

UNIVERSIDADE DE LISBOA  
FACULDADE DE CIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



**Condição fitossanitária do montado de sobreiro com  
recurso a imagens multiespectrais de alta resolução**

Joana Rita Seabra Laurentino

**Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica – Tecnologias e Aplicações**

Trabalho de Projeto orientado por:  
Prof. Doutor João Catalão Fernandes  
Prof.<sup>a</sup> Doutora Ana Navarro Ferreira

---

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

*Madre Teresa de Calcutá*

---

---

# AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho de projeto considero importante dirigir os meus agradecimentos a todos quantos colaboraram e foram importantes para o meu crescimento a nível académico e pessoal.

Aos orientadores, Professora Doutora Ana Navarro Ferreira e Professor Doutor João Catalão Fernandes, por todo o apoio dado ao longo do desenvolvimento deste trabalho de projeto, todas as propostas e críticas efetuadas que contribuíram para aprimorar os resultados obtidos, bem como a oportunidade que me foi dada de participar no Living Planet Symposium 2019.

À Herdade da Machoqueira do Grou, C.R.L. e Companhia das Lezírias, S.A. por ter sido dada a possibilidade de visitar e adquirir as fotografias aéreas e informação do estado fitossanitário dos sobreiros das áreas estudo, importantes para a realização do trabalho de projeto.

A todos os amigos que ao longo deste percurso sempre me incentivaram a ser mais e melhor, por toda a força e apoio nos momentos de maior ansiedade e conversas em momentos de bloqueio criativo.

A toda a equipa com quem trabalho, por toda a compreensão e paciência tidas durante os últimos meses.

Por fim, mas não menos importante, aos meus pais, pelo apoio dado ao longo de todo o meu percurso académico, principalmente por me terem oferecido a oportunidade de seguir sempre o caminho que achei ser o melhor para mim.

---

# RESUMO

Este trabalho de projeto tem como objetivo a identificar e diagnosticar situações de stress no sobreiro com recurso a tecnologias de deteção remota, sendo realizado em duas áreas da Companhia das Lezírias e da Herdade da Machoqueira do Grou. A monitorização é feita a partir da avaliação da evolução temporal de diversos índices vegetativos calculados com imagens multiespectrais de alta resolução adquiridas pelo satélite Sentinel-2, obtendo assim a variabilidade temporal da assinatura espectral de sobreiros saudáveis e sobreiros identificados como mortos ou em perda de vitalidade. Para este estudo foram adquiridas imagens dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B compreendidas entre 2016 e 2018, cuja área contém as duas áreas em estudo. A informação obtida pelas imagens permitiu, numa primeira fase, identificar a diferente assinatura espectral de cada uma das classes em época de chuvas e em época seca. Posteriormente foram calculados sete índices vegetativos (NDVI,  $CI_{RedEdge1}$ ,  $CI_{RedEdge2}$ ,  $CI_{Green}$ , GNDVI, EVI e SAVI) para cada uma das imagens, com o objetivo de reconhecer qual o índice que melhor se adequava para o estudo, e elaboradas séries temporais de 25 e 47 imagens, confirmando o resultado obtido primeiramente com as assinaturas espectrais. A análise temporal dos índices vegetativos permitiu observar a relação entre o estado vegetativo do sobreiro e a presença de precipitação, tal como a existência de vegetação vigorosa no solo em épocas de maior precipitação. Esta abordagem permite que sejam definidos intervalos de valores dos índices para os sobreiros saudáveis e para os sobreiros identificados como mortos ou em perda de vitalidade, a partir da média e desvio padrão obtidos para cada uma das classes. A metodologia proposta apresentou resultados satisfatórios, sendo que estes estão sujeitos a melhorias significativas nomeadamente na utilização de imagens de satélite com uma melhor resolução, que permitirão no futuro identificar remotamente sobreiros que possam estar em situação de stress, de forma a que seja diminuída a necessidade de deslocações ao terreno e os custos associados.

**PALAVRAS CHAVE:** Deteção Remota, Sentinel-2, Análise Multitemporal, Índices de Vegetação, Montado de Sobreiro

---

# ABSTRACT

This project work aims to identify and diagnose stress situations in the cork oak using remote sensing technologies, being carried out in two areas of the Companhia das Lezírias and the Herdade da Machoqueira do Grou. The monitoring is done by evaluating the temporal evolution of several vegetative indexes calculated with high resolution multispectral images acquired by the Sentinel-2 satellite, thus obtaining the temporal variability of the spectral signature of healthy cork oaks and cork oaks identified as dead or in loss of vitality. For this study, images of the Sentinel-2A and Sentinel-2B satellites were acquired between 2016 and 2018, whose area contains the two areas under study. The information obtained by the images allowed, in a first phase, to identify the different spectral signature of each one of the classes in rainy season and in the dry season. Subsequently, seven vegetative indexes (NDVI,  $CI_{RedEdge1}$ ,  $CI_{RedEdge2}$ ,  $CI_{Green}$ , GNDVI, EVI and SAVI) were calculated for each of the images, with the objective of recognizing which index was best suited for the study, and elaborated time series of 25 and 47 images, confirming the result obtained first with the spectral signatures. The temporal analysis of vegetative indexes allowed to observe the relationship between cork oak vitality and the presence of precipitation, as well as the existence of vigorous vegetation in the soil in times of greater precipitation. This approach allows ranges of index values to be defined for healthy cork oaks and cork oaks identified as dead or loss of vitality, from the mean and standard deviation obtained for each class. The proposed methodology presented satisfactory results, and these are subject to significant improvements, especially in the use of satellite images with better resolution, which will allow in the future to remotely identify corns that may be in a stress situation, in order to reduce the need of travel to the land and associated costs.

**KEYWORDS:** Remote Sensing, Sentinel-2, Multitemporal Analysis, Vegetation Indexes, Cork Oak Forest

---

# ÍNDICE

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	iii
<b>RESUMO</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>ÍNDICE</b> .....	vi
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	viii
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>ACRÓNIMOS</b> .....	xi
<b>Capítulo 1</b> .....	1
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. ENQUADRAMENTO.....	1
1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS.....	2
<b>Capítulo 2</b> .....	3
<b>ESTADO DA ARTE</b> .....	3
<b>Capítulo 3</b> .....	6
<b>DADOS E MÉTODOS</b> .....	6
3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	6
3.2. DADOS UTILIZADOS .....	8
3.2.1. Dados meteorológicos.....	8
3.2.2. Dados recolhidos no terreno.....	8
3.2.3. Imagens de Satélite .....	9
3.2.4. Aplicações Informáticas.....	10
3.3. METODOLOGIA .....	11
3.3.1. Voo .....	11
3.3.2. Coordenação de sobreiros .....	12
3.3.3. Caracterização espectral.....	12
3.3.4. Tratamento das imagens Sentinel-2 .....	13
3.3.5. Índices de Vegetação .....	13
3.3.6. Criação de séries temporais.....	14
<b>Capítulo 4</b> .....	16

---

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	16
4.1. ASSINATURAS ESPECTRAIS .....	16
4.2. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO .....	17
4.3. ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS .....	18
4.4. RELAÇÃO DA CONDIÇÃO FITOSSANITÁRIA COM A PRECIPITAÇÃO .....	23
4.5. ESTATÍSTICAS .....	24
<b>Capítulo 5</b> .....	25
<b>CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS</b> .....	25
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	27
<b>ANEXOS</b> .....	30
<b>A. Índices de Vegetação Herdade da Machoqueira do Grou</b> .....	30
<b>B. Índices de Vegetação Companhia das Lezírias</b> .....	33

---

# LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Características técnicas do sensor utilizado no VANT. (Adaptado de senseFly, 2019) .....	8
Tabela 3.2 Data das imagens Sentinel-2A e Sentinel-2B adquiridas, Nivel 1-C.....	9
Tabela 3.3 Características das bandas espectrais do Sentinel-2 (Adaptado de ESA, 2019).....	10
Tabela 3.4 Níveis de Processamento dos produtos da Missão Sentinel-2 (Adaptado de ESA, 2019) ...	10
Tabela 3.5 Aplicações informáticas utilizadas no processamento dos dados recolhidos .....	11
Tabela 3.6 N° de pontos digitalizados por classe.....	12
Tabela 3.7 Índices de Vegetação testados .....	14
Tabela 3.8 Séries temporais utilizadas .....	14

---

# LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Localização da Área de Estudo. a) Localização dos Municípios de Chamusca e Benavente. b) Localização da parcela pertencente à Herdade da Machoqueira do Grou no Município da Chamusca. c) Localização da parcela pertencente à Companhia das Lezírias no Município de Benavente. d) Extrato aplicado na área da Herdade da Machoqueira do Grou. e) Subset aplicado na área da Companhia das Lezírias .....	6
Figura 3.2 Valores de Precipitação e Temperatura do Ar. Normais Climatológicas 1971-2000 de Santarém. [Adaptado do IPMA, 2019] .....	7
Figura 3.3 Valores de Precipitação e Temperatura do Ar. Normais Climatológicas 1971-2000 de Lisboa. [Adaptado do IPMA, 2019] .....	7
Figura 3.4 Localização dos Pontos Coordenados. a) Herdade da Machoqueira do Grou. b) Companhia das Lezírias .....	9
Figura 3.5 Pontos fotogramétricos e sua coordenação.....	12
Figura 4.1 Gráfico da precipitação mensal e acumulada dos últimos 3 meses para o ano de 2016 (Adaptado de SNIRH, 2018).....	16
Figura 4.2 Assinaturas Espectrais de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época de Chuvas. Companhia das Lezírias .....	16
Figura 4.3 Assinaturas Espectrais de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época Seca. Companhia das Lezírias .....	16
Figura 4.4 Índices de Vegetação calculados para a imagem de satélite de 30/04/2016 (SAVI, NDVI, GNDVI, EVI).....	17
Figura 4.5 Índices de Vegetação calculados para a imagem de satélite de 30/04/2016 (GNDVI, EVI, $CI_{RedEdge1}$ , $CI_{RedEdge2}$ , $CI_{green}$ ) .....	18
Figura 4.6 EVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	19
Figura 4.7 NDVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	19
Figura 4.8 $CI_{RedEdge2}$ - Série Temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou.....	19
Figura 4.9 EVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	20
Figura 4.10 NDVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	20
Figura 4.11 $CI_{RedEdge2}$ - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	21
Figura 4.12 EVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	21
Figura 4.13 NDVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	22
Figura 4.14 EVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	22
Figura 4.15 NDVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	22
Figura 4.16 Série temporal do índice de vegetação NDVI e Precipitação mensal e acumulada .....	23
Figura 4.17 Relação entre a precipitação acumulada e o NDVI.....	24

---

Figura 4.18 Limiares de NDVI para as classes de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época seca. Companhia das Lezírias .....	24
Figura A.1 GNDVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	30
Figura A.2 SAVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou.....	30
Figura A.3 $CI_{RedEdge1}$ - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	31
Figura A.4 $CI_{Green}$ - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	31
Figura A.5 GNDVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	31
Figura A.6 SAVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou.....	32
Figura A.7 $CI_{RedEdge1}$ - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	32
Figura A.8 $CI_{RedEdge2}$ - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	32
Figura A.9 $CI_{Green}$ - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou .....	33
Figura A.10 GNDVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias.....	33
Figura A.11 SAVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	33
Figura A.12 $CI_{RedEdge1}$ - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	34
Figura A.13 $CI_{Green}$ - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias .....	34
Figura A.14 GNDVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias.....	34
Figura A.15 SAVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	35
Figura A.16 $CI_{RedEdge1}$ - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	35
Figura A.17 $CI_{RedEdge2}$ - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	35
Figura A.18 $CI_{Green}$ - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias .....	36

---

# ACRÓNIMOS

<b>CI</b>	<i>Clorofila Index</i>
<b>CL</b>	Companhia das Lezírias
<b>DGT</b>	Direção-Geral do Território
<b>DN</b>	<i>Digital Number</i>
<b>DR</b>	Deteção Remota
<b>ESA</b>	<i>European Spatial Agency</i>
<b>EVI</b>	<i>Enhanced Vegetation Index</i>
<b>FEADER</b>	Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural
<b>GEOSUBER</b>	Monitorização do montado
<b>GNDVI</b>	<i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>
<b>GPS-RTK</b>	<i>Global Positioning System - Real Time Kinematic</i>
<b>HMG</b>	Herdade da Machoqueira do Grou
<b>ICNF</b>	Instituto da Conservação da Natureza e Florestas
<b>IFAP</b>	Instituto de Financiamento da Agricultura e Pesca
<b>MI</b>	Índice Mortalidade
<b>MSI</b>	<i>Single Multi-Spectral Instrument</i>
<b>NDVI</b>	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
<b>NDWI</b>	<i>Normalized Difference Water Index</i>
<b>NUTS</b>	Nomenclatura das Unidades Territoriais para Fins Estatísticos
<b>PF</b>	Ponto Fotogramétrico
<b>SAVI</b>	<i>Soil-adjusted Vegetation Index</i>
<b>SNIRH</b>	Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos
<b>UNAC</b>	União Portuguesa da Floresta Mediterrânica
<b>USGS/NASA</b>	<i>United States Geological Survey / National Aeronautics Space Administration</i>
<b>UTM29N/WGS84</b>	<i>Universal Transverse Mercator/ World Geodetic System 1984</i>
<b>VANT</b>	Veículo Aéreo não Tripulado

# Capítulo 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1. ENQUADRAMENTO

O montado de sobreiro faz parte dos 35 santuários mundiais de biodiversidade, sendo que cerca de 30% da sua área se encontra em território português, representando mais de 20% da floresta nacional. A indústria derivada do montado assume elevada importância em território nacional, tendo Portugal uma cota de exportações no setor da cortiça superior a 60%, que tem como destino 130 países (APCOR, 2019).

Tendo em conta a assumida importância a nível económico e de biodiversidade em território nacional do montado de sobreiro, foi criado o Decreto-Lei n.º 11/97, de 14 de janeiro com o objetivo de proceder à conservação das espécies de Sobreiro e Azinheira, no qual foi decretado que o corte ou arranque destas duas espécies de árvores carecem de autorização da Direção-Geral das Florestas, sendo estas competências passadas para o Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas, e para o Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território no caso de estas se encontrarem em áreas classificadas, com a entrada em vigor do Decreto-Lei n.º 169/2001, de 25 de maio, alterado pelo Decreto-Lei n.º 155/2004, de 30 de junho.

Nas últimas décadas, tem-se verificado o declínio da população de sobreiros, não apenas em Portugal, mas, de uma forma generalizada, em toda a região mediterrânica, estando associado a situações de stress ambiental, nomeadamente devido à diminuição da precipitação e ao aumento dos períodos de seca, e a outras doenças que afetam a espécie em questão. A morte de sobreiros tem-se vindo a verificar em dois processos distintos, a “morte lenta”, processo observado num período de tempo longo, e a “morte súbita” que ocorre num espaço de tempo de 2 a 4 semanas (Rodrigues de Sousa *et al.*, 2017).

Os mecanismos de monitorização específicos do montado de sobreiro são atualmente inexistentes, sendo que o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) realiza de 5 em 5 anos o Inventário Florestal Nacional, baseado em processos de amostragem, no entanto, o último inventário realizado data de 2010, impossibilitando uma intervenção atempada para impedir o declínio dos sobreiros.

Em 2008 foi publicado o “Inventário nacional de mortalidade do sobreiro na fotografia aérea digital de 2004/2006” por Nuno Ribeiro e Peter Surový, onde a partir do tratamento espectral das fotografias, criando uma imagem de falsa cor com recurso à imagem de infravermelhos, foi possível melhorar a visibilidade e identificar cerca de 330.000 árvores mortas nos últimos 2 a 5 anos, representando um elevado impacto económico ao nível da perda de arborescência.

Com o uso da Detecção Remota (DR) é possível determinar o estado de vitalidade de diversos tipos de culturas, nomeadamente do montado, sendo possível a identificação do estado fitossanitário do montado de sobreiro, com o recurso a imagens de satélite de alta resolução, que hoje em dia se encontram disponíveis gratuitamente, e tratamento espectral das mesmas, usando o cálculo de índices de

vegetação a partir das bandas do visível, infravermelho próximo e infravermelho de onda curta, permitindo assim um controlo à distância, otimizando os processos e poupando recursos.

## 1.2. MOTIVAÇÃO E OBJETIVOS

Sendo obrigatório por lei a autorização para corte e ou arranque da espécie, e ainda a comunicação ao ICNF do número de sobreiros mortos, a dificuldade prende-se com o processo moroso e complicado da sua identificação no terreno, para que se proceda atempadamente ao seu corte/arranque evitando assim a possível contaminação por fungos ou outras bactérias de sobreiros saudáveis. Dado isto, é importante que se adote um mecanismo de monitorização rápido e de fácil utilização para simplificar o processo de identificação e abate de sobreiros mortos por parte dos produtores florestais.

O programa Copernicus, coordenado pela Comissão Europeia, em parceria com os Estados Membros e a Agência Espacial Europeia (European Space Agency, ESA), com o objetivo de ajudar a compreender o planeta e a gerir de forma sustentável o ambiente, tem vindo a mostrar grande importância no que toca à monitorização, com base na deteção remota, do uso do solo, alterações climáticas, agricultura, entre outros, usando nomeadamente a constelação de satélites Sentinel, de forma totalmente gratuita.

O trabalho de projeto foi realizado no âmbito do projeto GEOSUBER (PDR2020-101-031261), financiado pelo Instituto de Financiamento da Agricultura e Pescas (IFAP) através do Fundo Europeu Agrícola de Desenvolvimento Rural (FEADER), tem como objetivo assegurar a monitorização periódica da vitalidade dos sobreiros com recurso à deteção remota, fornecendo aos agricultores informação sobre as árvores doentes ou mortas anualmente através de uma plataforma online, sendo este projeto financiado pela União Portuguesa da Floresta Mediterrânica (UNAC) - PDR2020-101-03125.

