



**INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO**

Monitorização da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de energia da REN utilizando séries temporais de imagens de satélite

Projeto de Mestrado

Engenharia do Território e Ambiente

Filipe Alexandre Portela Pereira

Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, novembro de 2025



**INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO**

Filipe Alexandre Portela Pereira

**Monitorização da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de
energia da REN utilizando séries temporais de imagens de satélite**

Projeto de Mestrado

Engenharia do Território e Ambiente

Trabalho efetuado sob orientação de:

João Francisco Fernandes Gonçalves

Joaquim Mamede Alonso

Escola Superior Agrária do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, novembro de 2025

*As doutrinas expressas neste
documento são da exclusiva
responsabilidade do autor*

PENSAMENTO

“A educação é a arma mais poderosa que podes usar para mudar o mundo.”

Nelson Mandela

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS	VI
RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SIGLAS	IX
ÍNDICE DE FIGURAS	X
ÍNDICE DE QUADROS	XII
ÍNDICE DE EQUAÇÕES.....	XIII
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Redes Energéticas Nacionais.....	2
1.2. Gestão das faixas de servidão das linhas da RNT de eletricidade da REN	3
1.3. Riscos associados ao crescimento da vegetação	5
1.3.1 Interferências com as infraestruturas de transporte de energia	5
1.3.2. Risco associado aos incêndios florestais.....	7
1.4. Tecnologias de monitorização e gestão	8
1.5. Detecção remota e observação da Terra.....	8
1.5.1. Plataformas online para a análise e visualização de dados de observação da Terra	10
1.5.2. Sistemas de suporte à decisão	11
1.6. Objetivos gerais e específicos do trabalho	12
2. MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1. Caracterização da área de estudo.....	13
2.2. Seleção dos locais de teste.....	14
2.3. Processamento de dados de detecção remota	16
2.3.1. Imagens de satélite	17
2.3.2. Índices de vegetação	18
2.3.3. Funções de agregação	18
2.4. Desenvolvimento da aplicação online	19
2.4.1. Levantamento de requisitos gerais.....	20
2.4.2. Implementação da aplicação	21
2.5. Avaliação e escolha da melhor combinação de parâmetros analíticos.....	22

2.6. Validação de intervenções	23
2.7. Monitorização temporal do crescimento da vegetação	24
2.8. Identificação e classificação de áreas críticas	24
3. RESULTADOS	26
3.1. Aplicação online desenvolvida.....	26
3.1.1. Implementação dos requisitos	29
3.2. Avaliação da melhor combinação de parâmetros analíticos.....	31
3.3. Avaliação comparativa da deteção das intervenções.....	32
3.3.1. Linhas.....	32
3.2.3. Regiões.....	36
3.2.4. Classe de linhas.....	37
3.2.5. Uso do solo.....	37
3.3. Validação de intervenções realizadas	38
3.4. Monitorização do crescimento da vegetação.....	39
3.5. Classificação e priorização das áreas de risco	40
4. DISCUSSÃO	43
4.1 Análise crítica da plataforma online.....	43
4.2. Validação das metodologias utilizadas.....	44
4.3. Desafios enfrentados e oportunidades de melhoria	47
5. CONCLUSÃO.....	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

AGRADECIMENTOS

A realização deste projeto representou um percurso exigente, marcado por diversos desafios e incertezas, mas também muito apoio e incentivo de várias pessoas e instituições a quem desejo expressar o meu profundo agradecimento.

Em primeiro lugar, agradeço aos meus orientadores, Professor João Gonçalves, professor convidado da Escola Superior Agrária de Ponte de Lima, e Professor Joaquim Alonso, professor coordenador da mesma instituição. A disponibilidade, acompanhamento e contributos foram determinantes para o desenvolvimento deste trabalho.

À REN - Redes Energéticas Nacionais, expresso o meu reconhecimento pela oportunidade de desenvolver este projeto no contexto profissional, permitindo aplicar e consolidar conhecimentos adquiridos ao longo do mestrado. Agradeço, em particular, aos Engenheiros Luís Antunes e Pedro Marques, cujo apoio, incentivo e confiança foram essenciais para a conclusão deste percurso académico.

Por fim, dirijo um agradecimento especial à minha família, pelo apoio incondicional e pela compreensão perante as exigências deste processo. À minha esposa, Olga, aos meus pais e irmã, agradeço a paciência, o carinho e a motivação diária que me deram. Este trabalho é também o reflexo do apoio e da força que sempre me transmitiram.

A todos, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A gestão da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de energia elétrica constitui uma componente essencial para garantir a segurança das infraestruturas da REN e para reduzir o risco de propagação de incêndios florestais. As abordagens tradicionais de monitorização baseadas em inspeções de campo apresentam limitações de periodicidade e cobertura, exigindo metodologias mais eficientes e sistemáticas. Neste contexto, o presente projeto desenvolve e valida uma metodologia de monitorização remota do vigor da vegetação recorrendo a séries temporais de imagens dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8, processadas em ambiente Google Earth Engine, complementada pelo desenvolvimento de uma aplicação online designada ForestVAR.

O trabalho baseia-se na análise multitemporal de diferentes combinações entre sensores, índices espectrais e funções de agregação, com o objetivo de identificar a combinação mais eficaz na deteção das intervenções de controlo da vegetação. O estudo efetuado sobre 12 linhas elétricas, distribuídas pelo território continental, permitiu concluir que a combinação Sentinel-2 / NDVI / Mediana apresenta o melhor desempenho, evidenciando reduções consideráveis do vigor fotossintético dentro das faixas intervencionadas quando comparadas com o período homólogo do ano anterior e com as áreas fora da faixa.

A aplicação permitiu confirmar as intervenções realizadas, acompanhar a evolução da vegetação e identificar áreas onde o crescimento é mais expressivo. Os resultados mostram que esta abordagem pode apoiar a monitorização das faixas de servidão e complementar os métodos atualmente utilizados pela REN, oferecendo uma forma consistente de analisar alterações no vigor da vegetação ao longo do tempo.

Palavras-chave: monitorização da vegetação, deteção remota, imagens de satélite, índices de vegetação, séries temporais, gestão de combustível, linhas de transporte de energia, sistemas de apoio à decisão.

ABSTRACT

Vegetation management within the right-of-way corridors of high-voltage transmission lines is essential to ensure the safety and operational reliability of the Portuguese transmission system and to reduce the risk of wildfire propagation. Traditional monitoring approaches based on field inspections present inherent limitations in frequency and spatial coverage, making more efficient and systematic methodologies necessary. In this context, this dissertation develops and validates a remote-sensing methodology for monitoring vegetation vigor based on time series of Sentinel-2 and Landsat-8 satellite imagery, processed in the Google Earth Engine environment, and complemented by the development of an online application named ForestVAR.

The work relies on a multitemporal analysis of different combinations of sensors, spectral indices, and aggregation functions, with the objective of identifying the most effective configuration for detecting vegetation-management interventions. The study conducted on 12 transmission lines distributed across mainland Portugal showed that the combination Sentinel-2 / NDVI / Median achieved the best performance, revealing significant decreases in vegetation vigor within the intervened corridors when compared both with the same period of the previous year and with adjacent areas outside the right-of-way.

The application enabled the confirmation of completed interventions, the monitoring of vegetation recovery, and the identification of areas where growth is more pronounced. The results demonstrate that this approach can support right-of-way monitoring and complement the methods currently used by REN, providing a consistent means of analysing vegetation-vigor changes over time.

Keywords: vegetation monitoring; remote sensing; satellite imagery; vegetation indices; time series; fuel-management; electricity transmission lines; decision-support systems.

ABREVIATURAS, ACRÓNIMOS E SIGLAS

REN – Redes Energéticas Nacionais

SGIFR – Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais

PNGIFR – Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais

GEE – Google Earth Engine

MAT – Muito Alta Tensão

RNT – Rede Nacional de Transporte de eletricidade

RNTG – Rede Nacional de Transporte de Gás

RSLEAT – Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão

EIA – Agência Internacional de Energia

LIDAR – *Light Detection And Ranging*

DGT – Direção-Geral do Território

COS – Carta de Ocupação do Solo

ESA – Agência Espacial Europeia

SSD – Sistemas de Suporte à Decisão

SIG – Sistemas de Informação Geográfica

PIF – Planos de Intervenção de Faixa

PAF – Planos de Abertura de Faixa

NDVI – *Normalised Difference Vegetation Index*

MSAVI – *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index*

NDWI – *Normalized Difference Water Index*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Faixa de servidão das linhas de transporte de energia. Fonte: REN (2025).	4
Figura 1.2 - Representação de situações de risco de árvores fora da faixa de servidão/proteção. Fonte: REN (2025).	4
Figura 1.3 - Reconversão do uso do solo na faixa de servidão/proteção. Fonte: REN (2025).	7
Figura 1.4 - Comparação dos comprimentos de onda das bandas espectrais dos satélites Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2. Fonte: ESA (2025).	10
Figura 2.1 - Principais etapas adotadas no desenvolvimento do estudo. Fonte: Elaboração própria.	13
Figura 2.2 - Mapa com a distribuição das linhas da REN por diferentes regiões do país. Fonte: Elaboração própria com base em dados da REN.	15
Figura 2.3 - Principais etapas do processo de desenvolvimento da aplicação. Fonte: Elaboração própria.	19
Figura 2.4 - Seleção da camada da regeneração na aplicação. Fonte: Elaboração própria.	25
Figura 3.1 - Interface da aplicação ForestVAR, com caixas de explicação dos diferentes painéis. Fonte: Elaboração própria.	27
Figura 3.2 - Exemplo de gráfico temporal semanal do índice NDVI (mediana) gerado na aplicação, que representa a diferença, calculada para uma área selecionada manualmente na linha 5503 (região do alentejo, concelho de Borba). Elaboração própria.	28
Figura 3.3 - Distribuição da diferença do índice NDVI antes e depois da intervenção (i.e., ΔNDVI) para cada uma das 12 linhas de teste. Fonte: Elaboração própria.	33
Figura 3.4 - Distribuição da densidade do NDVI na linha 5386, antes e depois da intervenção, dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.	34
Figura 3.5 - Distribuição da densidade do NDVI na linha S4206, antes e depois da intervenção, dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.	35
Figura 3.6 - Variação percentual da diferença do NDVI por região do país. Fonte: Elaboração própria.	36
Figura 3.7 - Variação percentual da diferença do NDVI por classes de linhas. Para representar as caixas optou-se por remover os valores mínimos e máximos porque existia elevado número de <i>outliers</i> . Fonte: Elaboração própria.	37

Figura 3.8 - Variação percentual da diferença do NDVI por uso do solo. Fonte: Elaboração própria.....	38
Figura 3.9 - Mapa de diferença do NDVI gerado na aplicação, para um trecho da linha 5525, com representação das áreas dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.....	39
Figura 3.10 - Gráfico temporal que representa a evolução do índice NDVI entre o período de março de 2024 e março de 2025 para a linha 5504. Fonte: Elaboração própria.....	40
Figura 3.11 - Mapa da representação percentual da regeneração gerado na aplicação, para um trecho da linha 5377 (zona norte, concelho de Arouca), com representação das áreas dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.	41

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1.1 - Comparação entre sistemas de monitorização baseados em Observação da Terra.....	11
Quadro 2.1 - Linhas da REN utilizadas nos testes.	16
Quadro 2.2 - Características principais dos satélites utilizados.....	17
Quadro 2.3 - Índices de vegetação utilizados e respetiva aplicação.....	18
Quadro 2.4 - Funções estatísticas de agregação.	19
Quadro 2.5 - Requisitos gerais da aplicação online.....	20
Quadro 3.1 - Verificação da implementação dos requisitos da aplicação online.	30
Quadro 3.2 - Ranking das combinações de parâmetros testadas.	31

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1 - Cálculo da variação percentual do vigor da vegetação entre a área intervencionada e a área de controlo.	23
Equação 2.2 - Cálculo da variação percentual do vigor da vegetação entre o período pós-intervenção e o período homólogo um ano depois, utilizada como indicador do grau de regeneração da vegetação.	25

1. INTRODUÇÃO

A monitorização e gestão da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de energia elétrica da REN - Redes Energéticas Nacionais, desempenham um duplo papel de elevada relevância territorial e ambiental. Por um lado, garantem as condições de segurança operacional das infraestruturas, assegurando as distâncias regulamentares entre a vegetação e os condutores elétricos, por outro, funcionam como faixas secundárias de defesa da floresta contra incêndios, contribuindo para a redução do risco de propagação de fogos florestais e para o cumprimento das medidas previstas no Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR), nomeadamente no âmbito do Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais (PNGIFR) (AGIF, 2022).

Tradicionalmente, a monitorização destas áreas tem assentado em métodos convencionais de inspeção e levantamento de campo, os quais, embora precisos, apresentam limitações em termos de periodicidade, custo e cobertura espacial. O crescimento da vegetação em ambientes florestais e seminaturais é muito dinâmico sendo influenciado por fatores fenológicos, climáticos e antrópicos, o que torna a observação contínua e multitemporal um requisito essencial para a gestão preventiva. Neste contexto, as tecnologias de Detecção Remota e Observação da Terra emergem como ferramentas de elevado potencial, capazes de disponibilizar informação sistemática, georreferenciada e atualizada sobre a evolução do coberto vegetal em grandes extensões territoriais (Gorelick et al., 2017).

O desenvolvimento dos programas Copernicus e Landsat — respetivamente, pelas agências espaciais europeia ESA, e norte-americana NASA — revolucionou o acesso a dados de satélite, disponibilizando imagens gratuitas e de alta resolução espacial e temporal. Estes dados permitem o cálculo de índices de vegetação que traduzem o vigor fotossintético e a humidade da cobertura vegetal e a sua análise multitemporal. Constituem assim uma poderosa fonte de dados e uma abordagem eficaz para detetar variações na densidade e estrutura da vegetação, permitindo identificar zonas intervencionadas, áreas de regeneração e locais com acumulação de material combustível (Radočaj et al., 2020).

Apesar das diversas mais-valias dos satélites de Observação da Terra para fins de monitorização territorial/ambiental, a crescente diversidade e volume de informação representam um obstáculo na sua mobilização e uso. Neste domínio, o Google Earth Engine

(GEE) assume um papel central enquanto plataforma de análise e processamento na nuvem, possibilitando o tratamento automatizado de séries temporais extensas de dados de satélite. Esta capacidade de integração e automação torna-o particularmente adequado à monitorização contínua das faixas de servidão da REN, permitindo a criação de sistemas de suporte à decisão que facilitem o planeamento e gestão de intervenções de corte e limpeza da vegetação (Gorelick et al., 2017).

