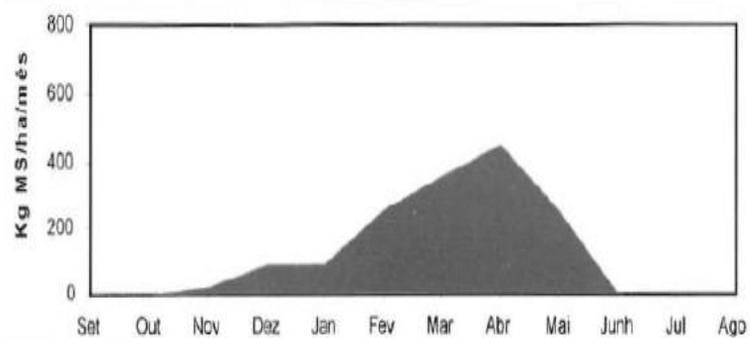
a) ano de Outono e Primavera húmidos (3000 kg MS / ha / ano)



b) ano de Outono húmido e Primavera seca (2100 kg MS / ha / ano)



c) ano de Outono seco e Primavera húmida (1900 kg MS / ha / ano)



d) ano de Outono e Primavera secos (1500 kg MS / ha / ano)

Figura 1. Curva de crescimento anual da pastagem nas condições de sequeiro Mediterrânico em quatro anos típicos (Efe Serrano, 2006).

3. Agricultura de precisão: conceito, tecnologias e aplicações

3.1. O conceito de agricultura de precisão

O conceito de AP surgiu nos anos 80 do século passado, com as primeiras aplicações em cereais nos Estados Unidos (Zhang *et al.*, 2002). Assenta no princípio da variabilidade do solo e do clima, com implicações na variabilidade da produção das culturas, procurando obter maiores produções com melhor eficiência, de forma a garantir a sustentabilidade agrícola e ambiental (Blackmore, 1999; Stafford, 2000; Alamo *et al.*, 2012; Gertsis *et al.*, 2013). Utiliza diversas tecnologias, incluindo os GNSS, os SIG, sistemas computacionais, dispositivos de controlo automático, sistemas de detecção remota, sistema de telecomunicações e sensores diversos. Em última instância, a AP proporciona uma gestão diferenciada dos factores de produção (fertilizantes, sementes, herbicidas, água ou combustível) nas diferentes fases dos sistemas agrícolas e, do ponto de vista económico, um melhor investimento e um maior retorno (Seelan *et al.*, 2003).

De acordo com Zhang *et al.* (2002), a gestão da variabilidade pode ser alcançada com duas aproximações: (i) baseada na interpretação da carta de solos; ou (ii) baseada na monitorização da produtividade da cultura no final da campanha. O conhecimento actual permite-nos complementar esta abordagem, considerando outras vias, nomeadamente, a da utilização de tecnologias de detecção remota ou de sensores próximos.

Ao longo da última década, a tecnologia associada à AP divulgou-se bastante e tem sido utilizada progressivamente pelos agricultores, permitindo-lhes a oportunidade de melhor gerirem o seu calendário cultural, sustentando as suas decisões quanto à melhor altura, por exemplo, de aplicar o adubo ou os produtos fitossanitários, em face da variabilidade espacial e temporal do solo ou das culturas. Contudo, são ainda poucos aqueles que utilizam o conceito na sua plenitude, quer por não se encontrarem comprovadas as vantagens que lhe estão associadas, quer pela incerteza relativamente ao retorno do investimento (Stafford, 2000; D'Antoni *et al.*, 2012). A indústria em geral e as empresas agrícolas em particular têm dado uma boa resposta ao produzirem as tecnologias que permitiram acelerar a sua implementação, funcionando como um estímulo à AP (Whelan e

McBratley, 2000; Zhang *et al.*, 2002). Em Portugal a taxa de adopção da AP é inferior ao esperado, para tal contribuem: o custo da aquisição dos equipamentos, a incompleta demonstração dos benefícios que poderão resultar pela sua aplicação e, especialmente, a falta de apoio prestado por técnicos qualificados na assistência às várias fases de utilização da tecnologia (instalação, calibração e tratamento dos dados obtidos) (Serrano *et al.*, 2014b).

Segundo Murakami *et al.* (2007), algumas das razões para a não implementação em grande escala do conceito de agricultura de precisão em todo o mundo prendem-se com factores sócio-económicos, agrónómicos e tecnológicos, nomeadamente o custo adicional associado, a carência de formação e capacidades para dominar a tecnologia envolvida, a necessidade de desenvolvimento de mais tecnologias de apoio, a falta de tempo para aprender, a ausência de bases de dados, a falta de instrução e de técnicos especializados, a complexidade em manter a integridade dos dados, a dificuldade em verificar ganhos económicos e ambientais, entre muitas outras.

3.2. Agricultura de precisão em pastagens

As tecnologias utilizadas em AP nas últimas décadas revelaram um enorme avanço no que respeita às pastagens, uma vez que permitem avaliar a produtividade da cultura e a variabilidade espacial do solo, da cultura e do pastoreio de animal (Schellberg *et al.*, 2008). O contributo da indústria para a agricultura verificou-se no desenvolvimento das ferramentas necessárias para conseguir dar resposta a esta variabilidade espacial (Cox, 2002). O potencial das pastagens encontra reflexo na extensa área ocupada por esta cultura, representando cerca de 26% da área agrícola mundial (Rutledge *et al.*, 2014; Schipper *et al.*, 2014). No entanto, a diversidade de espécies e composições florísticas, bem como a dinâmica da vegetação podem ser considerados constrangimentos na aplicação de tecnologias de AP em pastagens (Schellberg *et al.*, 2008).

Serrano *et al.* (2014a) apresentaram e implementaram uma proposta de ciclo completo de AP aplicado às pastagens (figura 2). Tem início com o levantamento da variabilidade espacial e da estabilidade temporal do solo e da pastagem, passa pela análise

desta informação e pela tomada de decisão, culminando com a aplicação diferenciada de fertilizantes utilizando tecnologia de aplicação variável (VRT).

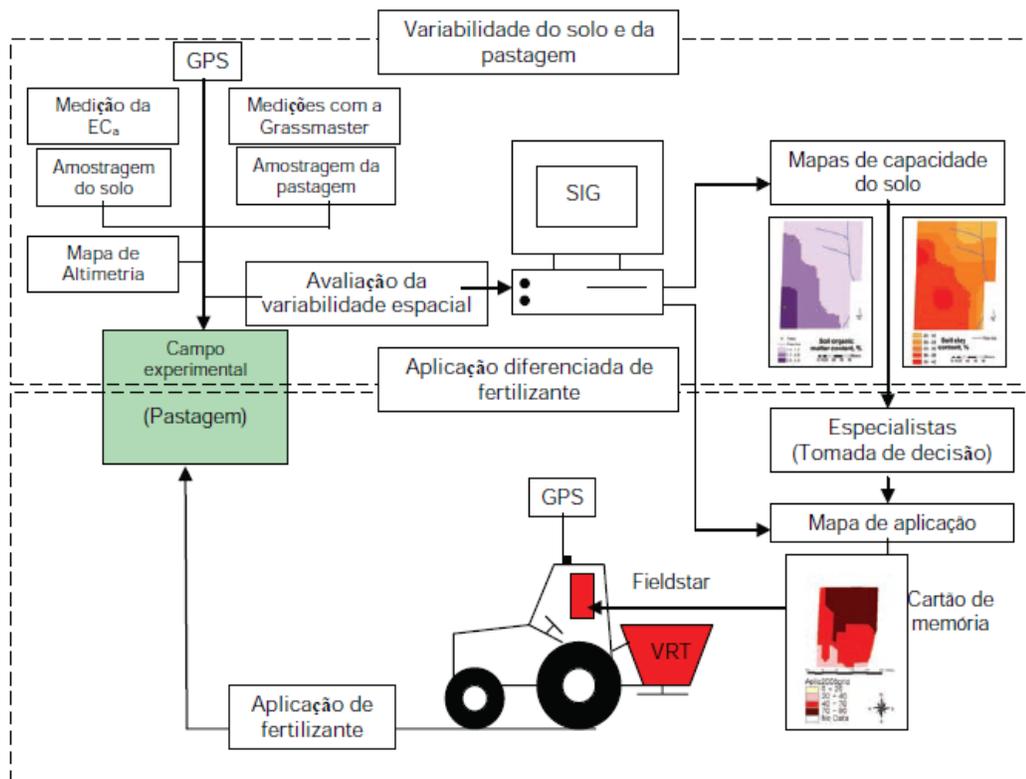


Figura 2. Representação esquemática de um ciclo completo de agricultura de precisão em pastagens (Serrano *et al.*, 2014a).

3.3. Tecnologias utilizadas em agricultura de precisão aplicada às pastagens

A figura 2 identifica os principais componentes tecnológicos presentes na aplicação do conceito de AP em pastagens: sistemas de localização de máquinas no terreno, sensores diversos, sistemas de informação geográfica e actuadores.

3.3.1. Sistemas de navegação global por satélite (GNSS)

O termo GPS (“*Global Positioning System*”) foi inicialmente utilizado para designar o sistema militar criado na década de 70 do século passado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América para posicionamento geo-espacial autónomo de um

receptor (fixo ou móvel) através do uso de satélites artificiais. Este posicionamento é possível a qualquer momento e em qualquer lugar na Terra, desde que o receptor se encontre no campo de visão de pelo menos quatro satélites. O termo GNSS surgiu para designar sistemas com capacidade para oferecer posicionamento em qualquer ponto da superfície terrestre (cobertura mundial, global), onde se inclui o sistema americano Navystar (“*Navigation Satellite with Time and Ranging*”)-GPS operacional desde 1995. Este sistema possui 24 satélites a uma altitude de 20200 km, os quais compõem o segmento espacial. Encontram-se distribuídos em seis planos orbitais, com uma inclinação de 55° em relação ao equador.

Os GNSS são o suporte das actividades em AP (Searcy, 1997; Coelho e Silva, 2009), uma vez que associam aos parâmetros medidos pelos sensores, as coordenadas geográficas do local.

3.3.2. Sensores electrónicos

São diversas as aplicações de sensores em pastagens, na cultura em si, mas também na monitorização do solo e do pastoreio animal, para além das tecnologias de aplicação variável de adubos ou de produtos fitossanitários (VRT). Nesta secção são abordadas as aplicações de alguns sensores medidores de condutividade eléctrica aparente do solo e de sensores próximos para monitorização da variabilidade da pastagem (sondas de capacitância e sensores ópticos). Não são abordadas técnicas de detecção remota (baseadas em imagens de satélite e imagens aéreas), de baixa resolução espacial, as quais constituem uma área em franca expansão, com potencial também para as pastagens, mas especialmente vocacionadas para a monitorização de extensas áreas, por exemplo em estudos de avaliação de sistemas de uso da terra.

3.3.2.1. Medidores de condutividade eléctrica aparente do solo

A amostragem do solo pelo método tradicional (recolha de amostras de solo e tratamento laboratorial) é muito exigente em tempo e mão-de-obra e tem custos associados elevados quando se pretende representar a variabilidade espacial de grandes áreas de

terreno agrícola (Serrano *et al.*, 2014a). A medição da condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a) é uma das técnicas mais utilizadas para caracterizar de forma expedita os padrões espaciais das propriedades do solo (Bronson *et al.*, 2005; Corwin e Lesch, 2005). A EC_a apresenta correlações significativas com propriedades do solo como a concentração de sais, os teores de argila ou a humidade (King *et al.*, 2005; Sudduth *et al.*, 2003), parâmetros determinantes da produtividade das pastagens (Serrano *et al.*, 2013).

Comercialmente estão disponíveis dois tipos de sensores para medição da condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a): sensores de contacto e sensores sem contacto com o solo (Sudduth *et al.*, 2013). No primeiro grupo insere-se o sensor Veris, enquanto no segundo grupo temos, por exemplo, o sensor DUALEM de indução electromagnética (EMI). Ambos os tipos apresentam vantagens e desvantagens, por exemplo os sensores sem contacto são leves, facilmente transportáveis e adaptáveis a condições de grande irregularidade topográfica, a solos húmidos e mesmo com culturas instaladas (Serrano *et al.*, 2014b). Abdu *et al.* (2007) acrescentaram a estas vantagens, a maior velocidade de deslocamento que é permitida a este tipo de sensor, facilitando assim a monitorização de extensas áreas. Os sensores de contacto com o solo são mais pesados, pelo que necessitam de uma fonte de potência, normalmente um tractor, não se devendo utilizar em solos com elevada humidade ou em solos cuja superfície esteja coberta por uma cultura instalada (Sudduth *et al.*, 2003). Por outro lado, verifica-se que os sensores de contacto exigem que os discos enterrem no solo para que os eléctrodos procedam à medição da EC_a , pelo que produzem medições menos fiáveis do que os sensores de indução electromagnética em solos secos ou muito duros (Corwin e Lesch, 2005).

3.3.2.2. Sonda de capacitância para estimativa 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 (Serrano *et al.*, 2011). O método mais comum e fiável para determinar a produtividade da pastagem em termos de matéria seca por unidade de área consiste no corte da pastagem e no processamento em laboratório (pesagens, secagem). Este método directo

é, no entanto, exigente em termos de mão-de-obra e de tempo. Têm surgido, por isso, propostas para desenvolver sistemas de medição indirecta, por estimativa, que não exigem o corte da pastagem (Serrano *et al.*, 2009).

A aplicação de tecnologias para avaliação da variabilidade da produtividade numa pastagem permanente com diversas espécies botânicas é difícil em consequência da complexidade inerente às variações anuais e espaciais da morfologia e da cor dos diferentes tipos de vegetação (Currie *et al.*, 1987; Schellberg *et al.*, 2008). Serrano *et al.* (2009; 2014c) desenvolveram estudos com a sonda de capacitância “Grassmaster II”, tendo estabelecido equações de calibração para diferentes tipos de pastagens no Alentejo. Esta sonda, leve e fácil de transportar (Cauduro *et al.*, 2006), é constituída por um circuito electrónico que emite uma corrente eléctrica fraca (cerca de 5 V), baseando a medição na diferença entre a constante dieléctrica do ar (que é alta) e a da pastagem (que é baixa) (Currie *et al.*, 1987). Este sensor de capacitância, equipado com uma consola, permite ao operador introduzir uma equação de calibração, disponibilizando em tempo real a informação da estimativa da produção de pastagem em termos de matéria seca (kg/ha). Se a esta sonda for associado um receptor GPS, é possível representar a variabilidade espacial da produtividade da pastagem (Serrano *et al.*, 2009; 2014c).

3.3.2.3. Sensores ópticos

Os sensores ópticos incluem-se na categoria de sensores próximos e procuram dar resposta a algumas das limitações levantadas pela detecção remota (imagens de satélite ou aéreas) (Bausch e Delgado, 2003). Devido ao seu reduzido peso, podem ser transportados por um operador aos locais de interesse, embora o processo mais comum de utilização seja assente numa estrutura montada numa moto quatro a uma altura fixa acima da cultura. Estes sensores medem a energia emitida ou reflectida pela superfície terrestre em diversos comprimentos de onda (bandas espectrais) do espectro electromagnético. Estes sensores podem ser passivos (utilizam a luz natural) ou activos (possuem fonte de luz própria), sendo que estes últimos dispensam calibração, podendo trabalhar em qualquer condição de luz (inclusivamente à noite).

O potencial da técnica prende-se com o facto de diferentes objectos originarem respostas (assinaturas espectrais) diferentes, que podem ser mais ou menos características e, por isso, identificativas (Brase, 2005). Segundo Numata *et al.* (2008), aspectos como as espécies botânicas presentes, a densidade, a altura, o teor de humidade, a percentagem de matéria verde, o estado vegetativo ou mesmo o estado nutricional de uma cultura podem traduzir-se em diferentes resultados na medição pelos sensores ópticos.

Normalmente os resultados espectrais não são apresentados em termos de radiação emitida pela superfície, tal como é medido pelo sensor, sendo transformados em índices de vegetação (Qi *et al.*, 1994). Por exemplo, o NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é o índice de vegetação (IV) mais conhecido e utilizado, relacionando-se entre outros, com a quantidade de vegetação fotossinteticamente activa, ou seja, com o vigor vegetativo das plantas (Morgan e Ess, 1997; Gitelson, 2004). O cálculo deste índice baseia-se na medição da resposta espectral em duas bandas: do infravermelho próximo (NIR, *near-infrared*, correspondente a 775 nm) e do vermelho (RED, correspondente a 670 nm) (equação 1).