Assim, este trabalho de projeto tem como objetivo a identificação e diagnóstico de situações de stress no sobreiro recorrendo a tecnologias de deteção remota para monitorizar o estado de vitalidade das árvores. Para o efeito, será estudada a evolução temporal de índices vegetativos ao longo de um ou mais anos com o objetivo de se determinar, em duas das parcelas de referência, a variabilidade temporal da assinatura espectral de sobreiros saudáveis e de sobreiros identificados em perda de vitalidade ou mortos. Os índices vegetativos são calculados com imagens multiespectrais adquiridas pelo satélite Sentinel-2. Embora a resolução espacial de 10 m não seja a ideal para este tipo de estudos, o facto de ser possível a aquisição de imagens com uma resolução temporal de 5 dias, permite que sejam elaboradas séries temporais mais densas, dada a maior probabilidade de existirem imagens sem nuvens durante o período mais chuvoso do ano.

## 1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO DE PROJETO

Este documento encontra-se estruturado em cinco capítulos, divididos em subcapítulos. No capítulo um é feito um breve enquadramento do tema do trabalho, tal como as motivações e os objetivos pretendidos. No capítulo dois é apresentado o estado da arte no qual é exposta a realidade do conhecimento atual através da revisão bibliográfica do tema do trabalho de projeto. O terceiro capítulo são caracterizadas as duas áreas estudadas, apresentados os dados e a metodologia usados para a concretização do trabalho. No capítulo quatro são apresentados os resultados obtidos e feita uma análise aos mesmos. Finalmente, no último capítulo, são apresentadas as conclusões relativamente aos resultados obtidos, apresentando ainda algumas perspetivas para desenvolver o trabalho no futuro.

# Capítulo 2

## ESTADO DA ARTE

As florestas têm uma particular importância ao nível ecológico e da biodiversidade, protegendo bacias hidrográficas, reduzindo a erosão do solo, fixando o carbono do ar e absorvendo e refletindo a energia solar. Desde o século XX que se verificam perturbações profundas nas florestas naturais, tais como a deflorestação, a poluição, infestações de insetos e patogénicos, e os incêndios graves que se vêm a verificar a nível mundial (Perry *et al.*, 2008). Nos últimos 30 anos, verificou-se uma diminuição de cerca de 1% da área global de floresta, especialmente em países em desenvolvimento, nas regiões da América Latina, Sueste asiático e África Subsariana (FAO, 2018).

Em Portugal a floresta ocupa cerca de 35% do território nacional, onde dominam três espécies florestais, o eucalipto, ocupando 25,4%, o sobreiro com 23% da ocupação florestal, e finalmente o pinheiro bravo, correspondendo a 22,3% da floresta portuguesa (PEFC, 2019). Sendo a maioria da área florestal detida por proprietários privados, o estado teve desde cedo um papel importante na gestão da floresta nacional, nomeadamente com a instituição do regime florestal em 1901, sendo que já existiam anteriormente organismos dedicados à gestão do património florestal pertencente ao Estado (Devy-Vareta, 2003).

Em Portugal a maior área de montado de sobreiro encontra-se no Sul, criando uma paisagem única no mundo, resultante da relação entre fatores naturais e culturais, sendo considerada elemento de identidade cultural do Alentejo. Os montados têm ainda um elevado valor económico, e por isso são considerados como sistemas de produção multifuncionais, com a produção de cortiça, madeira e ambiental, sendo cruciais na prevenção da erosão do solo, de incêndios florestais, regulação do ciclo da água e armazenamento de carbono (Pinto-Correia *et al.*, 2013).

O declínio do montado de sobreiro em Portugal tem sido estudado desde o século XIX, sendo assinalados vários surtos de mortalidade por Câmara-Pestana (1898, 1899), Lopes-Pimentel (1946), Natividade (1950), Neves (1950), Oliveira (1931) e Ramires (1989). A importância económica que o montado de sobreiro tem em Portugal gerou um maior interesse no estudo das causas do declínio nas últimas quatro décadas, tendo autores como Cabral (1992), Moreira *et al.* (2006), Santos (2003) e Camilo-Alves *et al.* (2017), apontado como razões para o declínio do montado fatores como a intensificação da pecuária bovina, a extração de cortiça infringindo as normas e por pessoas não qualificadas para o efeito, diversas pragas de insetos, doenças como a *Hypoxylon mediterraneum*, a *Endothiella gyrosa* e a *Phytophthora cinnamomi*, e ainda diversos fatores meteorológicos.

A monitorização das florestas tem vindo então a ganhar importância nos últimos anos, não apenas em Portugal, com medidas concretas a nível do Programa de Desenvolvimento Rural 2020, mas também a nível Europeu, visto serem ecossistemas essenciais tanto a nível económico como ambiental.

As técnicas de deteção remota são largamente utilizadas em contexto agrícola e florestal, usando os conhecimentos adquiridos durante largas décadas sobre a refletância espectral nas regiões do visível e do infravermelho do espectro eletromagnético (Clevers & Verhoef, 1993) e da sua relação com a atividade fotossintética da vegetação. É frequente o recurso a índices de vegetação que enfatizam determinadas características da vegetação combinando duas ou mais bandas espectrais (Baret & Guyot,

1991; Qi *et al.*, 1993). Os índices vegetativos são calculados a partir das bandas em que existam picos de absorção e reflexão da clorofila, como é o caso das bandas do vermelho e infravermelho, sendo que o índice mais utilizado e concensual é o Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*, NDVI) proposto por Rouse *et al.* (1974) (Basso *et al.*, 2004).

Estas técnicas permitem que a monitorização e avaliação das culturas e/ou floresta seja efetuada de forma rápida e precisa, sem que seja necessário o envio de equipas ao terreno, que constitui um processo moroso e dispendioso, permitindo consequentemente uma intervenção atempada por parte do produtor.

O uso de imagens de satélite para a agricultura de precisão e monitorização de florestas é de certa forma limitado, sendo as imagens com elevada resolução espacial muito dispendiosas e por isso de difícil acesso a pequenos produtores. Nos últimos anos têm sido lançadas missões de satélites de observação da Terra com acesso livre às imagens, como a missão Landsat da USGS/NASA ou a constelação Sentinel-2 fazendo parte do programa Copernicus da Comissão Europeia. O programa Copernicus, por contratualização dos serviços da ESA, fornece serviços de informação com base em satélites e dados *in-situ* com o objetivo de melhorar a qualidade de vida dos cidadãos da Europa (European Commission, 2019).

O Landsat-8, o mais recente satélite da família Landsat, foi lançado em 2013, com uma resolução temporal de 16 dias. Tem acoplados dois sensores, adquirindo imagens com 30m de resolução espacial nas bandas do visível, infravermelho próximo e limiar do vermelho, 100m de resolução nas bandas termicas, e 15m de resolução na banda pancromática (NASA, 2019).

A missão Sentinel-2 é baseada numa constelação de dois satélites, o primeiro satélite foi lançado em 2015 (2A) e o segundo em 2017 (2B), permitindo uma resolução temporal de 5 dias. Adquirem imagens multiespectrais com 13 bandas, tendo as bandas do visível e infravermelho próximo uma resolução espacial de 10m, as bandas do limiar do vermelho uma resolução de 20m e as bandas de correção atmosférica 60m de resolução espacial (ESA, 2019).

Ainda que a resolução espacial das imagens obtidas a partir dos satélites referidos não seja a ideal para a monitorização mais precisa de florestas, o facto de a resolução temporal ser inferior a 30 dias, permite que sejam efetuadas séries temporais densas, possibilitando assim análises ao longo de vários meses.

Wang *et al.* (2007) utilizaram duas imagens Landsat, do mês de outubro, uma de 1992 e outra de 2000, para detetar o declínio de espécies de Carvalho no Missouri, a partir das quais foram calculados os índices NDWI (*Normalized Difference Water Index*) (Gao, 1996) e NDVI (Rouse *et al.*, 1974), sendo posteriormente calculada a diferença para os dois índices entre o ano 2000 e 1992, do qual resultou um histograma com distribuição normal, em que os píxeis positivos representam uma recuperação, os píxeis perto de 0 representam a não alteração, e os píxeis a negativo representam o declínio dos carvalhos. Estes resultados foram comparados com a análise dos mapas de ocupação do solo de 1990 e 2003 numa matriz de correlação, obtendo uma precisão de cerca de 76%.

Em 2008 foi realizado em Portugal o “Inventário nacional de mortalidade de sobreiro na fotografia aérea digital de 2004/2006”, sendo este um dos primeiros estudos dedicados ao declínio do montado de sobreiro com base em técnicas de DR no país, no qual foram utilizadas imagens aéreas tratadas espectralmente de forma a que fosse possível identificar os sobreiros em declínio, usando o canal de

infravermelho da fotografia, identificando cerca de 330 mil árvores mortas, sendo ainda nomeadas algumas dinâmicas que levam à debilitação dos sobreiros (Ribeiro & Surový, 2008).

Costa *et al* (2009) realizaram uma análise dos padrões espaciais do declínio do sobreiro, utilizando fotografias aéreas digitais do verão de 2005 com 0,5m de resolução espacial, nas quais foram identificadas áreas onde existia a ocorrência de qualquer tipo de sintomas de declínio dos sobreiros, tais como a copa desbastada ou reduzida e a descoloração das folhas, a partir das quais foi calculado um índice de mortalidade (MI) que, juntamente com os dados de classificação de solos, declives, e exposição solar, serviram para criar um modelo de probabilidade de mortalidade de sobreiros, a partir do qual foi possível deduzir que o declínio pode estar associado ao stress hídrico.

Em Itália, foram efetuados estudos para detetar e mapear a floresta de sobreiros, primeiramente usando imagens do satélite Landsat-8, de 2014 entre maio e agosto e de abril de 2015 de duas áreas distintas, usando o método de classificação de máxima verosimilhança e de distância mínima, com o objetivo de avaliar o potencial das imagens do satélite para detetar as espécies de sobreiro (Modica *et al.*, 2016). Os mesmos autores (Modica *et al.*, 2019) voltaram a estudar a mesma área, comparando os resultados obtidos a partir do satélite Landsat-8 com os resultantes da utilização de imagens Sentinel-2, concluindo que, com segundo satélite, dadas as características das suas bandas espectrais, são obtidos mais detalhes na assinatura espectral da espécie em estudo, para além da importância das bandas do limiar do vermelho em aplicações relacionadas com a vegetação.

As imagens do satélite Landsat-5 (TM) foram usadas por alguns autores como Calvão & Palmeirim (2004) para estimar a quantidade de biomassa e o comportamento espectral da floresta mediterrânica, e Carreiras *et al.* (2006) com o objetivo de estimar a cobertura das copas de carvalhos usando imagens de agosto e setembro de 1995. Santos *et al.* (2016) utilizaram imagens do satélite Landsat-8 (OLI) dos últimos 15 anos, usando o EVI proposto por Huete *et al.* (2002), que quando comparadas com dados meteorológicos permitiram observar uma relação entre a produção de cortiça e as condições meteorológicas, existindo posteriormente estudos que relacionam o aumento da temperatura com o stress hídrico, que por sua vez provoca o aumento da evapotranspiração e consequentemente a diminuição de produção de cortiça e o declínio dos sobreiros (Camilo-Alves *et al.*, 2017).

García (2012), elaborou um estudo com imagens MODIS para analisar a resposta do montado português a diferentes fatores ambientais, tais como a precipitação, a temperatura e a humidade, utilizando uma série temporal de 12 anos, com recurso uma vez mais ao índice de vegetação NDVI. Os resultados que García obteve indicam que a variável meteorológica que mais influência tem sobre o NDVI é a precipitação, mostrando de forma satisfatória o efeito das secas de 2004 a 2005.

Com o lançamento do Sentinel-2, surgem estudos que exploram as bandas do limiar do vermelho, um dos quais usando imagens de janeiro a setembro de 2018, com o objetivo de comparar os níveis de clorofila com a estrutura da folha ao longo de uma série temporal, usando os índices de vegetação CIGreen (Zarco-Tejada *et al.*, 2001) e o NDVI (Rouse *et al.*, 1974) para detetar as condições de saúde dos sobreiros (Soares, 2018). Esta metodologia fora proposta por (Zarco-Tejada *et al.*, 2018), no entanto no caso em estudo, não foi possível distinguir claramente os sobreiros em condições saudáveis dos sobreiros em condições de declínio, sendo proposto que em estudos futuros seja tido em conta um período de pelo menos 3 anos e ter ainda em conta os vários níveis de condições de saúde das espécies. Usando também imagens Sentinel-2, surge em 2018 um estudo usando o NDVI calculado a partir de imagens dos anos 2015, 2016 e 2017, no qual é detetado um decréscimo da capacidade vegetativa dos sobreiros de cerca 5,5% (Recanatesi *et al.*, 2018).

# Capítulo 3

## DADOS E MÉTODOS

### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se no centro de Portugal, fazendo parte da subsecção-estatística NUTS III Lezíria do Tejo (Figura 3.1). Está dividida em duas parcelas distintas, pertencentes à Herdade da Machoqueira do Grou e à Companhia das Lezírias.

A Herdade da Machoqueira do Grou é uma propriedade agrícola familiar com 2,423 hectares situada no município da Chamusca. A produção dominante é o Montado de Sobreiro representando 42% da área total da herdade, com uma densidade média de 90 árvores/ha, existindo também produção de eucalipto e pinheiro bravo em menor escala (Corticeira Amorim & CE, 2010). A parcela estudada encontra-se a Sudoeste da Herdade e tem uma área de cerca de 14 hectares, com declives entre os 0 e os 13% (Figura 3.1 d)).

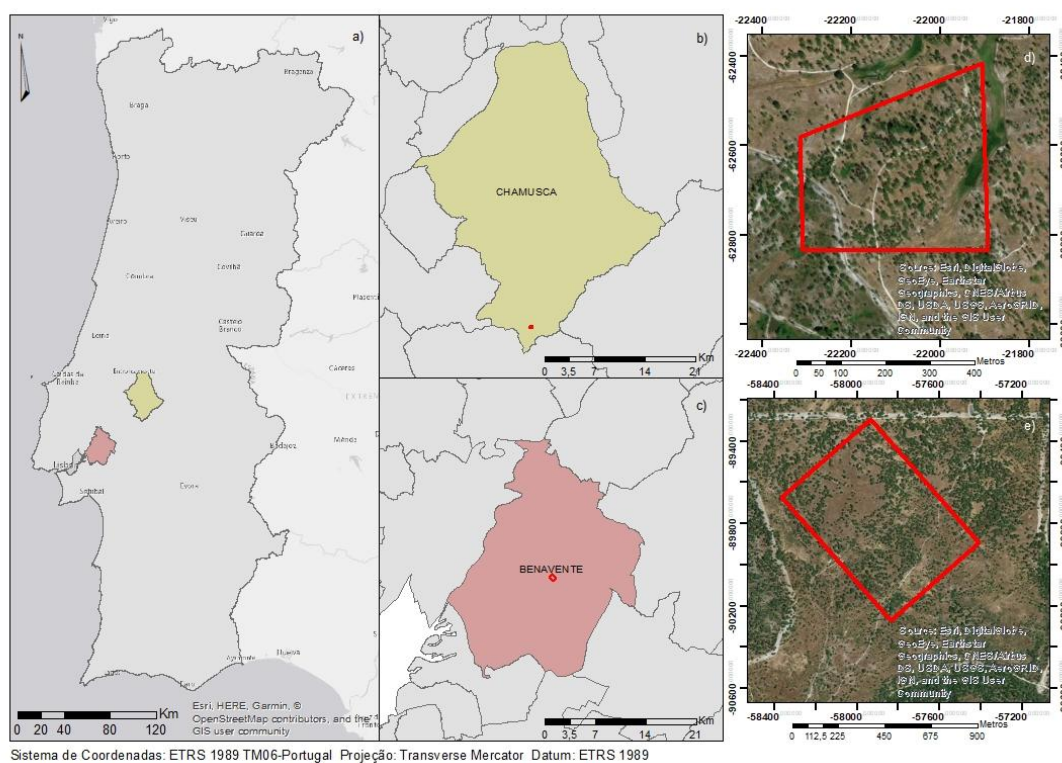


Figura 3.1 Localização da Área de Estudo. a) Localização dos Municípios de Chamusca e Benavente. b) Localização da parcela pertencente à Herdade da Machoqueira do Grou no Município da Chamusca. c) Localização da parcela pertencente à Companhia das Lezírias no Município de Benavente. d) Extrato aplicado na área da Herdade da Machoqueira do Grou. e) Subset aplicado na área da Companhia das Lezírias

A Companhia das Lezírias é a maior exploração agropecuária e florestal em Portugal e está localizada no Município de Benavente. A Charneca da Companhia das Lezírias tem cerca de 11 mil hectares dos quais 8.680 hectares destinados a produção florestal, com 77,5% correspondentes a área de sobreiro, cerca de 11% da área é de produção de pinheiro bravo, e os restantes 10% correspondem a produção

de pinheiro manso e eucalipto. Na restante área pertencente à Companhia das Lezírias pode encontrar-se produção de arroz, milho, vinha, olival e pastagens (Companhia das Lezírias, SA, 2019).

A parcela estudada é uma área de produção de sobreiro, encontra-se a Nordeste da exploração com uma área de cerca de 46 hectares, e tem declives entre os 0 e os 7% (Figura 3.1 e).

O clima da Lezíria do Tejo é caracteristicamente mediterrânico com influência continental, onde o inverno é frio e chuvoso, e o verão quente e seco. Para caracterizar o clima das duas parcelas foram obtidas do portal do IPMA as normais climatológicas 1971-2000 de Santarém (Figura 3.2), para a parcela da Machoqueira do Grou, e de Lisboa (Figura 3.3) para a parcela da Companhia das Lezírias. Os meses que apresentam temperaturas mais baixas são dezembro e janeiro, e os meses com temperaturas mais altas julho e agosto, com uma amplitude térmica média anual a variar entre os 10°C nos meses mais frios, e os 23°C nos meses mais quentes. No que diz respeito à precipitação média acumulada, varia entre os 6 mm nos meses mais quentes e os 122 mm nos meses frios. A humidade relativa da Lezíria do Tejo varia entre os 57% nos meses mais quentes, julho e agosto, e os 85% nos meses mais frios, dezembro e janeiro.