O presente projeto, tem como finalidade desenvolver e validar uma metodologia semi-automatizada de monitorização remota da vegetação, através do desenvolvimento de uma aplicação, baseada na integração de dados multi-espectrais de satélite, aplicada a diversas linhas da REN. Pretende-se não apenas identificar alterações associadas às operações de gestão da vegetação, mas também demonstrar como a análise temporal pode apoiar uma gestão preventiva, sustentável e tecnicamente fundamentada do território.

Ao conjugar a segurança das infraestruturas elétricas com a prevenção de incêndios, este trabalho insere-se num contexto de crescente relevância para a gestão integrada da paisagem e constitui um contributo concreto para a modernização das práticas de manutenção e monitorização ambiental em Portugal.

1.1. Redes Energéticas Nacionais

A REN – Redes Energéticas Nacionais é a empresa responsável por garantir o transporte de eletricidade em muito alta tensão (MAT) e de gás em alta pressão em Portugal Continental. Opera a Rede Nacional de Transporte de eletricidade (RNT), ao longo de 9661 km, e a Rede Nacional de Transporte de Gás (RNTG), com cerca de 1375 km, assim como também é responsável pela receção, armazenamento e regaseificação de gás natural liquefeito e o armazenamento subterrâneo de gás natural (REN, 2025).

Está também presente em outras áreas de atuação, nomeadamente nas telecomunicações, energias renováveis, laboratório de metrologia, consultoria e serviços e na emissão de garantias de origem. Desenvolve um conjunto de atividades complementares no setor da energia e presta serviços especializados de engenharia nas diferentes áreas operacionais das empresas do grupo. Assegura também presença internacional com as empresas Transemel e Electrogas no Chile e com a barragem de Cahora Bassa em Moçambique (REN, 2025).

A REN tem como missão garantir o fornecimento ininterrupto de eletricidade e gás, ao menor custo, satisfazendo critérios de qualidade e de segurança, mantendo o equilíbrio entre a oferta e a procura em tempo real, e assegurando as condições de sistema que viabilizam o mercado da energia, contribuindo ainda para o desenvolvimento das comunidades e para a melhoria da qualidade de vida dos portugueses (REN, 2025).

1.2. Gestão das faixas de servidão das linhas da RNT de eletricidade da REN

Por servidão administrativa entende-se o encargo imposto sobre um imóvel em benefício de uma coisa, por virtude da utilidade pública desta. Pode implicar a proibição, limitação ou obrigação da prática de ações que apenas cessam com a desafetação dos bens onerados ou com o fim da função de utilidade pública para a qual foram constituídas (DGOTDU, 2011).

A servidão associada a uma linha de transporte de eletricidade, consiste na reserva do espaço necessário à manutenção das distâncias de segurança designadamente ao solo, árvores, estradas, vias-férreas e edifícios, nas condições previstas na lei portuguesa (REN, 2025).

De acordo com o Decreto-Lei n.º 26.852, de 30 de julho de 1936, alterado pelo Decreto-Lei n.º 446/76, de 5 de junho, os proprietários dos terrenos onde se encontram estabelecidas linhas de transporte de energia elétrica, bem como os proprietários confinantes, estão obrigados a não consentir nem conservar plantações que possam pôr em risco a exploração segura das linhas. Para garantir essas condições, é permitido o corte ou decote da vegetação que interfira com as distâncias regulamentares de segurança, assegurando o funcionamento e integridade da infraestrutura elétrica (Diário da República, 1976).

Para garantir o fornecimento ininterrupto de energia e nos termos previstos no Decreto Regulamentar 1/92, de 18 de fevereiro, o qual estabelece o Regulamento de Segurança de Linhas Elétricas de Alta Tensão (RSLEAT), a REN procede à gestão da vegetação de modo a garantir a distância mínima de segurança na faixa de servidão/proteção, a qual tem uma largura de 45 metros (limitada por duas retas paralelas distanciadas 22,5 metros do eixo do traçado), com periodicidade média de três anos, salvo casos particulares em que esse intervalo é inferior. Dentro dessa faixa, procede-se ao abate e/ou à poda das árvores necessárias para assegurar as distâncias regulamentares entre os cabos condutores e a vegetação (Figura 1.1), bem como das árvores que, em caso de queda, não garantam a

distância mínima de 1,5 metros em relação aos cabos condutores, na hipótese de flecha máxima sem sobrecarga de vento(Diário da República, 1992).

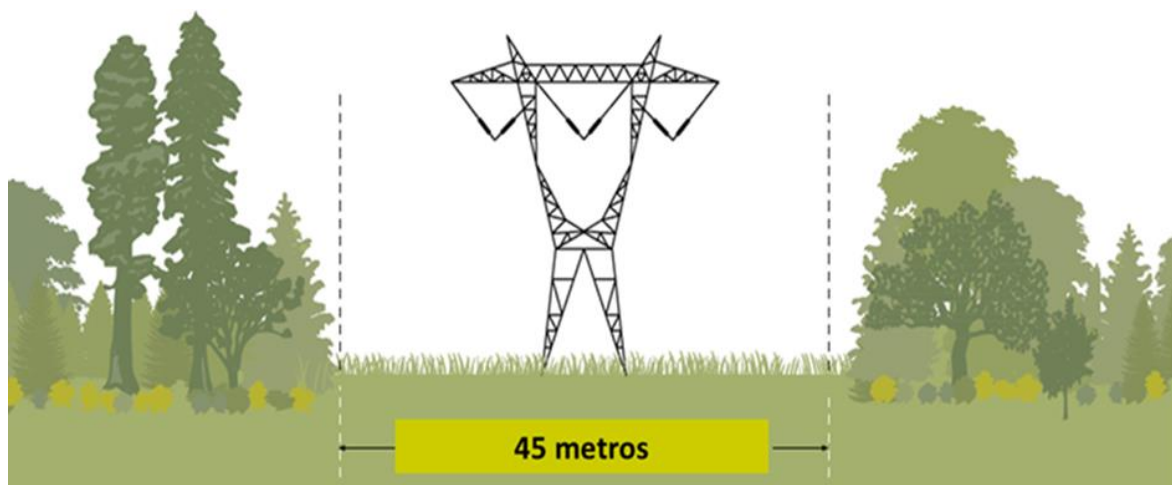


Figura 1.1 - Faixa de servidão das linhas de transporte de energia. Fonte: REN (2025).

Fora da faixa de servidão/proteção, e de acordo com o mesmo regulamento, a REN procede ao abate de todas as árvores que, pelo seu porte e condições particulares, possam em caso de queda constituir um risco inaceitável para a segurança da linha (Figura 1.2).



Figura 1.2 - Representação de situações de risco de árvores fora da faixa de servidão/proteção. Fonte: REN (2025).

Estas faixas de servidão assumem também a função de faixas secundárias de defesa da floresta contra incêndios, conforme o Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, que estabelece o SGIFR. Neste enquadramento, a REN enquanto entidade responsável pela infraestrutura, é obrigada a executar a gestão de combustível numa faixa correspondente à projeção vertical dos cabos condutores exteriores, acrescida de 10 metros para cada lado, ao longo das linhas de muito alta tensão (Diário da República, 2021).

Para uniformizar as intervenções em toda a RNT, a REN definiu que a largura da faixa de gestão de combustível corresponde à largura total da faixa de servidão, reconhecendo os benefícios que este tipo de gestão representa tanto para a segurança operacional da rede elétrica, como para a redução do risco de incêndios florestais e a valorização ambiental do território portuguesa (REN, 2025).

1.3. Riscos associados ao crescimento da vegetação

Apesar da existência de regulamentação rigorosa para a gestão das faixas de servidão, o crescimento contínuo da vegetação e a variabilidade das condições ambientais (e.g., disponibilidade de água, luz, solo) e fenológicas introduzem riscos significativos que exigem uma monitorização constante (REN, 2023).

A acumulação de biomassa e o desenvolvimento de espécies herbáceas e arbustivas anuais ou ruderais de rápido crescimento nas faixas de proteção podem provocar interferências diretas com os condutores elétricos, comprometendo a integridade da infraestrutura, e simultaneamente aumentar os riscos de ignição e propagação de incêndios florestais através do incremento de combustíveis e da sua continuidade horizontal e vertical. (REN, 2023).

Neste contexto, a gestão das faixas não deve ser entendida apenas como uma exigência legal ou técnica, mas como uma ferramenta essencial de prevenção de riscos, tanto para o sistema elétrico como para a proteção civil e a defesa da floresta contra incêndios (AGIF, 2022).

1.3.1 Interferências com as infraestruturas de transporte de energia

As linhas de transporte de eletricidade operam a elevadas tensões, sendo as distâncias de segurança entre os condutores e o meio envolvente definidas por regulamentação específica (RSLEAT). O crescimento excessivo da vegetação no interior ou nas proximidades das faixas de servidão pode originar descargas elétricas, curto-circuitos e interrupções de

serviço, com potenciais consequências em cadeia para o fornecimento de energia, a segurança pública e o ambiente (Matikainen et al., 2016).

Estes riscos agravam-se em regiões com espécies arbóreas de rápido crescimento (tais como *Eucalyptus globulus*, *Acacia spp.* ou *Pinus pinaster*) e em terrenos acidentados, onde as diferenças de cota reduzem as margens de segurança (REN, 2024).

Para além dos riscos associados ao crescimento da vegetação, importa reconhecer que as alterações climáticas têm vindo a intensificar a exposição e a vulnerabilidade das redes elétricas. O aumento da frequência e severidade de fenómenos extremos, como tempestades, episódios de vento forte, precipitação intensa e ondas de calor prolongadas, amplifica as probabilidades de ocorrência de quedas de árvores, ruturas estruturais, curtos-circuitos e danos nos condutores. Estes impactos têm sido amplamente identificados em análises internacionais de risco climático aplicadas a infraestruturas críticas, que destacam a necessidade de reforçar mecanismos de avaliação, prevenção e monitorização contínua para garantir a resiliência do sistema elétrico (Lyster et al., 2022).

Os impactos das alterações climáticas sobre o setor elétrico incluem também alterações graduais nas condições ambientais que afetam diretamente o desempenho das infraestruturas. Estudos de revisão internacional apontam que o aumento das temperaturas médias pode reduzir a capacidade de transporte das linhas aéreas, ao provocar maior flecha dos cabos e diminuição da eficiência térmica. Simultaneamente, padrões climáticos mais variáveis, incluindo ciclos de seca seguidos de precipitação intensa, tendem a destabilizar solos e encostas, aumentando o risco de quedas de árvores ou instabilidade de suportes. Este conjunto de pressões climáticas cumulativas reforça a necessidade de integrar a adaptação climática na gestão da rede, de modo a incorporar estas novas dinâmicas de risco (Karagiannakis et al, 2025).

A monitorização sistemática do estado da vegetação ao longo das faixas constitui, por isso, uma medida preventiva fundamental. O recurso a tecnologias de deteção remota, nomeadamente através da análise de séries temporais de imagens de satélite, permite detetar antecipadamente zonas de risco, identificando padrões anómalos de crescimento ou regeneração que possam interferir com as infraestruturas (Bueno et al., 2024).

1.3.2. Risco associado aos incêndios florestais

As faixas de servidão das linhas de transporte de eletricidade localizam-se frequentemente em áreas florestais ou de interface urbano-florestal, caracterizadas por elevada densidade de vegetação e acumulação de material combustível. O crescimento descontrolado da vegetação nestas zonas aumenta significativamente a carga térmica disponível, potenciando a ignição e propagação de incêndios florestais (AGIF, 2022).

O contacto direto entre a vegetação e os condutores pode gerar descargas elétricas ou faíscas e atuar como foco de ignição, especialmente em períodos de seca ou sob condições meteorológicas adversas. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), a interação entre vegetação e infraestruturas elétricas é uma das principais causas de ignição em países mediterrâneos e de risco elevado de incêndios. Por outro lado, a ausência de descontinuidade vegetal entre as faixas e o território envolvente pode facilitar a propagação do fogo, comprometendo a função das faixas enquanto barreiras de proteção (AGIF, 2022).

Neste enquadramento, a REN tem vindo a adotar planos de gestão e reconversão da ocupação do solo que promovem o estabelecimento de cobertos vegetais de baixa combustibilidade, como pastagens permanentes, mosaicos agrícolas ou ocupações compatíveis com a segurança elétrica, conforme exemplo ilustrado na Figura 1.3. Estas ações visam reduzir a carga combustível e minimizar o risco de propagação de incêndios nas faixas de servidão, em conformidade com o SGIFR e com as orientações do PNGIFR 2020-2030 (REN, 2024).



Figura 1.3 - Reconversão do uso do solo na faixa de servidão/proteção. Fonte: REN (2025).

1.4. Tecnologias de monitorização e gestão

A monitorização e gestão das faixas de servidão das linhas de transporte de energia elétrica envolvem um conjunto diversificado de tecnologias e métodos que permitem garantir a segurança operacional, reduzir riscos, otimizar as intervenções no terreno e promover uma gestão mais eficiente e sustentável dos recursos. Tradicionalmente, estas atividades baseiam-se em inspeções presenciais, cartografia topográfica e levantamentos aéreos periódicos, mas a evolução tecnológica tem permitido o desenvolvimento de soluções digitais e integradas de apoio à decisão (REN, 2024).

Entre as ferramentas mais utilizadas encontram-se os sistemas de informação geográfica (SIG), que possibilitam a gestão e visualização espacial das infraestruturas elétricas e das áreas envolventes, integrando dados topográficos, ambientais e de planeamento. Nos últimos anos, têm emergido tecnologias complementares que reforçam a monitorização, entre as quais se destacam o uso de satélites de observação da Terra, os veículos aéreos não-tripulados (i.e., VANT, vulgo “drones”) equipados com sensores óticos passivos e sensores laser ativos como o LiDAR (Light Detection and Ranging), que oferecem elevada resolução espacial e precisão topográfica assim como os sensores terrestres e estações meteorológicas conectadas, que fornecem dados locais sobre humidade, temperatura e crescimento da vegetação (Matikainen et al., 2016).

Em Portugal, a Direção-Geral do Território (DGT) tem vindo a aplicar metodologias semelhantes no âmbito da monitorização do uso e ocupação do solo, recorrendo a imagens de satélite Sentinel-2 e fotografia aérea, complementadas pontualmente por drones para apoio à atualização da Carta de Ocupação do Solo (COS 2021), demonstrando o potencial destas tecnologias no apoio à gestão territorial (DGT, 2021).