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

Ao nível das culturas foram publicados resultados promissores pela utilização de sensores ópticos, por exemplo, na medição do stress hídrico em cereais (Laliberte *et al.*, 2010) ou na identificação de zonas com infestantes (Adamchuk *et al.*, 2004). Nestas duas aplicações em concreto, estes aspectos podem ser relevantes no apoio à tomada de decisão relativa à gestão da rega ou da aplicação de herbicidas, respectivamente. Uma outra aplicação prática muito comum encontra-se relacionada com a identificação em cereais de deficiências de azoto, com o aparecimento de coloração amarelada nas folhas, sendo a base do sistema “N-sensor”, utilizado na gestão diferenciada da fertilização.

3.3.3. Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

Os SIG são sistemas que facilitam a recolha, o armazenamento, a manipulação, a análise e a apresentação de informações relativamente aos objectos espaciais. São sistemas de *software* e *hardware*, informação espacial e computacional que facilita a gestão e representação de fenómenos que ocorrem no espaço (Laranjeira, 2010). De acordo com Coelho e Silva (2009) os SIG têm vindo a ser utilizados no sector agrícola sobretudo no planeamento e gestão da exploração agropecuária.

O papel principal destinado aos SIG é organizar as informações espaciais, criando abstracções digitais do real, modelando e armazenando eficientemente os dados, de forma a identificar a melhor relação entre as variáveis espaciais, facilitando a elaboração dos relatórios e mapas para compreensão holística desses relacionamentos (Pinto, 2009).

Pinto (2009) apresenta um diagrama (figura 3) que resume o funcionamento dos SIG, desde os elementos que os constituem até às diferentes aplicações.

No ciclo de AP em pastagens, os SIG constituem uma etapa intermédia entre a recolha da informação geo-referenciada e a tomada de decisão. Entre outros, “Idrisi”, “LandCad”, “ArcView” ou “ArcGIS” constituem exemplos de SIG desenvolvidos para este efeito.

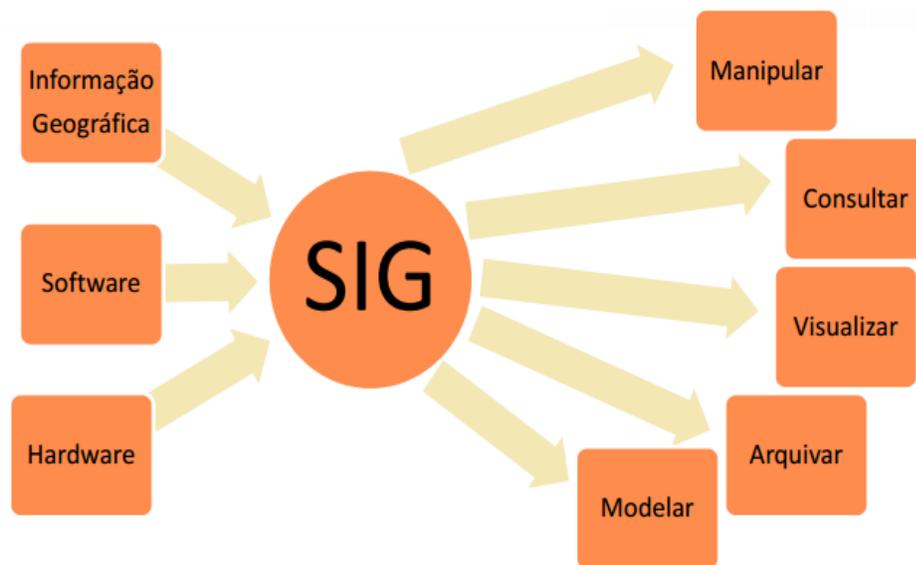


Figura 3. Diagrama representativo do funcionamento de um sistema de informação geográfica, SIG (Pinto, 2009).

3.3.4. Da organização dos dados à tomada de decisão

A agricultura de precisão conjuga a utilização de tecnologias de informação no auxílio a processos de tomada de decisão para reduzir os riscos que afectem a produtividade e os custos operacionais mantendo uma elevada eficiência energética mas tendo uma melhor consciência ambiental e social (Zhang *et al.*, 2010).

A tecnologia apresentada nos pontos anteriores disponibiliza um caudal de dados geo-referenciados que constituem a base da tomada de decisão. Esta representa, no entanto, um processo complexo, uma vez que, para além do levantamento dos dados de anos sucessivos, envolve a transformação destes em informação, à qual se deverá associar o conhecimento agronómico para enquadrar as alternativas e sustentar a decisão (Serrano *et al.*, 2014a). É neste contexto que se enquadram os SIG, cujo resultado é normalmente apresentado sob a forma de mapas, por exemplo, da condutividade eléctrica aparente do solo (EC_a), da concentração de nutrientes ou da humidade relativa do solo, dos índices de vegetação ou da produtividade da pastagem. A interpretação destes mapas constitui uma das grandes dificuldades na implementação do conceito de agricultura de precisão (Blackmore, 1999). O conhecimento agronómico definirá agora o sentido da intervenção, numa primeira fase, de amostragem selectiva (escolha ponderada dos locais para recolha de amostras de solo), e numa fase seguinte, por exemplo, para aplicação diferenciada de fertilizantes ou de sementes (ressementeira de espécies), utilizando tecnologia VRT. Fecha-se assim o ciclo de agricultura de precisão (Serrano *et al.*, 2014a).

3.3.5. Tecnologia de aplicação variável (VRT – “Variable Rate Technology”)

A tecnologia de aplicação variável inclui dispositivos electrónicos que permitem variar em trabalho e ao longo da parcela as quantidades de factores de produção aplicadas, adaptando-as às características do solo (Serrano e Peça, 2009). Na prática, concretizam as estratégias desenvolvidas a partir do levantamento da variabilidade do solo e da cultura, fechando o ciclo de agricultura de precisão (Serrano, 2014). Esta tecnologia permite a aplicação diferenciada dos factores de produção (adubos, produtos fitossanitários, sementes, água, etc.), encontrando-se disponíveis no mercado, dois tipos de solução: (i)

“em tempo real”; (ii) “em pós-processamento”. Na tecnologia “em tempo real”, numa só passagem realiza-se o levantamento da variabilidade e a aplicação diferenciada. Além dos sensores para levantamento da variabilidade e dos actuadores na fase de aplicação, exige o desenvolvimento de um algoritmo capaz de interpretar as leituras dos sensores e de convertê-las em decisões imediatas ao nível dos actuadores. Esta tecnologia é especialmente utilizada quando não existe estabilidade temporal dos padrões de variabilidade, como é o caso das pragas, doenças e infestantes, a que corresponde a aplicação de produtos fitossanitários, pesticidas e herbicidas, mas também no caso da fertilização azotada de cobertura (Serrano, 2014).

A tecnologia “em pós-processamento” está associada a situações em que existe razoável estabilidade temporal nos padrões de variabilidade espacial. A informação sobre a variabilidade espacial de factores considerados determinantes é obtida previamente. Essa informação 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 (Serrano, 2014).

4. Material e métodos

4.1. Locais de estudo

A parcela principal em estudo encontra-se na propriedade privada da Quinta da Silveira, concelho de Évora (coordenadas geográficas 38°62.2'N; 7°94.8'W). A parcela de 7 hectares (figura 4) ocupa uma zona com pequeno declive, com uma amplitude de cotas entre 273 e 282m (figura 5), apresenta coberto arbóreo (oliveiras, azinheiras, freixos e amoreiras) e é atravessada por uma linha de água torrencial. Trata-se de uma pastagem natural dominada por gramíneas, não tendo sido sujeita a pastoreio animal em 2014 e 2015, apresentando, por isso, bastante restolho seco. Toda a parcela se encontra delimitada por cerca.



Figura 4. Fotografia aérea da parcela da Quinta da Silveira (a linha branca traduz o limite exterior da parcela; a linha azul representa a linha de água; 1-ovil; 2-amoreira; 3- zona de oliveiras; 4- zona de sobreiros).

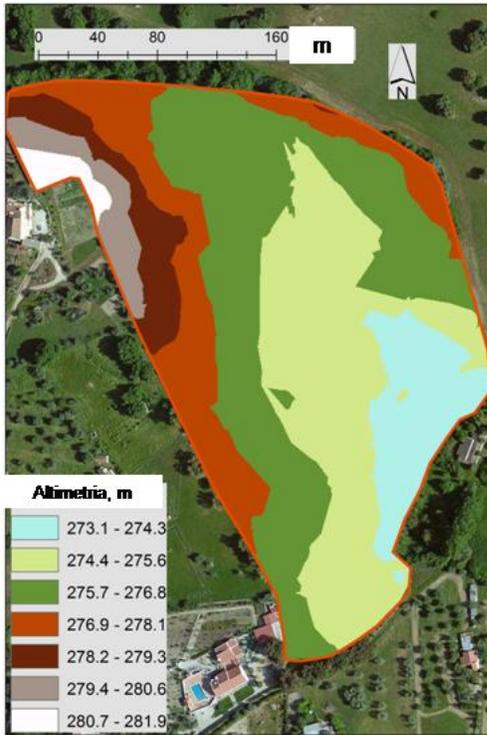


Figura 5. Carta altimétrica da parcela de ensaio na Quinta da Silveira.

Para além dos ensaios principais na Quinta da Silveira, foram realizados ensaios complementares em pastagens semeadas na Herdade da Mitra (coordenadas 38°32.2'N e 8°01.1'W), biodiversas (de gramíneas e leguminosas), tendo como objectivos específicos a avaliação da consistência do sensor de vegetação e da resposta deste perante diferentes coberturas vegetais do solo e diferentes produtividades.

4.2. Caracterização climática

Na caracterização climática foram utilizados os dados da Estação Climática de Évora. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é “Csa” (clima temperado húmido), com verões secos (típico clima Mediterrânico), com temperatura média do mês mais frio inferior a 18°C e superior a -3°C (mês de Janeiro) e a temperatura média do mês mais quente superior a 22°C (mês de Julho). A precipitação anual é da ordem

dos 450-600 mm, concentrada principalmente nos meses de Inverno e de Primavera, praticamente sem precipitação durante o Verão. As figuras 6 e 7 ilustram, respectivamente, os diagramas termopluiométricos da estação meteorológica de Évora, no trinténio 1951-1980 e no ano agrícola de 2014/2015 (neste caso apenas entre Setembro de 2014 e Maio de 2015, dados com efeito sobre a produtividade da pastagem do ano agrícola em causa).

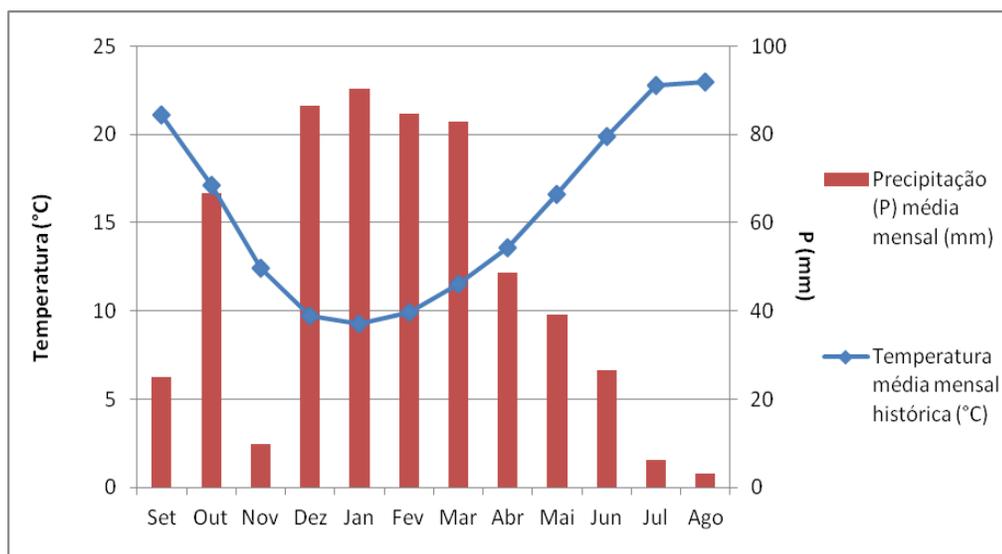


Figura 6. Diagrama termopluiométrico para a estação meteorológica de Évora (segundo dados climáticos dos anos 1951-1980).

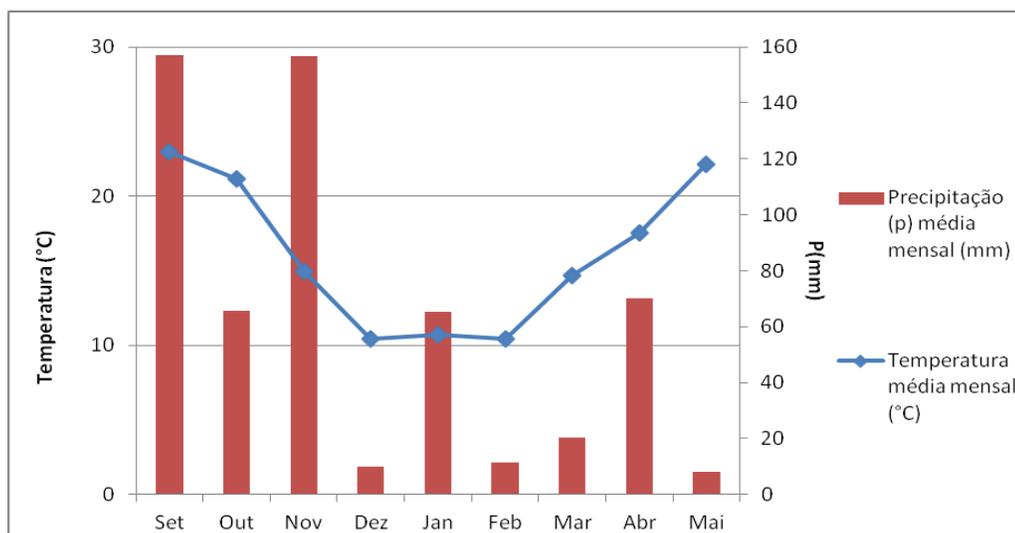


Figura 7. Diagrama termopluiométrico para a estação meteorológica de Évora (segundo dados climáticos do ano agrícola 2014-2015).

A comparação entre as figuras 6 e 7 mostra diferenças muito significativas entre o ano agrícola 2014-2015 e a média histórica em termos de temperatura e precipitação média mensal. Assim, no que respeita à temperatura, enquanto a Primavera de 2014-2015 apresentou valores da ordem dos 14, 17 e 23°C, respectivamente em Março, Abril e Maio, a média histórica no período considerado apresentou valores da ordem dos 12, 14 e 17°C, respectivamente. Relativamente à precipitação acumulada entre Janeiro e Maio, a média histórica apontava para cerca de 350 mm, sendo que em 2015 esta não chegou a metade deste valor. A conjugação da menor quantidade de precipitação com a ocorrência de temperaturas mais altas transforma 2015 num ano atípico, com influência directa no ciclo vegetativo das pastagens de sequeiro no Alentejo.

4.3. Equipamentos utilizados

Foram utilizados nos ensaios realizados os seguintes equipamentos:

-Sensor óptico activo “OptRx[®]” (Ag Leader, 2202 South River Side Drive Ames, IOWA 50010, USA) e respectiva fonte de energia (pequena bateria portátil) (figura 8);

-Receptor Trimble GNSS, GeoExplorer da série 6000, modelo 88951, com precisão sub-métrica (GmbH, Am Prime Parc 11, 65479 Raunheim, Germany) (figura 8);



Figura 8. Sensor óptico (“OptRx[®]”), receptor GPS (“Trimble”) e bateria portátil, utilizados nos ensaios de campo.