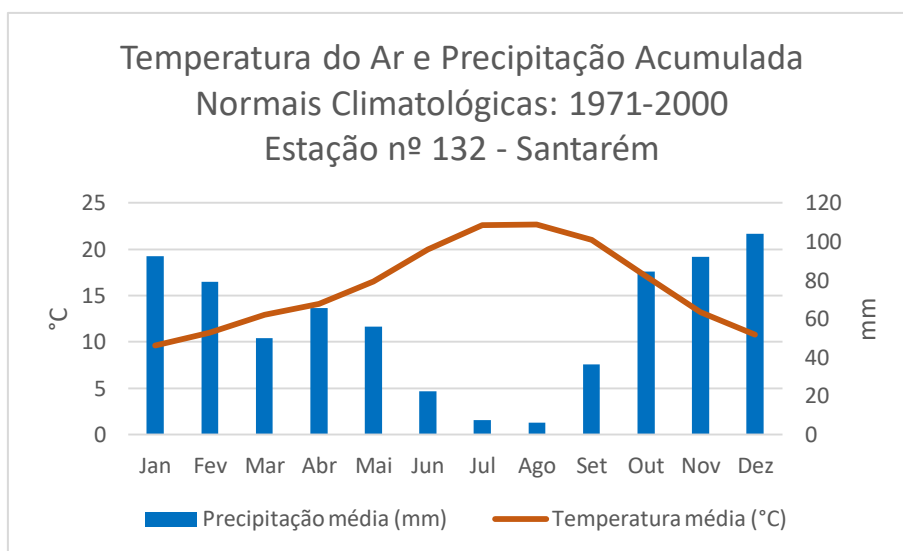


Figura 3.2 Valores de Precipitação e Temperatura do Ar. Normais Climatológicas 1971-2000 de Santarém. [Adaptado do IPMA, 2019]

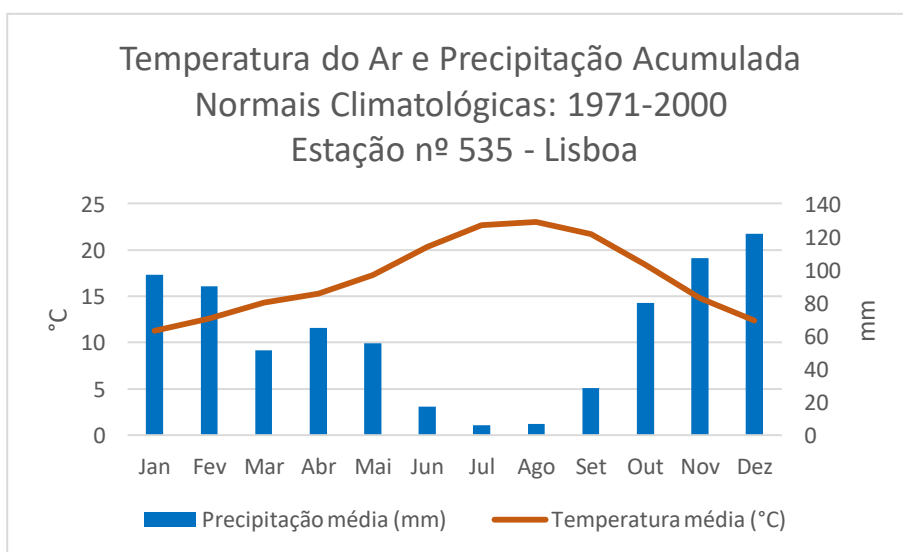


Figura 3.3 Valores de Precipitação e Temperatura do Ar. Normais Climatológicas 1971-2000 de Lisboa. [Adaptado do IPMA, 2019]

### 3.2. DADOS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho foi necessário proceder à recolha de alguns dados, nomeadamente dados meteorológicos, dados recolhidos no terreno, como fotografias aéreas, sobreiros coordenados e o seu estado fitossanitário e por fim imagens de satélite que contêm as duas áreas de estudo.

#### 3.2.1. Dados meteorológicos

Os dados meteorológicos foram recolhidos a partir da plataforma do Sistema Nacional de Informação de Recursos Hídricos (SNIRH) da Associação Portuguesa do Ambiente. A estação com dados de precipitação mensal mais próxima da área de estudo é a da Barragem de Magos (20E/01C), sendo recolhidos dados de 2016 a 2018.

#### 3.2.2. Dados recolhidos no terreno

Para a identificação dos sobreiros e o seu estado fitossanitário com o objetivo de posteriormente efetuar a caracterização espectral de cada classe de sobreiro (saudável, doente, morto), foram realizadas diversas idas ao terreno.

Em cada uma das visitas as áreas de estudo foram adquiridas imagens aéreas de alta resolução com recurso a um veículo aéreo não tripulado (VANT). O VANT utilizado foi o eBee Classic de asa fixa, com o sensor Parrot Sequoia+ da SenseFly, com uma autonomia de cerca de 30 minutos permitindo a cobertura de 100 ha num único voo com uma resolução espacial na ordem dos 1.5 cm, dependendo da altitude do voo e das condições atmosféricas. As características da câmara acoplada encontram-se na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 Características técnicas do sensor utilizado no VANT. (Adaptado de senseFly, 2019)

Parrot Sequoia+	
<b>Sensor</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RGB</li> <li>• Multiespectral:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Verde (530-570 nm)</li> <li>Vermelho (640-680 nm)</li> <li>Limiar do Vermelho (730-740 nm)</li> <li>Infravermelho próximo (770-810 nm)</li> </ul> </li> </ul>
<b>Resolução</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RGB – 16 MP</li> <li>• Single-band – 1.2 MP</li> </ul>
<b>Obturador</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RGB – Global Shutter</li> <li>• Single band – Rolling Shutter</li> </ul>
<b>FOV</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RGB:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>HFOV – 64°</li> <li>VFOV – 50°</li> <li>DFOV – 74°</li> </ul> </li> <li>• Single Band:                             <ul style="list-style-type: none"> <li>HFOV – 62°</li> <li>VFOV – 49°</li> <li>DFOV – 74°</li> </ul> </li> </ul>

As imagens obtidas a partir do VANT têm uma resolução espacial de cerca de 3 cm e encontram-se no sistema de coordenadas ETRS89/Portugal\_TM06, sendo a área coberta de cerca de 13,6 ha na parcela da Herdade da Machoqueira do Grou obtida a 26 de junho de 2018, e de 43,6 ha na parcela da Companhia das Lezírias, obtida a 23 de outubro de 2018.

Para além das fotografias aéreas, foram recolhidos dados e coordenadas de vários sobreiros, com recurso a um GPS portátil, juntamente com a informação do seu estado fitossanitário, sendo posteriormente gerado um ficheiro vetorial de pontos (Figura 3.4).

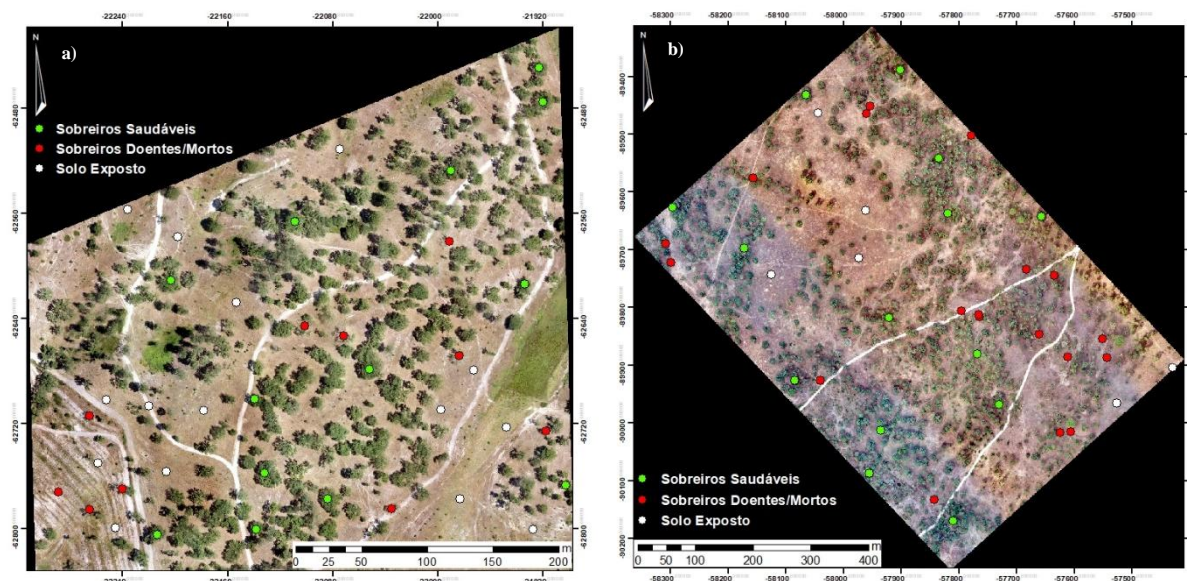


Figura 3.4 Localização dos Pontos Coordenados. a) Herdade da Machoqueira do Grou. b) Companhia das Lezírias

### 3.2.3. Imagens de Satélite

Para a realização das séries temporais foram utilizadas imagens do satélite Sentinel-2 entre 30 de abril de 2016 e 27 de setembro de 2018, no total de 47 imagens dos satélites Sentinel-2A e Sentinel-2B. As imagens estão disponíveis em acesso aberto na plataforma Copernicus Open Access Hub da European Space Agency (ESA), no sistema de coordenadas UTM29N/WGS84. Todas as imagens obtidas estão listadas na Tabela 3.2 e contêm as áreas das parcelas em estudo, não tendo evidências de efeitos atmosféricos como nevoeiro ou neblina.

Tabela 3.2 Data das imagens Sentinel-2A e Sentinel-2B adquiridas, Nivel 1-C

Ano	Mês											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
<b>2016</b>				30	20	15 29	9 19 29	8 18 28	7 17 27	7	16	6 26
<b>2017</b>				5 15	25	4 14	4 14 24	3 13 23	2 12 22	2 12 22	11 21	1 21
<b>2018</b>	30		21		10	19	29	8 18	17 27			

A missão Sentinel-2 é formada por uma constelação de dois satélites idênticos, percorrendo a mesma órbita, com uma separação de 180°, possibilitando a cobertura de todas as superfícies da Terra com um intervalo de 5 dias. O primeiro satélite foi lançado em junho de 2015 (Sentinel-2A) e o segundo foi lançado em março de 2017 (Sentinel-2B). As imagens fornecidas por estas missões Sentinel são de elevada importância para o programa Copernicus da Comissão Europeia, um programa de monitorização ambiental. O sensor multiespectral de alta resolução (MSI) que o satélite carrega tem 13 bandas espectrais, especificadas na Tabela 3.3, cujas resoluções espacial e espectral permitem fornecer

dados para mapear as mudanças na cobertura da terra, monitorizar florestas, mapear desastres ambientais como inundações, erupções vulcânicas, poluição em lagos e águas costeiras, entre outros, fornecendo continuidade e uma melhoria às missões Spot e Landsat (ESA, 2019).

Tabela 3.3 Características das bandas espectrais do Sentinel-2 (Adaptado de ESA, 2019)

Nº Banda	S2A	S2B	Resolução (m)
	Comprimento de onda (nm)	Comprimento de onda (nm)	
2 (Blue)	497	492	10
3 (Green)	560	559	
4 (Red)	665	665	
8 (NIR)	835	833	
5 (Vegetation Red Edge)	704	704	20
6 (Vegetation Red Edge)	740	739	
7 (Vegetation Red Edge)	783	778	
8a (Vegetation Red Edge)	865	864	
11 (SWIR)	1614	1610	
12 (SWIR)	2202	2186	
1 (Coastal Aerosol)	444	442	60
9 (Water Vapour)	945	943	
10 (SWIR cirrus)	1374	1377	

Os dois satélites têm uma órbita heliossíncrona polar, separados por 180° a uma altitude de 786 km da Terra, com uma faixa de cobertura de 290 km de largura. Em separado, cada satélite tem uma resolução temporal de 10 dias, conseguindo obter uma resolução temporal de 5 dias com o uso dos dois satélites. A resolução espacial varia entre os 10 m nas bandas visíveis e infra-vermelho, 20 m nas bandas do limiar do vermelho e infravermelho de ondas curtas, e os 60 m nas bandas de correção atmosférica.

As imagens obtidas pelo Sentinel-2 podem ser adquiridas com diversos níveis de processamento (Tabela 3.4), sendo que para o estudo realizado foram adquiridos os produtos do Nível-1C (LC1), fornecendo refletâncias normalizadas codificadas em números inteiros de 15 bits, com valores entre 1 e 10.000, para que as imagens não ocupem tanta memória (Gascon et al., 2016).

Tabela 3.4 Níveis de Processamento dos produtos da Missão Sentinel-2 (Adaptado de ESA, 2019)

Nível de processamento	Descrição
Nível-1B (L1B)	• Radiância do Topo da Atmosfera (TOA).
Nível-1C (L1C)	• Refletância do Topo da Atmosfera (TOA).
Nível-2A (L2A)	• Refletância do Fundo da Atmosfera (BOA)

### 3.2.4. Aplicações Informáticas

Para o processamento dos dados recolhidos foram utilizadas algumas aplicações informáticas, tais como ESA SNAP®, ArcGIS 10.6.1®, MatLab R2018a®, Pix4D®, Microsoft® e Excel® 365 (Tabela 3.5).

Tabela 3.5 Aplicações informáticas utilizadas no processamento dos dados recolhidos

Aplicação	Função
Pix4D	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processamento do mosaico de imagens aéreas</li> </ul>
ESA SNAP®	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Processamento das imagens Sentinel - 2</li> </ul>
ArcGIS 10.6.1®	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificação de classes de sobreiros</li> </ul>
MATLAB R2018a®	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Algoritmo de análise píxel a píxel</li> <li>• Cálculo de Índices de Vegetação</li> <li>• Criação de séries temporais</li> </ul>
Excel® 365	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estudo do comportamento dos Índices de vegetação na série temporal</li> <li>• Cálculo de estatísticas</li> </ul>

### 3.3. METODOLOGIA

Este trabalho pretende, com recurso a tecnologias de Deteção Remota, analisar o potencial das imagens Sentinel-2 para detetar a variabilidade temporal do estado fitossanitário dos sobreiros com base em séries temporais. A metodologia proposta pretende utilizar índices de vegetação com uma maior sensibilidade em diferenciar a resposta espectral de vegetação saudável e não saudável, e tentar identificar diferentes condições fitossanitárias dos sobreiros, realizando uma análise píxel a píxel para diversos índices de vegetação ao longo da série temporal.

A metodologia apresentada divide-se em 3 etapas principais: (1) a aquisição das imagens aéreas e coordenação de árvores em diferentes condições fitossanitárias, (2) o tratamento das imagens aéreas com vista à geração dos ortomosaicos e por fim, (3) o cálculo de índices de vegetação com imagens do satélite Sentinel-2 e a posterior criação de séries temporais.

#### 3.3.1. Voo

Para a aquisição das fotografias aéreas foram realizados diversos voos nas duas parcelas estudadas. Os voos foram realizados de acordo com as normas da Direção-Geral do Território para os voos com fins cartográficos (Direção-Geral do Território, 2016). Foram marcados 5 pontos fotogramétricos (PF's) no terreno, com chapas de alumínio de 40x40 cm, pintadas a preto com faixas brancas e vermelhas em forma de cruz no centro. A localização dos pontos fotogramétricos foi definida em gabinete, sendo posicionados de forma a que quatro PF's estivessem nos limites da área a ser levantada e visíveis na fotografia e o último no centro, sendo a sua coordenação efetuada com recurso a um GPS-RTK. A precisão estimada das coordenadas dos pontos fotogramétricos é de cerca de 2 cm. Na Figura 3.5 estão apresentadas as placas de alumínio utilizadas para a marcação dos pontos fotogramétricos e a sua posterior coordenação. Os voos foram efetuados com uma altitude média relativa ao solo de 140 m, sendo a sobreposição longitudinal de 75% e a sobreposição lateral de 70%.

O processamento das imagens adquiridas para criar os ortofotos foi efetuado de forma automática no software Pix4D. As ortofotos utilizadas para o estudo em questão foram adquiridas a 26 de junho na Herdade da Machoqueira do Grou, e a 23 de outubro na Companhia das Lezírias.



Figura 3.5 Pontos fotogramétricos e sua coordenação

### 3.3.2. Coordenação de sobreiros

Paralelamente à aquisição das fotografias aéreas foram ainda coordenados com recurso ao GPS-RTK alguns sobreiros mortos e saudáveis, juntamente com a informação do seu estado fitossanitário, a partir dos quais foi gerado um ficheiro vetorial de pontos. Estes pontos não correspondem à localização exata do centro da árvore. Em gabinete procedeu-se à sobreposição do ficheiro das coordenadas dos sobreiros com o ortofoto, e por análise visual de imagem os pontos foram editados de forma a que coincidissem com o centro da árvore.

### 3.3.3. Caracterização espectral

As ortofotos adquiridas com o VANT foram utilizadas para identificar e digitalizar por análise visual de imagem sobreiros mortos/doentes, sobreiros saudáveis e solo exposto, para ser efetuada a caracterização espectral das três classes. Para esse fim, foram identificadas e digitalizados num ficheiro vetorial de pontos os sobreiros correspondentes às três classes, juntamente com os sobreiros coordenados anteriormente no terreno e relocalizados para o centroide das árvores (Tabela 3.6).

Tabela 3.6 Nº de pontos digitalizados por classe

<i>Classe</i>	<b>Herdade da Machoqueira do Grou</b>	<b>Companhia das Lezírias</b>
<i>Sobreiros Mortos/Doentes</i>	14	13
<i>Sobreiros Saudáveis</i>	19	10
<i>Solo Exposto</i>	6	15

Estes pontos obtidos por análise visual de imagem foram posteriormente sobrepostos à série temporal de imagens de satélite para obter a assinatura espectral de cada classe ao longo do período temporal em análise.