1.5. Detecção remota e observação da Terra

A deteção remota constitui uma das vertentes mais relevantes das tecnologias de monitorização apresentadas no ponto anterior. Baseia-se na aquisição de informação espectral sobre a superfície terrestre sem contacto direto, através de sensores óticos, térmicos ou de radar montados em satélites, aeronaves ou drones, sensores montados em postes, mastros, torres de observação ou carregados por pessoas. No caso particular das imagens multi-espectrais no visível e no infravermelho próximo e de ondas curtas, estes sensores

registam a quantidade de radiação refletida pela vegetação em diferentes comprimentos de onda, permitindo distinguir padrões que não são perceptíveis ao olho humano. A vegetação saudável, por exemplo, absorve fortemente a radiação no vermelho e reflete intensamente no infravermelho próximo, comportamento que possibilita o cálculo de índices de vegetação. A comparação multitemporal destes valores possibilita identificar alterações na estrutura e vigor da vegetação (ESA, 2025).

A disponibilização gratuita de imagens de média e alta resolução, como as provenientes dos programas Landsat e Sentinel, tornou-se um marco na monitorização ambiental global. De acordo com Wulder et al. (2019), a continuidade destes programas garante uma cobertura global e sistemática da Terra, com resoluções espaciais adequadas a vários tipos de análises, favorecendo o desenvolvimento de sistemas de gestão sustentável dos recursos e a prevenção de riscos ambientais (Wulder et al., 2019).

A comparação entre sensores é um elemento fundamental na seleção de dados de observação da Terra, uma vez que diferentes satélites operam com bandas espectrais distintas e resoluções específicas que influenciam a capacidade de detetar e caracterizar a vegetação. A Figura 1.4 apresenta uma comparação dos comprimentos de onda das bandas dos satélites Sentinel-2 e Landsat 7/8, evidenciando a forma como cada missão cobre diferentes regiões do espectro eletromagnético. Esta representação demonstra que ambos os sistemas incluem bandas no visível, infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR). No entanto, o Sentinel-2 disponibiliza uma maior densidade de bandas estreitas na região do vermelho e do red-edge, o que melhora a sensibilidade à estrutura foliar e ao stress da vegetação, enquanto o Landsat 8 assegura uma estabilidade radiométrica elevada e séries temporais de longa duração (ESA, 2025).

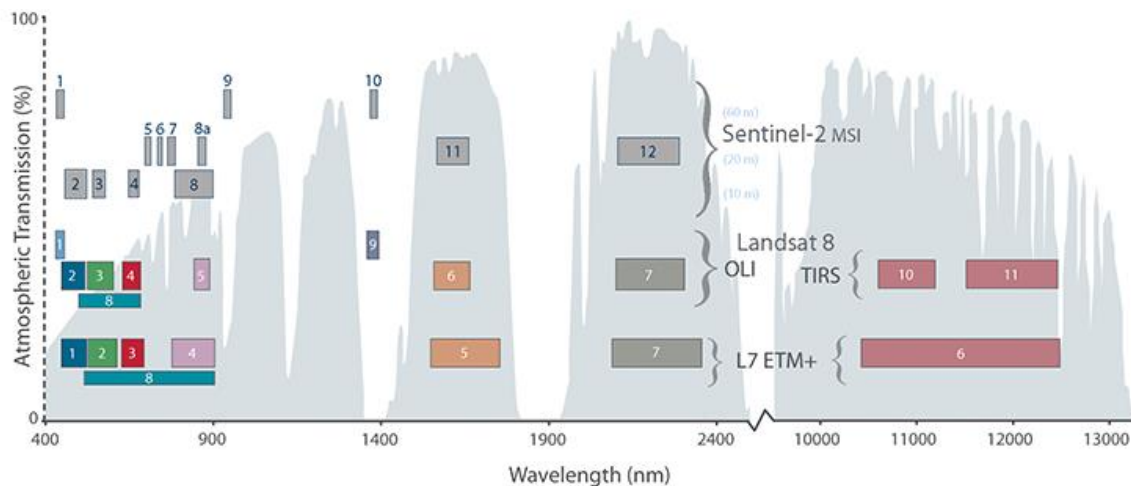


Figura 1.4 - Comparação dos comprimentos de onda das bandas espectrais dos satélites Landsat 7, Landsat 8 e Sentinel-2. Fonte: ESA (2025).

1.5.1. Plataformas online para a análise e visualização de dados de observação da Terra

O avanço das tecnologias de computação em nuvem permitiu o desenvolvimento de plataformas integradas que armazenam, processam e visualizam grandes volumes de dados de observação da Terra. Entre estas destaca-se o Google Earth Engine (GEE), que disponibiliza acesso a vastos catálogos de imagens de satélite, algoritmos de processamento e capacidade de análise em larga escala (Gorelick et al., 2017).

O GEE tem sido amplamente utilizado em estudos de monitorização florestal e agrícola, permitindo combinar dados de diferentes satélites, aplicar índices de vegetação e gerar séries temporais de alta resolução espacial e temporal e tirando partido do vasto arquivo histórico de imagens atualmente existente. Outras plataformas, como o Copernicus Browser, desenvolvido pela Agência Espacial Europeia (ESA), oferece um ambiente intuitivo de visualização e análise básica de dados Sentinel, integrando produtos temáticos de monitorização terrestre, oceânica e atmosférica (ESA, 2025). A NASA EarthData disponibiliza igualmente um vasto conjunto de dados abertos de observação da Terra e serviços de acesso e download via interface web e API (NASA, 2025).

Existem ainda plataformas baseadas em infraestruturas de computação cloud, como o Earth on AWS, da Amazon Web Services, que aloja catálogos públicos de dados de satélite em ambiente cloud e permite o seu processamento através de ferramentas externas e a Microsoft Planetary Computer, baseada no Azure, que integra dados ambientais globais com modelos de inteligência artificial e ferramentas de análise geoespacial (Amani et al., 2020).

1.5.2. Sistemas de suporte à decisão

Os Sistemas de Suporte à Decisão (SSD) constituem ferramentas computacionais concebidas para auxiliar processos de decisão complexos, integrando dados, modelos analíticos e interfaces interativas que permitem avaliar cenários, reduzir incerteza e apoiar escolhas informadas. Combinam capacidades de processamento de informação, visualização e simulação, possibilitando ao decisor explorar alternativas e antecipar consequências em contextos onde a análise manual seria limitada ou insuficiente. Assim, funcionam como um elo entre o conhecimento técnico-científico e a ação prática, reforçando a eficácia, rapidez e consistência das decisões (Eom, 2020).

Os sistemas baseados em dados de observação da Terra e em modelos preditivos são capazes de integrar variáveis biofísicas, meteorológicas e socioeconómicas, oferecendo apoio direto à tomada de decisão. A utilização de indicadores derivados de séries temporais em *dashboards* geoespaciais permite às entidades gestoras identificar zonas críticas de acumulação de biomassa e avaliar a eficácia das medidas de mitigação (Bueno et al., 2024).

Alguns sistemas de apoio à decisão têm vindo a ser desenvolvidos com objetivos semelhantes ao deste trabalho, aplicando dados de Observação da Terra à gestão da vegetação e prevenção de riscos. Entre eles, destacam-se os sistemas de vigilância e de fornecimentos de dados apresentados no Quadro 1.1.

Quadro 1.1 - Comparação entre sistemas de apoio baseados em Observação da Terra.

Sistema	Instituição responsável	Tipo de dados utilizados	Funcionalidades principais
SMOS	Direção-Geral do Território (DGT)	Sentinel-2, modelos de classificação, séries multitemporais	Monitorização de uso e ocupação do solo; deteção de alterações
SeverusPT	BIOPOLIS/CIBIO/InBIO & Instituto Politécnico de Viana do Castelo (IPVC)	Sentinel-2, variáveis meteorológicas, dados biofísicos	Avaliação e previsão da severidade do fogo
geoRUBUS	ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas	Cartografia florestal, dados territoriais, modelos espaciais	Apoio à gestão florestal e planeamento de combustíveis
FireHub	National Observatory of Athens	Sentinel-2, MODIS, produtos térmicos	Deteção de incêndios e monitorização pós-fogo

Fonte: DGT (2025); Gonçalves et al. (2024); ICNF (2025); FireHub (2020).

1.6. Objetivos gerais e específicos do trabalho

O principal objetivo deste projeto é desenvolver e validar uma metodologia semi-automatizada de monitorização da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de energia elétrica da REN, utilizando séries temporais de imagens de satélite.

De forma mais específica, pretende-se:

- i) Desenvolver uma aplicação interativa no ambiente Google Earth Engine para visualização e monitorização da vegetação nas faixas de servidão das linhas;
- ii) Comparar diferentes combinações de satélites, índices de vegetação e funções de agregação, para avaliar qual a combinação que melhor deteta a realização de intervenções de corte da vegetação;
- iii) Identificar e caracterizar a evolução espaciotemporal da vegetação nas faixas de servidão, recorrendo a índices de vegetação derivados de imagens satélite;
- iv) Identificar e caracterizar possíveis áreas críticas, que apresentem um crescimento vegetativo muito acentuado;
- v) Avaliar a eficácia das metodologias baseadas em séries temporais de imagem de satélite como ferramenta de apoio à decisão, demonstrando o seu potencial na gestão preventiva das faixas e na defesa da floresta contra incêndios.

Estes objetivos enquadram-se na visão de uma gestão operacional sustentável das infraestruturas elétricas, promovendo a integração entre tecnologia, planeamento e gestão da paisagem, em consonância com as estratégias nacionais de gestão integrada de fogos rurais e com o compromisso da REN na redução de riscos e melhoria da eficiência na exploração da rede (REN, 2024).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente capítulo descreve os materiais, métodos e procedimentos utilizados. A metodologia deste trabalho organiza-se em quatro etapas principais que estruturam todo o processo desenvolvido (Figura 2.1). A primeira etapa consistiu na definição do objeto e da área de estudo, identificando as linhas analisadas e estabelecendo o respetivo enquadramento territorial. Seguiu-se o desenvolvimento da aplicação online, no qual foram implementados os módulos de visualização espacial, análise temporal e cálculo das métricas necessárias à deteção de alterações na vegetação. A terceira etapa correspondeu aos testes e ao processamento dos dados, fase que decorreu de forma complementar ao desenvolvimento da aplicação, envolvendo a preparação das imagens, o cálculo dos índices de vegetação e a execução das combinações de parâmetros previstas. Por fim, a etapa de análise dos resultados permitiu avaliar, de forma integrada, o desempenho da metodologia e das funcionalidades implementadas.



Figura 2.1 - Principais etapas adotadas no desenvolvimento do estudo. Fonte: Elaboração própria.

2.1. Caracterização da área de estudo

A área de estudo corresponde ao território de Portugal Continental, abrangendo as regiões onde se encontra implantada a RNT de eletricidade, gerida pela REN. Esta opção justifica-se pelo carácter nacional da infraestrutura, cuja extensão cobre aproximadamente 9661 km de linhas aéreas, atravessando uma diversidade de contextos fisiográficos, ecológicos e de uso do solo (REN, 2024).

A abrangência nacional da análise permite avaliar o comportamento da vegetação sob condições biofísicas distintas, assegurando que a metodologia proposta seja robusta e transferível entre diferentes regiões do país.

Contudo, a análise desenvolvida foca-se exclusivamente nas áreas com necessidade de gestão de combustível, isto é, nas faixas inseridas em áreas florestais e de matos, onde existe

potencial risco de acumulação de biomassa e consequente interferência com as infraestruturas elétricas. Foram assim excluídas as porções de faixa que atravessam áreas agrícolas e zonas urbanas, uma vez que estas não apresentam relevância no âmbito da monitorização do crescimento de vegetação nem exigem intervenções regulares de corte ou limpeza.

Dentro destas áreas de interesse foram considerados os principais ecossistemas e classes de ocupação do solo representativos do território continental, de acordo com a carta de uso e ocupação do solo (COS 2021) disponibilizada pela Direção-Geral do Território (DGT, 2021), incluindo áreas florestais dominadas por *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus* e *Quercus suber*, zonas de matos e pastagens naturais.

Esta abordagem procura garantir que os resultados obtidos reflitam a diversidade territorial e ambiental de Portugal continental e permitindo inferir sobre os padrões gerais de comportamento da vegetação quando observados remotamente através de imagem de satélite.

2.2. Seleção dos locais de teste

A seleção dos locais de teste teve como objetivo garantir uma amostra representativa da RNT, considerando diferentes condições territoriais (e.g., clima, vegetação, geomorfologia) e tipos de linhas. Para tal, recorreu-se aos dados disponibilizados pela REN, dos quais foram selecionadas 12 linhas distribuídas pelas principais regiões do país: Norte, Centro, Alentejo, Oeste e Vale do Tejo, e Algarve, conforme ilustrado na Figura 2.2.

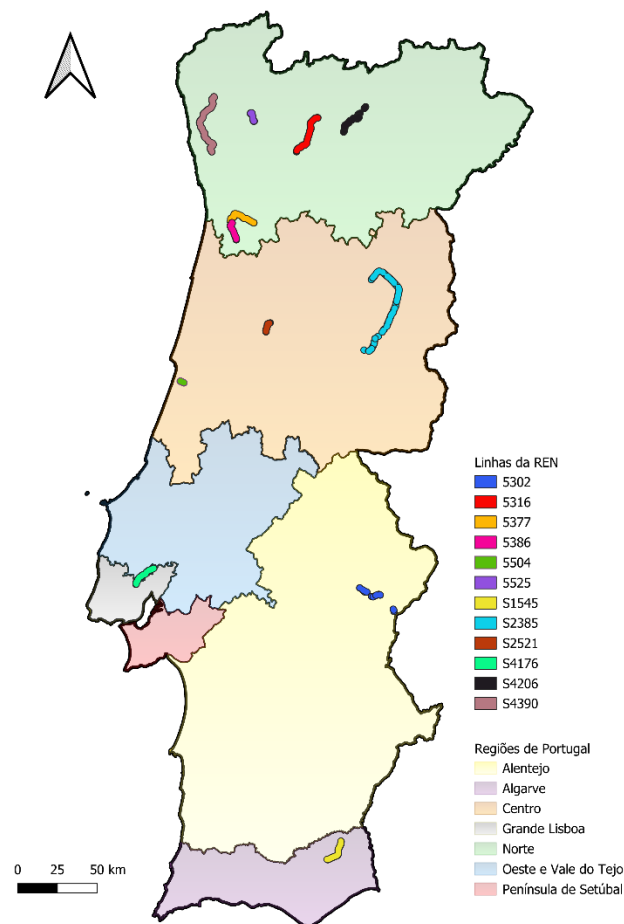


Figura 2.2 - Mapa com a distribuição das linhas da REN por diferentes regiões do país.
Fonte: Elaboração própria com base em dados da REN.