-Sonda “Grassmaster II” (Novel Ways Electronic, Hamilton, New Zealand) (figura 9);

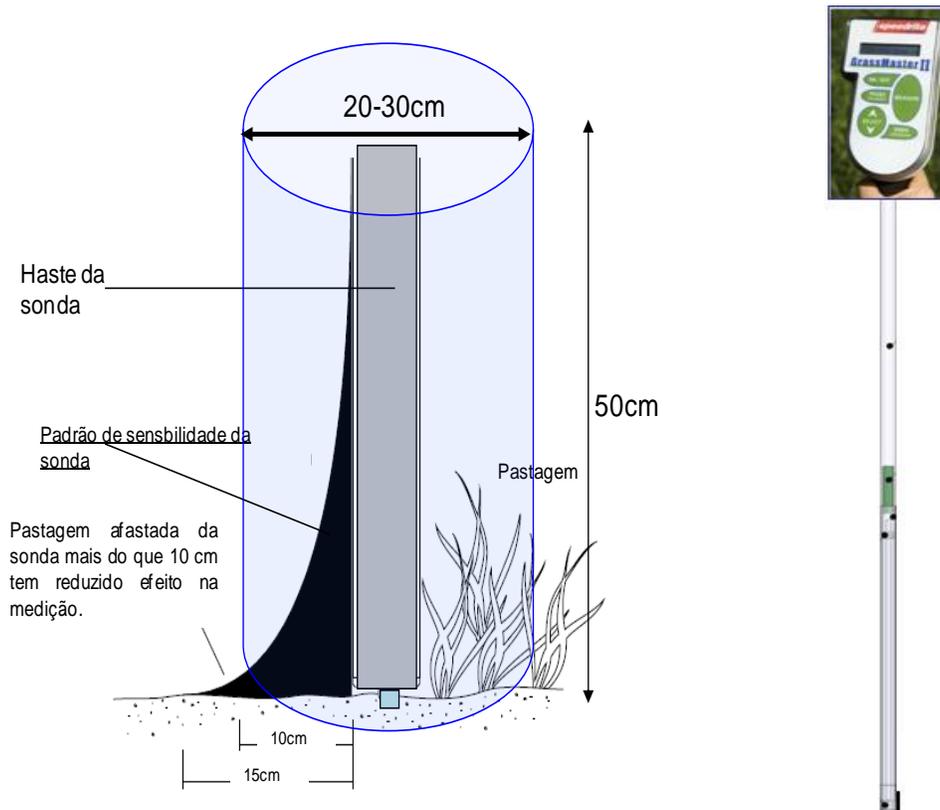


Figura 9. Princípio de funcionamento da sonda de capacitância “Grassmaster II”.

-Máquina fotográfica, modelo Nikon COOLPIX S2800;

-Material para caracterização, corte e recolha da pastagem (régua metálica graduada em centímetros; aro metálico de 0,1 m²; máquina de cortar relva portátil; sacos de plástico identificados com o código do ponto de amostragem).

4.4. Metodologia dos ensaios

4.4.1. Ensaios na Quinta da Silveira

Na parcela de ensaio da Quinta da Silveira encontram-se marcados 47 pontos de amostragem, previamente geo-referenciados com um GPS-RTK (figura 10), constituindo uma quadrícula com 34 m de aresta. Nesta parcela procurou-se monitorizar a evolução da

pastagem durante o período do pico de produção primaveril, tendo sido realizados quatro ensaios entre meados de Março e final de Maio (16/03, 14/04, 30/04 e 21/05). Para este efeito, acompanhou-se a evolução da pastagem percorrendo, em cada data de ensaio, os 47 pontos de amostragem com o sensor óptico activo “OptRx[®]” associado a um receptor Trimble GNSS e uma bateria portátil (figura 11).

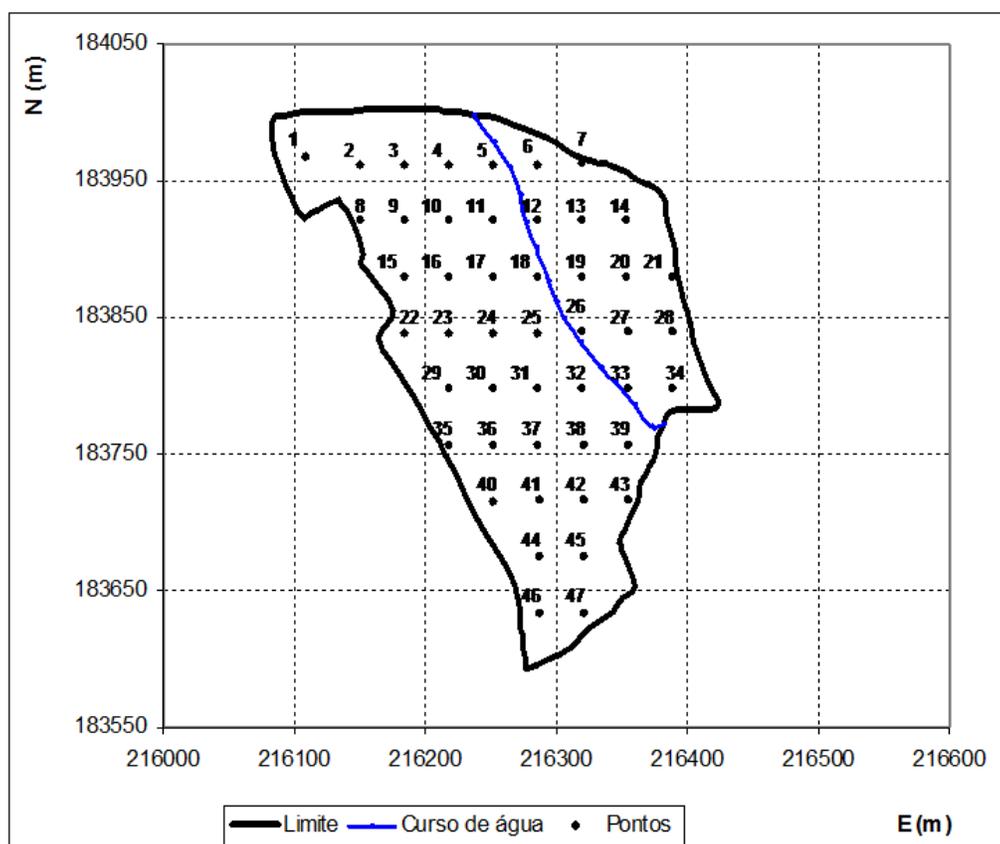


Figura 10. Representação dos 47 pontos de amostragem na Quinta da Silveira.

O sensor, colocado a cerca de 0,75m de altura do solo (cerca de 0,50m acima da pastagem, considerando um valor médio de altura da pastagem de 0,25m), registou durante dois minutos em cada ponto geo-referenciado as medições de radiação em três bandas: i) no vermelho (RED) - 670 nm; ii) no infravermelho próximo (NIR)- 775 nm; e iii) e na transição para o vermelho (RedEdge) -728 nm, a partir das quais calculou os índices de vegetação NDVI (equação 1) e NDRE (“Normalized Difference RedEdge”, equação 2).

O operador, em passo lento, realizou com o sensor um círculo com um raio de 3m em relação à marca central de cada ponto geo-referenciado e imobilizou-se o restante período de tempo (dos dois minutos) no local dentro dessa área circular previamente identificado como representativo da pastagem.

$$\text{NDRE} = \frac{(\text{NIR} - \text{RedEdge})}{(\text{NIR} + \text{RedEdge})} \quad (2)$$



Figura 11. Operador durante a recolha de dados com o sensor óptico “OptRx[®]”.

No último ensaio realizado na Quinta da Silveira (21/05), à medida que o operador do sensor se deslocava para o ponto seguinte, outro operador realizava a medição da capacitância da pastagem com a sonda “Grassmaster II” no mesmo local onde esteve imobilizado o sensor “OptRx[®]”. Após esta medição, uma equipa de dois operadores procedia ao registo fotográfico da pastagem no local e ao corte e recolha do material vegetal contido num aro metálico com 0,1 m² de área. A pastagem recolhida foi transportada em sacos de plástico para o Laboratório de Pastagens e Tecnologia de

Forragens da Universidade de Évora, onde se procedeu à pesagem, desidratação (durante 72h a 65°C) e nova pesagem para determinação da produtividade da pastagem em termos de matéria verde (kg MV/ha) e de matéria seca (kg MS/ha) de acordo com protocolo standard (Serrano *et al.*, 2009).

Os dados medidos pelos sensores (índices NDVI e NDRE no caso do sensor óptico e capacitância no caso da sonda “Grassmaster II”) e as determinações relativas à produtividade da pastagem foram organizados em ficheiro Excel, associados às coordenadas rectangulares dos respectivos pontos de amostragem.

4.4.2. Ensaios complementares

Atendendo a que a parcela de pastagem da Quinta da Silveira apresentava características muito particulares por não se encontrar sob pastoreio regular, foram desenvolvidos três ensaios complementares em pastagens semeadas biodiversas (gramíneas e leguminosas) na Herdade da Mitra, na fase de grande desenvolvimento vegetativo, em plena floração (início de Abril de 2015), os quais obedeceram a um protocolo específico que visou, por um lado, avaliar a consistência do sensor de vegetação e, por outro, a resposta do sensor perante diferentes coberturas vegetais so solo e diferentes produtividades. Em cada um destes ensaios foram estabelecidos percursos a realizar pelo operador com o sensor “OptRx[®]” a uma altura ao solo de 0,75m.

Na figura 12 apresenta-se o diagrama do ensaio complementar 1 (constituído por três zonas: solo nu; gramíneas; leguminosas), no qual se procurou avaliar a consistência do sensor “OptRx[®]” para identificar diferentes coberturas vegetais do solo (leguminosas/gramíneas). O percurso foi realizado cinco vezes (repetições). Procedeu-se de seguida, em cada uma das duas zonas de pastagem, à medição da capacitância e ao corte do material vegetal (correspondente a 0,1m²) para determinação directa da produtividade.

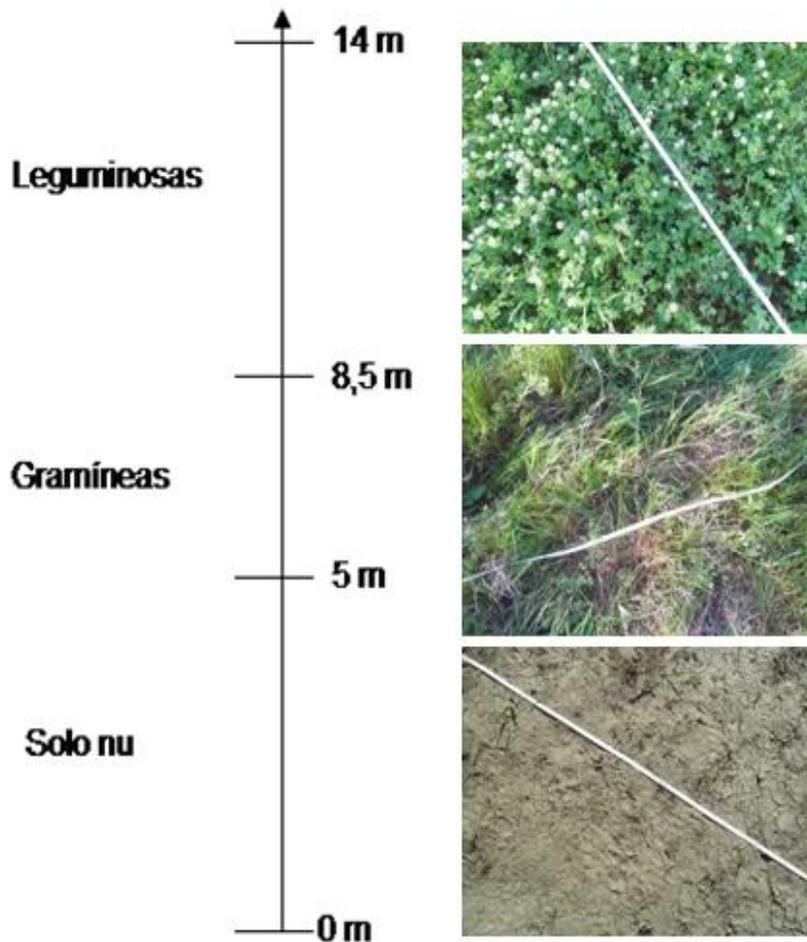


Figura 12. Diagrama do ensaio complementar 1 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015.

Na figura 13 apresenta-se o diagrama do ensaio complementar 2 (constituído por seis zonas: solo nu; gramíneas altas; leguminosas; gramíneas secas; gramíneas baixas; solo nu), o qual teve como objectivos avaliar a consistência do sensor “OptRx[®]” para identificar diferentes coberturas vegetais do solo (leguminosas/gramíneas) e, dentro das gramíneas, identificar diferentes características (altura ou estado de desenvolvimento vegetativo). O percurso foi realizado cinco vezes (repetições). Procedeu-se de seguida, em cada uma das quatro zonas de pastagem, à medição da capacitância e ao corte do material vegetal (correspondente a 0,1m²) para determinação directa da produtividade.

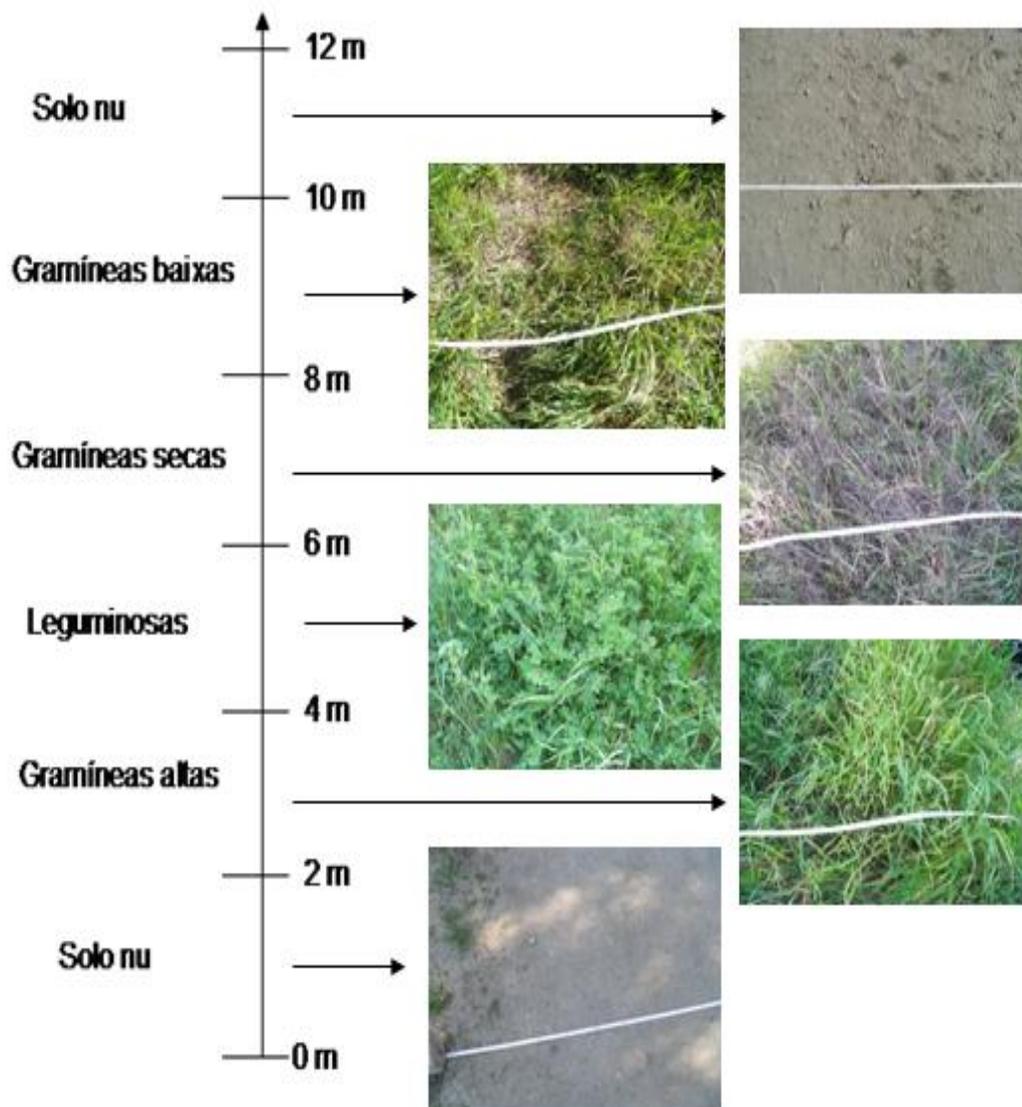


Figura 13. Diagrama do ensaio complementar 2 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015.

Na figura 14 apresenta-se o diagrama do ensaio complementar 3 (constituído por três zonas: leguminosas; gramíneas; ervas secas intercaladas com uma árvore), o qual teve como objectivos avaliar a consistência do sensor “OptRx[®]” para identificar diferentes coberturas vegetais do solo (gramíneas/leguminosas) e, dentro de cada uma destas,

identificar zonas de produtividade diferenciada. O percurso foi realizado três vezes (repetições).