#### 3.3.4. Tratamento das imagens Sentinel-2

As imagens Sentinel-2 dos três anos, 2016 a 2018, foram obtidas a partir da plataforma online do Copernicus, e selecionadas as 47 imagens que não apresentavam cobertura de nuvens ou quaisquer evidências de outros efeitos atmosféricos. Para o cálculo de alguns dos índices foram utilizadas as bandas do limiar do vermelho (*Red Edge*), com uma resolução espacial de 20 m, e por isso foi necessário realizar uma reamostragem para 10 m, sendo posteriormente selecionado um extrato (4.790 linhas x 7.309 colunas) onde estivessem inseridas as duas áreas de estudo. Os valores digitais (DN) das imagens Sentinel-2 foram transformados em refletâncias dividindo o DN por 10000 de acordo com os metadados do produto.

#### 3.3.5. Índices de Vegetação

Os índices de vegetação permitem uma análise mais detalhada da refletância da vegetação, realçando diferentes tipos de vegetação, e os estados fitossanitários em que se encontram. Para este trabalho foram selecionados diversos índices de vegetação, apresentados na Tabela 3.7 Índices de Vegetação testados, recorrem às bandas do visível, do infravermelho próximo e do limiar do vermelho.

O NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) é calculado a partir das bandas do vermelho e infra-vermelho próximo, sendo obtidos valores entre o 0 e o 1, sendo que os valores perto de 0 representam ausência de vegetação, e perto de 1, representam grande atividade fotossintética, ou seja, vegetação vigorosa.

Os Índices de Clorofila (CI), utilizam as bandas do limiar do vermelho, correspondentes a um pico de absorção de clorofila na curva de refletância da vegetação, e a banda do verde, sendo que o fator dominante no controlo da refletância das folhas nestes comprimentos de onda é a pigmentação da vegetação.

O GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*) é semelhante o NDVI, substituindo a banda do vermelho pela banda do verde, verificando-se que este é mais sensível à concentração de Clorofila do que o NDVI (Gitelson et al., 1996), e tal como o NDVI, varia entre 0 (ausência de vegetação) e 1 (vegetação vigorosa).

O EVI (*Enhanced Vegetation Index*) permite minimizar as influências da atmosfera e do solo, otimizando o sinal da vegetação. A equação inclui três constantes, L que é a constante de ajuste do solo, sendo L=1; C1 e C2 que são os coeficientes usados para corrigir os efeitos da atmosfera, usando a banda do azul para corrigir os efeitos atmosféricos na banda do vermelho, sendo C1=6 e C2=7,5.

O índice SAVI (*Soil-Adjusted Vegetation Index*) foi adaptado do NDVI, acrescentando o fator de correção do brilho do solo, pretendendo diminuir a influência do solo quando a cobertura de vegetação é baixa. Nesta equação a constante L varia entre 0 (alta cobertura de vegetação) e 1 (ausência de vegetação saudável), sendo o valor de L=0,5 o recomendado e utilizado para este estudo.

Tabela 3.7 Índices de Vegetação testados

Índice	Fórmula	Autor
NDVI	$\frac{b8 - b4}{b8 + b4}$	(Rouse et al., 1974)
$CI_{red-edge1}$	$\frac{b5}{b6}$	(Zarco-Tejada et al., 2001)
$CI_{red-edge2}$	$\frac{b7}{b5} - 1$	(Gitelson et al., 2003, 2006)
$CI_{green}$	$\frac{b7}{b3} - 1$	(Gitelson et al., 2003, 2006)
GNDVI	$\frac{b8 - b3}{b8 + b3}$	(Gitelson et al., 1996)
EVI	$2,5 \times \frac{b8 - b4}{b8 + C1.b4 - C2.b2 + L}$	(Justice et al., 1998)
SAVI	$\frac{(1 + L) \times b8 - b5}{b8 + b5 + L}$	(Huete A. , 1998)

### 3.3.6.Criação de séries temporais

Para o cálculo dos índices de vegetação referidos na Tabela 3.7 foi desenvolvido um algoritmo em ambiente Matlab de análise píxel a píxel, que é corrido sobre cada uma das 47 imagens de satélite, criando 329 novas bandas, correspondentes aos índices em cada data, com o objetivo de criar séries temporais.

Este algoritmo começa por criar uma máscara para cada uma das parcelas a partir dos ficheiros vetoriais de pontos criados para cada classe (Tabela 3.6), reprojatados para o sistema de coordenadas UTM29N/WGS84. De seguida, os índices de vegetação são calculados para cada imagem, criando as novas bandas às quais são aplicadas as máscaras criadas anteriormente, para as duas áreas de estudo (CL e HMG), guardando assim o valor dos índices em cada píxel pertencente à máscara. Os dados obtidos no processo anterior são guardados em seis ficheiros de texto (três classes para cada uma das parcelas) estruturados em quatro colunas: nº de sobreiro, índice, data, valor do índice.

O algoritmo foi corrido com 4 séries temporais distintas, apresentadas na Tabela 3.8 com o objetivo de comparar os resultados inter-anuais e intra-anual. Sendo assim, para a análise inter-anual numa primeira fase foram obtidos os dados para o total das imagens dos três anos trabalhados, numa segunda fase foi selecionada 1 imagem de satélite por mês, e por fim, foram selecionadas imagens de maio, abril e maio e setembro e outubro. Para a análise intra-anual, o algoritmo foi corrido para as imagens de cada ano em separado.

Tabela 3.8 Séries temporais utilizadas

Nº Série Temporal	1	2	3	4
Meses	Todos	Todos	Mar, Abr, Mai	Set, Out
Nº Imagens	47	25	7	12

Com os ficheiros de texto obtidos a partir do algoritmo desenvolvido, foram criados gráficos para cada índice e série temporal, cuja representação em gráficos de caixas permite concentrar uma grande quantidade de dados num só gráfico, indicando valores máximos, mínimos, médias e ainda o primeiro

e terceiro quartis, facilitando a análise dos resultados. Foram ainda calculados os valores de média e desvio padrão global para cada uma das classes e representados em gráficos.

Para melhor compreensão da dinâmica dos índices nas séries temporais, foram ainda adicionados gráficos de precipitação média mensal e precipitação acumulada dos últimos três meses.

# Capítulo 4

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. ASSINATURAS ESPECTRAIS

É com base na radiação refletida em cada banda do espectro eletromagnético que conseguimos distinguir os sobreiros mortos ou doentes, saudáveis e o solo exposto, sendo que a assinatura espectral de cada uma das classes varia também consoante a estação do ano, existindo mais ou menos água no solo, e a extensão da área coberta por folhas ser maior ou menor.

Assim, foram criadas as assinaturas espectrais de cada classe para duas datas distintas ao longo do ano 2016, tendo em conta a precipitação verificada ao longo desse mesmo ano, representada na Figura 4.1, selecionando as imagens de satélite de 30 de abril e 29 de julho, a primeira correspondente à época de chuva, e a segunda à época seca.

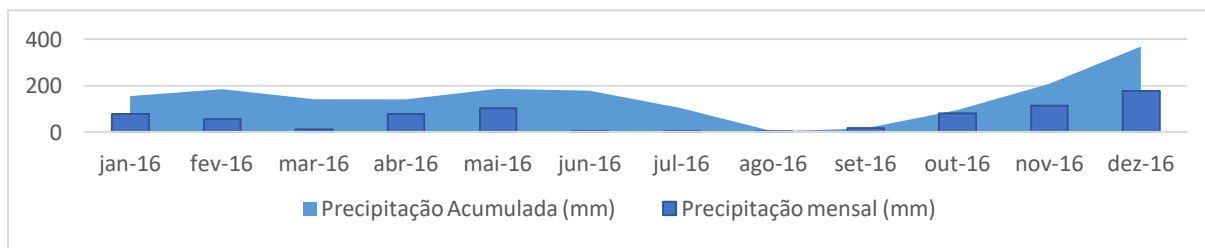


Figura 4.1 Gráfico da precipitação mensal e acumulada dos últimos 3 meses para o ano de 2016 (Adaptado de SNIRH, 2018)

Nas Figura 4.2 e Figura 4.3 são apresentadas as assinaturas espectrais das três classes, sobreiros saudáveis, sobreiros doentes ou mortos e solo exposto para as duas épocas em questão. Na época de chuvas, Figura 4.2, o comportamento espectral das três classes é semelhante nos comprimentos de onda do visível, representando os pigmentos das folhas, e as curvas começam a afastar-se nos comprimentos de onda do limiar do vermelho e infravermelho próximo, que representam a estrutura da célula das folhas. Já na época seca, Figura 4.3, verificamos uma inversão de comportamento das curvas de cada classe, denotando o pico de absorção da clorofila no comprimento de onda do vermelho apenas na curva dos sobreiros saudáveis.

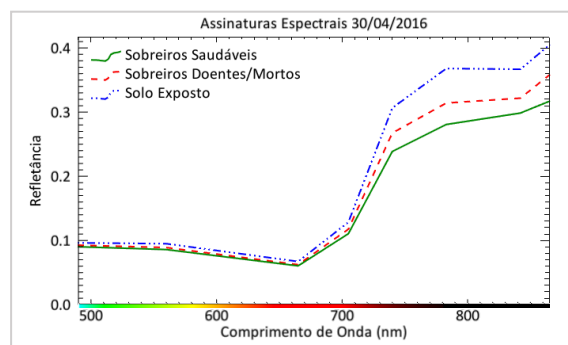


Figura 4.2 Assinaturas Espectrais de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época de Chuvas. Companhia das Lezírias

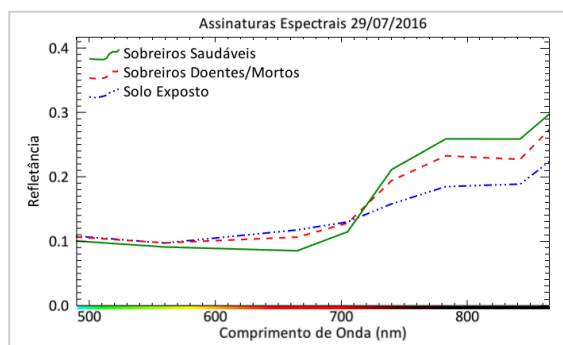


Figura 4.3 Assinaturas Espectrais de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época Seca. Companhia das Lezírias

De um modo geral, o comportamento espectral dos sobreiros saudáveis mantem-se ao longo das estações do ano, já os sobreiros doentes ou secos, apresentam menores valores de refletância na estação seca, principalmente nos comprimentos de onda do limiar do vermelho e infravermelho. A diferença das duas curvas pertencentes à classe de solo exposto explica-se pelo facto de na época de chuva existir vegetação no solo para pasto, assim, na época seca, a curva do solo exposto indica-nos uma maior refletância no comprimento de onda do vermelho, e menor nos comprimentos de onda do limiar do vermelho e infravermelho, indicando a ausência de vegetação vigorosa.

## 4.2. ÍNDICES DE VEGETAÇÃO

Os índices de vegetação permitem que seja observada de forma mais eficaz a presença de vegetação e a sua robustez, tal como a presença ou ausência de água, sendo os valores mais altos indicativos de vegetação vigorosa, e os valores mais baixos indicativos de cursos de água, solo exposto ou áreas artificializadas.

Nas Figura 4.4 e Figura 4.5 são apresentados os sete índices de vegetação calculados para o extrato da imagem de satélite no dia 30/04/2016, que inclui as duas áreas estudadas, a Norte a Herdade da Machoqueira do Grou, e a Sul a Companhia das Lezírias.

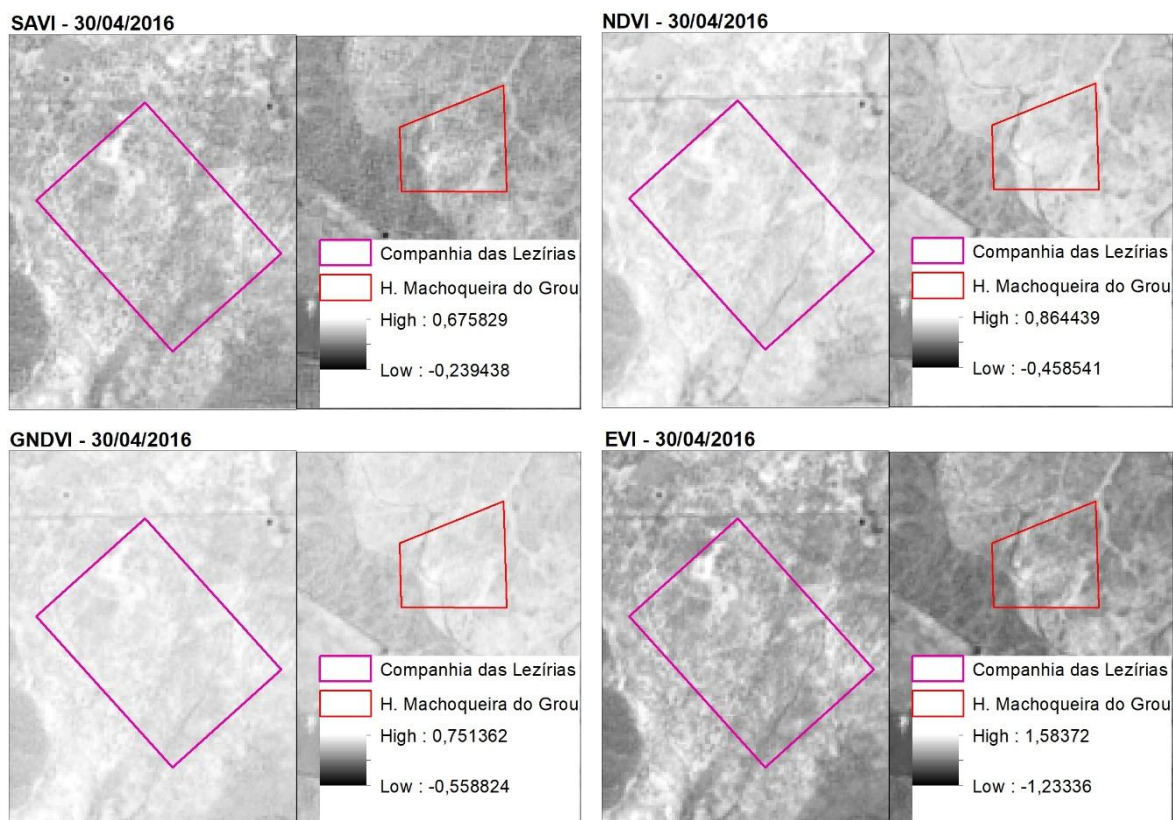


Figura 4.4 Índices de Vegetação calculados para a imagem de satélite de 30/04/2016 (SAVI, NDVI, GNDVI, EVI)

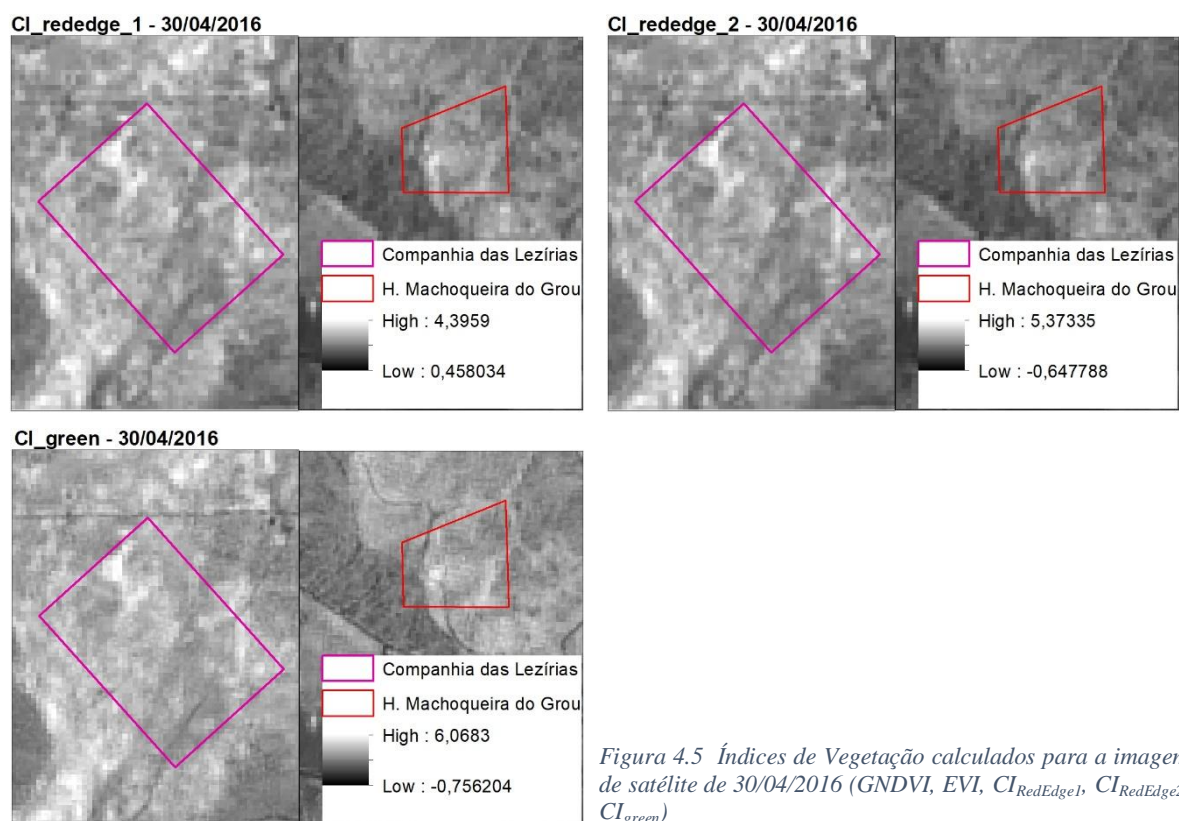


Figura 4.5 Índices de Vegetação calculados para a imagem de satélite de 30/04/2016 (GNDVI, EVI,  $CI_{RedEdge1}$ ,  $CI_{RedEdge2}$ ,  $CI_{green}$ )

### 4.3. ANÁLISE DE SÉRIES TEMPORAIS

Para a análise dos resultados obtidos nas séries temporais, foram selecionados os três índices com melhores resultados no que diz respeito à distinção entre sobreiros saudáveis, sobreiros doente/mortos e solo exposto.