A escolha teve igualmente em conta o tipo de faixa de servidão, distinguindo entre linhas novas, que estão em construção ou construídas recentemente (<5 anos) e linhas em serviço (em média, >10 anos em funcionamento). As primeiras correspondem a infraestruturas sujeitas à primeira abertura de faixa e as segundas referem-se a linhas em exploração, com operações periódicas de manutenção da vegetação. Esta diferenciação permite analisar e comparar a eficácia das metodologias de monitorização com dados de satélite em dois contextos de gestão distintos.

A definição das áreas alvo de intervenções periódicas de gestão de combustível nas faixas das linhas é da responsabilidade da REN, que procede à sua identificação e planeamento. Para as linhas existentes, esta definição é realizada através da elaboração de Planos de Intervenção de Faixa (PIF) e no caso das linhas novas, são elaborados Planos de Abertura

de Faixa (PAF), que determinam a delimitação inicial das áreas alvo de intervenção (REN, 2024).

Outro fator considerado foi a data de referência do final das intervenções, sendo que as linhas selecionadas apresentam datas de conclusão dos trabalhos distribuídas principalmente entre 2024 e 2025, permitindo observar o comportamento temporal dos índices de vegetação em diferentes fases pós-intervenção. A linha 5377 (LFRA.RBP-L3) constitui uma exceção, por ter a sua abertura de faixa concluída em 2021, o que possibilita a análise de uma intervenção mais antiga e a avaliação da evolução da vegetação após um período de regeneração mais longo.

O Quadro 2.1 apresenta as linhas incluídas na análise, com indicação da respetiva região, classe da linha e a data de referência do final das intervenções utilizada no processamento das séries temporais.

Quadro 2.1 - Linhas da REN utilizadas nos testes.

Id	Linha	Região NUTS-II	Classe	Data final intervenção
5302	ETM.ALA	Alentejo	Nova	15/04/2025
5316	FRA.RBP-L2	Norte	Nova	01/03/2025
5377	FRA.RBP-L3	Norte	Nova	01/05/2021
5386	RR.FRA-FRA.PI	Norte	Nova	01/02/2025
5504	LV.RM2	Centro	Nova	01/11/2024
5525	FAF.PDV-12	Norte	Nova	01/06/2025
S1545	VOS.TVR	Algarve	Existente	01/09/2025
S2385	CF.FE1 LCF.FE2	Centro	Existente	01/04/2024
S2521	RPR.TBA1-MRT	Centro	Existente	01/03/2025
S4176	AM.RJ LFN.RJ	Oeste e Vale do Tejo	Existente	01/09/2025
S4206	VPC.VPA	Norte	Existente	01/02/2025
S4390	PTL.VNF	Norte	Existente	01/07/2024

Fonte: Elaboração própria com base em dados da REN.

2.3. Processamento de dados de deteção remota

O processamento dos dados de deteção remota consistiu na aplicação de procedimentos de filtragem, cálculo e análise de índices espectrais sobre séries temporais de imagens de satélite. O fluxo metodológico foi estruturado de modo a garantir a comparabilidade entre

diferentes sensores e funções estatísticas, assegurando a consistência dos resultados entre as várias linhas analisadas.

As operações foram executadas na plataforma Google Earth Engine (GEE), que permite o processamento em ambiente de computação na nuvem e o acesso direto a coleções de imagens dos programas ESA/Copernicus (Sentinel-2) e NASA/USGS Landsat-8.

Em cada linha de teste, foram processadas as imagens correspondentes aos períodos posteriores à intervenção e aos períodos homólogos do ano anterior, removendo o efeito sazonal e maximizando a detecção de alterações reais na vegetação (Gorelick et al., 2017).

Após o pré-processamento (correção atmosférica e filtragem de nuvens usando as máscaras incluídas nos produtos de nível de processamento L2, i.e., refletância de superfície), foram calculados os índices de vegetação definidos, e aplicadas as funções estatísticas de agregação temporal, nomeadamente: i) mediana, ii) valor máximo, iii) z-score iv) o percentil 90%, de forma a agregar as imagens dos períodos definidos e avaliar a sensibilidade de cada combinação na detecção de cortes de vegetação.

2.3.1. Imagens de satélite

As imagens utilizadas neste estudo provêm dos satélites Sentinel-2 e Landsat-8, ambos disponibilizados gratuitamente através dos programas Copernicus (ESA) e Landsat (NASA/USGS), descritos no Quadro 2.2.

Estes sensores óticos multiespectrais foram selecionados pela sua resolução espacial e temporal, adequadas à análise efetuada, bem como pela sua continuidade temporal, que assegura séries históricas para monitorização multitemporal (Wulder et al., 2019).

Quadro 2.2 - Características principais dos satélites utilizados.

Satélite	Programa / Entidade	Resolução Espacial	Resolução Temporal	Bandas Relevantes	Aplicações Principais
Sentinel-2	Copernicus / ESA	10, (20 e 60) m	5 dias	B4 (Red), B8 (NIR), B11 (SWIR)	Monitorização da vegetação, uso do solo, humidade e alterações ambientais.
Landsat-8	NASA / USGS	30 m	16 dias	B4 (Red), B5 (NIR), B6 (SWIR1), B7 (SWIR2)	Análise de cobertura vegetal, detecção de alterações e estudos de dinâmica de uso do solo.

Fonte: Adaptado de ESA (2025); NASA (2025).

2.3.2. Índices de vegetação

A quantificação do vigor e da humidade da vegetação foi realizada através do cálculo de diferentes índices, os quais permitem realçar a resposta espectral associada à presença e ao estado fisiológico da vegetação.

Foram testados três índices principais, o *Normalised Difference Vegetation Index* (NDVI), o *Modified Soil-Adjusted Vegetation Index* (MSAVI) e o *Normalized Difference Water Index* (NDWI), descritos no Quadro 2.3 e selecionados com base na sua relevância científica e aplicabilidade na monitorização de vegetação em contextos florestais e de gestão de combustível (Radočaj et al., 2020).

Quadro 2.3 - Índices de vegetação utilizados e respetiva aplicação.

Índice	Fórmula	Aplicação
NDVI	$\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}$	Mede o vigor fotossintético da vegetação. Valores elevados indicam vegetação densa e saudável. Valores baixos indicam solo exposto, áreas artificializadas, substratos rochosos ou vegetação esparsa.
MSAVI	$\frac{(2 \times NIR + 1) - \sqrt{(2 \times NIR + 1)^2 - 8 \times (NIR - Red)}}{2}$	Minimiza a influência do solo exposto, sendo adequado para áreas com cobertura vegetal descontínua, como matos e zonas em regeneração.
NDWI	$\frac{(NIR - SWIR)}{(NIR + SWIR)}$	Avalia o teor de humidade da vegetação e é útil para detetar zonas com maior conteúdo de água ou stress hídrico.

Fonte: Adaptado de Radočaj et al. (2020).

2.3.3. Funções de agregação

Após o cálculo dos índices de vegetação, foram aplicadas diferentes funções estatísticas de agregação temporal, com o objetivo de sintetizar a informação de múltiplas observações numa única métrica representativa, possibilitando a comparação entre períodos e entre linhas de análise. Para o presente estudo, o período considerado para a agregação correspondeu aos três meses subsequentes à conclusão da intervenção, para permitir a concatenação de mais imagens de modo a eliminar problemas, como a persistência de nuvens (especialmente crítico nos períodos de inverno e primavera e mais impactante nas imagens Landsat, devido à menor resolução temporal de 16 dias). Sendo este também o intervalo utilizado no projeto

SeverusPT para mapeamento da severidade e monitorização da recuperação da vegetação após incêndios (Gonçalves et al., 2024).

Foram testadas três funções principais, a mediana, o percentil 90% e o z-score, descritos no Quadro 2.4, de forma a avaliar a sua capacidade de deteção de alterações relacionadas com intervenções de gestão da vegetação e regeneração subsequente. Cada função apresenta propriedades estatísticas distintas que influenciam a sensibilidade da resposta obtida.

Quadro 2.4 - Funções estatísticas de agregação.

Função	Descrição	Aplicação principal
Mediana	Valor central da distribuição de valores no período definido. Reduz o impacto de valores extremos e de observações anómalas causadas por nuvens ou ruído atmosférico.	Utilizada para representar o estado médio e estável da vegetação numa janela temporal.
Percentil 90%	Valor abaixo do qual se situam 90% das observações. Representa o limite superior da distribuição, atenuando <i>outliers</i> isolados.	Usada para estimar o nível superior típico da resposta espectral da vegetação, sem influência de valores anormais.
Z-score	Mede o grau de variação de cada valor em relação ao comportamento médio do conjunto de dados. Permite identificar desvios significativos e destacar áreas onde ocorreram alterações abruptas na vegetação.	Aplicada para detetar anomalias ou diferenças relevantes entre períodos antes e após as intervenções, funcionando como um indicador de mudança.

Fonte: Elaboração própria com base em metodologia estatística aplicada a séries temporais.

2.4. Desenvolvimento da aplicação online

O desenvolvimento da aplicação online pretendeu transformar a metodologia proposta num instrumento interativo de apoio à decisão, acessível em ambiente Google Earth Engine. O processo de conceção seguiu uma abordagem iterativa, ilustrada no fluxograma da Figura 2.3, iniciando-se com a definição dos requisitos funcionais, seguida da implementação com a integração dos diferentes módulos de processamento, depois foram testadas as diferentes abordagens e efetuados os ajustes finais antes da sua publicação.



Figura 2.3 - Principais etapas do processo de desenvolvimento da aplicação. Fonte: Elaboração própria.

A aplicação recebeu a designação ForestVAR, uma combinação das palavras *Forest* de floresta e *VAR* de variação, refletindo o objetivo central da ferramenta que é analisar as variações que ocorrem na floresta ao longo do tempo, com especial enfoque nas faixas de servidão das linhas elétricas. O acesso encontra-se disponível através do endereço <https://forestvar.projects.earthengine.app/view/forestvar>.

2.4.1. Levantamento de requisitos gerais

O levantamento de requisitos teve como finalidade identificar as funcionalidades essenciais que a aplicação deveria incorporar para satisfazer os objetivos de monitorização, análise e apoio à decisão. O Quadro 2.5 sintetiza os requisitos funcionais e técnicos definidos com base nas necessidades do projeto a implementar.

Quadro 2.5 - Requisitos gerais da aplicação online.

Requisito	Descrição	Prioridade
Seleção de satélites	Possibilitar a escolha entre os principais satélites de observação da Terra	Alta
Seleção de índices de vegetação	Permitir a escolha entre os principais índices de vegetação	Alta
Seleção de funções de agregação	Integrar diferentes opções de funções de agregação	Alta
Seleção de dados vetoriais	Permitir o carregamento e seleção de diferentes dados vetoriais das linhas	Alta
Seleção das datas do final das intervenções	Implementar uma caixa de inserção da data a partir da qual são efetuados os cálculos	Alta
Visualização de diferentes camadas de mapas	Exibir mapas dos períodos pré e pós-intervenção, da diferença e regeneração.	Alta
Geração de gráficos temporais	Permitir gerar gráficos da evolução do estado da vegetação ao longo do tempo	Alta
Ferramentas de desenho	Possibilitar que a análise seja efetuada para áreas selecionadas pelo utilizador	Baixa
Exportação de resultados	Permitir o download de imagens, gráficos e tabelas	Baixa
Escala e legenda dinâmicas	Atualização automática conforme o índice selecionado	Alta
Botões de ajuda	Disponibilizar instruções básicas de utilização	Baixa
Geração de alertas	Enviar alertas quando se atinge valores pré-definidos	Baixa

Fonte: Elaboração própria.

2.4.2. Implementação da aplicação

A implementação da aplicação decorreu em ambiente GEE, recorrendo à linguagem JavaScript e às suas bibliotecas de interface gráfica (User Interface API). O processo seguiu uma abordagem sequencial e modular, permitindo validar cada componente antes da integração final.

Numa fase inicial, foi preparado o ambiente de desenvolvimento, com a definição das coleções de imagens e a criação das variáveis de entrada correspondentes aos parâmetros selecionáveis (satélite, índice, função e data do final da intervenção). Em seguida, foram aplicadas as máscaras e filtros de nuvens e efetuado o cálculo dos índices de vegetação definidos anteriormente, para os períodos antes e depois do corte de forma a permitir que seja calculada a diferença entre os dois momentos. Sendo que o período depois corresponde aos três meses após a intervenção agregados de acordo com a função escolhida e o período antes corresponde aos três meses homólogos do ano anterior, igualmente agregados. Desta forma conseguimos detetar as diferenças do vigor da vegetação em momentos distintos.

Iniciou-se depois a fase de integração da interface, estruturada em módulos correspondentes aos parâmetros de entrada e às opções de análise. Foram utilizados os elementos de interface do GEE, como `ui.Panel` (painéis de organização das ferramentas), `ui.Select` (menus de seleção) e `ui.Button` (botões de ação e análise de dados), para criar uma disposição funcional e intuitiva, permitindo a interação com o código sem necessidade de edição direta.

Posteriormente avançou-se para o carregamento de dados vetoriais das faixas de servidão, para permitir a seleção das diferentes linhas alvo de estudo, assim como foram criadas também em formato vetorial áreas paralelas fora da faixa, selecionadas de acordo com os mesmos critérios de usos do solo alvo de intervenções de gestão de vegetação. Estas áreas também foram adicionadas à aplicação, para permitir uma melhor comparabilidade entre as áreas intervencionadas (i.e., designadas por áreas “dentro da faixa”) e as áreas não intervencionadas (i.e., “fora da faixa”), servindo estas últimas como zonas de controlo na periferia imediata das faixas intervencionadas. Estas áreas fora da faixa foram também muito importantes para a realização dos testes de escolha da melhor combinação entre satélite, índice espectral e função de agregação temporal permitindo assim uma melhor parametrização da ferramenta. O upload destes dados é efetuado na interface do Code Editor do GEE através do carregamento dos designados “assets”, ou seja, dados (vetoriais ou de

imagem) que o utilizador adiciona e pode manipular diretamente na *cloud* do Google Earth Engine.