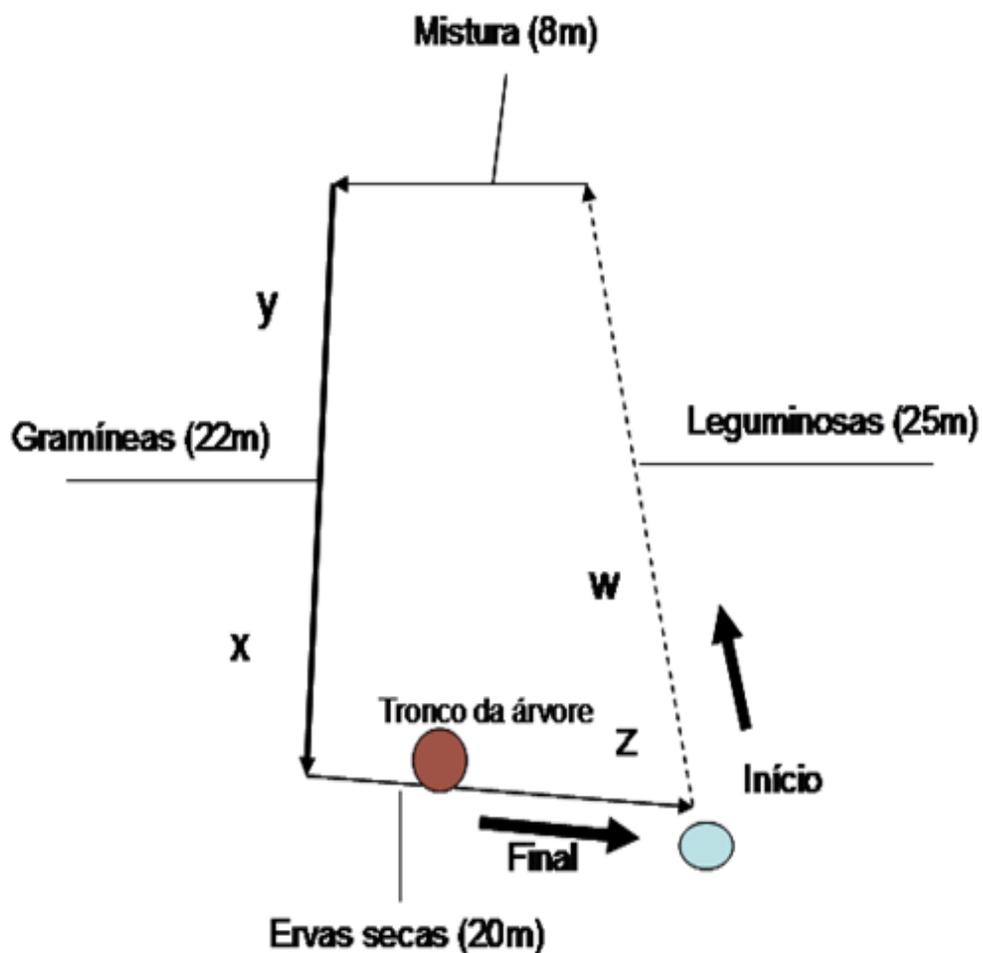


Figura 14. Diagrama do ensaio complementar 3 realizado na Herdade da Mitra em Abril de 2015.

Procedeu-se de seguida, em cada uma das duas zonas de ervas verdes (leguminosas e gramíneas), à identificação de três locais de amostragem com pastagem baixa e três locais de amostragem com pastagem alta (figura 15): zona “y” de gramínea baixa; zona “x” de gramínea alta; zona “z” de leguminosas baixa e zona “w” de leguminosa alta. Em cada um

destes seis locais mediu-se o NDVI, a capacitância e procedeu-se ao corte do material vegetal (correspondente a $0,1m^2$) para determinação directa da produtividade.



Figura 15. Pormenor do ensaio complementar 3: identificação dos locais de recolha de amostras com diferentes produtividades.

4.5. Tratamento estatístico dos dados

Os dados obtidos no campo (NDVI, NDRE, capacitância e produtividade da pastagem) foram sujeitos a análise estatística descritiva (cálculo da média, intervalo de variação, desvio padrão e coeficiente de variação). Procedeu-se também ao estabelecimento de correlações entre parâmetros com um nível de significância estatística de 95% ($p < 0,05$).

Os dados do NDVI, da capacitância e da produtividade da pastagem foram tratados no software ArcGIS 10.2 (ESRI, Redlands, CA) para elaboração dos mapas respectivos. Utilizou-se o processo de interpolação por “krigagem” com um “lag size” de 15m.

5. Resultados e discussão

5.1. Ensaio na Quinta da Silveira

5.1.1. Índices de vegetação NDRE e NDVI

Os índices de vegetação são indicadores da condição em que se encontra a vegetação de uma determinada parcela. Valores de NDVI próximos da unidade significam maior cobertura do solo com vegetação fotossinteticamente activa. No extremo contrário, valores de NDVI próximos de zero correspondem a zonas de solo descoberto (Dusseux *et al.*, 2015).

Os índices de vegetação da pastagem da Quinta da Silveira (NDRE e NDVI) foram recolhidos no campo usando o sensor óptico “OptRx[®]” em quatro datas, entre meados de Março e o final de Maio de 2015. A análise estatística descritiva (quadro 1) permite fazer uma primeira abordagem à variabilidade espacial e temporal da pastagem da parcela. No conjunto das datas de medição os valores dos índices (NDRE e NDVI) para os 47 pontos amostrados apresentam bastante consistência em termos de intervalo de variação, média ou coeficiente de variação (CV). O CV em qualquer dos índices e nas quatro datas de medição oscila entre 13 e 16%.

Quadro 1 - Estatística descritiva dos índices de vegetação calculados (NDRE e NDVI) em diferentes datas, no conjunto dos 47 pontos de amostragem da pastagem da Quinta da Silveira.

Índice	NDRE				NDVI			
	16/03	14/04	30/04	21/05	16/03	14/04	30/04	21/05
Datas (2015)	16/03	14/04	30/04	21/05	16/03	14/04	30/04	21/05
Mínimo	0,119	0,127	0,142	0,108	0,329	0,344	0,391	0,310
Máximo	0,279	0,263	0,268	0,243	0,814	0,786	0,795	0,759
Média	0,191	0,192	0,200	0,164	0,521	0,569	0,586	0,468
Desvio Padrão	0,027	0,025	0,027	0,025	0,073	0,074	0,080	0,073
CV (%)	14,8	13,0	13,6	13,4	14,0	13,0	13,6	15,6

CV- Coeficiente de variação;

5.1.2. Correlação entre índices de vegetação (NDRE versus NDVI)

A figura 16 mostra a evolução dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) nos 47 pontos amostrados da pastagem da Quinta da Silveira, entre 16/03 e 21/05 de 2015.

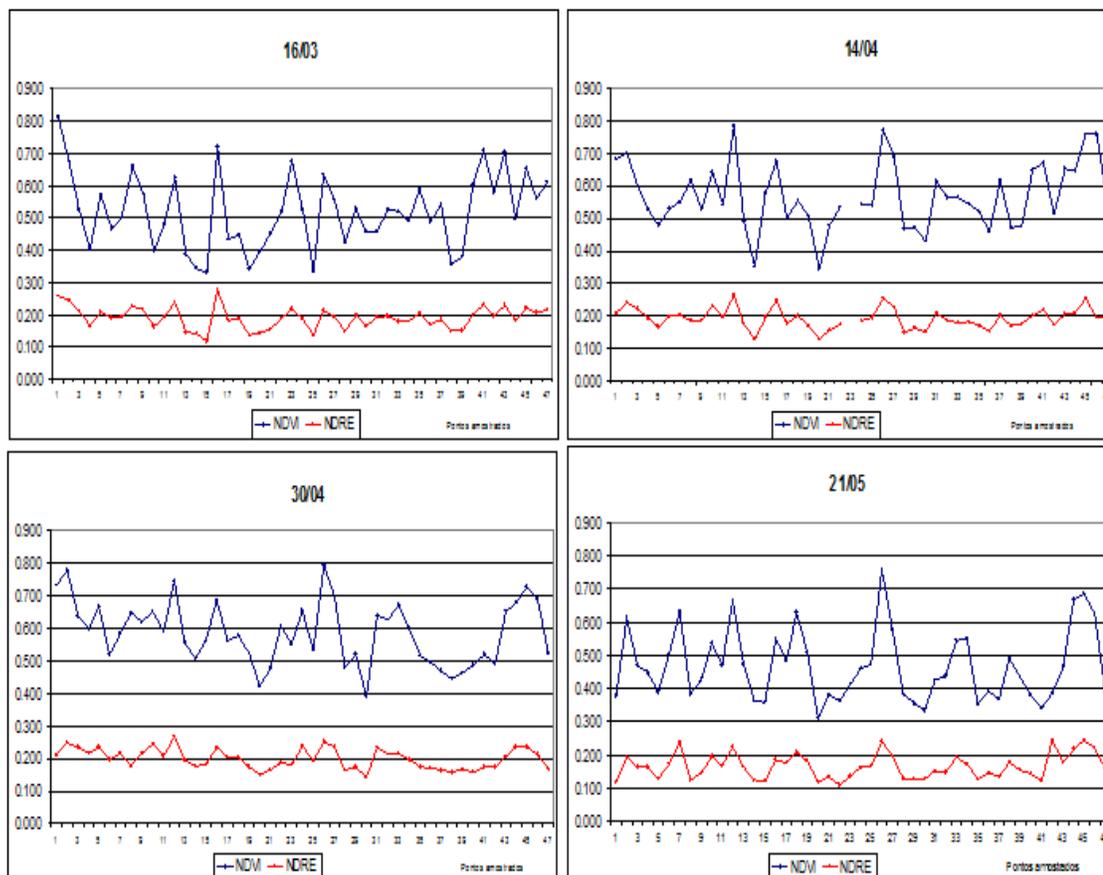


Figura 16- Evolução dos índices de vegetação (NDVI e NDRE) nos 47 pontos amostrados da pastagem da Quinta da Silveira, entre Março e Maio de 2015.

É possível evidenciar um padrão semelhante para os dois índices (NDVI e NDRE) em todos os momentos de avaliação. A semelhança de padrões é reforçada pelos elevados coeficientes de correlação linear (“r” entre 0,878 e 0,939) entre ambos os índices (NDRE e NDVI) em cada uma das datas de avaliação (quadro 2). Em qualquer dos dois índices, verificam-se ainda correlações significativas praticamente entre todas as datas de amostragem. É exceção a correlação não significativa dos índices de vegetação obtidos em

16/03 e 21/05, o que poderá traduzir a natural evolução da pastagem ao longo do seu ciclo vegetativo.

Quadro 2 - Coeficientes de correlação linear (r) entre os índices de vegetação NDRE e NDVI em diferentes datas de amostragem da pastagem da Quinta da Silveira.

Índice	Datas	NDRE				NDVI			
		(2015)	16/03	14/04	30/04	21/05	16/03	14/04	30/04
NDRE	16/03	1	0,620**	0,475*	0,190 ^{ns}	0,939**	0,653**	0,603**	0,243 ^{ns}
	14/04		1	0,746**	0,579*	0,530*	0,910**	0,739**	0,684**
	30/04			1	0,572*	0,315*	0,652**	0,910**	0,715**
	21/05				1	0,091 ^{ns}	0,519*	0,483*	0,878**
NDVI	16/03					1	0,643**	0,520*	0,120 ^{ns}
	14/04						1	0,766**	0,626**
	30/04							1	0,671**
	21/05								1

** - Correlação significativa com um grau de confiança de 99% * - Correlação significativa com um grau de confiança de 95%; ns - Correlação não significativa;

Dada a estreita correlação evidenciada entre estes dois índices medidos pelo sensor em qualquer das quatro datas de ensaio, neste trabalho será apenas utilizado o índice NDVI dado que este é o mais comum para representar a vegetação fotossinteticamente activa (Broge e Leblanc, 2000; Gitelson, 2004).

Os mapas da figura 17 mostram a variabilidade espacial do índice NDVI e a sua evolução entre Março e Maio de 2015. Em termos médios (ver quadro 1), o valor do NDVI aumentou sucessivamente entre 16/03 (0,521±0,073), 14/04 (0,569±0,074) e 30/04 (0,586±0,080), tendo diminuído significativamente em 21/05 (0,468±0,073). A evolução positiva deste índice entre meados de Março e final de Abril reflecte a evolução das condições meteorológicas na região (ver figura 7), com as temperaturas médias a chegarem aos 15-20°C e com a ocorrência de valores de precipitação mensal da ordem dos 70 mm.

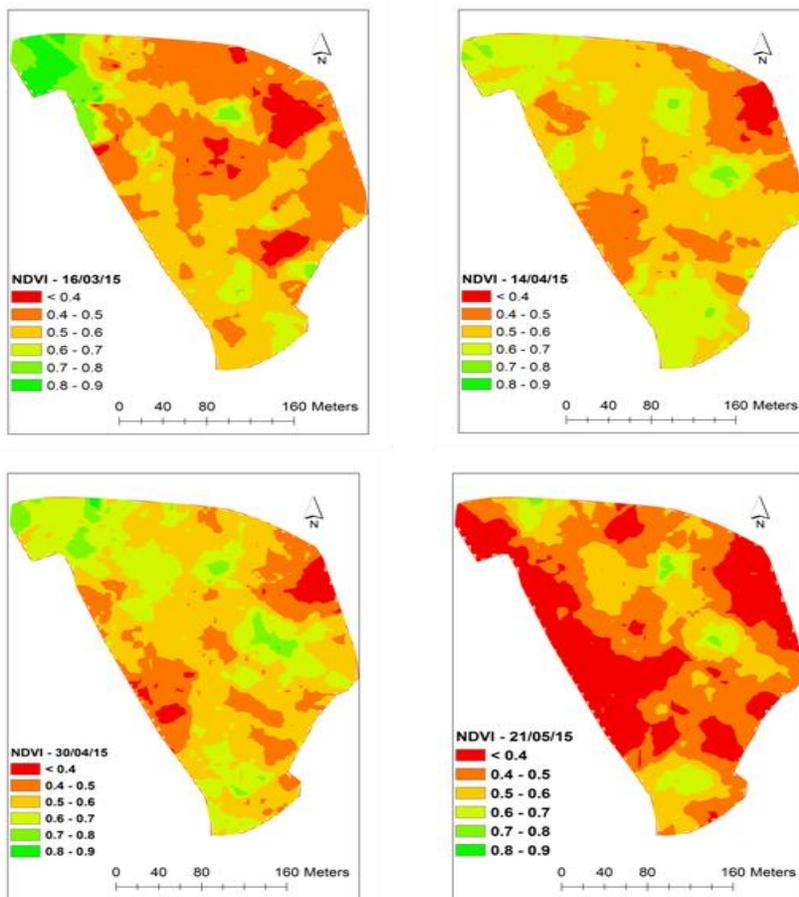


Figura 17 - Mapas dos índices de vegetação (NDVI) da pastagem na Quinta da Silveira, entre Março e Maio de 2015.

A conjugação destas condições proporcionou o crescimento acelerado da pastagem, após um período de Inverno característico, de temperaturas baixas, inibidoras do crescimento vegetativo. É também particularmente evidente a diminuição dos valores de NDVI da pastagem na amostragem realizada em 21/05, depois de uma sucessão de dias onde se verificaram temperaturas anormalmente altas para a época do ano, as quais, conjugadas com a ausência de precipitação, aceleraram o ciclo vegetativo das plantas de sequeiro, com o aparecimento de muitas zonas com vegetação seca. Este padrão, fortemente dependente da conjugação do binómio temperatura/precipitação é característico de pastagens Mediterrânicas de sequeiro (Marques da Silva *et al.*, 2008). Também

Kumhálová *et al.*, (2011) confirmaram que a disponibilidade de água é um dos factores fundamentais na produtividade das pastagens, sobretudo em anos secos.

5.1.3. Medição da capacitância e da produtividade da pastagem

A parcela de ensaio é atravessada por uma linha de água (ver figura 4) e apresenta uma extensa zona de vale que mantém humidade superficial durante todo o Inverno e parte da Primavera. Por outro lado, a inexistência de pastoreio animal no ano de 2014 levou à acumulação de ervas secas do ano anterior em toda a zona de baixa. A conjugação destas duas condições impediu a utilização da sonda de capacitância “Grassmaster II” durante grande parte do período vegetativo da pastagem, atendendo ao seu princípio de funcionamento, o qual requer que a vegetação não tenha humidade exterior, sendo a medição afectada negativamente pela existência de material vegetal senescente e húmido. Por esta razão, apenas se procedeu à medição da capacitância e recolha de pastagem na última data de ensaio. No quadro 3 são apresentados os resultados da estatística descritiva referente à avaliação da capacitância, da produtividade (em termos de matéria verde e de matéria seca, em kg/ha) e da percentagem de matéria seca da pastagem da Quinta da Silveira em 21 de Maio de 2015.

Quadro 3 - Estatística descritiva da capacitância e da produtividade da pastagem em termos de matéria verde (kg/ha) e de matéria seca (em kg/ha e em %) em 21 de Maio de 2015, no conjunto dos 47 pontos de amostragem da Quinta da Silveira.