Num primeiro momento, foram analisadas as séries temporais para cada índice com todas as imagens da Tabela 3.2, num total de 47 datas.

Nas Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, encontram-se os índices EVI, NDVI e  $CI_{RedEdge2}$  respetivamente, da área de estudo da Herdade da Machoqueira do Grou. Os índices EVI e NDVI apresentam resultados idênticos, existindo uma separação clara entre as curvas dos sobreiros saudáveis e das duas restantes classes entre os meses de junho a outubro, sendo que nos restantes meses, entre novembro e maio, a diferença entre as três classes não é perceptível. Verifica-se um maior número de valores atípicos no EVI, respeitante à classe de solo exposto nos meses de inverno, podendo estes resultar de ajustes do solo e atmosfera que o índice em causa permite efetuar, sendo por isso mais sensíveis à vegetação rasteira existente nos meses indicados.

O índice  $CI_{RedEdge2}$  foi calculado para testar a importância do limiar do vermelho na monitorização do montado de sobreiro. De acordo com resultados da figura 4.8 o índice  $CI_{RedEdge2}$  apresenta uma maior confusão entre classes, sendo que as classes de Sobreiros Secos e Solo Exposto não apresentam uma clara distinção na série temporal.

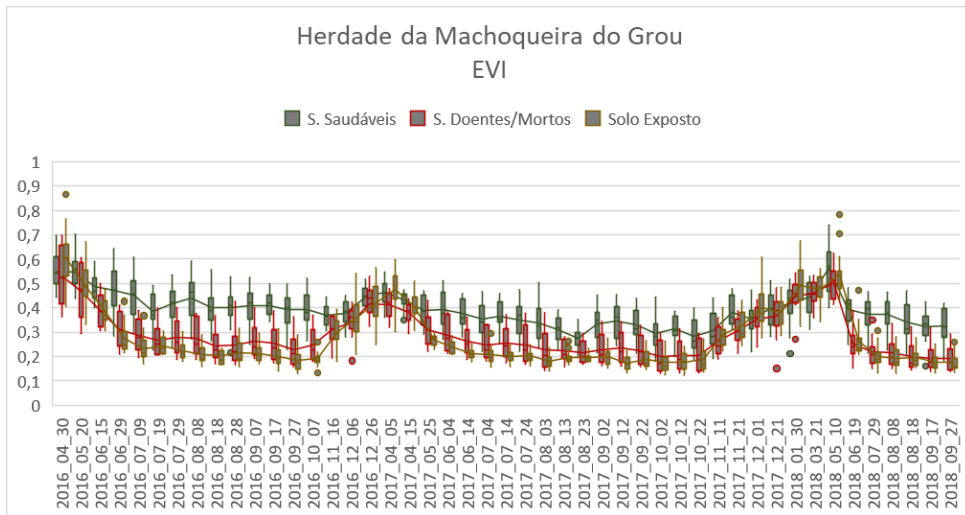


Figura 4.6 EVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

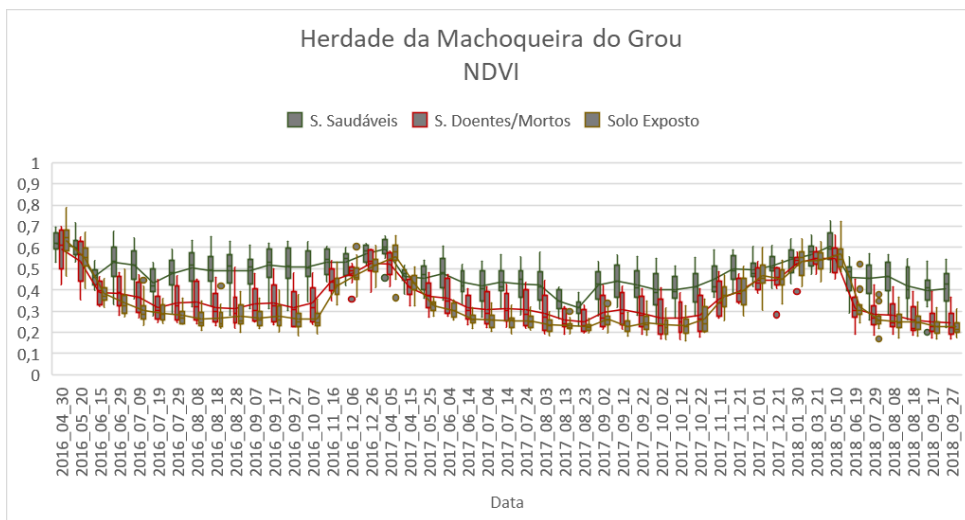


Figura 4.7 NDVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

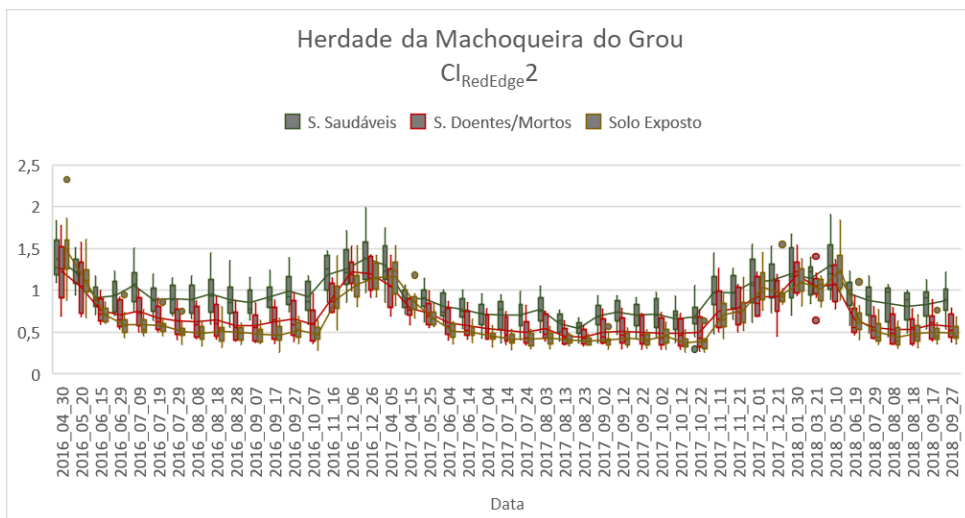


Figura 4.8  $CI_{RedEdge2}$  - Série Temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

A área de estudo na Herdade da Machoqueira do Grou caracteriza-se pela distribuição dispersa e irregular dos sobreiros, e sendo a resolução espacial das imagens adquiridas do Sentinel-2 de 10m, leva a que os resultados sejam influenciados, visto que um só píxel contém por vezes mais área de solo exposto do que sobreiros saudáveis ou secos.

As Figura 4.9, Figura 4.10 e Figura 4.11 correspondem aos índices EVI, NDVI e  $CI_{RedEdge2}$  da área de estudo da Companhia das Lezírias, onde podemos observar uma clara distinção entre todas as classes, inclusivamente entre a classe de sobreiros secos/doentes e a classe de solo exposto, ao contrário do que se verifica na área de estudo da Herdade da Machoqueira do Grou. Esta distinção é visível entre os meses de junho e outubro, sendo que nos meses de novembro a maio os valores obtidos pelos índices são semelhantes para as três classes.

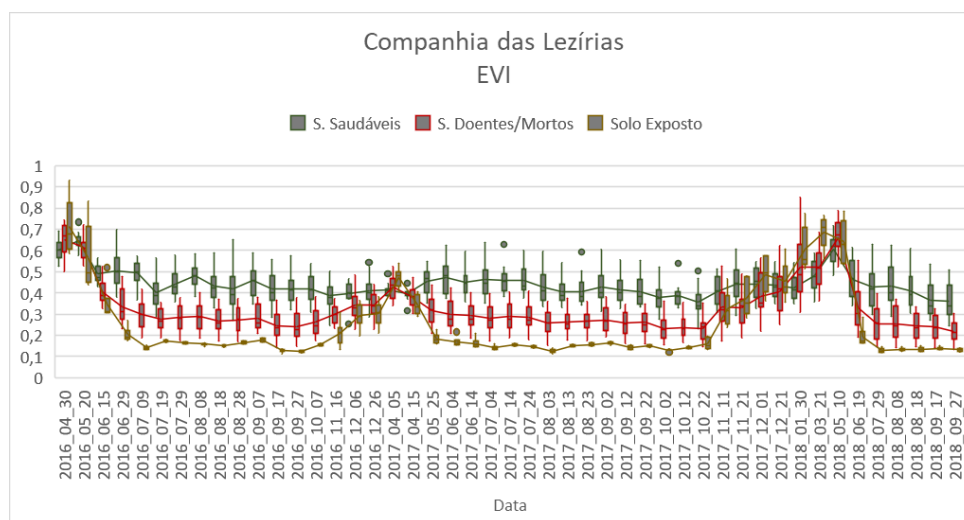


Figura 4.9 EVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

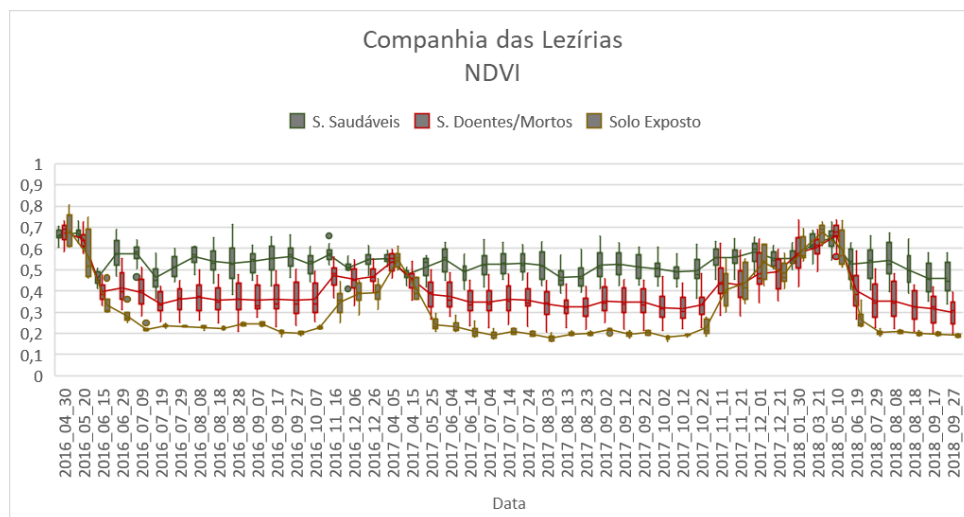


Figura 4.10 NDVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

Na Figura 4.9 conseguimos ainda observar que nos meses de janeiro e março, os valores de EVI da classe solo exposto se sobrepõem às outras duas classes, situação que não é visível na Figura 4.10 correspondente ao índice NDVI, justificado pelas constantes de ajuste ao solo e correção de efeitos atmosféricos existentes no EVI, tornando-se assim mais sensível à vegetação rasteira.

Ao contrário do observado na série temporal do  $CI_{RedEdge2}$  da Herdade da Machoqueira do Grou, na área de estudo da Companhia das Lezírias, o  $CI_{RedEdge2}$  apresenta resultados mais satisfatórios, sendo possível observar a distinção entre as três classes apresentadas, não sendo no entanto tão claros quanto o EVI e o NDVI.

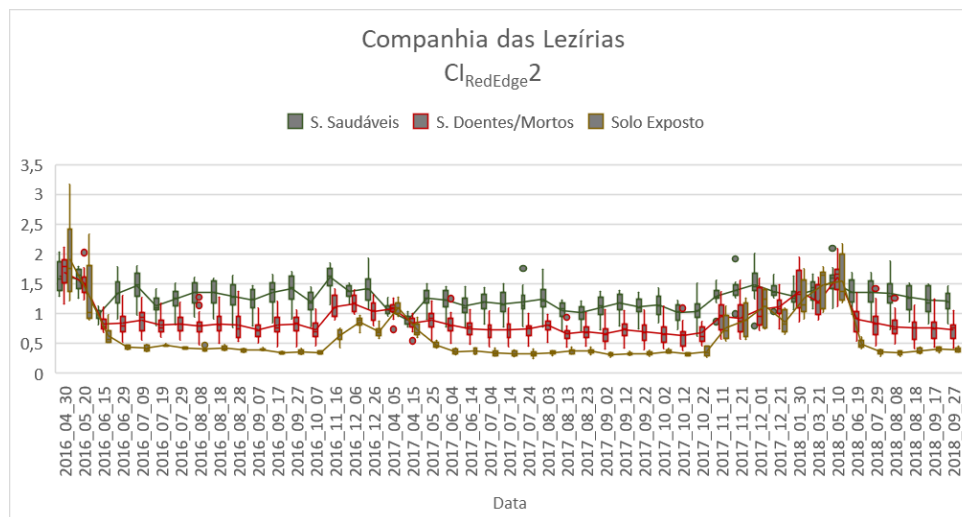


Figura 4.11  $CI_{RedEdge2}$  - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

Existindo uma tendência notória ao longo da série temporal, e sendo o sobreiro uma árvore de folha perene, não sofrendo por isso alterações significativas ao longo de um mês, foram testadas ainda as séries temporais com apenas uma imagem por mês, num total de 25 datas, com o objetivo de verificar se existe necessidade de aquisição de imagens com um intervalo de 5 dias.

Os resultados estão apresentados nas figuras Figura 4.12 a Figura 4.15, respeitantes aos índices de vegetação EVI e NDVI, para cada uma das áreas de estudo. A utilização de um menor número de datas permite visualizar as tendências já observadas nas séries temporais de 47 datas, existindo assim menor ruído visual para a análise dos resultados.

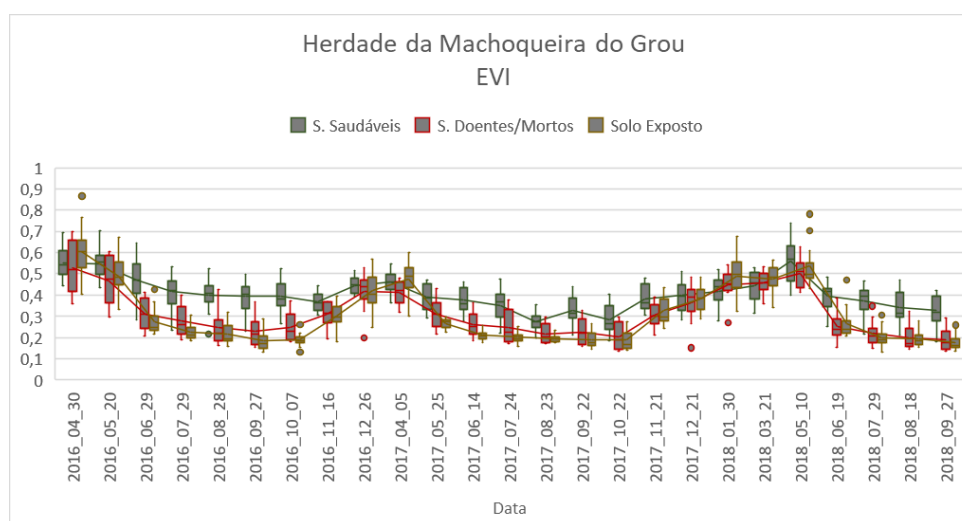


Figura 4.12 EVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

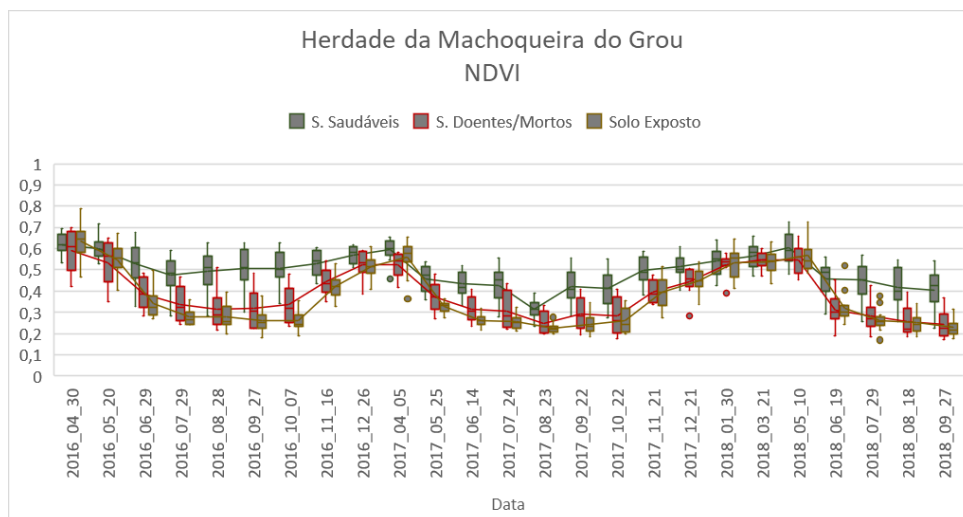


Figura 4.13 NDVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

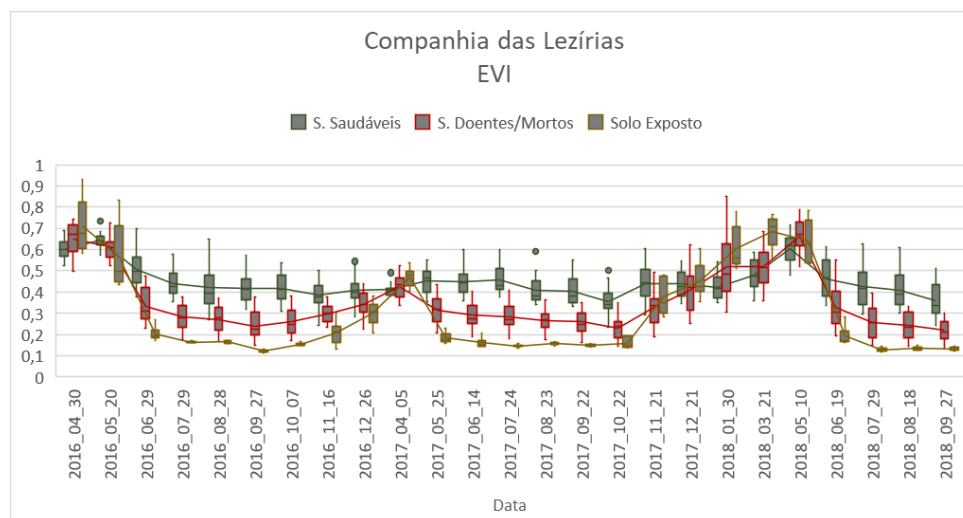


Figura 4.14 EVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

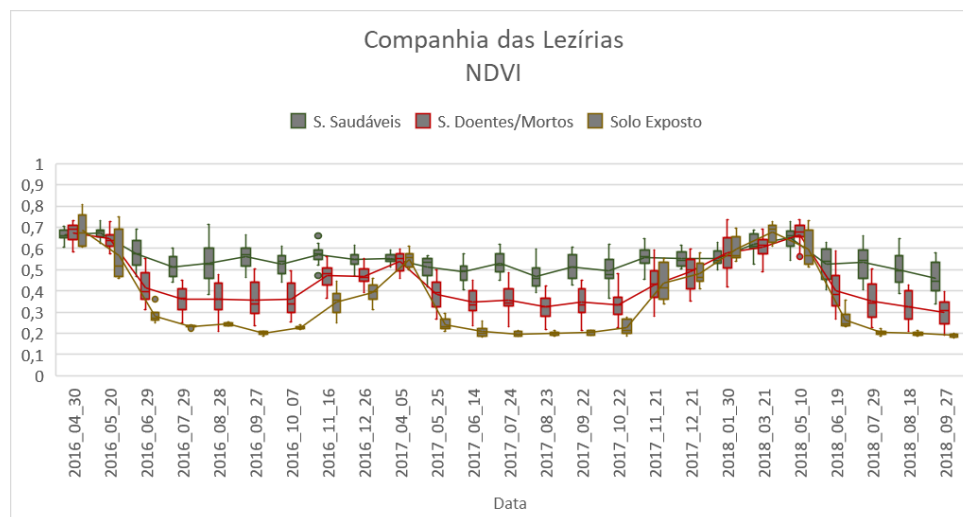


Figura 4.15 NDVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

A aquisição de um menor número de imagens permite que o tratamento das imagens, cálculo de índices e posterior criação de séries temporais seja efetuada de forma mais célere, obtendo ainda