Depois foi introduzida também a funcionalidade de geração de gráficos temporais que representam a evolução do estado da vegetação ao longo de um período pré-definido, para a linha selecionada, ou para uma área desenhada pelo utilizador. Se alguma área for desenhada manualmente a aplicação assume como prioritária para processar a análise. Sendo que pode ser optado entre a geração de um gráfico que represente a diferença entre o momento depois do corte e o momento antes do corte para os períodos homólogos ou pode-se escolher que o gráfico apresente os valores absolutos do índice de vegetação selecionado.

Após a montagem da interface e a ligação entre os módulos de entrada e processamento, foram conduzidos testes de desempenho e compatibilidade, avaliando a estabilidade da aplicação e a eficiência de execução em diferentes combinações de parâmetros. Nesta fase, foram também ajustados os limites de escala e a formatação das saídas gráficas, com o objetivo de obter tempos de resposta adequados à utilização prática da ferramenta implementada.

Finalmente, a aplicação foi publicada através do módulo Earth Engine Apps em modo público, permitindo o acesso e utilização aos utilizadores interessados.

2.5. Avaliação e escolha da melhor combinação de parâmetros analíticos

A determinação da melhor combinação de parâmetros de análise teve como finalidade identificar qual o satélite (i.e., Sentinel-2 vs. Landsat-8), índice de vegetação e função de agregação que apresenta maior sensibilidade na deteção das alterações no vigor da vegetação resultantes das intervenções de manutenção ou abertura de faixa.

Para tal, recorreu-se à aplicação desenvolvida, através da qual foram geradas e exportadas imagens no formato GeoTIFF correspondentes a todas as combinações em estudo. Foram consideradas as doze linhas de transporte de energia selecionadas, dois satélites (Sentinel-2 e Landsat-8), três índices de vegetação (NDVI, NDWI e MSAVI) e três funções de agregação temporal (i.e., a mediana, o percentil 90% e o z-score), resultando num total de 216 combinações testadas/comparadas. No entanto, como cada combinação foi analisada em duas situações distintas, antes da intervenção e após a intervenção, originou à necessidade de exportação de 432 imagens GeoTIFF a partir desta plataforma.

Com o objetivo de automatizar o processamento e análise deste elevado volume de dados, foi utilizada a linguagem R em ambiente RStudio, com suporte do pacote RTools. Este ambiente permitiu a leitura das imagens GeoTIFF e dos dados vetoriais (através dos pacotes *terra* e *sf*) correspondentes às duas zonas de análise, a área dentro da faixa alvo de intervenção e a área fora da faixa, onde, salvo exceções pontuais, não foram realizadas operações de corte ou desbaste de vegetação.

Para cada uma das combinações de parâmetros, foi calculada a percentagem de diferença do vigor da vegetação entre as duas zonas, utilizando a média dos valores do índice espectral como variável comparativa. O cálculo foi efetuado segundo a seguinte expressão geral, representada na Equação 2.1.

$$\%Diferença = \frac{(\text{Índice}_{(dentro)} - \text{Índice}_{(fora)})}{(\text{Índice}_{(fora)})} \times 100$$

Equação 2.1 - Cálculo da variação percentual do vigor da vegetação entre a área intervencionada e a área de controlo.

Este procedimento permitiu quantificar a variação relativa do vigor vegetativo nas áreas intervencionadas em comparação com as áreas adjacentes, constituindo a base para efetuar a ordenação do(s) melhor(es) conjunto(s) de parâmetros e assim identificar a combinação mais eficaz e robusta na deteção das alterações provocadas pelo corte de vegetação.

2.6. Validação de intervenções

A prova da realização das intervenções assenta na interpretação dos mapas de diferença dos índices de vegetação, gerados automaticamente pela aplicação desenvolvida, que já tem pré-selecionada a combinação de parâmetros (satélite, índice espectral e função de agregação) que obteve a melhor classificação nos testes efetuados.

Estes mapas representam, em escala cromática, as variações do vigor vegetativo entre o período anterior e o período posterior à intervenção. As áreas com valores negativos da diferença, representadas a vermelho na interface, correspondem a zonas onde ocorreu uma redução do vigor da vegetação, associada à remoção de material vegetal/combustível. Quanto mais intenso for o tom de vermelho, maior é a magnitude dessa variação e, consequentemente, maior o grau de certeza de que essa redução resulta de uma intervenção

de corte e não de fatores externos, como variações fenológicas ou condições meteorológicas intra-anuais.

Para as linhas alvo de estudo e no sentido de complementar esta análise, é possível selecionar a visualização conjunta da área paralela fora da faixa, desenhada para a realização dos testes, o que permite uma avaliação comparativa entre as zonas dentro e zonas de controlo fora da faixa, possibilitando uma leitura mais precisa da magnitude das alterações detetadas.

Esta análise espacial e temporal permite confirmar de forma remota, imediata e com maior grau de certeza a ocorrência das intervenções e avaliar a sua extensão e intensidade.

2.7. Monitorização temporal do crescimento da vegetação

A monitorização temporal do crescimento da vegetação também é realizada recorrendo à aplicação, a qual integra uma funcionalidade de geração automática de gráficos temporais de variação ou dos valores absolutos dos índices de vegetação. Esta ferramenta permite acompanhar, de forma contínua, a evolução espectral das faixas de servidão.

Para a execução desta análise, o utilizador deve selecionar, na interface da aplicação, a linha de transporte de energia ou a área específica a monitorizar e definir o período temporal de interesse. A aplicação processa automaticamente as séries temporais das imagens de satélite correspondentes ao intervalo selecionado e gera um gráfico de evolução semanal dos valores médios do índice de vegetação.

Cada ponto do gráfico representa a média semanal do índice (caso se opte pelo gráfico da diferença, é efetuada a comparação com a semana homóloga do ano anterior), permitindo identificar padrões de crescimento, estabilização ou declínio do vigor vegetativo ao longo do tempo.

Esta abordagem permite, monitorizar a evolução da vegetação após as intervenções, detetar tendências anómalas e pode também ser utilizada para otimizar os períodos de corte.

2.8. Identificação e classificação de áreas críticas

A identificação e classificação de áreas críticas foi realizada com base na implementação de uma nova camada na aplicação, Figura 2.4, que permitiu avaliar a capacidade regenerativa da vegetação após a realização de uma intervenção, de forma a identificar segmentos de faixa com crescimento vegetativo mais acelerado.



Figura 2.4 - Seleção da camada da regeneração na aplicação. Fonte: Elaboração própria.

Para tal, procedeu-se a um cálculo comparativo entre os valores do índice de vegetação obtidos imediatamente após a intervenção (agregação dos 3 meses após a realização do corte) com os valores para o período homólogo 1 ano após a data de referência (entre os 12 e os 15 meses), conforme representado na Equação 2.2. A diferença percentual entre ambos foi utilizada como indicador do grau de regeneração da vegetação.

$$\% \text{ Variação} = \frac{(\text{Índice}_{(1 \text{ ano})} - \text{Índice}_{(\text{pós-intervenção})})}{(\text{Índice}_{(\text{pós-intervenção})})} \times 100$$

Equação 2.2 - Cálculo da variação percentual do vigor da vegetação entre o período pós-intervenção e o período homólogo um ano depois, utilizada como indicador do grau de regeneração da vegetação.

Com base nesta variação, as áreas foram classificadas em três classes de criticidade: baixo risco (variação inferior a 20%), risco moderado (entre 20% e 50%) e risco elevado (superior a 50%). A classificação é representada na interface da aplicação com um mapa temático e uma escala de cores padronizada (verde, amarelo e vermelho), permitindo visualizar e quantificar as zonas que apresentam maior criticidade.

3. RESULTADOS

Nesta secção são apresentados os principais resultados obtidos com base nas metodologias desenvolvidas e através da implementação e utilização da aplicação ForestVAR. Os resultados englobam essencialmente a apresentação da aplicação, a análise das combinações de parâmetros testadas, as avaliações comparativas, a validação das intervenções de remoção da vegetação, a monitorização temporal do crescimento da vegetação e a identificação de áreas críticas ao longo das faixas de servidão.

3.1. Aplicação online desenvolvida

A Figura 3.1 apresenta a interface principal da aplicação, onde se encontram reunidas as funcionalidades que suportam a análise e interpretação dos resultados.

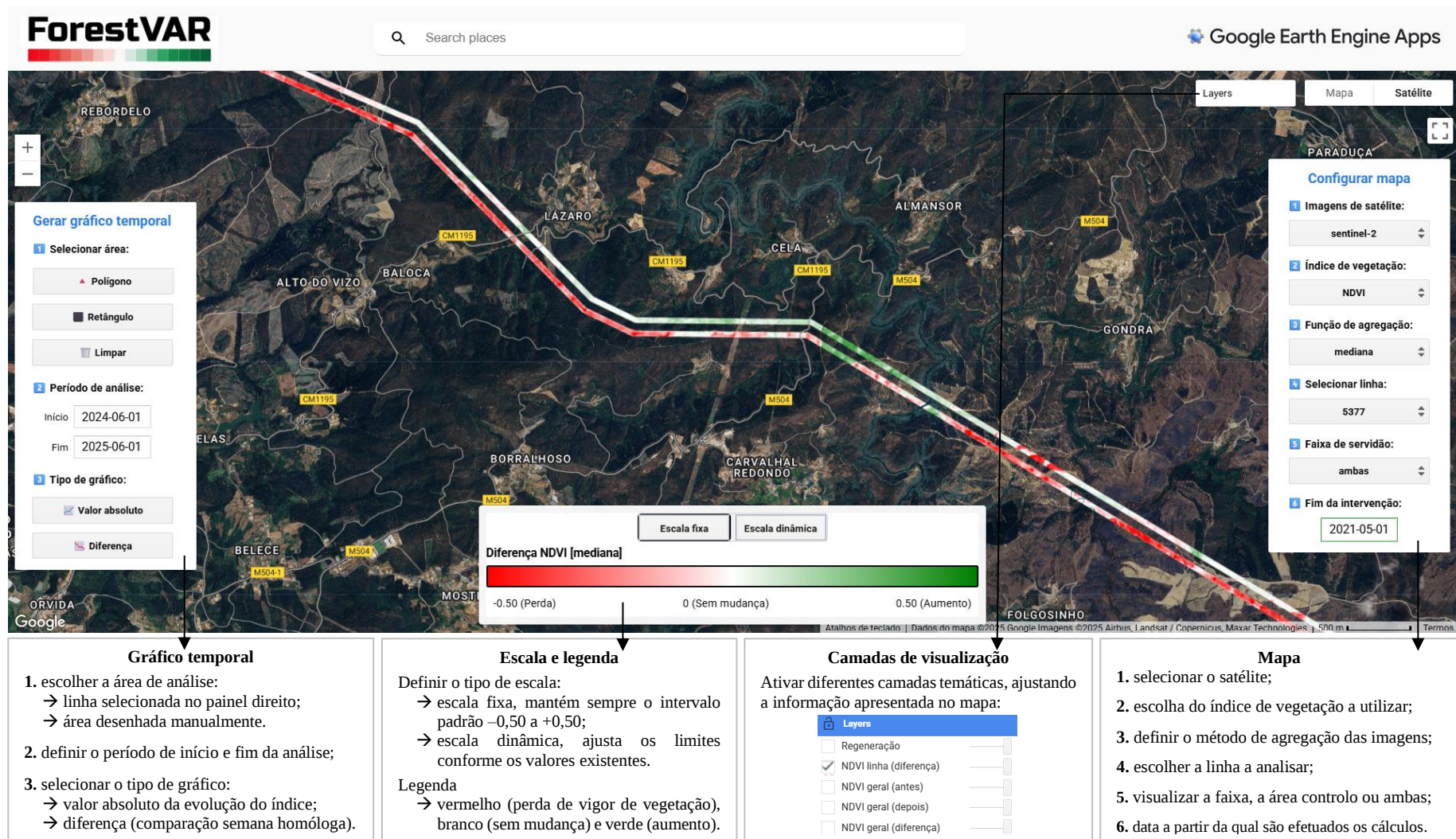


Figura 3.1 - Interface da aplicação ForestVAR, com caixas de explicação dos diferentes painéis. Fonte: Elaboração própria.

A aplicação apresenta-se dividida em três áreas principais: o painel central, onde é exibido o mapa base e as camadas de análise; o painel direito, que contém as opções de configuração e seleção dos parâmetros de visualização; e o painel esquerdo, que permite a geração e configuração de gráficos temporais.

No painel de configuração à direita, o utilizador pode selecionar o tipo de imagem de satélite, o índice de vegetação a utilizar na análise, a função de agregação estatística, que define o modo de cálculo do valor representativo do índice, a linha de transporte de energia a analisar, escolhida a partir de uma lista pré-definida, a faixa a considerar, podendo o utilizador optar por visualizar apenas a área dentro da faixa, fora da faixa, ou ambas, e finalmente, a data do fim da intervenção, que define o ponto temporal de referência a partir do qual a aplicação calcula as diferenças espectrais.

O painel esquerdo é dedicado à análise temporal, possibilitando a geração de gráficos (Figura 3.2) que representam a evolução semanal dos índices de vegetação. O utilizador pode definir o período temporal de interesse e escolher entre os dois tipos de gráfico, o de valor absoluto ou diferença do índice selecionado. Estes gráficos podem ser gerados para a linha selecionada no painel direito ou, em alternativa, para uma área desenhada manualmente no mapa através das ferramentas de desenho incluídas na interface (polígono ou retângulo), permitindo análises localizadas e personalizadas.

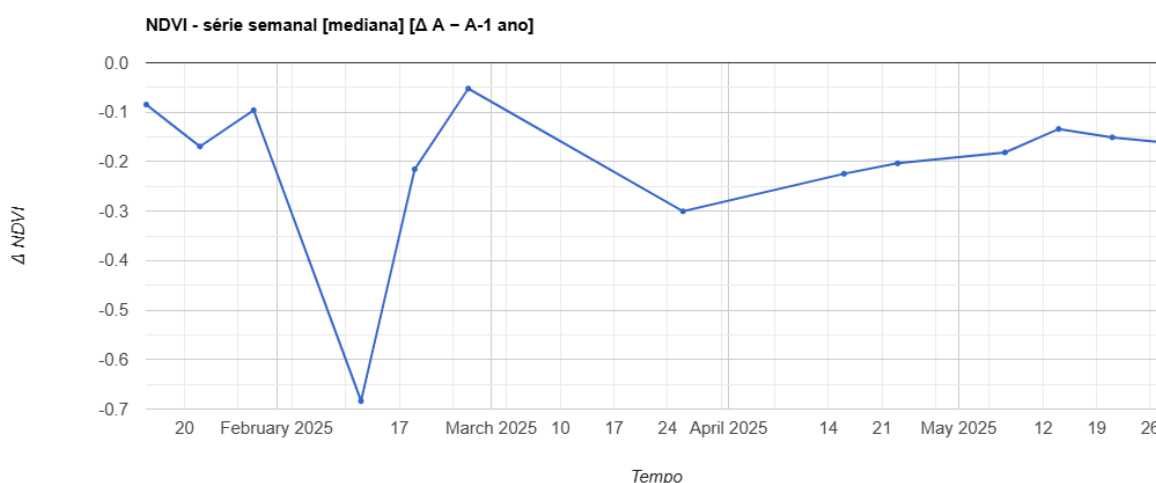


Figura 3.2 - Exemplo de gráfico temporal semanal do índice NDVI (mediana) gerado na aplicação, que representa a diferença, calculada para uma área selecionada manualmente na linha 5503 (região do alentejo, concelho de Borba). Elaboração própria.