Parâmetro	CMR	MV (kg/ha)	MS (kg/ha)	MS (%)
Mínimo	3134	2198	608	10,8
Máximo	9631	22330	4450	56,2
Média	5321	6373	1916	33,1
Desvio Padrão	1997	4360	922	8,7
CV (%)	37,5	68,4	48,1	24,2

CV- Coeficiente de variação; CMR- Capacitância; MV- Matéria verde; MS- Matéria seca;

Ao contrário dos índices de vegetação, a produtividade da pastagem apresenta valores de CV da ordem dos 50% (no caso da MS) a 70% (na MV), o que evidencia a extraordinária heterogeneidade da parcela, nomeadamente em termos de condições de drenagem do solo, com reflexo no ciclo vegetativo das plantas. Ainda no que se refere à produtividade, esta pastagem apresenta valores médios relativamente baixos (inferiores a 2000 kg de MS/ha) e que reflectem um manejo desadequado do pastoreio animal, associado a condições edafo-climáticas Mediterrânicas, com solos pobres e distribuição irregular da precipitação (Efe Serrano, 2006).

Na figura 18 são apresentados os mapas que evidenciam os padrões espaciais da capacitância, da produtividade da pastagem (em termos de matéria verde e de matéria seca) e da percentagem de matéria seca. Os teores mais baixos de matéria seca da pastagem (inferiores a 30%) verificam-se nos extremos opostos da parcela (Noroeste e Sudeste), correspondendo-lhe também maior produtividade da pastagem e valores mais elevados de capacitância medida pela sonda “Grassmaster II”.

A avaliação da pastagem da Quinta da Silveira mostra essencialmente três zonas (figura 19; quadro 4):

I) Algumas bolsas de leguminosas (principalmente *Trifolium subterraneum*) representam apenas cerca de 10% da área da parcela (5 das 47 quadrículas de amostragem); em zonas de sombra, bem drenadas, com maior produtividade em verde e menor percentagem de matéria seca, correspondendo-lhe índices de vegetação e valores de capacitância relativamente elevados (NDVI= 0,563±0,176; CMR= 7158±2103);

II) Predominância de gramíneas (principalmente *Lolium rigidum*) em cerca de metade da área da parcela (22 das 47 quadrículas), na zona mais plana e com tendência para encharcamento durante o Inverno, com restolho seco do ano anterior a condicionar o desenvolvimento vegetativo; valores intermédios de índices de vegetação e de capacitância (NDVI= 0,490±0,095; CMR= 5749±2070);

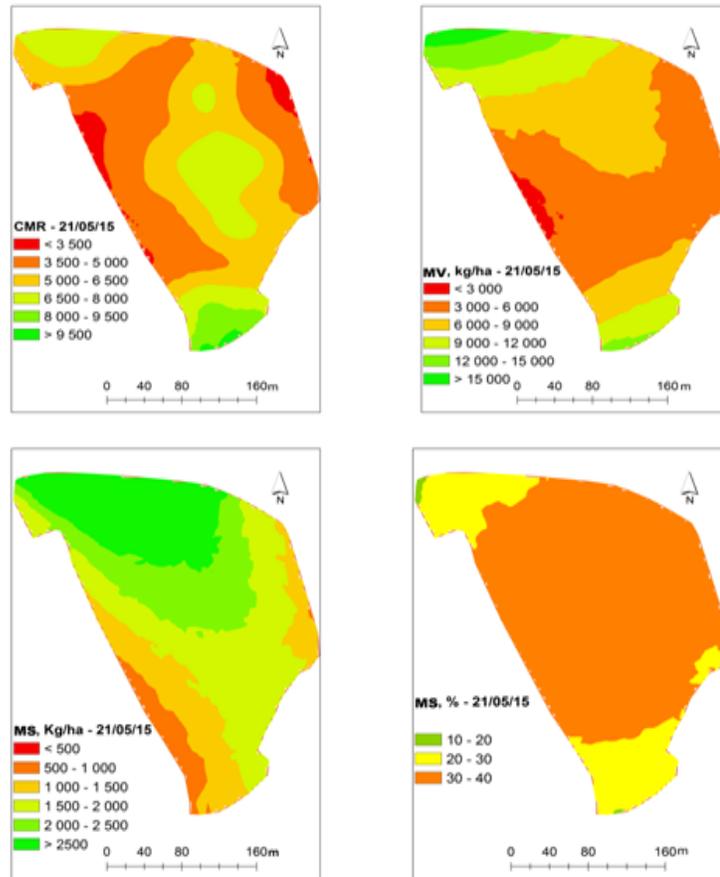


Figura 18- Mapas da capacitância (CMR), da produtividade da pastagem, em termos de kg de matéria verde (MV)/ha e de kg de matéria seca (MS)/ha e da percentagem de MS, na Quinta da Silveira em 21 de Maio de 2015.

III) Zona sub arbórea que ocupa cerca de 40% da área da parcela (20 das 47 quadrículas), com reduzida exposição solar, onde predominam outras espécies botânicas (principalmente *Anagalis arvensis*), rasteiras e de baixa produtividade (grande parte inferior a 1000 kg de MS/ha); a fraca cobertura vegetal origina baixos índices de vegetação e de capacitância ($NDVI= 0,421\pm 0,086$; $CMR= 4344\pm 1350$).

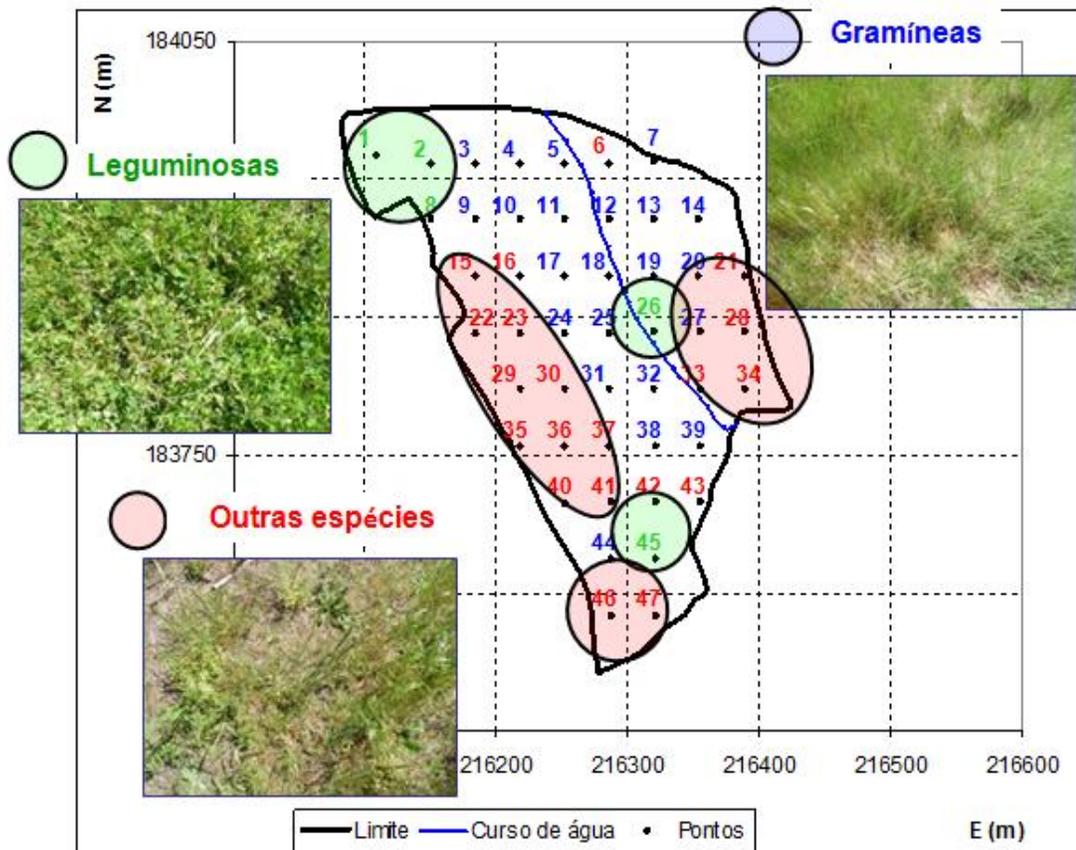


Figura 19- Zonas tipo de desenvolvimento da pastagem na Quinta da Silveira em Maio de 2015.

Quadro 4 - Características das diferentes zonas da pastagem da Quinta da Silveira em Maio de 2015.

Zona (número de amostras)	MV (kg/ha)	MS (%)	MS (kg/ha)	CMR	NDVI
I) Leguminosas (n=5)	12098±6380	22,2±11,0	2248±583	7158±2103	0,563±0,176
II) Gramíneas (n=22)	7235±2467	34,6±6,6	2439±806	5749±2070	0,490±0,095
III) Outras plantas (n=20)	3995±3911	34,2±8,6	1225±652	4344±1350	0,421±0,086

Apesar desta pastagem apresentar um ecossistema com elevado potencial resultante da disponibilidade de água e da cobertura arbórea, o seu estado actual justificava intervenção no sentido de repor o equilíbrio biodiverso, o que poderia passar por correcções ao nível do sistema de drenagem do solo, pela fertilização fosfatada, pela ressementeira diferenciada de leguminosas e pelo restabelecimento do pastoreio regular.

5.1.4. Correlação entre o NDVI, a capacitância e a produtividade da pastagem

O interesse em avaliar ferramentas expeditas que facilitem a monitorização da pastagem é um desafio que diversas equipas de investigação têm levado a cabo em todo o mundo. A sonda de capacitância tem mostrado resultados muito interessantes em termos de estimativa da produtividade de pastagens biodiversas do Alentejo (Serrano *et al.*, 2011).

O índice NDVI tem sido particularmente utilizado para apoio à gestão diferenciada da fertilização azotada em cereais (Povh *et al.*, 2008), atendendo, no entanto, à capacidade de trabalho e à facilidade de utilização deste tipo de sensores próximos, poderá representar uma alternativa aos sistemas de avaliação da variabilidade das pastagens. Os resultados obtidos no conjunto dos 47 pontos de amostragem da parcela da Quinta da Silveira em 21 de Maio de 2015 permitiram estabelecer correlações entre estes parâmetros (a capacitância e o NDVI) e a produtividade da pastagem.

A figura 20 ilustra a correlação entre o NDVI e a capacitância e entre o NDVI e a produtividade da pastagem (kg MV/ha). Os coeficientes de determinação obtidos nas equações lineares (“R²”, da ordem dos 0,5) indicam que estas ferramentas (sonda de capacitância e sensor de vegetação) dão respostas muito próximas e aceitáveis na caracterização da produtividade da pastagem. Zonas com maior produção de matéria verde apresentam valores mais elevados de capacitância e de NDVI, o que reflecte o princípio de funcionamento de ambos os sensores envolvidos.

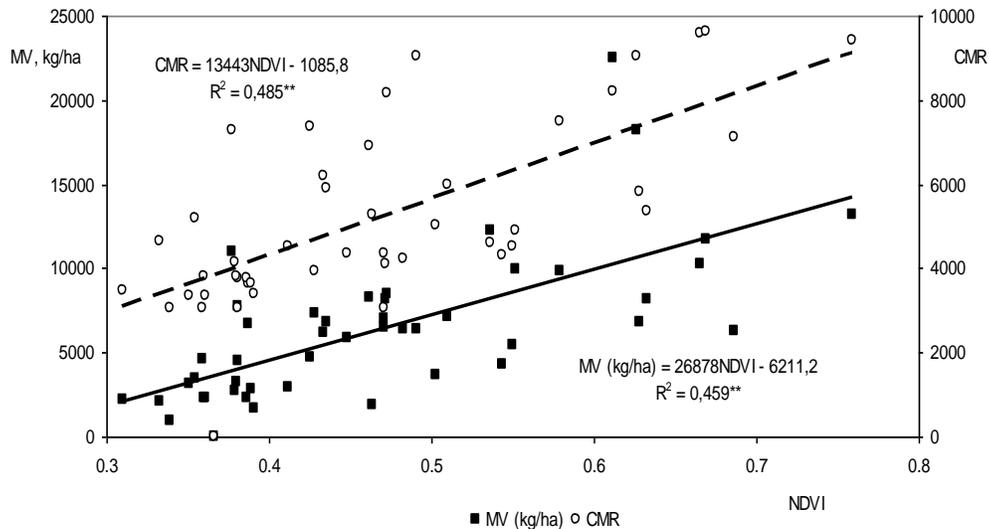


Figura 20- Correlação entre o NDVI e a capacitância e entre o NDVI e a produtividade da pastagem (kg MV/ha).

A figura 21 ilustra a correlação entre o NDVI e a produtividade da pastagem (em termos de matéria seca por unidade de área) e entre o NDVI e a percentagem de matéria seca da pastagem. Apesar de significativas, estas correlações são mais fracas do que a obtida entre o NDVI e a matéria verde, o que deverá traduzir a heterogeneidade do estado vegetativo das plantas (em função da espécie botânica) e a consequente percentagem de matéria seca. Como seria de esperar, verifica-se uma tendência para valores mais altos de NDVI em plantas com teores mais baixos de matéria seca.

A figura 22 mostra a correlação da produtividade da pastagem (MV e MS/ha) e da percentagem de MS da pastagem com a capacitância (CMR). Este sensor apresenta um comportamento semelhante ao do sensor de vegetação, sendo a correlação da CMR com a MV mais forte do que com a MS e apresentando tendência para valores mais elevados da CMR em zonas de pastagem com menores teores de matéria seca. A correlação mais fraca da CMR com a produtividade da pastagem em termos de matéria seca reflecte à já referida interferência do material vegetal senescente que permaneceu na pastagem em virtude da ausência de pastoreio animal.

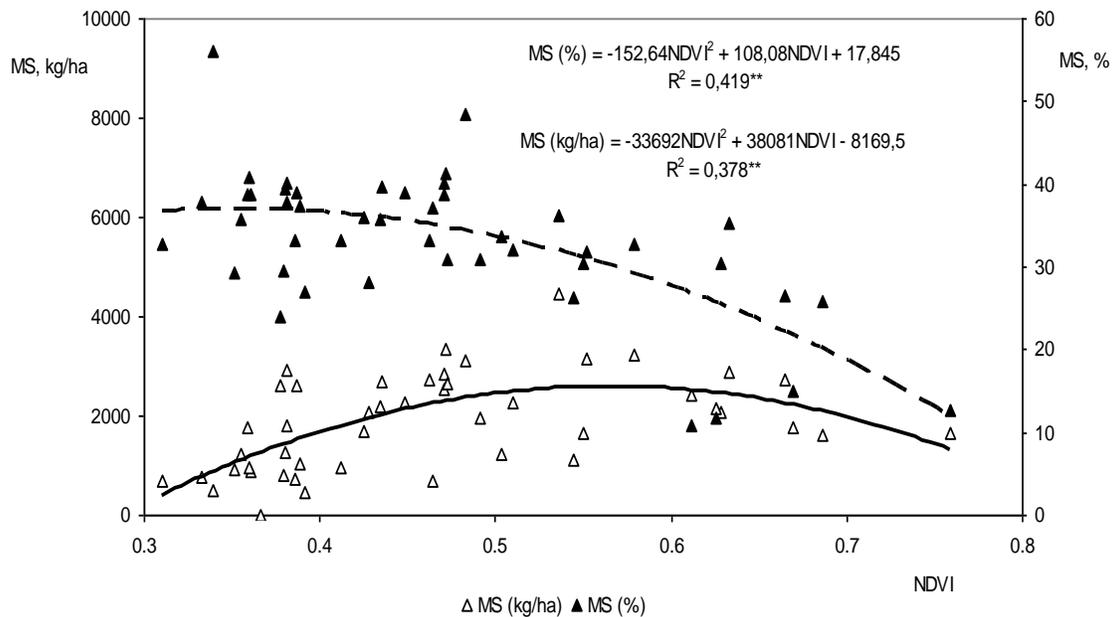


Figura 21- Correlação entre o NDVI e produtividade da pastagem (em termos de matéria seca por unidade de área) e entre o NDVI e a percentagem de matéria seca da pastagem.