assim, como já foi referido, resultados bastante satisfatórios no que diz respeito à distinção da condição fitossanitária dos sobreiros.

#### 4.4. RELAÇÃO DA CONDIÇÃO FITOSSANITÁRIA COM A PRECIPITAÇÃO

Como foi descrito nas secções anteriores, a tendência verificada é que existe um aumento da atividade de fotossíntese nos meses de primavera, e que esta diminui ao longo dos restantes meses atingindo o valor mais baixo nos meses de verão. Sendo que Portugal tem um clima Mediterrâneo, no qual o verão corresponde à época seca, e o inverno à época de chuvas, o aumento da atividade de fotossíntese poderá estar relacionado com uma maior disponibilidade de água no solo, relacionada diretamente com a precipitação ocorrida.

Para testar esta hipótese foi utilizada a série temporal de 25 datas do índice de vegetação NDVI para a área de estudo da Companhia das Lezírias, juntamente com os dados do SNIRH de precipitação mensal da Barragem de Magos, apresentados na Figura 4.16.

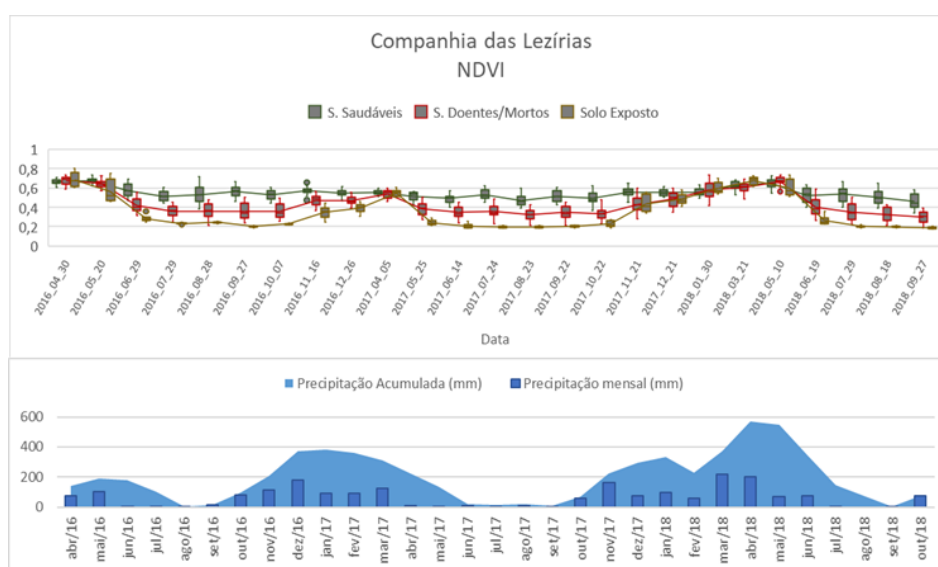


Figura 4.16 Série temporal do índice de vegetação NDVI e Precipitação mensal e acumulada

De facto, verifica-se uma relação entre a curva da classe de sobreiros doentes/mortos e a precipitação, em que com o aumento da precipitação a atividade fotossintética da classe de sobreiros doentes/mortos aumenta, sendo igual à dos sobreiros saudáveis. Com a ausência de chuva os sobreiros em perda de vitalidade reduzem fortemente a sua atividade fotossintética diferenciando-se dos sobreiros saudáveis. No limite inferior encontramos o solo com uma fraca atividade fotossintética nos meses de verão.

Para comprovar e caracterizar esta relação foi ainda criado um gráfico onde é relacionado o valor de NDVI com a precipitação acumulada, apresentado na Figura 4.17. Confirma-se então que, quando a precipitação acumulada é menor, as três classes estudadas se distinguem com clareza, e à medida que a precipitação acumulada é maior, principalmente a partir dos 140 mm de precipitação acumulada, os valores de NDVI das três classes têm tendência a igualar-se. Para valores de precipitação acumulada até aos 50 mm, os valores de NDVI para a classe de solo exposto encontram-se entre os 0,19 e os 0,23, na classe de Sobreiros Doentes/Mortos os valores ficam-se entre os 0,31 e 0,36 e finalmente a classe de Sobreiros Saudáveis apresenta valores entre os 0,46 e os 0,55.

Mais uma vez, o facto de a resolução espacial das imagens Sentinel-2 utilizadas ser de 10 m influencia os resultados obtidos, sendo que dentro de cada píxel se pode encontrar parte das três classes estudadas.

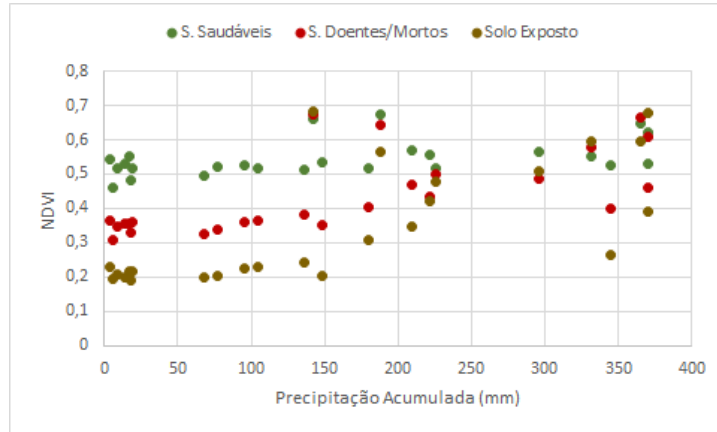


Figura 4.17 Relação entre a precipitação acumulada e o NDVI

#### 4.5. ESTATÍSTICAS

Com os resultados obtidos nas séries temporais, verifica-se que será possível distinguir sobreiros saudáveis de sobreiros doentes/mortos a partir dos valores obtidos nos índices de vegetação. Para se determinar os limites de separabilidade entre as três classes foram calculados os quartis do índice NDVI para cada uma das três classes. Estas estatísticas foram apenas calculadas para os meses secos, definindo um limite de precipitação mensal inferior a 20 mm, podendo assim evitar o ruído causado pela vegetação rasteira que se verifica na época de chuva e irá influenciar a resposta espectral obtida. Os resultados estão apresentados na Figura 4.18, na qual se encontram representados os limiares de NDVI obtidos a partir do 1º e 3º quartil da amostra, representando 50% da amostra para cada uma das classes. Assim é possível distinguir as três classes, sendo o limiar para os sobreiros saudáveis de 0,46-0,57 com uma média de 0,52, para os sobreiros doentes ou mortos o limiar é de 0,31-0,42 com uma média de 0,36, e finalmente, para a classe de solo exposto o limiar é de 0,20-0,24 com uma média de 0,24.

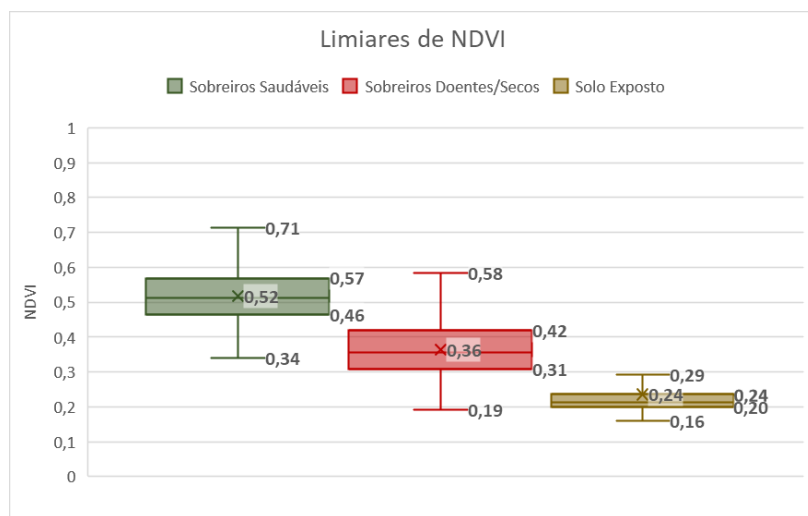


Figura 4.18 Limiares de NDVI para as classes de Sobreiros Saudáveis, Sobreiros Doentes/Mortos e Solo Exposto. Época seca. Companhia das Lezírias

# Capítulo 5

## CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Neste trabalho de projeto foram aplicadas técnicas de Detecção Remota para avaliar a condição fitossanitária do montado sobreiro, obtendo informação a partir de imagens de alta resolução espacial (10 m) e temporal (5 a 10 dias). Para tal, foram testados diversos índices de vegetação, calculados a partir de imagens Sentinel-2, ao longo de duas séries temporais.

As imagens Sentinel-2 foram adquiridas durante três anos, de 2016 a 2018, a partir das quais foram criadas e avaliadas as assinaturas espectrais de três classes verificadas no subsistema montado: sobreiros saudáveis, sobreiros doentes/mortos, e o solo exposto, em duas datas distintas, uma para a época de chuvas e outra para a época seca, permitindo verificar em que comprimentos de onda do espectro eletromagnético é possível fazer uma distinção entre as classes referidas.

O algoritmo utilizado permitiu calcular os sete índices de vegetação selecionados, NDVI,  $CI_{RedEdge1}$ ,  $CI_{RedEdge2}$ ,  $CI_{Green}$ , GNDVI, EVI e SAVI, para as 47 imagens obtidas, de forma sistemática e rápida, extraindo os valores para cada uma das classes usando as máscaras obtidas a partir das ortofotos adquiridas por VANT. As séries temporais permitem acompanhar a evolução dos sobreiros ao longo dos três anos em questão, e sendo que os sobreiros são uma árvore de folha perene, é possível utilizar apenas uma imagem por mês, no entanto, a resolução espacial das imagens Sentinel-2 não é a ideal, sendo que um píxel com 10 m de resolução poderá incluir uma maior percentagem de área de solo exposto, influenciando os valores obtidos pelos índices.

A elaboração de séries temporais com os valores extraídos permitiu tirar algumas conclusões, verificando-se uma clara relação entre a resposta espectral de cada uma das classes com os valores de precipitação verificados em cada mês. A época seca será então o melhor período para conseguir distinguir as três classes estudadas, visto que na época de chuva, e pela interferência da vegetação existente no solo e que ganha vigor com a presença de água, todas as classes têm respostas espectrais semelhantes. Os índices que melhor caracterizam a diferença entre classes são o NDVI e o EVI, sendo que com este último poder-se-ão obter melhores resultados no futuro testando outros valores para a constante de ajuste de solo. Os resultados obtidos na Herdade da Machoqueira do Grou e na Companhia das Lezírias são visivelmente diferentes, sendo que a área de estudo da HMG tem uma distribuição dos sobreiros mais dispersa, tal como a sua altimetria.

Apesar das condicionantes de resolução espacial existentes, tendo em conta apenas imagens da época seca, foi possível obter intervalos de NDVI que podem caracterizar cada uma das classes, sendo que a classe de solo exposto terá valores entre os 0,16 e os 0,31, a classe de sobreiros doentes/mortos terá valores entre os 0,29 e os 0,44 e finalmente a classe de sobreiros saudáveis, que é a que melhor se distinguirá, terá valores entre os 0,45 e os 0,59.

A utilização de imagens obtidas por VANT permitem a utilização de imagens com melhor resolução espacial, no entanto tornam-se inviáveis para o projeto GEOSUBER, visto que a área de cobertura acaba por se tornar reduzida, e o processo de cobrir toda a área que é pretendido estudar acaba por ser moroso e dispendioso.

Tendo em conta os resultados obtidos, a metodologia utilizada pode sofrer melhoras significativas no futuro, sugerindo que sejam utilizadas imagens de melhor resolução espacial, as quais permitirão incluir apenas uma das classes estudadas num maior número de píxeis, permitindo uma melhor avaliação da condição fitossanitária dos sobreiros. Apesar de os satélites com maior resolução espacial serem comerciais, cada imagem cobre uma grande área que abrange um vasto leque de produtores pertencentes à União da Floresta Mediterrânica (UNAC), cuja área de intervenção se prende nos interesses dos produtores florestais da área mediterrânica portuguesa, sendo assim uma mais valia para estes a aquisição destas imagens.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APCOR. (20 de 03 de 2019). *Floresta*. Obtido de APCOR - Associação Portuguesa da Cortiça: <http://www.apcor.pt/montado/floresta/>
- Basso, B., Cammarano, D., & De Vita, P. (2004). Remotely Sensed Vegetation Indices: Theory and Applications for Crop Management. *Revista Italiana di Agrometeorologia*, pp. 36-53.
- Cabral, M., Ferreira, M., Moreira, T., Carvalho, E., & Diniz, A. (1992). Diagnóstico das Causas da Anormal Mortalidade dos Sobreiros a Sul do Tejo. *SCIENTIA gerundensis*(18), pp. 205-214.
- Calvão, T., & Palmeirim, J. M. (2004). Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behaviour. *25*(00), pp. 1-14.
- Câmara-Pestana, J. (1899). Doenças do Sobreiro. *Arquivo Rural*(4).
- Câmara-Pestana, J. (1989). Doenças do Sobreiro. *Arquivo Rural*(3).
- Camilo-Alves, C. S., Vaz, M., Esteves da Clara, M., & Ribeiro, N. M. (2017). Chronic cork oak decline and water status: new insights. *New Forests*(48), pp. 753-772.
- Carreiras, J. M., Pereira, J. M., & Pereira, J. S. (2006). Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. *Forest Ecology and Management*(223), pp. 45-53.
- Clevers, J., & Verhoef, W. (Fevereiro de 1993). LAI Estimatio by Means of the WDV: A Sensivity Analysis with a Combined PROSPECT-SAIL Model. *Remote Sensig Reviews*, pp. 43-64.
- Companhia das Lezírias, SA. (04 de 2019). *Resumo do Plano de Gestão Florestal*. Obtido de Gestão Florestal Sustentável - Companhia das Lezírias: [https://www.cl.pt/gestao\\_florestal\\_sustentavel.pdf](https://www.cl.pt/gestao_florestal_sustentavel.pdf)
- Corticeira Amorim & CE. (2010). *Valuation of Ecosystem Services at the Local Scale - Case Study - The Role of the Cork Oak Montado at Herdade da Machoqueira do Grou (Portugal)*. Corticeira Amorim SGPS, SA & C.E. Liège.
- Costa, A., Pereira, H., & Madeira, M. (2010). Analysis of spatial patterns of oak decline in cork oak woodlans in Mediterranean conditions. *Annals of Forest Science, Springer Verlag/EDP Sciences* , 67 (2).
- Devy-Vareta, N. (2003). O Regime Florastal em Portugal através do século XX (1903-2003). *Revista da Faculdade de Letras - Geografia, XIX*, pp. 447-455.
- Direção-Geral do Território. (01 de 06 de 2016). Cartografia e Ortofotocartografia à escala 1:2000 - Normas técnicas de produção e reprodução.
- ESA. (19 de 03 de 2019). *Sentinel-2*. Obtido de ESA: [https://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/Copernicus/Sentinel-2](https://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2)
- European Commission. (02 de 2019). *Copernicus*. Obtido de <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>
- FAO. (2018). *The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development*. Rome.
- Gao, B. (1996). NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sens. Environ.* 58 (3), pp. 257-266.
- Gascon, F., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., . . . Fernandez, V. (2016). Copernicus Sentinel-2 Calibration and Products Validation Status. *Preprints*.
- Gitelson, A., Gritz, Y., & Merzlyak, M. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology*(160), pp. 271-282.
- Gitelson, A., Kaufman, Y., & Merzlyak, M. (1996). Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 58, pp. 289-298.
- Gitelson, A., Keydan, G., & Merzlyak, M. (2006). Three-band model for noninvasive estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters*(33).