Uma funcionalidade complementar disponibilizada ao utilizador é a escolha entre escala fixa e escala dinâmica na visualização dos mapas de diferença. Na escala fixa, os limites de variação do índice mantêm-se constantes, o que facilita a comparação entre linhas e períodos distintos. Na escala dinâmica, os valores mínimos e máximos são ajustados automaticamente à área em análise, permitindo uma leitura mais sensível das variações locais no vigor da vegetação.

A aplicação integra ainda várias camadas de visualização dos valores do índice para o momento antes e depois da intervenção, necessárias para o cálculo da camada principal pré-definida na interface, que podem ser ativadas conforme o objetivo da análise. Complementarmente, foi adicionada a camada referente à regeneração, que avalia a recuperação da vegetação num período de um ano após a intervenção, classificando as zonas segundo os níveis de regeneração baixa, moderada e elevada.

3.1.1. Implementação dos requisitos

A avaliação da implementação dos requisitos definidos na fase de conceção da aplicação permite verificar em que medida as funcionalidades planeadas (Quadro 2.5) foram efetivamente concretizadas na versão final da aplicação. Esta confirmação permite analisar o grau de cumprimento dos objetivos funcionais estabelecidos e identificar eventuais limitações ou funcionalidades ainda em desenvolvimento.

No Quadro 3.1 apresenta-se uma síntese comparativa entre os requisitos propostos e o seu estado de implementação efetiva na aplicação ForestVAR, indicando ainda observações relevantes relativas ao desempenho ou à viabilidade técnica de cada componente.

Quadro 3.1 - Verificação da implementação dos requisitos da aplicação online.

Requisito	Prioridade	Implementação	Observações
Seleção de satélites	Alta	Sim	Implementada a seleção entre Sentinel-2, Landsat-8 e coleção harmonizada HLS (Landsat 5, 7 e 8).
Seleção de índices de vegetação	Alta	Sim	Inclui NDVI, EVI, NBR, SAVI, MSAVI e NDWI.
Seleção de funções de agregação	Alta	Sim	Disponíveis média, mediana, máximo, percentis 75 e 90% e Z-score.
Seleção de dados vetoriais	Alta	Sim	Permite a seleção em formato vetorial das linhas.
Seleção das datas do final das intervenções	Alta	Sim	Caixa de inserção de data funcional integrada no painel de controlo.
Visualização de diferentes camadas de mapas	Alta	Sim	Inclui camadas do antes, do depois, da diferença e da regeneração.
Geração de gráficos temporais	Alta	Sim	Gráficos temporais automáticos gerados da diferença ou do valor absoluto do índice.
Ferramentas de desenho	Baixa	Parcialmente	Possível desenhar polígonos e retângulos, sem gravação persistente.
Exportação de resultados	Baixa	Parcialmente	Exportação de gráficos temporais e tabelas; A exportação das imagens GeoTIFF esteve ativa apenas para a realização dos testes.
Escala e legenda dinâmicas	Alta	Sim	Escala ajustável (fixa e dinâmica) e legenda automática atualizada.
Botões de ajuda	Baixa	Não	Não implementada. Prevista para futuras versões da aplicação.
Geração de alertas	Baixa	Não	Não implementada. Prevista para futuras versões da aplicação.

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se no Quadro 3.1 que a maioria dos requisitos considerados prioritários foram integralmente implementados na aplicação, nomeadamente as funcionalidades relacionadas com a seleção de parâmetros, visualização de camadas e geração de gráficos temporais. No entanto, algumas funcionalidades classificadas como de prioridade baixa, como as ferramentas de ajuda ou o envio de alertas automáticos, devido a limitações técnicas ou de tempo, foram apenas parcialmente integradas ou permanecem em fase de desenvolvimento. No conjunto, cerca de 80% das funcionalidades previstas foram implementadas, assegurando o cumprimento dos objetivos definidos para a versão atual da aplicação. Ainda assim, importa referir que a performance da aplicação apresenta algumas limitações operacionais,

sobretudo na geração de gráficos temporais para áreas extensas ou períodos mais longos, situações em que ocorrem falhas ou tempos de processamento significativamente superiores.

3.2. Avaliação da melhor combinação de parâmetros analíticos

O Quadro 3.2 apresenta o ranking das combinações de parâmetros testados, resultantes da integração entre os diferentes satélites avaliados (Sentinel-2 e Landsat-8), índices de vegetação (NDVI, MSAVI e NDWI) e funções de agregação (mediana, percentis e z-score). O objetivo desta análise consistiu em identificar a combinação que melhor detecta as alterações de vigor da vegetação associadas à realização das intervenções, expressas através da diferença percentual média entre as áreas dentro e fora das faixas de servidão. Neste contexto, associou-se uma maior diferença média à capacidade de detecção remota de sinais de remoção da vegetação.

Quadro 3.2 - Ranking das combinações de parâmetros testadas.

Ranking	Satélite	Índice	Função	% Δ Dentro	% Δ Fora	% Final
1	Sentinel-2	NDVI	Mediana	-18.22	1.09	-19.31
2	Sentinel-2	MSAVI	Mediana	-13.83	3.55	-17.37
3	Sentinel-2	NDWI	Percentil 90	5.51	22.54	-17.03
4	Sentinel-2	NDVI	Percentil 90	-17.23	-2.57	-14.67
5	Sentinel-2	NDWI	Mediana	-11.07	1.99	-13.06
6	Sentinel-2	MSAVI	Percentil 90	-11.68	0.85	-12.53
7	Landsat-8	NDVI	Mediana	-12.49	-0.72	-11.78
8	Landsat-8	MSAVI	Mediana	-10.41	-1.12	-9.29
9	Sentinel-2	NDVI	Z-score	-7.30	0.76	-8.06
10	Landsat-8	NDWI	Mediana	-8.47	-0.72	-7.75
11	Landsat-8	NDVI	Percentil 90	-11.96	-4.34	-7.62
12	Landsat-8	MSAVI	Percentil 90	-7.15	-0.50	-6.65
13	Sentinel-2	NDWI	Z-score	-4.75	1.56	-6.30
14	Landsat-8	NDVI	Z-score	-10.63	-4.81	-5.83
15	Landsat-8	NDWI	Z-score	-8.45	-4.35	-4.10
16	Landsat-8	NDWI	Percentil 90	-43.36	-40.95	-2.41
17	Sentinel-2	MSAVI	Z-score	-1.49	0.67	-2.16
18	Landsat-8	MSAVI	Z-score	-2.41	-1.15	-1.26

Fonte: Elaboração própria, com recurso à linguagem R.

De forma global, os dados indicam que a combinação Sentinel-2 / NDVI / Mediana constitui a configuração mais estável e sensível para a detecção das intervenções de corte de vegetação. Ocupa a primeira posição no ranking com uma variação média de -19,3 %, o que confirma a adequação do NDVI e da resolução espacial do Sentinel-2 (10 m) para a monitorização deste tipo de processos.

As combinações baseadas no MSAVI e NDWI do Sentinel-2 também se destacam entre as mais eficazes, com reduções médias do vigor da vegetação entre -12 % e -17 %. Em contraste, os resultados obtidos com o Landsat-8 tendem a apresentar valores absolutos inferiores, refletindo a sua menor resolução espacial (30 m) e consequente diluição das alterações locais de vegetação devido a efeitos de mistura espectral de distintos tipos de coberto do solo e/ou contaminação intra-pixel do sinal. Simultaneamente, a menor resolução temporal dos dados Landsat (16 dias vs 5 dias do Sentinel-2) podem também explicar diferenças substanciais na qualidade do sinal espectral e menor capacidade de detecção do Landsat. Ainda assim, os índices NDVI e MSAVI neste sensor demonstraram comportamentos coerentes, com variações entre -7 % e -12 %.

Os resultados associados às funções z-score e percentis revelam maior dispersão, sugerindo que estas abordagens estatísticas são mais sensíveis à variabilidade temporal e à qualidade das séries de imagens. No entanto, o seu potencial na detecção de anomalias e regeneração poderá ser explorado em análises complementares.

3.3. Avaliação comparativa da detecção das intervenções

Com base na combinação de parâmetros que apresentou o melhor desempenho na detecção das intervenções, procedeu-se a uma análise comparativa entre linhas, grupos de linhas e localizações, destinada a identificar os contextos em que se registaram maiores variações.

3.3.1. Linhas

A Figura 3.3 apresenta a distribuição da variação do índice NDVI obtida para cada uma das 12 linhas de transporte de energia testadas, considerando a combinação Sentinel-2 / NDVI / Mediana, identificada como a mais eficaz. A representação em gráfico de densidade permite visualizar a magnitude e a dispersão das diferenças do vigor da vegetação antes e após intervenção nas faixas de servidão, refletindo as alterações resultantes dos trabalhos e distinguindo os comportamentos entre as diferentes linhas e regiões analisadas. Valores mais

próximos de zero ou positivos são indicativos de não remoção ou crescimento/recuperação rápida da vegetação enquanto que valores mais fortemente negativos indicam maior remoção da biomassa vegetal. Por outro lado, distribuições mais amplas indicam maior variabilidade das condições da vegetação após as intervenções.



Figura 3.3 - Distribuição da diferença do índice NDVI antes e depois da intervenção (i.e., Δ NDVI) para cada uma das 12 linhas de teste. Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, observa-se que a maioria das linhas evidencia valores médios negativos da diferença de NDVI, correspondendo a uma redução do vigor da vegetação após a intervenção, tal como esperado. As linhas 5525, 5386, 5377, 5316 e S2521 destacam-se por apresentarem distribuições deslocadas para valores negativos mais acentuados, indicando intervenções que implicaram maior corte de vegetação para cumprimento das especificações técnicas da REN e da legislação em vigor e, por outro lado, maior força do sinal espectral detetado pelo satélite antes e após intervenções.

Por outro lado, algumas linhas, como S2385, S1545 e S4390, apresentam distribuições mais centradas em torno de zero ou ligeiramente positivas, sugerindo pouca redução da carga vegetativa e até processos de regeneração vegetal onde já ocorreu recuperação parcial da cobertura. As linhas que apresentam distribuições mais amplas, com elevada variabilidade nos valores, poderão estar associadas à heterogeneidade estrutural da vegetação ao longo da faixa de servidão ou a diferenças temporais nas datas de execução dos trabalhos.

De forma a visualizar as diferenças temporais antes e após intervenções e colocar em contexto com as diferenças espaciais, é apresentada na Figura 3.4 os valores do índice de vegetação na linha 5386 (região norte, concelhos de Santa Maria da Feira e Oliveira de Azeméis), antes e depois da intervenção, tanto dentro como fora da faixa de servidão.

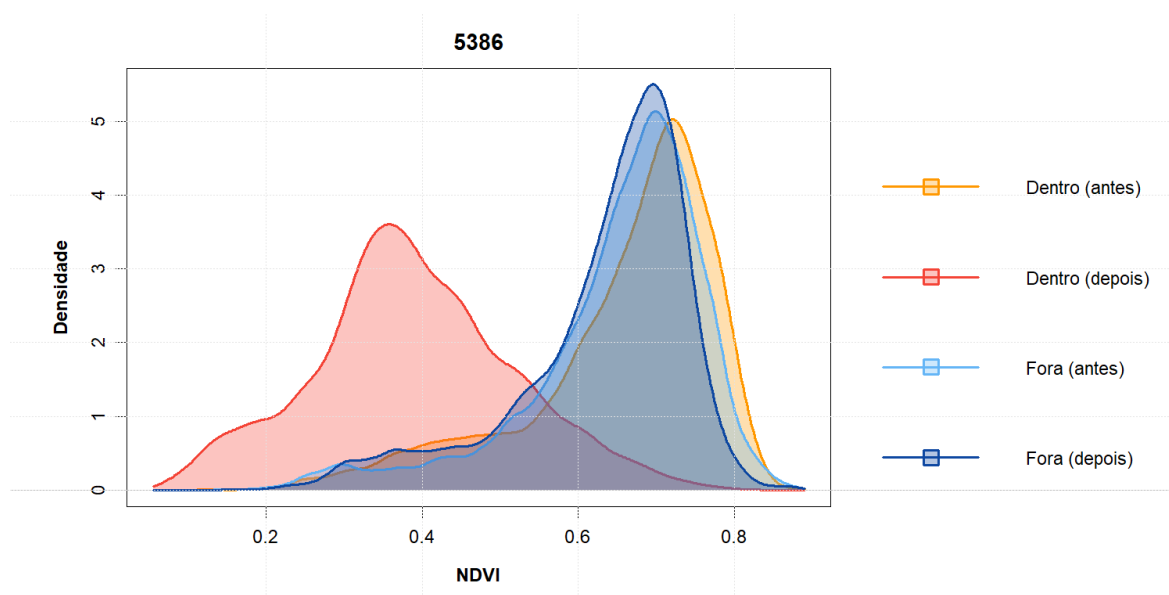


Figura 3.4 - Distribuição da densidade do NDVI na linha 5386, antes e depois da intervenção, dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que existem três situações que se sobrepõem parcialmente (com pequenas diferenças nas medianas destas distribuições), evidenciando que, antes da intervenção, não existiam diferenças expressivas entre o vigor da vegetação dentro e fora da faixa de servidão, uma vez que ambas as zonas apresentavam picos de densidade semelhantes e valores elevados de NDVI, indicativos de uma cobertura vegetal densa. Após a intervenção, observa-se uma redução acentuada do NDVI dentro da faixa, aproximadamente na ordem dos 50%, traduzindo a remoção efetiva da vegetação resultante do corte.