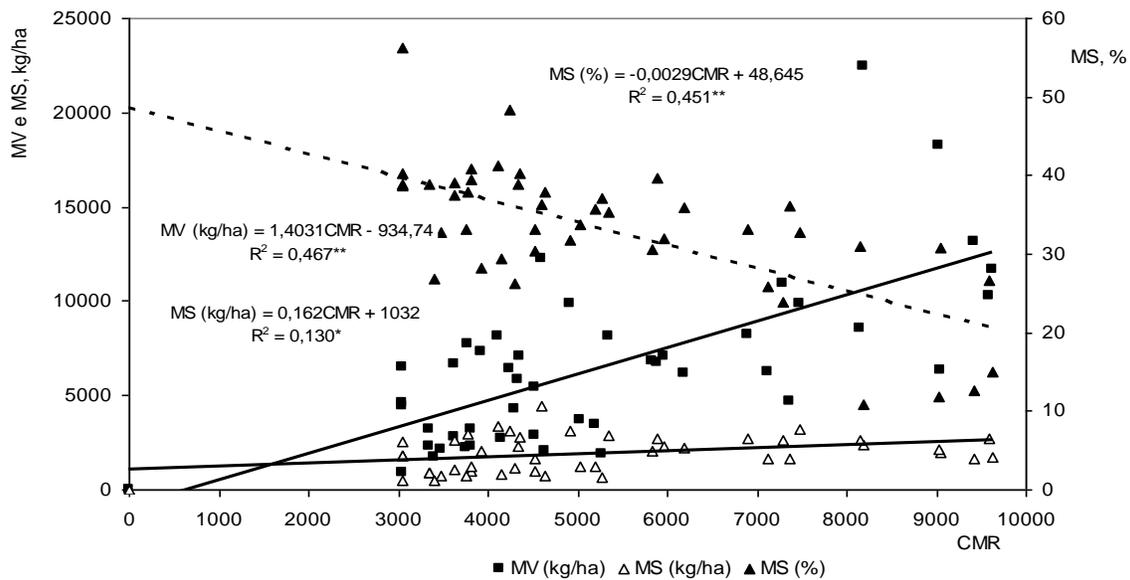


Figura 22- Correlação entre a capacitância (CMR) e a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde e de matéria seca por unidade de área) e entre a capacitância e a percentagem de matéria seca da pastagem.

5.2. Ensaios complementares

5.2.1. Ensaio complementar 1

O quadro 5 apresenta o valor médio das principais características das duas zonas de pastagem consideradas no ensaio (gramíneas e leguminosas). A zona coberta por leguminosas (espécie predominante: *Trifolium resupinatum*) apresenta claramente maior produtividade em verde e menor percentagem de matéria seca do que a zona de gramíneas (espécie predominante: *Holcus lanatus*), indiciando um estado menos avançado de desenvolvimento vegetativo, a que corresponderam valores mais elevados de NDVI e de capacitância.

Quadro 5 - Valor médio das principais características das duas zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 1.

Zonas de pastagem (altura)	CMR	MV (kg/ha)	MS (%)	MS (kg/ha)	NDVI
Gramíneas (20 cm)	6081±1263	9700	28,9	2803	0,600±0,078
Leguminosas (30 cm)	7957±782	18700	13,9	2599	0,784±0,050

CMR- Capacitância; MV- Matéria verde; MS- Matéria seca;

O quadro 6 resume os valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas três zonas consideradas no ensaio (solo nu, gramíneas e leguminosas). É evidente a estabilidade dos valores de NDVI no conjunto das repetições realizadas, em qualquer das zonas consideradas (0,14-0,16 para solo nu; 0,59-0,63 no caso da gramínea e 0,78-0,79 no caso da leguminosa), o que demonstra a consistência do sensor na identificação de diferentes coberturas vegetais do solo.

Quadro 6 – Valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas três zonas consideradas no ensaio complementar 1.

Repetição	I	II	III	IV	V
Solo nu	0,154±0,023	0,143±0,003	0,161±0,024	0,160±0,018	0,157±0,006
Gramíneas (20 cm)	0,611±0,054	0,585±0,070	0,589±0,099	0,586±0,060	0,631±0,092
Leguminosas (30 cm)	0,786±0,042	0,783±0,048	0,788±0,059	0,777±0,050	0,788±0,049

A figura 23 ilustra esta mesma consistência entre repetições na medição do NDVI. A figura 24 mostra o pormenor de uma das repetições, sendo evidente a transição entre zonas do campo com diferente cobertura vegetal.

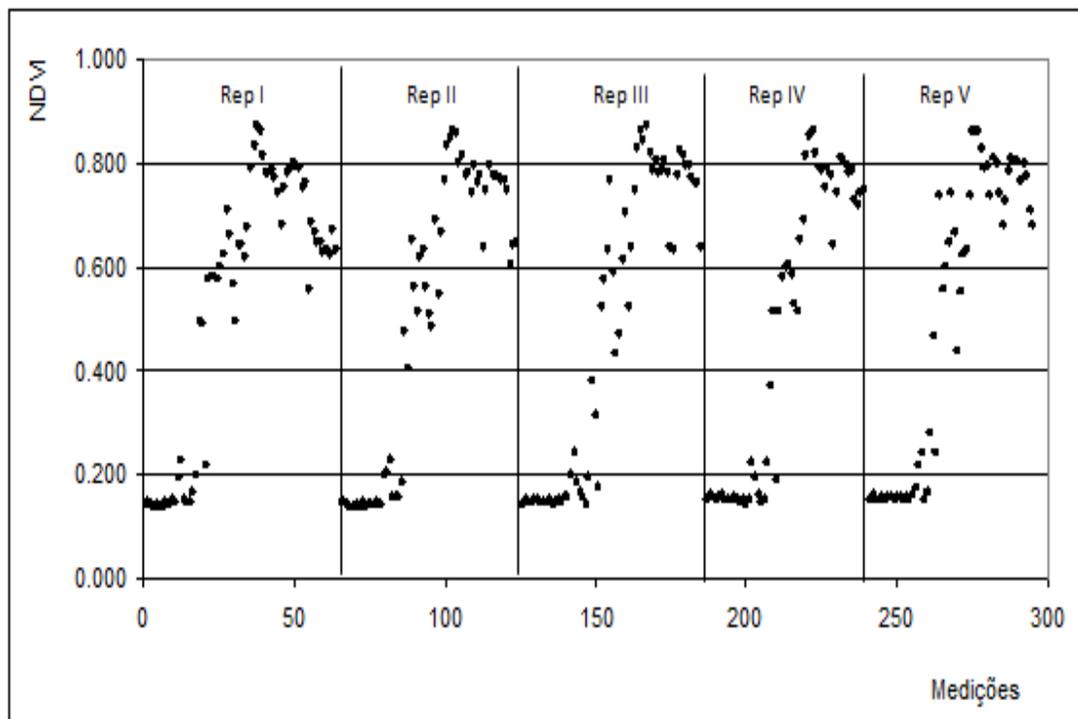


Figura 23- NDVI registado nas cinco repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 1.

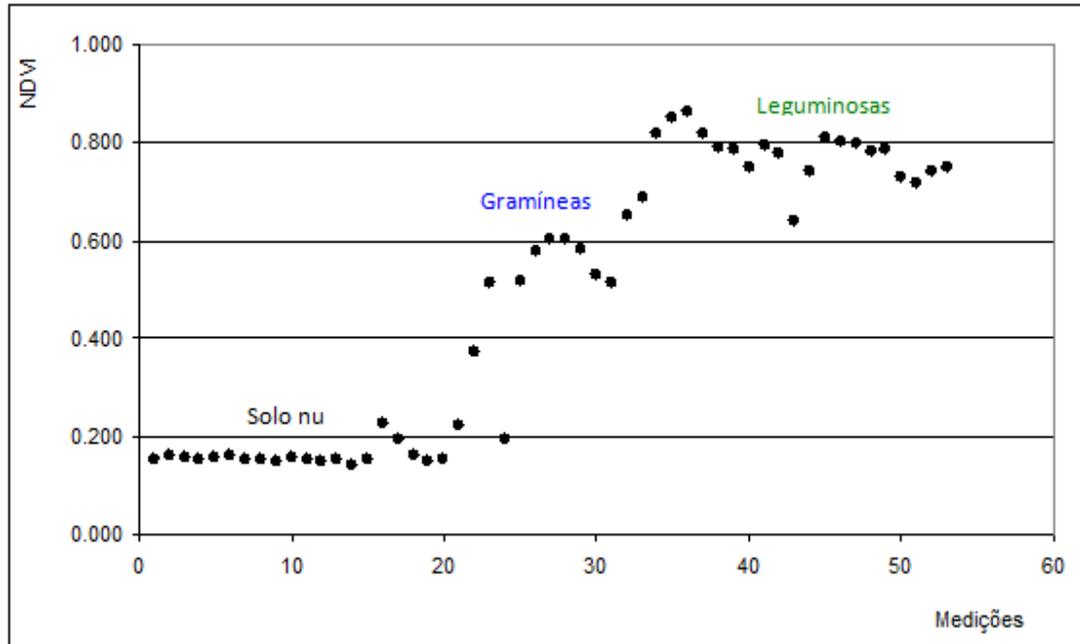


Figura 24- NDVI registado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 1: identificação dos três patamares correspondentes a solo nu, gramíneas e leguminosas.

5.2.2. Ensaio complementar 2

O quadro 7 apresenta o valor médio das principais características das quatro zonas de pastagem consideradas no ensaio (gramíneas altas, leguminosas, gramíneas secas e gramíneas baixas). Os valores mais elevados de NDVI e de capacitância foram obtidos no caso da leguminosa (espécies predominantes: *Medicago polymorpha* e *Medicago rugosa*) e da gramínea (espécies predominantes: *Avena sterilis* e *Hordeum murinum*), alta e verde; zonas de maior produtividade em verde (MV) e de menor percentagem de matéria seca (< 20%). Os valores mais baixos de NDVI e de capacitância foram obtidos na zona de gramínea seca, com menor produtividade. A gramínea baixa apresentou valores intermédios de NDVI e de capacitância.

Quadro 7 – Valores médios das principais características das quatro zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 2 (gramíneas altas, leguminosas, gramíneas secas e gramíneas baixas).

Zonas de pastagem (altura)	Capacitância	MV (kg/ha)	MS (%)	MS (kg/ha)	NDVI
Gramínea alta (50 cm)	5666±253	17900	19,0	3401	0,741±0.023
Leguminosa densa (25 cm)	5680±214	20100	12,9	1602	0,857±0.008
Gramínea seca (10 cm)	3878±172	3900	32,7	1275	0,282±0.012
Gramínea baixa (15 cm)	4911±188	4900	30,8	1509	0,576±0.030

O quadro 8 resume os valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas seis zonas consideradas no ensaio (duas de solo nu e as quatro já referidas de pastagem). Também aqui é evidente a estabilidade dos valores de NDVI no conjunto das repetições realizadas, em qualquer das zonas consideradas (0,10-0,13 para solo nu inicial; 0,70-0,77 no caso da gramínea alta; 0,85-0,87 no caso da leguminosa; 0,27-0,30 no caso da gramínea seca; 0,55-0,63 na gramínea baixa; e 0,09 no solo nu final), o que demonstra a consistência do sensor na identificação de diferentes coberturas vegetais do solo e, no caso concreto, de diferentes alturas e estados de desenvolvimento vegetativo.

Quadro 8 – Valores do NDVI medidos em cinco repetições, nas seis zonas consideradas no ensaio complementar 2 (duas de solo nu, uma de leguminosas e três de gramíneas).

Repetição	I	II	III	IV	V
Solo nu	0,104±0,008	0,122±0,005	0,122±0,004	0,126±0,006	0,126±0,005
Gramínea alta (50 cm)	0,765±0,016	0,704±0,037	0,740±0,017	0,744±0,027	0,751±0,014
Leguminosa densa (25 cm)	0,852±0,004	0,863±0,007	0,851±0,008	0,850±0,005	0,867±0,004
Gramínea seca (10 cm)	0,282±0,006	0,280±0,007	0,303±0,007	0,275±0,004	0,272±0,003
Gramínea baixa (15 cm)	0,628±0,006	0,568±0,011	0,561±0,006	0,554±0,013	0,567±0,004
Solo nu	0,086±0,014	0,089±0,004	0,084±0,005	0,091±0,004	0,089±0,004

A consistência das medições de NDVI é evidenciada na figura 25.

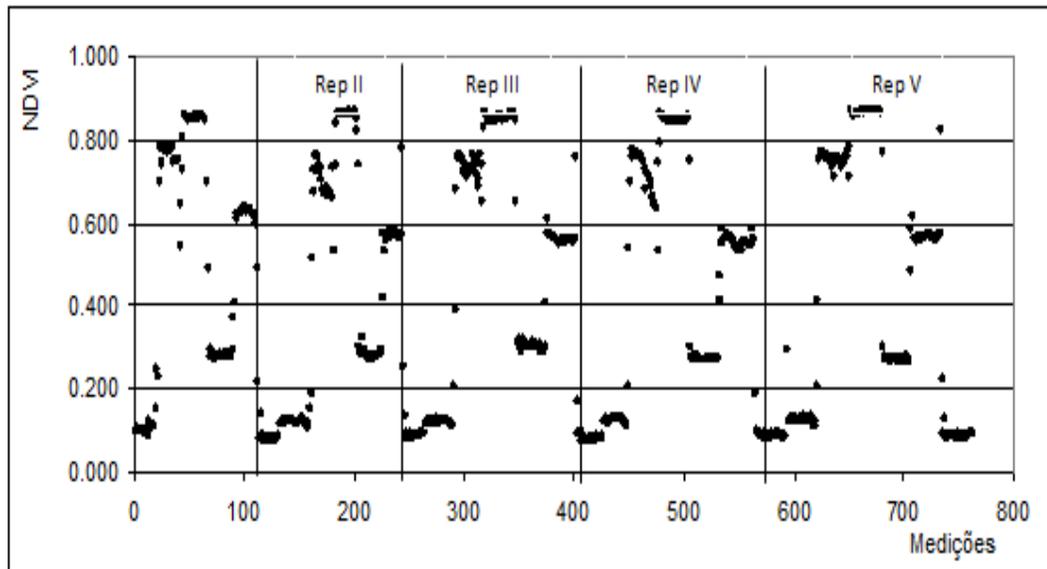


Figura 25- NDVI registrado nas cinco repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 2.

A figura 26 mostra o pormenor de uma das repetições, sendo evidente a transição entre zonas do campo com diferente cobertura vegetal.

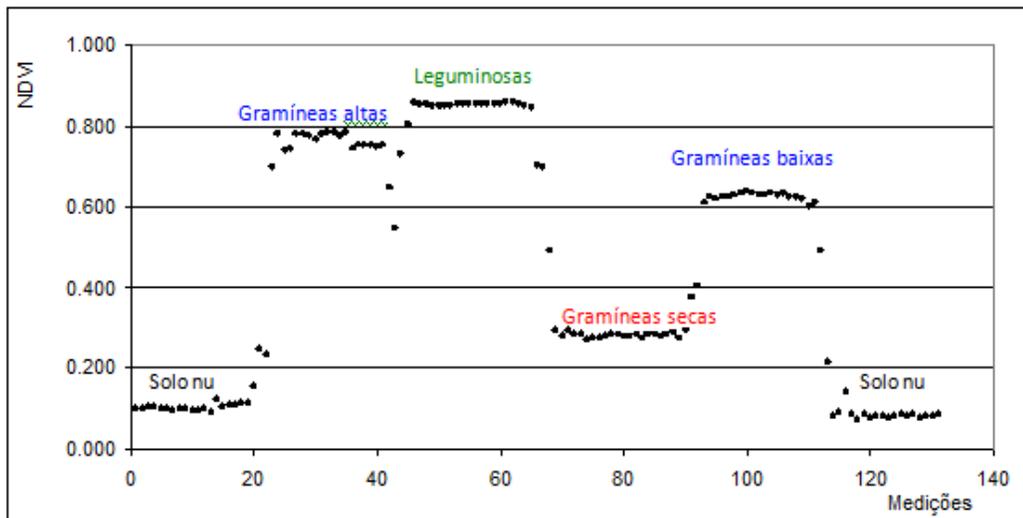


Figura 26- NDVI registrado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 2: identificação dos seis patamares correspondentes a solo nu (inicial e final), gramíneas (altas, baixas e secas) e leguminosas.

5.2.3. Ensaio complementar 3

A figura 27 ilustra a consistência das medições de NDVI realizadas em três voltas ao circuito de ensaio. A figura 28 mostra o pormenor de uma das repetições, sendo evidente a transição entre zonas do campo com diferente cobertura vegetal.