- Huete, A. (1998). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), pp. 295-309.
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E., Gao, X., & Ferreira, L. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indexes. *Remote Sens. Environ*(83), pp. 195-213.
- IPMA. (07 de 2019). *Normais Climatológicas - 1971-2000 - Lisboa*. Obtido de IPMA: <http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/012/>
- IPMA. (07 de 2019). *Normais Climatológicas - 1971-2000 - Santarém*. Obtido de IPMA: <http://www.ipma.pt/pt/oclima/normais.clima/1971-2000/018/>
- Justice, C., Vermonte, E., Townshend, J., Defries, R., Roy, D., Hall, D., . . . Strahler, A. (1998). The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), pp. 1228-1249.
- Lopes-Pimentel, A. (1946). O sobreiro também é parasitado pela *Phytophthora cambivora* (Petri) Buis., agente da doença da tinta do castanheiro. *Publicações da Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas*(13), pp. 45-49.
- Modica, G., Pollino, M., & Solano, F. (2019). Sentinel-2 Imagery for Mapping Cork Oak (*Quercus suber* L.) Distribution in Calabria (Italy): Capabilities and Quantitative Estimation. *Springer International Publishing AG*, pp. 60-67.
- Modica, G., Solano, F., Merlino, A., Di Fazio, S., Barreca, F., Laudari, L., & Fichera, C. R. (2016). Using Landsat 8 imagery in detecting cork oak (*Quercus suber* L.) woodlands: a case study in Calabria (Italy). *Journal of Agricultural Engineering 2016; volume XLVII:571*, pp. 205-215.
- Moreira, A., Medeira, C., Maia, I., Quartin, V., Matos, M., & Cravador, A. (2006). Studies on the Association of the *Quercus suber* Decline Disease with *Phytophthora cinnamomi* in Portugal. *Bol. Inf. CIDEU*(1), pp. 31-38.
- NASA. (19 de 03 de 2019). *Landsat 8 - Mission Details*. Obtido de Landsat Science: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/mission-details/>
- Natividade, J. (1950). *Subericultura*. Lisboa: Ministério da Economia. Direcção Geral dos Serviços Florestais e Aquícolas.
- Neves, C. (1950). *Introdução à Entomologia Florestal portuguesa. A Serra e o Homem*. Colecção Livros Agrícolas.
- Oliveira, A. (1931). Apontamentos para o estudo de duas doenças do sobreiro. *Revista Agronómica*(19), pp. 7-24.
- PEFC. (18 de 03 de 2019). *Floresta Portuguesa*. Obtido de PEFC Portugal: <https://www.pefc.pt/certificacao-gfs/introducao/floresta-portuguesa>
- Perry, D., Oren, R., & Hart, S. (2008). *Forest Ecosystems*. JHU Press.
- Pinto-Correia, T., Ribeiro, N., & Potes, J. (2013). *Livro Verde dos Montados*. Évora: ICAAM - Instituto de Ciências Agrárias e Ambientais Mediterrânicas.
- Ramires, A. (1898). O parasitismo do sobreiro. *Portugal Agrícola*(8), pp. 227-235.
- Recanatesi, F., Giuliani, C., & Ripa, M. N. (2018). Monitoring Mediterranean Oak Decline in a Peri-Urban Protected Area Using the NDVI and Sentinel-2 Images: The Case Study of Castelporziano State Natural Reserve. *Sustainability*.
- Ribeiro, N. d., & Surovy, P. (2008). *Inventário Nacional de Mortalidade de Sobreiro na Fotografia Aérea Digital de 2004/2006*. Évora.
- Rodrigues de Sousa, E. M., Santos, M. N., Varela, M. C., & Henriques, J. (Outubro de 2017). Perda de Vigor dos Montados de Sobre e Azinho: Análise da Situação e Perspetivas. Ministério da Agricultura, do Desenvolvimento Rural e das Pescas; Direcção Geral dos Recursos Florestais; INRB, I.P.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the Vernal Advancement of Retrogradation (Greenwave effect) of Natural Vegetation; Type III, Final Report.
- Santos, M. (2003). Contribuição para o conhecimento das Relações *Quercus suber* - *Biscogniauxia mediterranea* (syn. *Hypoxylon mediterraneum*). *Silva Lusitana*, 11, pp. 21-29.
- Santos, M. J., Baumann, M., & Esgalhado, C. (2016). Drivers of Productivity Trends in Cork Oak Woodlands over the last 15 Years. *Remote Sensing*, 8(6), 486.

- senseFly. (09 de 04 de 2019). *Cameras*. Obtido de senseFly: <https://www.sensefly.com/cameras/>
- Soares, F. M. (Maio de 2018). Temporal effects of cork oak (*Quercus suber* L.) decline in the red-edge spectral region. *PH.D Program in Biodiversity, Genetics and Evolution*.
- Wang, C., Lu, Z., & Haithcoat, T. L. (2007). Using Landsat images to detect oak decline in the Mark Twain National Forest, Ozark Highlands. *Forest Ecology and Management* 240, pp. 70-78.
- Zarco-Tejada, P. J., Hornero, A., Hernández-Clemente, R., & Beck, P. S. (2018). Understanding the temporal dimension of the red-edge spectral region for forest decline detection using high-resolution hyperspectral and Sentinel-2a imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*(137), pp. 134-148.
- Zarco-Tejada, P., Miller, J., Noland, T., Mohammed, G., & Sampson, P. (2001). Scaling-up and model inversion methods with narrowband optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*(39), pp. 1491-1507.

# ANEXOS

## I. Índices de Vegetação Herdade da Machoqueira do Grou

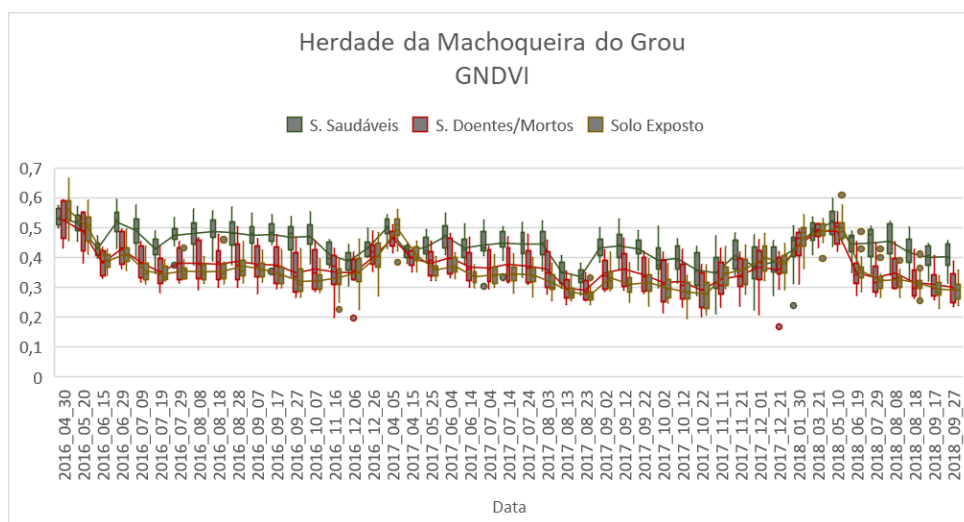


Figura A.1 GNDVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

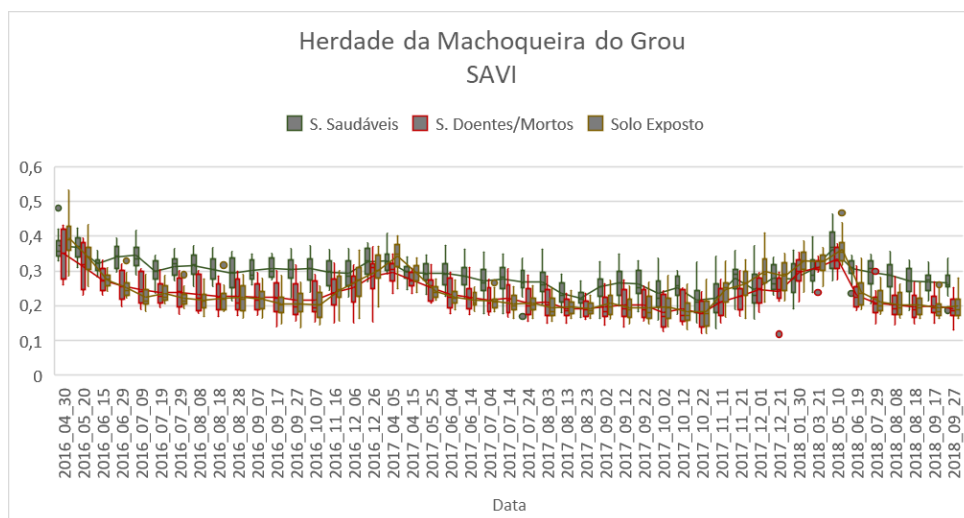


Figura A.2 SAVI - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

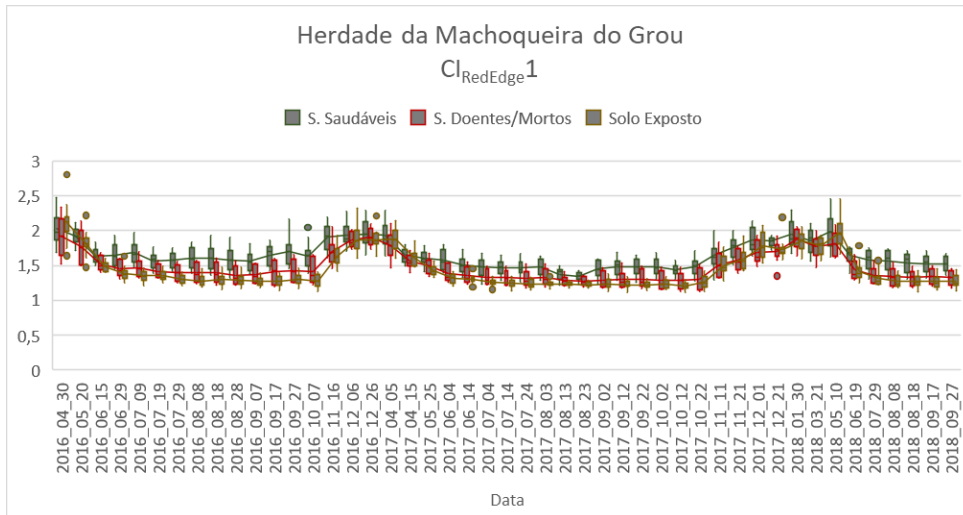


Figura A.3  $CI_{RedEdge1}$  - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

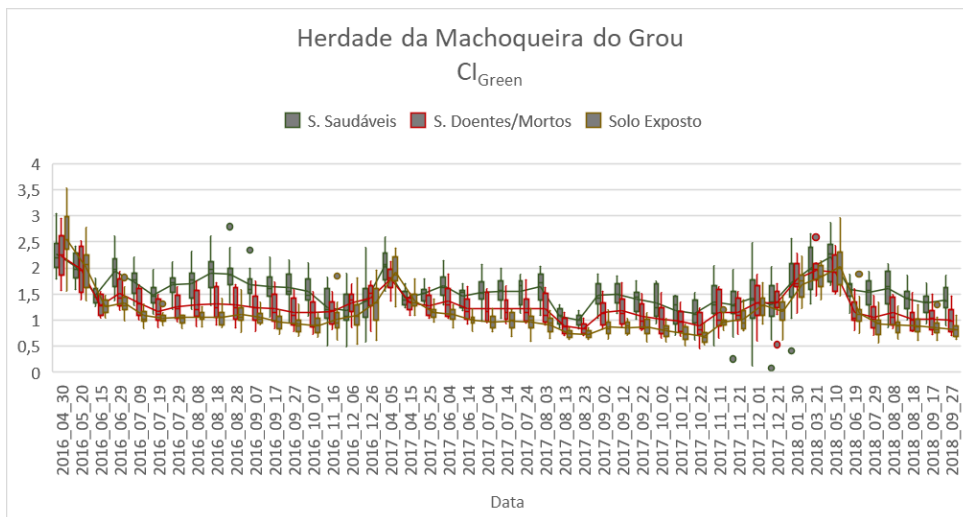


Figura A.4  $CI_{Green}$  - Série temporal de 47 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

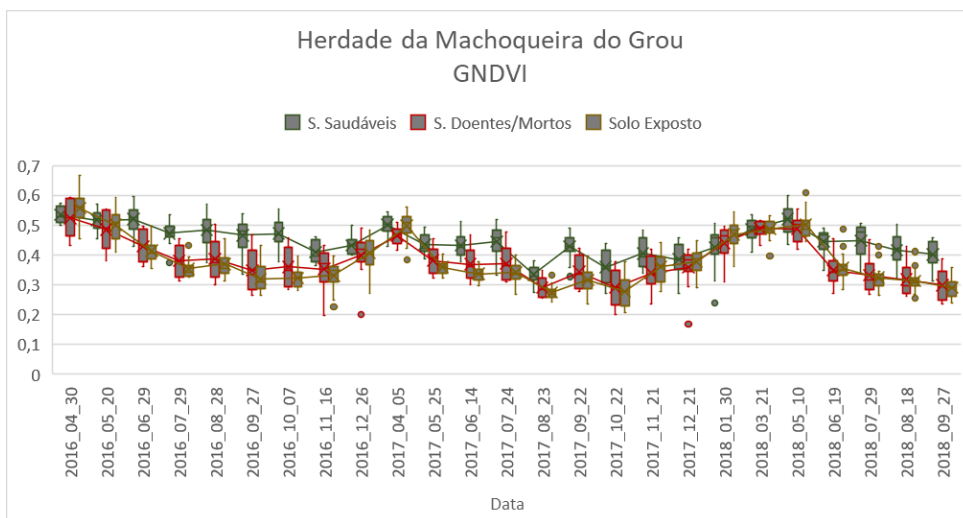


Figura A.5 GNDVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

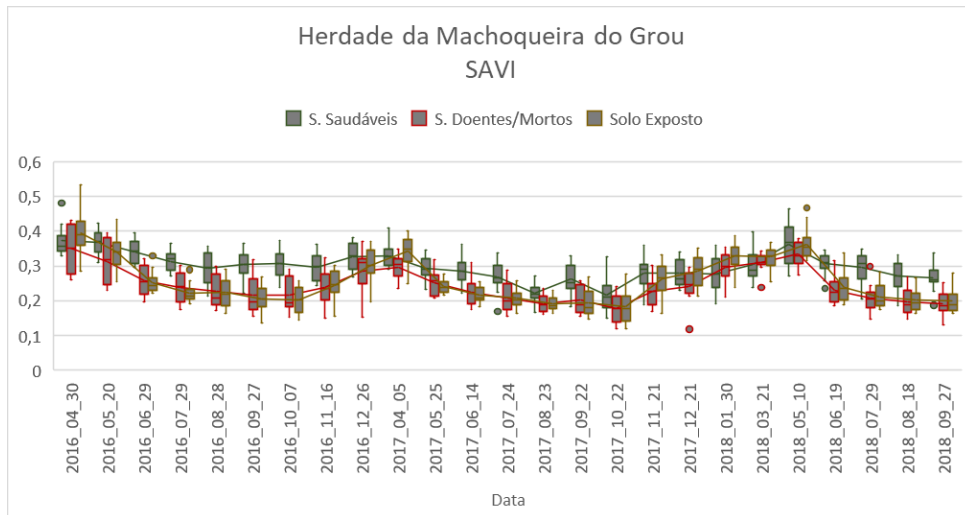


Figura A.6 SAVI - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

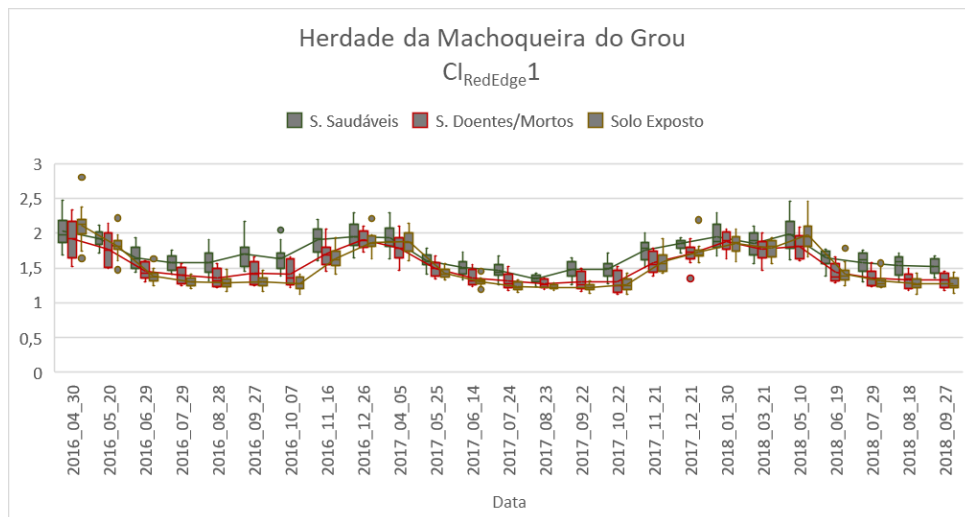


Figura A.7  $CI_{RedEdge1}$  - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