Em contraste, as áreas fora da faixa mantêm valores estáveis entre os dois períodos, sem variações significativas, o que demonstra que a diferença observada não decorre de fatores climáticos ou sazonais, mas está diretamente associada à execução dos trabalhos de abertura de faixa.

O exemplo anteriormente apresentado é referente a uma linha nova, pelo que se segue a Figura 3.5, representativa de uma linha preexistente sujeita a operações regulares de manutenção da vegetação, e que ilustra a distribuição da densidade do NDVI na linha S4206 (região norte, concelhos de Vila Pouca de Aguiar, Valpaços e Chaves).

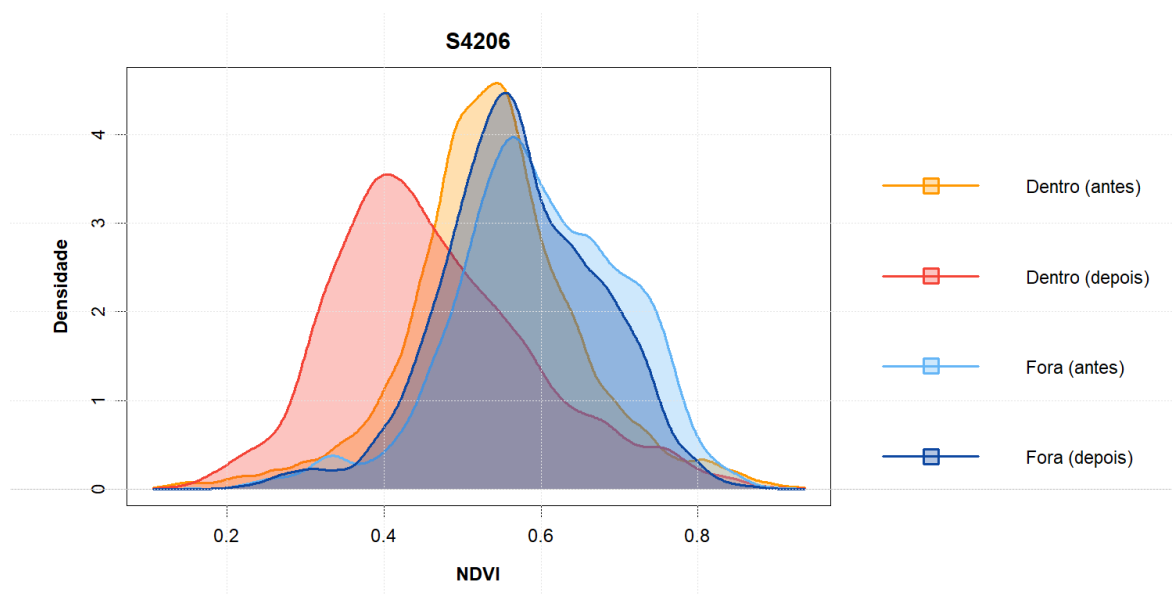


Figura 3.5 - Distribuição da densidade do NDVI na linha S4206, antes e depois da intervenção, dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.

Tal como observado na situação anterior, é possível identificar o efeito do corte dentro da faixa de servidão, evidenciado pela deslocação da curva vermelha para valores de NDVI

claramente mais baixos em termos medianos. Contudo, as curvas apresentam-se mais sobrepostas entre si do que no caso da linha nova, revelando que o sinal da remoção da vegetação é mais ténue e, consequentemente, mais difícil de detetar pelo satélite.

A porção da curva vermelha que não se sobrepõe às restantes distribuições representa as zonas em que a remoção da vegetação foi efetiva, enquanto as áreas de sobreposição sugerem cortes parciais ou seletivos, em que a cobertura vegetal foi reduzida, mas não eliminada.

3.2.3. Regiões

A Figura 3.6 apresenta a variação percentual da diferença do NDVI por região do país, com base na combinação já abordada, permitindo comparar a magnitude das alterações entre os contextos territoriais onde se localizam as linhas analisadas.

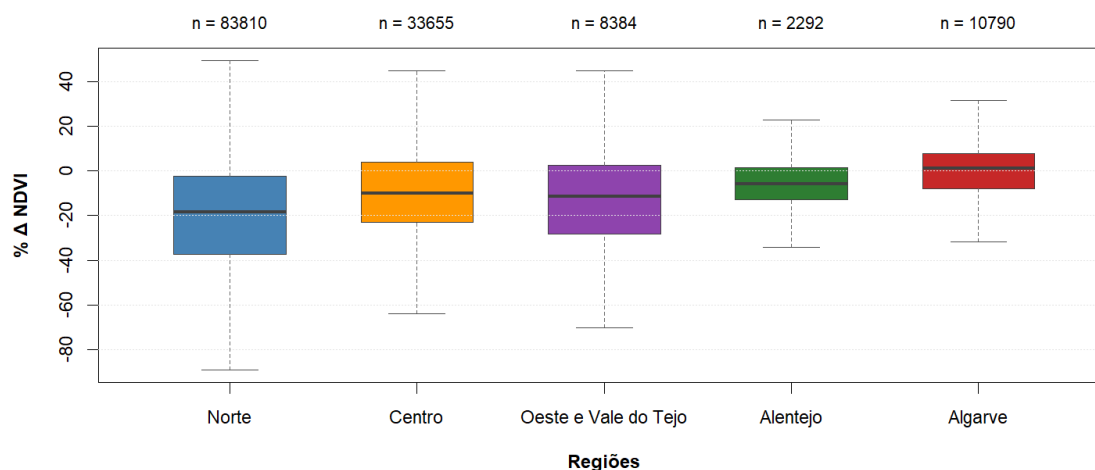


Figura 3.6 - Variação percentual da diferença do NDVI por região do país. Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se que as regiões do Norte e do Centro registam as maiores reduções médias do NDVI, refletindo intervenções mais intensas de gestão de combustível e abertura de faixa, em coerência com a maior densidade florestal e presença de espécies de rápido crescimento nestas zonas. As regiões do Oeste e Vale do Tejo e do Alentejo apresentam valores médios menos negativos, sugerindo intervenções mais localizadas ou vegetação de menor porte. Já no Algarve, as variações são próximas de zero, o que poderá estar associado à predominância de áreas de matos e cobertos dispersos.

3.2.4. Classe de linhas

A Figura 3.7 apresenta a variação percentual da diferença do NDVI em função da classe das linhas, distinguindo entre linhas novas, em fase de construção e sujeitas à abertura inicial de faixa, e linhas existentes, que são alvo de intervenções periódicas de manutenção.

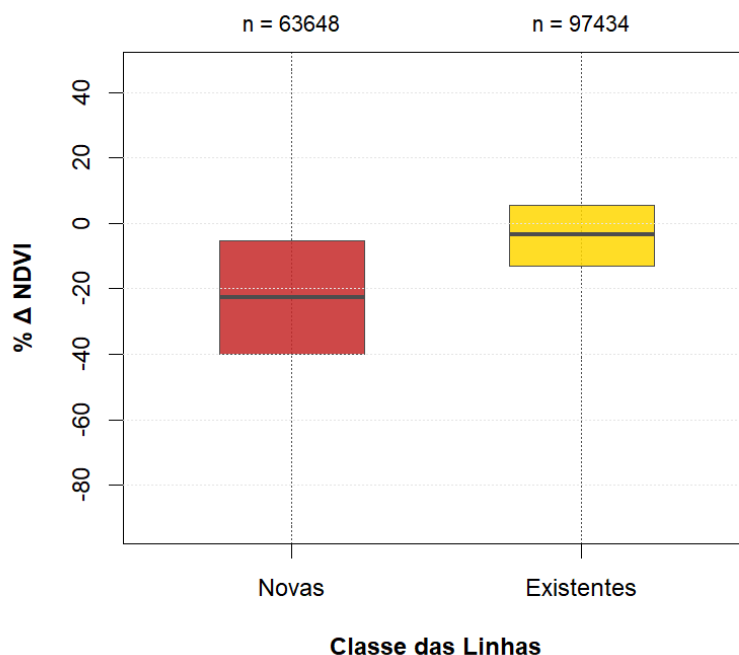


Figura 3.7 - Variação percentual da diferença do NDVI por classes de linhas. Para representar as caixas optou-se por remover os valores mínimos e máximos porque existia elevado número de *outliers*. Fonte: Elaboração própria.

Os resultados evidenciam diferenças significativas entre os dois grupos. As linhas novas registam reduções médias de NDVI mais acentuadas, refletindo o corte integral da vegetação associado à abertura inicial das faixas de servidão. Por sua vez, as linhas existentes apresentam variações mais moderadas, refletindo que este tipo de faixas, pela periodicidade com que são intervencionadas, já possuem uma carga combustível mais reduzida e, como tal, não é tão evidente a detecção das variações comparativamente com as linhas novas.

3.2.5. Uso do solo

A Figura 3.8 apresenta a variação percentual da diferença do NDVI em função do uso do solo, distinguindo entre áreas florestais e de matos presentes nas faixas de servidão. Esta análise visa avaliar se o tipo de cobertura vegetal influencia a magnitude das variações.

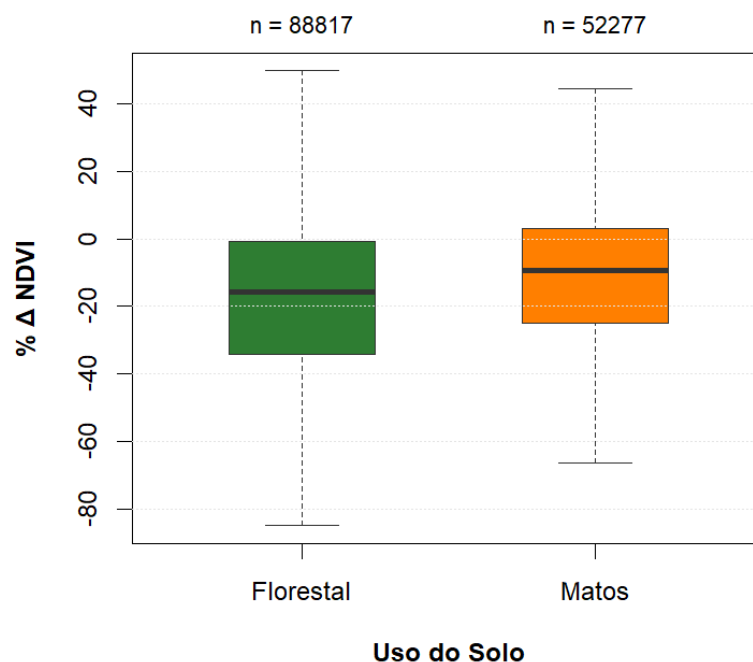


Figura 3.8 - Variação percentual da diferença do NDVI por uso do solo. Fonte: Elaboração própria.

As áreas florestais apresentam reduções médias mais acentuadas, evidenciando a remoção de vegetação arbórea de maior porte, que implica perdas mais expressivas de biomassa e vigor fotossintético. Em contraste, as áreas de matos registam variações menos intensas, coerentes com a menor densidade e altura da vegetação, bem como com a rápida regeneração destas espécies após o corte.

3.3. Validação de intervenções realizadas

A Figura 3.9 ilustra um exemplo representativo do mapa de diferença do NDVI gerado na aplicação, para um troço da linha 5525 (região norte, concelho de Póvoa de Lanhoso), evidenciando o resultado prático da análise efetuada.

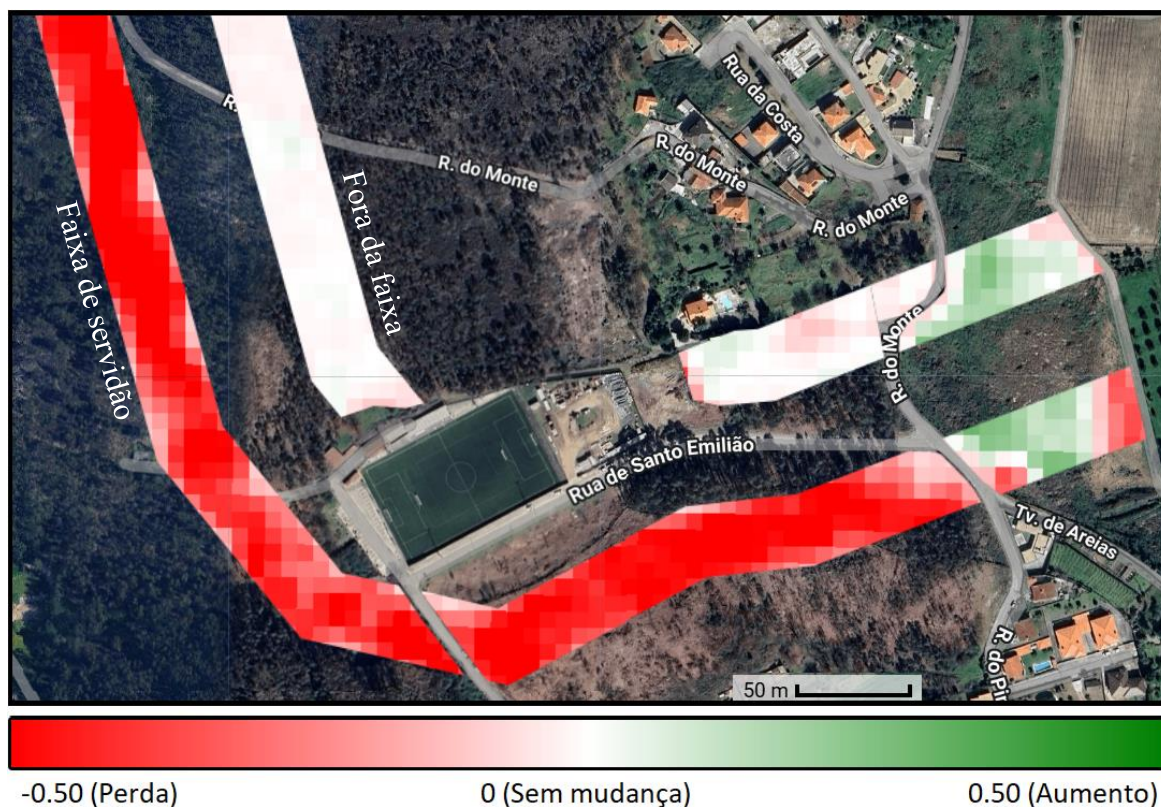


Figura 3.9 - Mapa de diferença do NDVI gerado na aplicação, para um trecho da linha 5525, com representação das áreas dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.