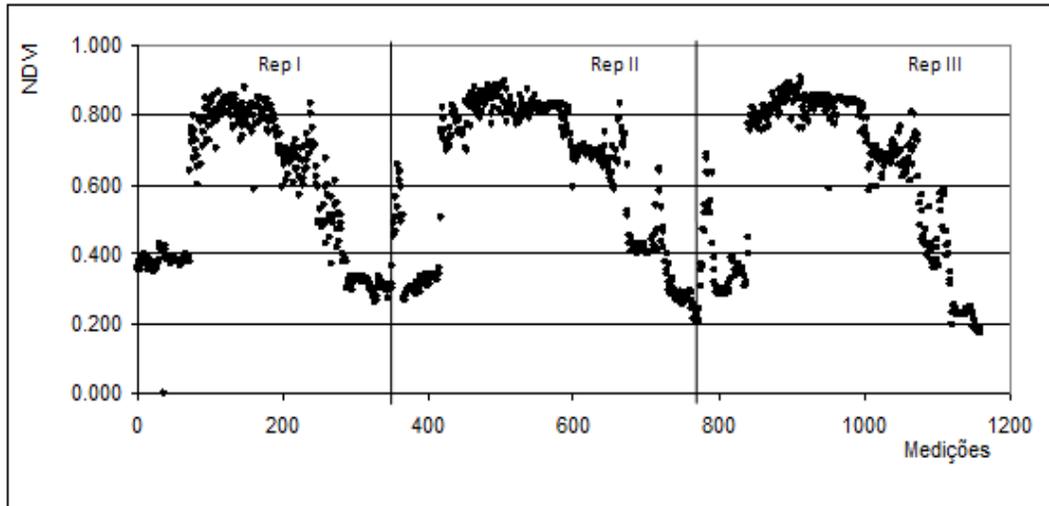


Figura 27- NDVI registado nas três repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 3.

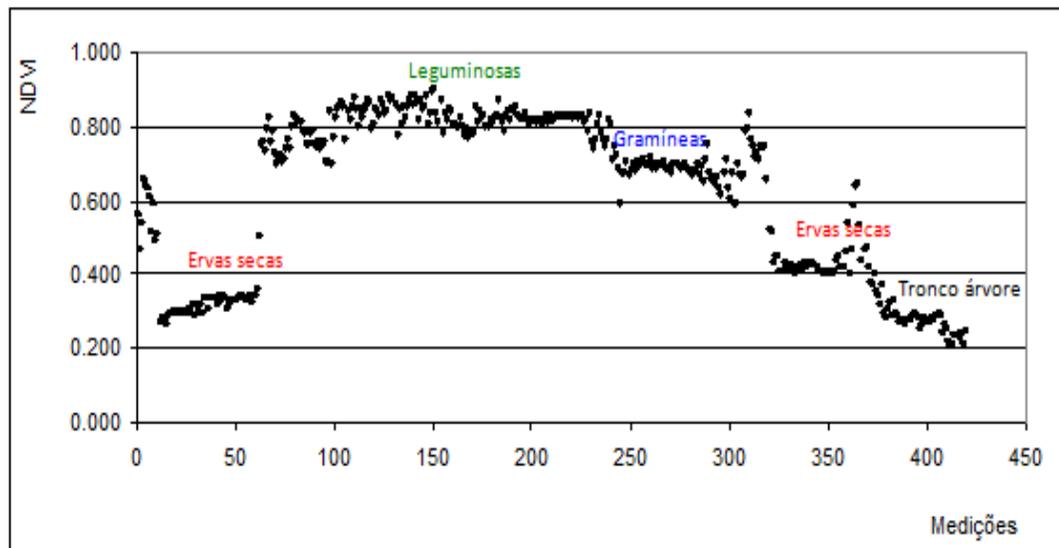


Figura 28- NDVI registado numa das repetições realizadas no percurso do ensaio complementar 3: identificação dos quatro patamares correspondentes a ervas secas, leguminosas, gramíneas, e tronco de árvore.

Na segunda parte do ensaio, foram identificadas quatro zonas de produtividade: zonas “y” e “x” (ver figura 15) no caso da gramínea (baixa e alta, respectivamente com 30 cm e 70 cm de altura; espécies predominantes: *Chamaemelum fuscatum* e *Avena sativa*) e zonas “z” e “w” (ver figura 15) no caso da leguminosa (baixa e alta, respectivamente com 30 cm e 60 cm de altura; espécie predominante: *Trifolium michelianum*). Em cada uma destas quatro zonas procedeu-se à medição estática do NDVI em três locais (repetições) e procedeu-se em todas elas à determinação da capacitância e à recolha da pastagem para determinação da MV e da MS. Os resultados são apresentados no quadro 9. Os valores mais elevados de NDVI (e de capacitância) ocorreram sistematicamente na zona de leguminosa alta (zona de maior produtividade em termos de MV) e os valores mais baixos de NDVI (e de capacitância) ocorreram sistematicamente na zona das gramíneas baixas (zona de menor produtividade em termos de MV).

As figuras 29 e 30 ilustram a variação do NDVI (respectivamente para as gramíneas e para as leguminosas), nas três repetições realizadas em cada zona (erva baixa/erva alta).

Este conjunto de resultados evidencia a capacidade do sensor “OptRx[®]” para detectar produtividade diferenciada dentro da mesma zona de cobertura vegetal do solo (gramíneas ou leguminosas).

Quadro 9 – Valores médios das principais características das quatro zonas de pastagem consideradas no ensaio complementar 3 (gramíneas baixas e altas, leguminosas baixas e altas).

Zona de pastagem (repetição)	Capacitância	MV (kg/ha)	MS (%)	MS (kg/ha)	NDVI
Gramínea baixa (I)	7488±1211	16100	12,4	2000	0,638±0,038
Gramínea baixa (II)	6334±1034	8300	14,5	1200	0,542±0,023
Gramínea baixa (III)	7296±879	11300	15,9	1800	0,688±0,033
“y”, Gramínea baixa, 30 cm (média)	7039±1041	11900±3934	14,3±1,8	1667±416	0,623±0,032
Gramínea alta (I)	9384±1605	24300	19,9	4830	0,778±0,033
Gramínea alta (II)	12575±2210	28700	15,6	4470	0,832±0,023
Gramínea alta (III)	11301±2517	20900	15,7	3290	0,795±0,043
“x”, Gramínea alta, 70 cm (média)	11087±2111	24633±3911	17,1±2,4	4197±806	0,802±0,033
Leguminosa baixa (I)	11953±3816	46100	16,5	7610	0,737±0,025
Leguminosa baixa (II)	7192±3325	27700	15,8	4370	0,705±0,021
Leguminosa baixa (III)	6435±978	33900	16,5	5590	0,746±0,027
“z”, Leguminosa baixa, 30 cm (média)	8527±2706	35900±9362	16,3±0,4	5857±1636	0,729±0,024
Leguminosa alta (I)	16864±2176	63500	12,5	7950	0,909±0,018
Leguminosa alta (II)	14406±2854	73500	13,0	9550	0,877±0,069
Leguminosa alta (III)	15536±2176	71900	11,9	8590	0,899±0,028
“w”, Leguminosa alta, 60 cm (média)	15602±2402	69633±5372	12,5±0,5	8697±805	0,895±0,038

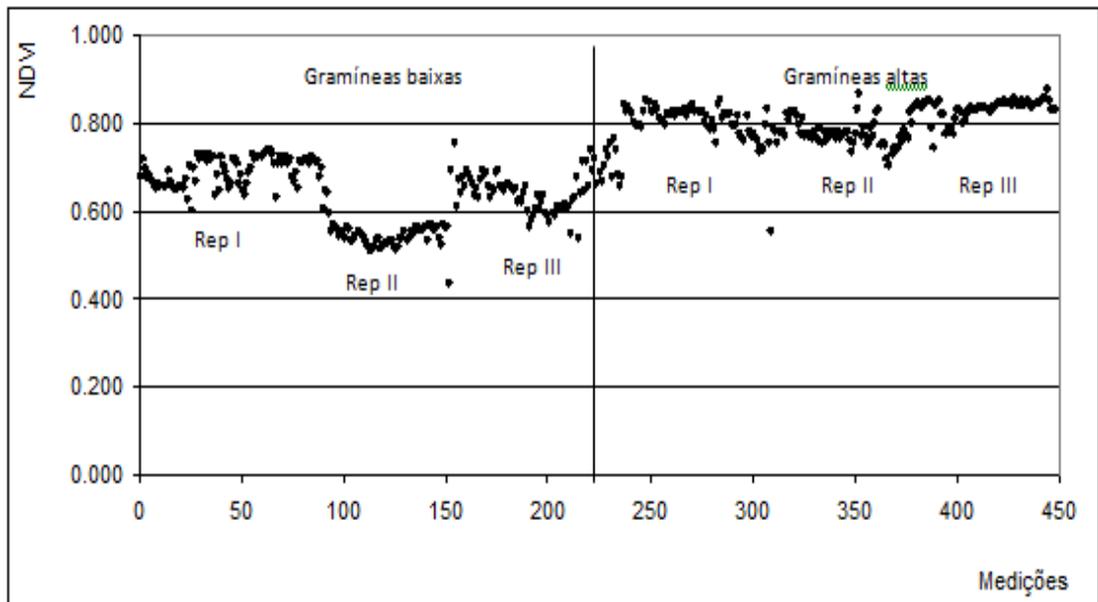


Figura 29- NDVI registado nas três repetições realizadas em cada condição (erva baixa/alta) na zona das gramíneas, no âmbito do ensaio complementar 3.

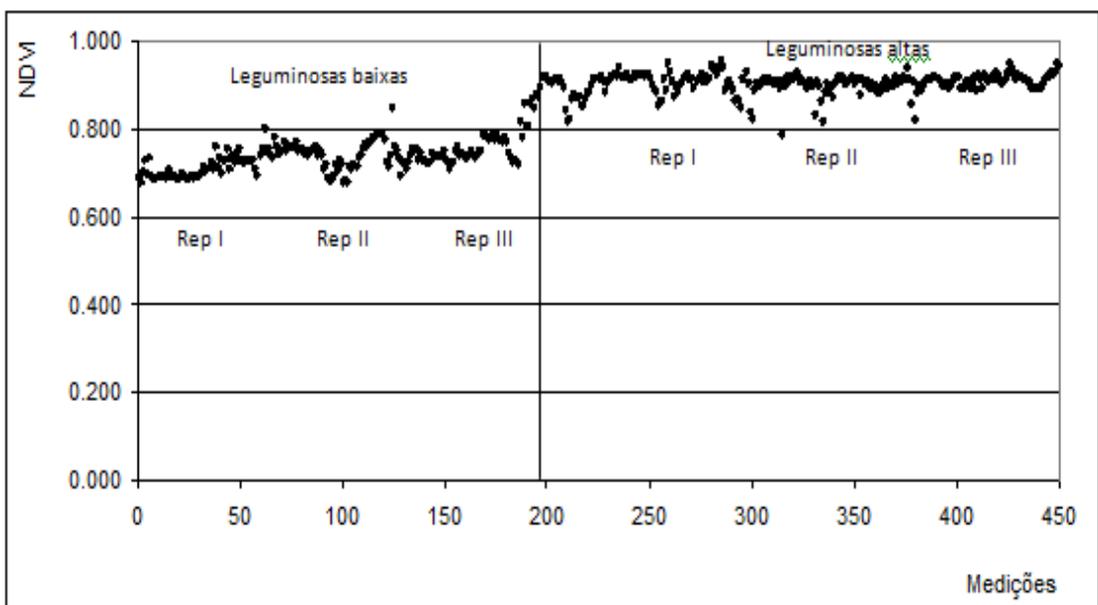


Figura 30- NDVI registado nas três repetições realizadas em cada condição (erva baixa/alta) na zona das leguminosas, no âmbito do ensaio complementar 3.

5.2.4. Dados agregados dos ensaios complementares

Os dados da pastagem dos três ensaios complementares realizados (duas amostras do ensaio 1, quatro amostras do ensaio 2 e doze amostras do ensaio 3) foram agrupados, tendo sido realizada análise de regressão entre as características da pastagem (MV, MS, em kg/ha e em %) e os parâmetros medidos pelos sensores (capacitância, medida pela sonda “Grassmaster II” e NDVI, medida pelo sensor “OptRx[®]”). Nas figuras 31, 32 e 33 são apresentadas as melhores equações de correlação (e respectivos coeficientes de determinação) entre as características da pastagem e as medições realizadas pelos sensores (NDVI e capacitância). A correlação significativa obtida entre estes parâmetros reforça os resultados obtidos nos ensaios realizados na Quinta da Silveira e justificam o interesse no desenvolvimento e extensão destes estudos a outras pastagens características da região Mediterrânica. A utilização de ferramentas expeditas associadas a sistemas de georeferenciação poderão simplificar o processo de monitorização das pastagens. A informação gerada sobre a variabilidade espacial e temporal da pastagem constitui a base para a estimativa do alimento disponível, fundamental no apoio à tomada de decisão do gestor agrícola para definição de encabeçamentos animais e rotação de parcelas em pastoreio (Serrano *et al.*, 2014b).

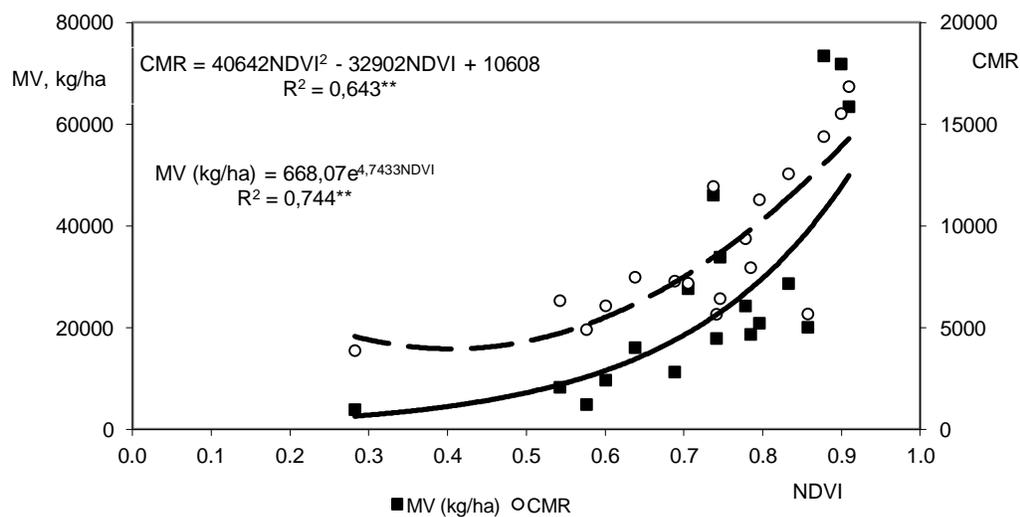


Figura 31- Correlação entre o NDVI e a capacitância e entre o NDVI e a produtividade da pastagem (kg MV/ha), nos ensaios complementares.

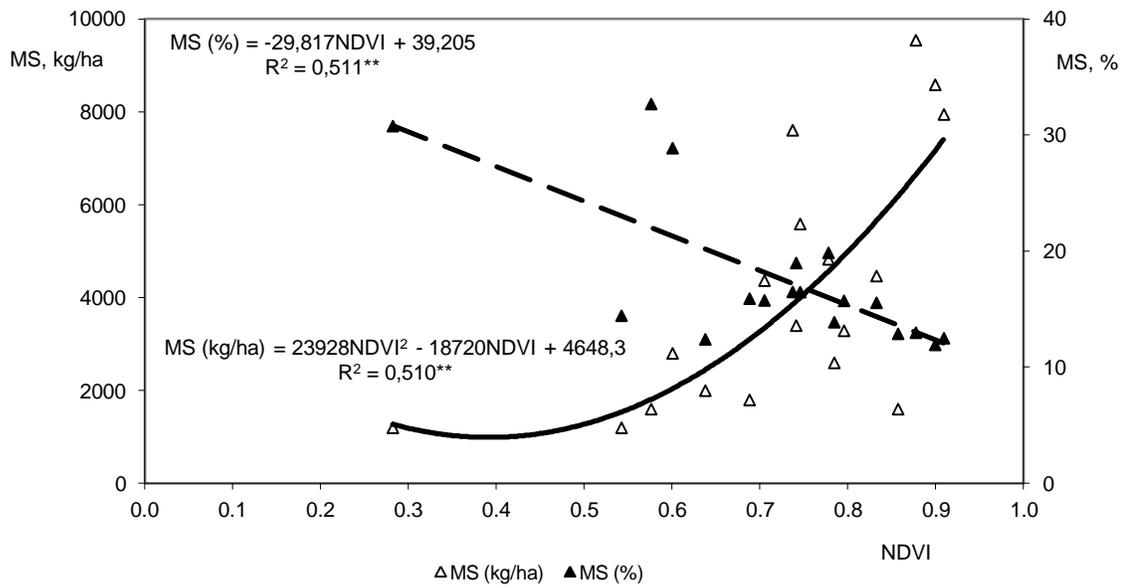


Figura 32- Correlação entre o NDVI e produtividade da pastagem (em termos de matéria seca por unidade de área) e entre o NDVI e a percentagem de matéria seca da pastagem, nos ensaios complementares.