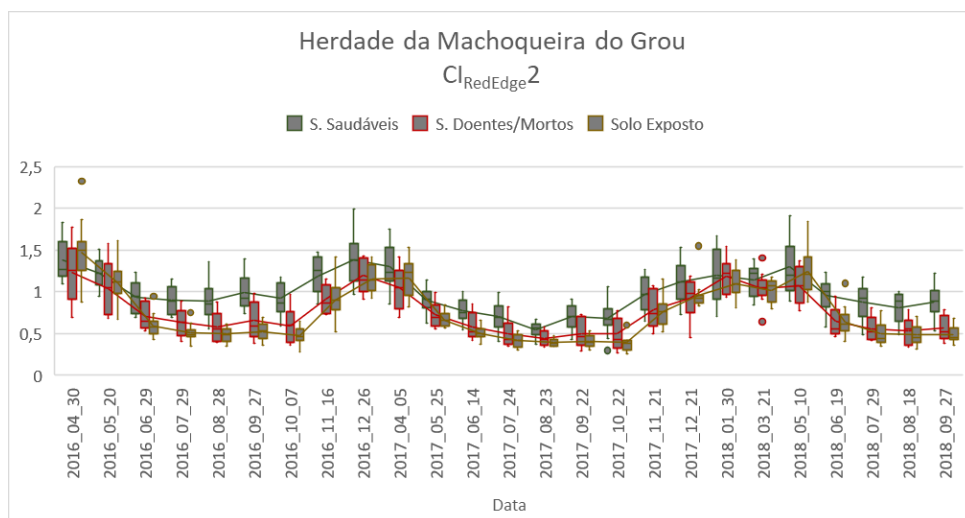


Figura A.8  $CI_{RedEdge2}$  - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

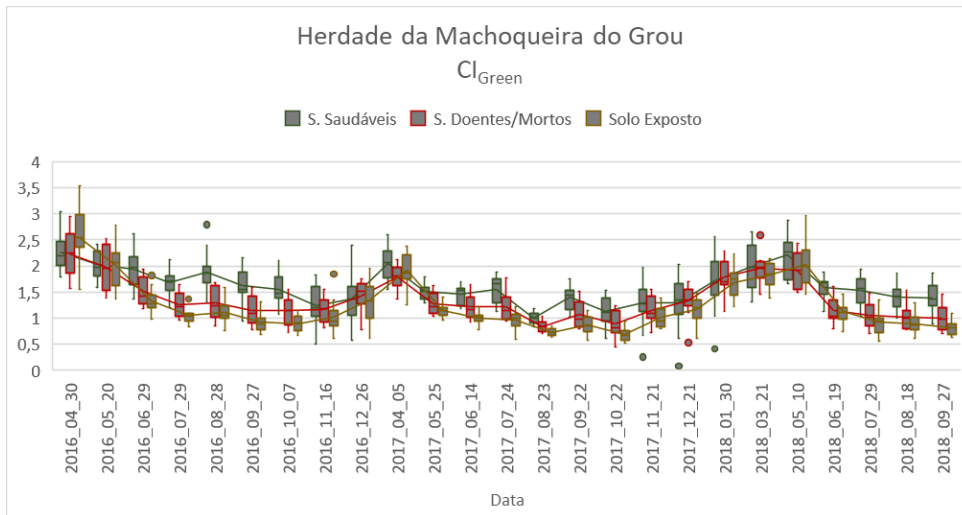


Figura A.9 CI<sub>Green</sub> - Série temporal de 25 datas. Herdade da Machoqueira do Grou

## II. Índices de Vegetação Companhia das Lezírias

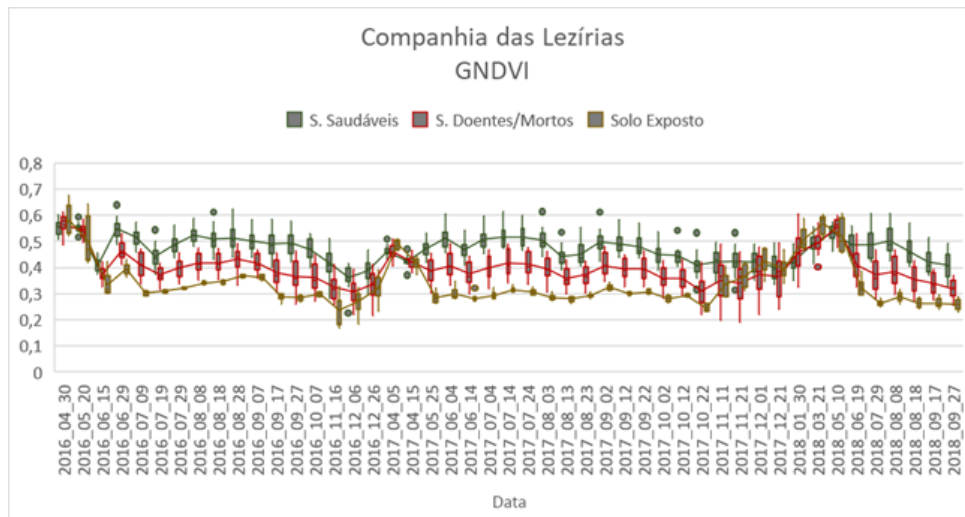


Figura A.10 GNDVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

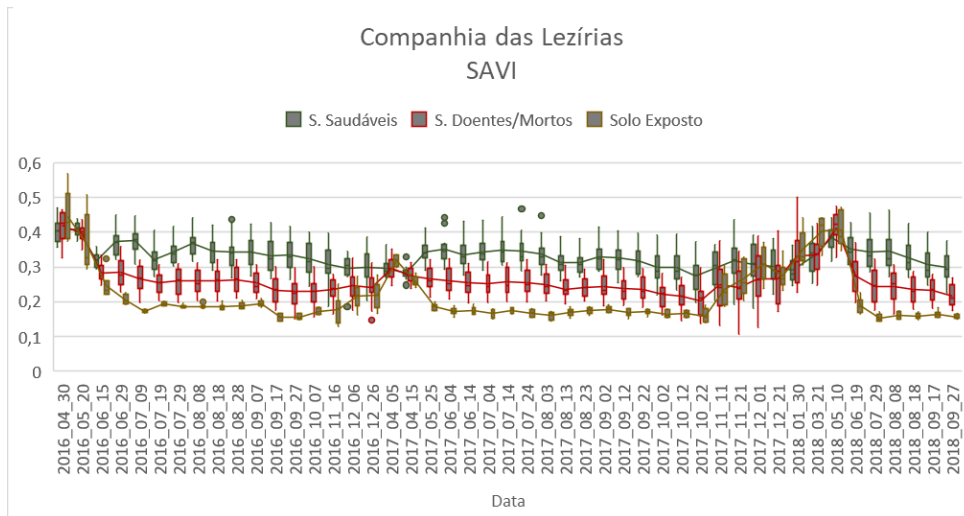


Figura A.11 SAVI - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

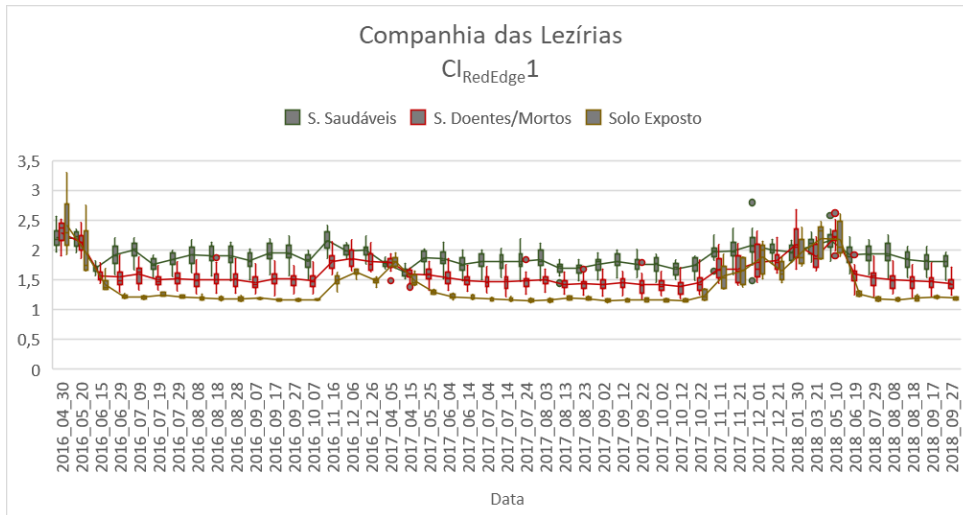


Figura A.12 CI<sub>RedEdge</sub>1 - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

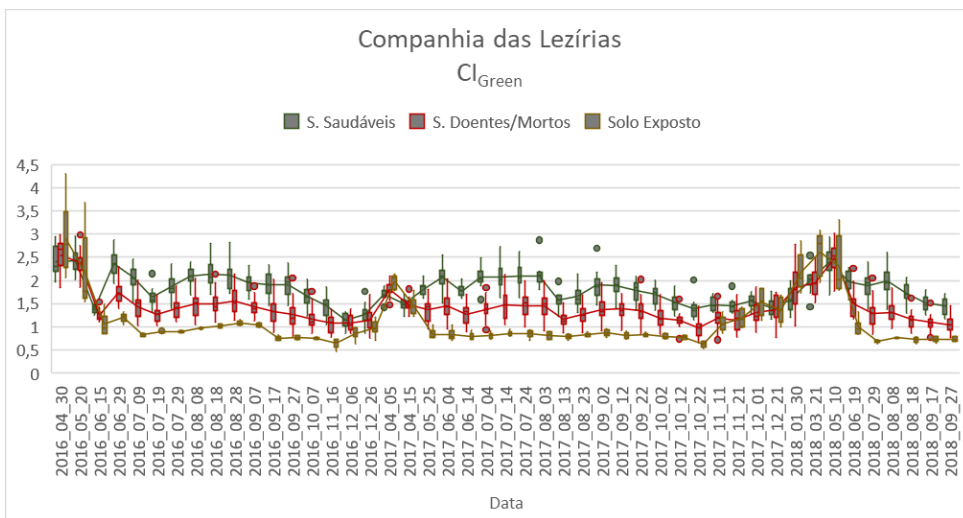


Figura A.13 CI<sub>Green</sub> - Série temporal de 47 datas. Companhia das Lezírias

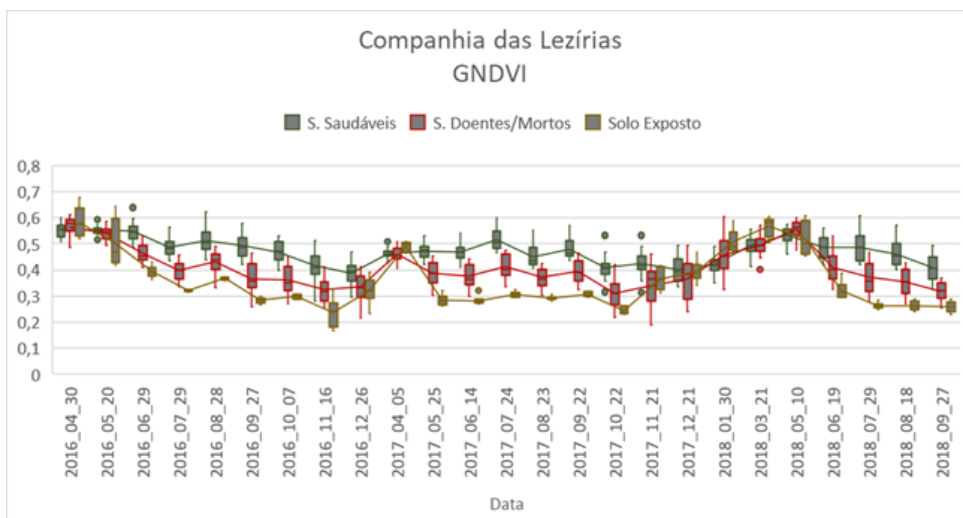


Figura A.14 GNDVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

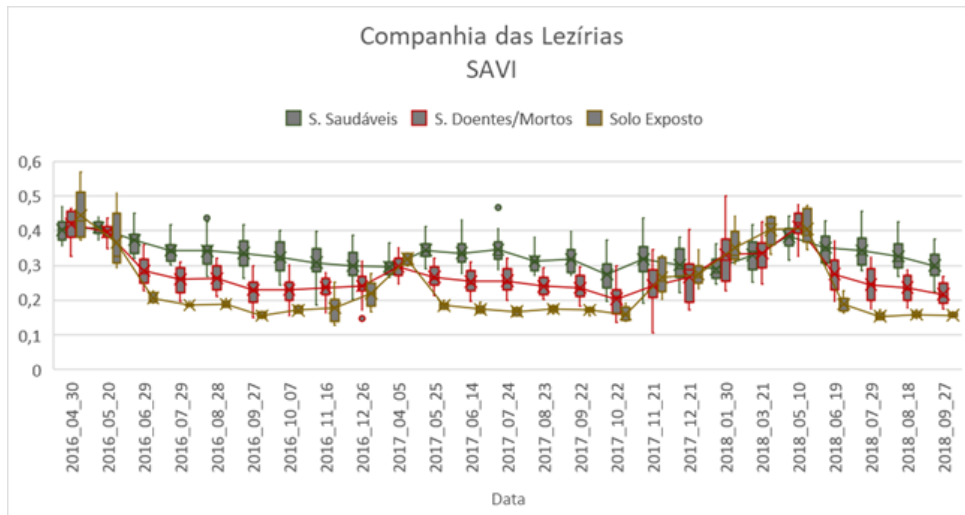


Figura A.15 SAVI - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

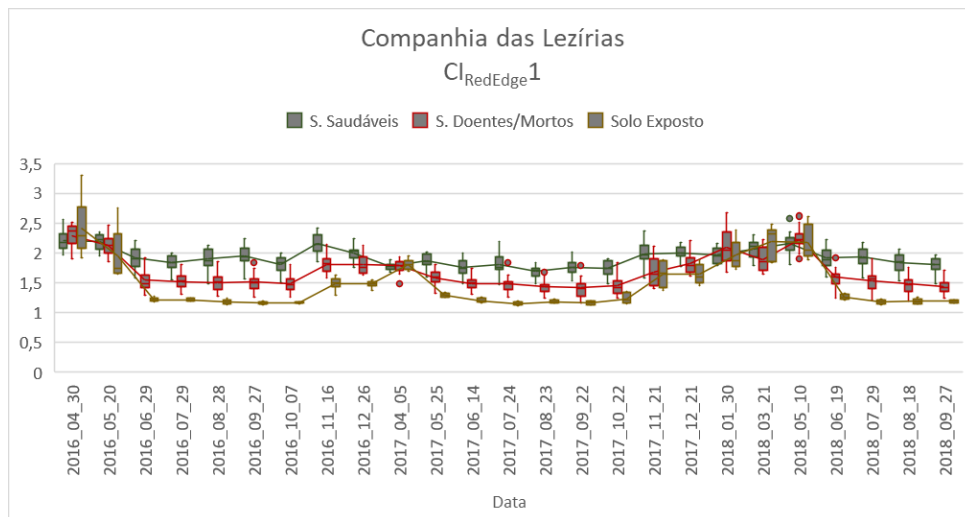


Figura A.16  $CI_{RedEdge1}$  - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

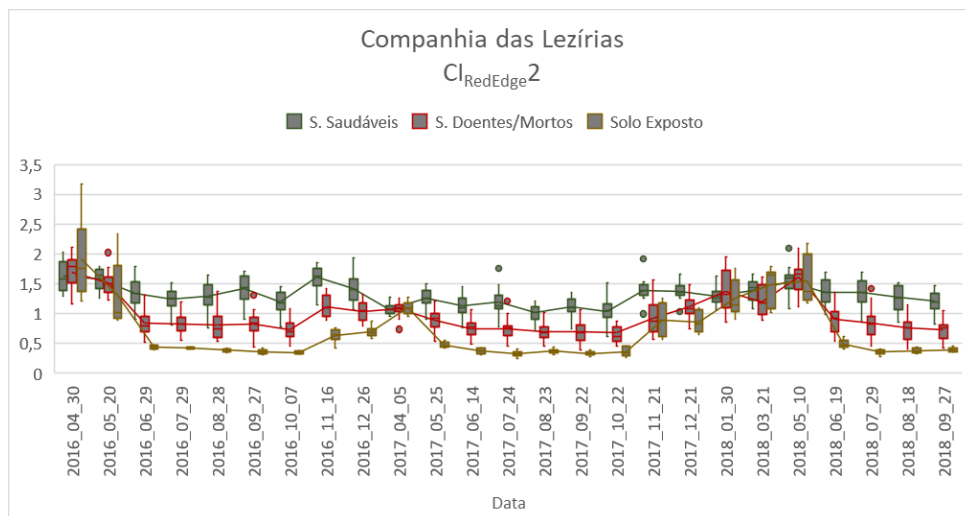


Figura A.17  $CI_{RedEdge2}$  - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias

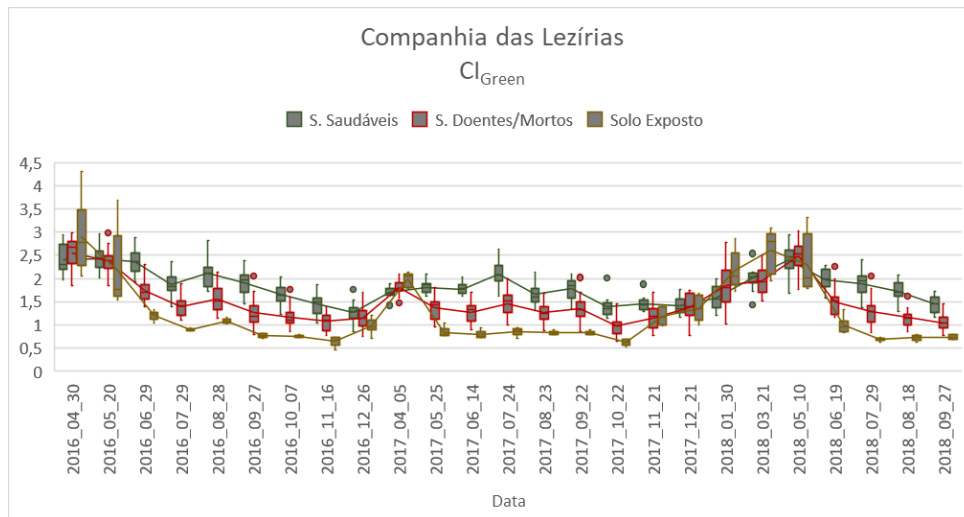


Figura A.18 CI<sub>Green</sub> - Série temporal de 25 datas. Companhia das Lezírias