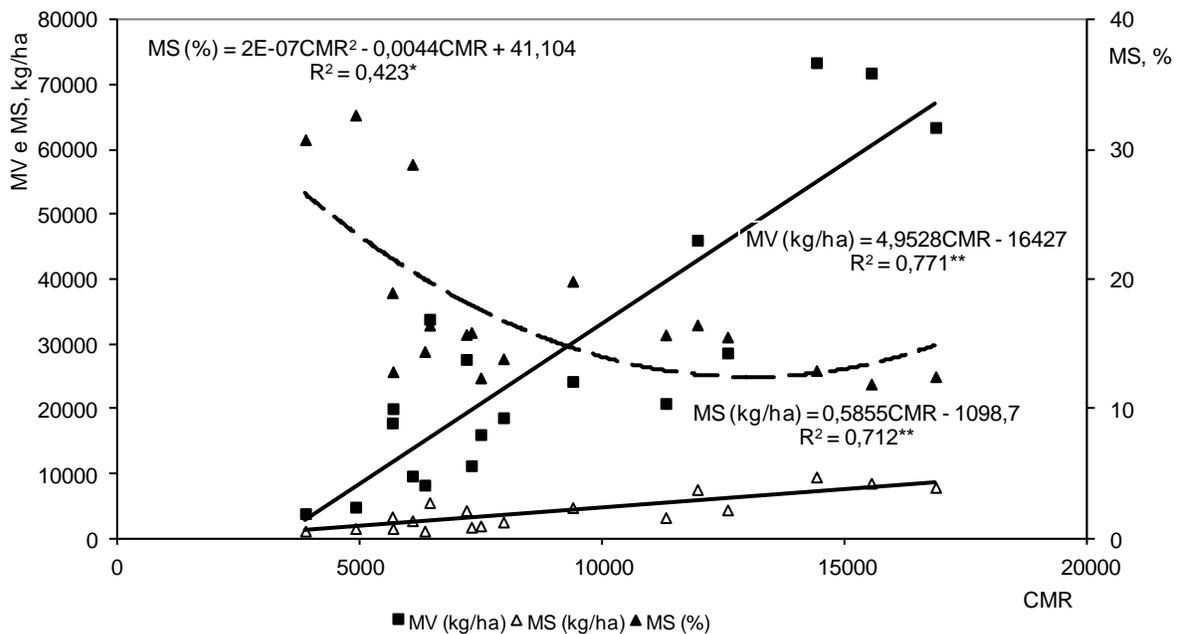


Figura 33- Correlação entre a capacitância (CMR) e a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde e de matéria seca por unidade de área) e a percentagem de matéria seca da pastagem, nos ensaios complementares.

6. Conclusões

A agricultura enfrenta hoje desafios de competitividade e de sustentabilidade que exigem do gestor agrícola um conhecimento actualizado das opções que dispõe para otimizar o processo produtivo. As tecnologias estão disponíveis para todas as etapas do processo, no entanto, no geral, quem as vende não presta um serviço de assistência que permita ao utilizador tirar o máximo partido destas, representando um entrave à implementação e desenvolvimento das práticas de Agricultura de Precisão. A permanente evolução das ferramentas tecnológicas justificam, por isso, o interesse na sua experimentação, calibração e divulgação.

O maneo das pastagens e o planeamento e gestão dos respectivos sistemas de produção animal são essencialmente baseados na estimativa da produtividade. Pelo que, a avaliação de tecnologias com potencial para monitorizar de forma expedita os aspectos relacionados com a variabilidade da pastagem e apoiar a tomada de decisão do gestor agrícola constitui-se como um elemento fundamental para o sucesso empresarial num sector estratégico como é o da pecuária extensiva.

Neste trabalho foram avaliados dois tipos de sensores para monitorizar a variabilidade espacial e temporal da pastagem: um sensor óptico e uma sonda de capacitância.

Os resultados obtidos demonstraram o potencial que apresenta o sensor óptico activo "OptRx[®]", através da determinação do índice NDVI, para monitorizar a evolução do padrão espacial e temporal do estado vegetativo de uma pastagem biodiversa. Índices mais elevados foram registados à medida que a pastagem se aproximava do seu maior vigor vegetativo, notando-se uma quebra significativa destes índices no final da Primavera, quando a pastagem começou a secar em virtude da conjugação de temperaturas mais elevadas com a redução dos teores de humidade no solo. Foram obtidas correlações significativas entre o NDVI e a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde ou a matéria seca, em kg/ha). Este índice foi também efectivo na identificação de diferentes coberturas vegetais do solo (gramíneas/leguminosas) e, dentro destas, de estados diversos

de desenvolvimento. Em analogia à utilização em cereais, na identificação de zonas com déficit de azoto, este sensor poderá identificar desequilíbrios nas características da vegetação, por exemplo, por stress hídrico ou por deficiente drenagem do solo. A informação obtida, referente à fraca expressão ou mesmo à extinção de uma dada espécie botânica numa determinada zona da parcela poderá ser utilizada na elaboração de mapas de prescrição diferenciada de fertilizantes ou de sementes, base para a utilização de tecnologia VRT.

A capacitância, medida pela sonda “Grassmaster II”, também apresentou correlações significativas com a produtividade da pastagem (em termos de matéria verde ou de matéria seca), no entanto, revelou falta de consistência quando a pastagem apresenta restolho do ano anterior (pastagens não pastoreadas), o qual mantém na camada superficial do solo teores de humidade que impedem o correcto funcionamento da sonda.

Por outro lado, foram desenvolvidas equações de calibração entre o NDVI e a capacitância, tendo ainda sido possível evidenciar uma relação inversa quer do NDVI quer da capacitância com o teor de matéria seca (em %) de pastagens de sequeiro do Alentejo.

Os resultados obtidos abrem perspectivas para a realização de outros trabalhos que permitam testar e validar estes equipamentos num leque mais alargado de condições de produção de pastagens, nomeadamente no que se refere à extraordinária diversidade de espécies botânicas características da região Mediterrânica, mas também nas pastagens e forragens regadas, em sistemas de produção intensivos, onde a incorporação tecnológica tende a assumir papel determinante.

7. Referências bibliográficas

- Abdu, H., Robinson, D.A., Jones, S.B. (2007). Comparing bulk soil electrical conductivity determination using the DUALEM-1S and EM38-DD electromagnetic induction instruments. *Soil Science Society American Journal*, 71, 189–196.
- Adamchuk, V.I., Hummel, J.W., Morgan, M.T., Udaphyaya, S.K. (2004). On the go soil sensor for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44, 71–91.
- Alamo, S., Ramosi, M.I., Feito, F.R., Cañas, J.A. (2012). Precision techniques for improving the management of the olive groves of southern Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 10(3), 583–595.
- Bausch, W.C., Delgado, J.A. (2003). Ground-based sensing of plant nitrogen status in irrigated corn to improve nitrogen management. In: T. VanToai *et al.* (Eds.), *Digital imaging and spectral techniques: Applications to precision agriculture and crop physiology* (pp. 145–157). ASA Special Publication 66. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA.
- Blackmore, S. (1999). The interpretation of trends from multiple yields Maps. *Computers and Electronics in Agriculture*, 26, 37–51.
- Braga, R., Pinto, P.A. (2011). Agricultura de precisão: adoção & principais obstáculos. *AGROTEC*, 1, 84–88.
- Brase, T. (2005). *Precision Agriculture*. Thomson Delmar Learning, New York, USA. 224p.
- Broge, N.H., Leblanc, E. (2000). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, 76(2), 156–172.

- Bronson, K., Booker, J., Officer, S., Lascano, R., Maas, S., Searcy, S., Booker, J. (2005). Apparent electrical conductivity, soil properties and spatial covariance in the U.S. southern high plains. *Precision Agriculture*, 6(3), 297–311.
- Cauduro, G.F., Carvalho, P., Barbosa, C., Lunardi, R., Pilau, A., Freitas, F., Silva, J. (2006). Comparação de métodos de medida indirecta de massa de forragem em pasto de azevém anual (*Lolium multiflorum* Lam.). *Ciência Rural*, 36(5), 1617–1623.
- Coelho, J. C., Marques da Silva, J. (2009). Agricultura de precisão. In: Castro Coelho, J. & Marques da Silva, J. (Eds.), *Agricultura de Precisão, Inovação e Tecnologia na Formação Agrícola- Agricultura de Precisão* (pp. 2–9). Associação dos Jovens Agricultores de Portugal (AJAP).
- Cox, S. (2002). Information Technology: the global key to precision agriculture and sustainability. *Computers and Electronics in Agriculture*, 36, 93–111.
- Corwin, D., Lesch, S. (2005). Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46 (1), 11–43.
- Currie, P.O., Hilken, T.O., White, R.S. (1987). Evaluation of a Single Probe Capacitance Meter for Estimating Herbage Yield. *Journal of Range Management*, 40(6), 537–541.
- D’Antoni, J.M., Mishra, A.K., Joo, H. (2012). Farmers’ perception of precision technology: The case of autosteer adoption by cotton farmers. *Computers and Electronics in Agriculture*, 87, 121–128.
- David, T.S., Pinto, C.A., Nadezhdina, N., Kurz-Besson, C., Henriques, M.O., Quilhó, T., Cermak, J., Chaves, M.M., Pereira, J.S., David, J.S. (2013). Root functioning, tree water use and hydraulic redistribution in *Quercus suber* trees: A modeling approach based on root sap flow. *Forest Ecology and Management*, 307, 136–146.

- Dusseux, P., Moy-Hubert, L., Corpetti, T., Vertes, F. (2015). Evaluation of SPOT imagery for the estimation of grassland biomass. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 38, 72 – 77.
- Efe Serrano, J. (2006). *Pastagens do Alentejo: bases técnicas sobre caracterização, pastoreio e melhoramento*. Universidade de Évora – ICAM (Ed.), Évora (pp. 165–178). Portugal: Gráfica Eborensis
- Gertsis, A., Fountas, D., Arpasanu, I., Michaloudis, M. (2013). Precision Agriculture Applications in a High Density Olive Grove Adapted for Mechanical Harvesting in Greece. *Procedia Technology*, 8, 152–156.
- Gitelson, A.A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, 161(2), 165–173.
- King, J., Dampney, P., Lark, R., Wheeler, H., Bradley, R., 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*, 6(2), 167–181.
- Kumhálová, J., Kumhála, F., Kroulík, M., Matejková, S. (2011). The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. *Precision Agriculture*, 12, 813–830.
- Laliberte, A.S., Herrick, J.E., Rango, A., Winters, C. (2010). Acquisition, orthorectification, and object-based classification of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for rangeland monitoring. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(6), 661–672.

- Laranjeira, P. (2010). *Sistema de Informação Geográfica para Timor Leste, Caso estudo nos distritos de Bobonaro e de Covalima*. Dissertação de Mestrado, Universidade Trás-os-Montes Alto Douro, Vila Real, 101p.
- Marques da Silva, J.R., Peça, J.O., Serrano, J.M., Carvalho, M.J., Palma, P.M. (2008). Evaluation of spatial and temporal variability of pasture based on topography and the quality of the rainy season. *Precision Agriculture*, 9, 209–229.
- Moreira, N. (2002). *Agronomia das forragens e pastagens*. Texto de apoio aos alunos, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real, 183p.
- Murakami, E., Saraiva, A.M., Júnior, L.C.M.R., Cugnasca, C.E., Hirakawa, A.R., Correa, P.L.P. (2007). An infrastructure for the development of distributed service-oriented information systems for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 58(1), 37–48.
- Numata, I., Chadwick, O.A., Schimel, J.P., Galvão, L.S., Soares, J.V. (2008). Evaluation of hyperspectral data for pasture estimate in the Brazilian Amazon using field and imaging spectrometers. *Remote Sensing of Environment*, 112, 1569–1583.
- Morgan, M., Ess, D. (1997). *The Precision-Farming guide for agriculturists*. John Deere & Company, Moline, Illinois, USA, 117 p.
- Pinto, I. (2009). *Introdução aos sistemas de informação geográfica (SIG)*. Curso de Introdução à Georreferenciação de CH&C, Instituto de Investigação Científica Tropical, Lisboa, 31p.
- Povh, F.P., Molin, J.P., Gimenez, L.M., Pauletti, V., Molin, R., Salvi, J.V. (2008). Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico activo em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43(8), 1075–1083.

- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, A.R., Sorooshian, S. (1994). A Modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing Environment*, 48, 119–126.
- Rutledge, S., Mudge, P.L., Wallace, D.F., Campbell, D.I., Woodward, S.L., Walla, A.M., Schipper, L.A. (2014). CO₂ emissions following cultivation of a temperate permanent pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 184, 21–33.
- Schellberg, J., Hill, M.J., Roland, G., Rothmund, M., Braun, M. (2008). Precision agriculture on grassland: Applications, perspectives and constraints. *European Journal of Agronomy*, 29, 59–71.
- Schipper, L.A., Parfitt, R.L., Fraser, S., Littler, R.A., Baisden, W.T., Ross, C. (2014). Soil order and grazing management effects on changes in soil C and N in New Zealand pastures. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 184, 67–75.
- Searcy, S.W. (1997). *Precision Farming: A New Approach to Crop Management*. Texas Agricultural Extension Service, The Texas A&M University System, College Station, TX, 4p.
- Seddaiu, G., Porcua, G., Luigi, L., Ledda, Roggero, P.P. Agnelli, A., Cortic, G. (2013). Soil organic matter content and composition as influenced by soil management in a semi-arid Mediterranean agro-silvo-pastoral system. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 167, 1–11.
- Seelan, S.K., Laguette, S., Casady, G.M., Seielstad, G.A. (2003). Remote sensing applications for precision Agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88, 157–169.
- Serrano, J., Peça, J. (2009). Novas tecnologias na distribuição diferenciada de fertilizantes em pastagens: o fechar de um ciclo em Agricultura de Precisão. In: Castro Coelho, J. & Marques da Silva, J. (Eds.), *Agricultura de Precisão, Inovação e Tecnologia na*

Formação Agrícola- Agricultura de Precisão (pp. 104–124). Associação dos Jovens Agricultores de Portugal (AJAP).

Serrano, J.M., Peça, J.M., Palma, P.M., Marques da Silva, J.R., Carvalho, M. (2009). Calibração e validação de um medidor de capacitância num projecto de agricultura de precisão em pastagens. *Revista das Ciências Agrárias*, 32, 85–96.

Serrano, J., Peça, J., Marques da Silva, J., Shahidian, S. (2010). Mapping soil and pasture variability with an electromagnetic induction sensor. *Computer and Electronics in Agriculture*, 73, 7–16.

Serrano, J.M., Peça, J.O., Marques da Silva, J., Shahidian, S. (2011). Calibration of a capacitance probe for measurement and mapping of dry matter yield in Mediterranean pastures. *Precision Agriculture*, 12 (6), 860–875.

Serrano, J., Shahidian, S., Silva, J.M. (2013). Small scale soil variation and its effect on pasture yield in southern Portugal. *Geoderma*, 195–196, 173–183.

Serrano, J.M. (2014). VRT – Tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes em pastagens. *Voz do Campo*, 171, 19–20.

Serrano, J., Peça, J., Silva, J.M., Shahidian, S. (2014a). Avaliação de tecnologias para aplicação diferenciada de fertilizantes: novos conceitos de gestão em pastagens permanentes. *Revista de Ciências Agrárias*, 37(3), 253–269.

Serrano, J., Peça, J., Silva, J.M., Shahidian, S. (2014b). Aplicação de fertilizantes: tecnologia, eficiência energética e ambiente. *Revista de Ciências Agrárias*, 37(3), 270–279.

Serrano, J., Shahidian, S., Silva, J.M. (2014c). Validation of GRASSMASTER II for measurement and mapping of dry matter yield in Mediterranean pastures. *In:*

Proceedings of the International Conference of Agricultural Engineering
(AgEng2014), Zurique, Suiça, 6-10 de Julho, 8 p.

Stafford, J.V. (2000). Implementing precision agriculture in the 21st century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267–275.

Sudduth, K.A., Kitchen, N.R., Bollero, G.A., Bullock, D.G., Wiebold, W.J. (2003). Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agronomy Journal*, 95(3), 472–482.

Sudduth, K.A., Myers, D.B., Kitchen, N.R., Drummond, S.T. (2013). Modeling soil electrical conductivity – depth relationship with data from proximal and penetrating ECa sensor. *Geoderma*, 199(1), 12–21.

Whelan, B.M., McBratley, A.B. (2000). The null hypothesis of precision agriculture management. *Precision Agriculture*, 2, 265–279.

Zhang, N., Wang, M., Wang, N. (2002). Precision agriculture a worldwide overview, *Computers and Electronics in Agriculture*, 36, 113–132.

Zhang, X., Seelan, S., Seielstad, G. (2010). Digital Northern Great Plains: A Web-Based System Delivering Near Real Time Remote Sensing Data for Precision Agriculture. *Remote Sensing*, 2, 861–873.