Ainda na Figura 3.9, as zonas assinaladas a vermelho correspondem a áreas com reduções significativas no vigor da vegetação, traduzindo a realização dos trabalhos. O gradiente de intensidade reflete a magnitude da variação, com os tons vermelhos mais escuros a indicar cortes intensos, enquanto as áreas a verde sugerem áreas que possivelmente não foram intervencionadas ou que a intervenção não tenha provocado grandes alterações no coberto vegetal e, nomeadamente, já esteja a regenerar.

Neste exemplo, pode-se afirmar que existem parcelas que foram alvo de intervenção e que outras carecem de confirmação, sendo que a interpretação do mapa sugere que a intervenção não tenha sido realizada. O contraste entre o interior da faixa, com perda de vigor e as áreas adjacentes, com valores estáveis ou positivos, reforça esta conclusão.

3.4. Monitorização do crescimento da vegetação

A funcionalidade de monitorização temporal integrada na aplicação ForestVAR permite acompanhar a evolução do vigor da vegetação nas faixas de servidão ao longo do tempo, a

partir da análise das séries temporais dos índices de vegetação. A Figura 3.10 apresenta o gráfico gerado automaticamente para a linha 5504 (região centro, concelho de Figueira da Foz), representando a variação semanal do NDVI no período de um ano, compreendido entre março de 2024 e março de 2025 (período que abrange o antes e o depois dos trabalhos de abertura de faixa).

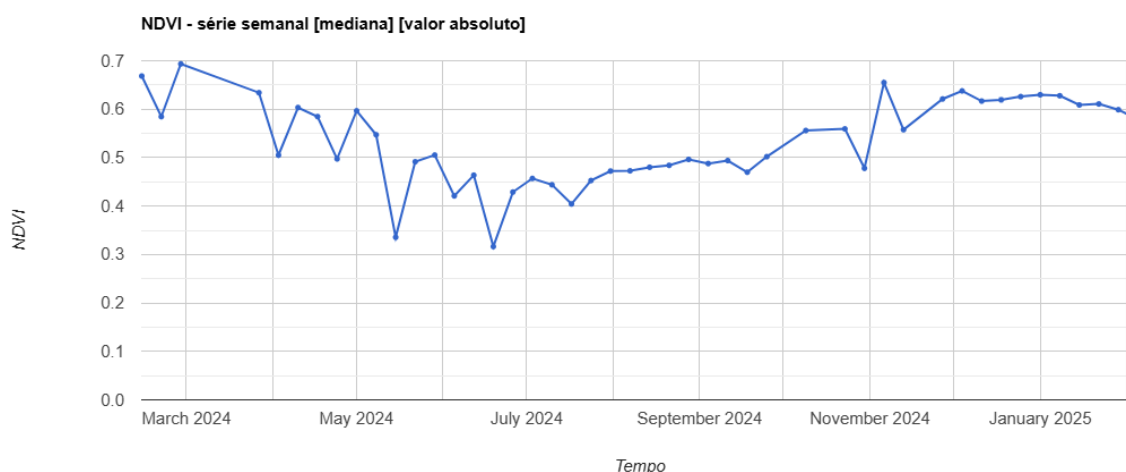


Figura 3.10 - Gráfico temporal que representa a evolução do índice NDVI entre o período de março de 2024 e março de 2025 para a linha 5504. Fonte: Elaboração própria.

O gráfico mostra uma redução acentuada dos valores de NDVI durante o segundo trimestre de 2024, coincidindo com o período de início da execução das intervenções de abertura de faixa nesta linha. Seguidamente, observa-se uma tendência de recuperação gradual dos valores ao longo dos meses seguintes, traduzindo a regeneração da vegetação herbácea e arbustiva após o corte. A estabilização dos valores de NDVI a partir do final de 2024 confirma a recuperação parcial do coberto vegetal e o restabelecimento do equilíbrio espectral da faixa.

3.5. Classificação e priorização das áreas de risco

A classificação e priorização das áreas de risco teve como finalidade identificar, de forma objetiva, os trechos das faixas de servidão que apresentam maior reincidência de crescimento vegetativo ou de acumulação de combustível, após a realização das intervenções de gestão.

A Figura 3.11 apresenta um exemplo do produto final deste processo, onde são evidenciadas as zonas com maior vulnerabilidade à regeneração rápida e, consequentemente, com maior

necessidade de monitorização, através da visualização de uma camada adicional gerada na aplicação.

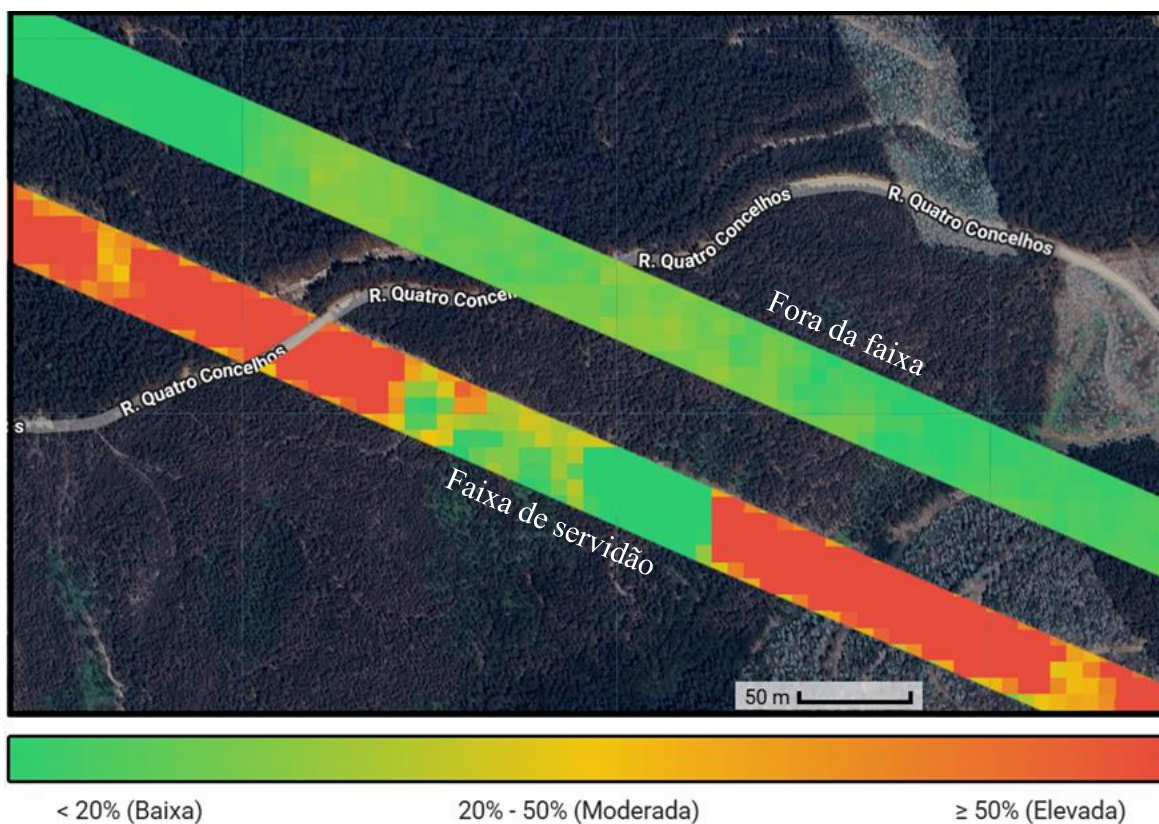


Figura 3.11 - Mapa da representação percentual da regeneração gerado na aplicação, para um troço da linha 5377 (zona norte, concelho de Arouca), com representação das áreas dentro e fora da faixa. Fonte: Elaboração própria.

As tonalidades mais intensas de vermelho representam áreas com maior variação positiva dos índices de vegetação no período pós-intervenção, traduzindo um crescimento significativo do coberto vegetal. As áreas assinaladas a verde, por sua vez, correspondem a zonas estabilizadas ou com regeneração controlada.

Desta forma temos a possibilidade de obter uma fotografia geral, e perceber se a linha ou partes dela apresentam valores que merecem maior monitorização. Mais uma vez a área em análise é colocada em contexto com a área fora da faixa (a norte) para permitir a comparação entre elas. Sendo possível observar, como era expectável, que a capacidade regenerativa é superior dentro da faixa derivada da intervenção ocorrida.

No entanto, como o estudo em causa está desenhado para calcular a variação do vigor da vegetação um ano após a intervenção, para permitir comparação com igual período homólogo, apenas as linhas que tenham sido intervencionadas à mais de um ano é que podem ser seleccionadas.

Considerando a linha alvo deste estudo que teve a sua última intervenção concluída há mais tempo, 5377, conseguimos identificar espacialmente que cerca de 25% da sua faixa apresenta risco elevado, 15% risco moderado e 55% risco baixo.

4. DISCUSSÃO

A interpretação e a avaliação crítica dos produtos de dados gerados são essenciais para avaliar a eficácia das diferentes abordagens e demonstrar qual o potencial da ferramenta para apoiar a gestão preventiva e operacional da gestão da vegetação e identificar quais as dificuldades e oportunidades de melhoria do projeto.

4.1 Análise crítica da plataforma online

A aplicação ForestVAR demonstrou um desempenho globalmente satisfatório na integração e análise de dados de detecção remota aplicados à monitorização da vegetação nas faixas de servidão. A escolha da plataforma Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017) revelou-se adequada pela sua capacidade de processar grandes volumes de dados e disponibilizar ferramentas integradas de visualização e cálculo.

A interface desenvolvida apresenta uma estrutura clara e funcional, permitindo ao utilizador configurar facilmente os parâmetros de análise. As ferramentas de visualização espacial e temporal, nomeadamente os mapas de diferença e os gráficos de evolução do vigor vegetativo, contribuem para uma leitura integrada e intuitiva das alterações na vegetação.

A escala ajustável oferece versatilidade, permitindo ajustar o nível de detalhe da interpretação conforme o contexto, nomeadamente realçar com a escala dinâmica variações subtis que poderiam passar despercebidas com uma escala global.

A camada relativa à regeneração, apresenta-se como uma abordagem relevante e com potencial para ser melhor explorada. Poderá necessitar de uma melhor definição dos limiares de variação, considerando a diversidade de linhas e regiões.

Contudo, a aplicação ainda apresenta algumas limitações operacionais e de usabilidade. Em primeiro lugar, a resposta da interface pode ser um pouco mais lenta em determinadas combinações ou áreas de maior extensão. A geração de gráficos temporais, embora funcional, requer por vezes tempos de carregamento superiores ao expectável e encontra-se, na atual versão, limitada a intervalos temporais mais curtos, o que reduz a possibilidade de analisar séries longas ou padrões de vários anos. De igual modo, a ausência de mecanismos automáticos de validação dos resultados implica uma leitura mais interpretativa e dependente da experiência do utilizador.

Apesar de algumas limitações, a aplicação cumpre todos os objetivos essenciais que foram definidos pelo mapa de requisitos e comprova a viabilidade de utilização de dados de satélite e ferramentas de processamento geoespacial na nuvem neste tipo de aplicação.

4.2. Validação das metodologias utilizadas

A validação das metodologias aplicadas teve como objetivo compreender as razões que explicam o desempenho e os padrões observados nos resultados obtidos. Mais do que confirmar a eficácia técnica das abordagens utilizadas, pretendeu-se interpretar os fatores que condicionaram as variações detetadas, avaliando a robustez da metodologia e a sua aplicabilidade prática.

A combinação de parâmetros que revelou melhor desempenho, Sentinel-2 / NDVI / mediana, demonstrou ser a mais sensível na deteção das variações associadas à remoção da vegetação. O NDVI é particularmente eficaz em ambientes de vegetação densa e saudável, uma vez que a sua fórmula se baseia na diferença entre a refletância no vermelho e no infravermelho próximo, diretamente relacionada com a atividade fotossintética, conforme amplamente descrito por (Xue & Su, 2017), que identificam este índice como um dos mais robustos para monitorizar vigor vegetativo em ecossistemas com elevada biomassa. O Sentinel-2, pela sua resolução espacial de 10 metros e elevada frequência temporal, permite captar alterações na vegetação com maior detalhe e consistência do que sensores de resolução inferior, como o Landsat-8, tal como destacado por Radočaj et al., (2020), que reconhecem o Sentinel-2 como uma das plataformas mais eficazes para monitorização de variações rápidas no coberto vegetal. A utilização da função mediana revelou-se adequada porque reduz a influência de outliers e de ruído atmosférico (como nuvens ou sombras), proporcionando uma representação mais estável da condição média da vegetação. Estes resultados são coerentes com outros estudos que apontam o NDVI derivado de dados Sentinel-2 como um dos indicadores mais fiáveis para o acompanhamento de trabalhos de silvicultura e de gestão de combustível (Bueno et al., 2024).

A análise comparativa entre as diferentes linhas evidenciou diferenças marcadas na magnitude da variação espectral. As linhas novas apresentaram reduções mais expressivas do NDVI, enquanto as linhas existentes mostraram alterações mais subtis. Esta diferença pode ser explicada pela natureza distinta das intervenções: nas aberturas de faixa de linhas novas ocorre a remoção quase total da vegetação, incluindo espécies arbóreas e arbustivas,

o que provoca uma quebra abrupta no sinal de infravermelho próximo. Já nas linhas existentes, as intervenções são de manutenção, focadas sobretudo no corte de espécies arbustivas, uma vez que as espécies arbóreas não compatíveis já terão sido cortadas em intervenções anteriores, preservando desta forma o arvoredo existente, por ser compatível com a infraestrutura.

Do ponto de vista regional, observou-se que as regiões Norte e Centro registaram variações negativas mais acentuadas, enquanto o Alentejo e o Algarve apresentaram respostas mais ténues. É importante realçar também que as variações regionais nos tipos de vegetação, na composição das comunidades vegetais e na estrutura vertical da vegetação influenciam também de forma determinante os resultados obtidos da diferença antes e após as intervenções. Com efeito, a detetabilidade de alterações por imagens de satélite depende fortemente da estrutura, composição, fisionomia e densidade das formações vegetais. Este padrão é explicado essencialmente por diferenças climáticas e estruturais da vegetação. O Norte e o Centro são dominados por ecossistemas florestais húmidos, com espécies de crescimento rápido e copas densas (e.g., *Eucalyptus globulus*, *Pinus pinaster*, *Quercus robur*), que produzem um forte contraste espectral entre a fase pré-corte e pós-corte. Do ponto de vista fitossociológico, as comunidades vegetais do norte, frequentemente enquadradas em aliança com formações mesófilas apresentam cobertos arbóreos e arbustivos mais contínuos, maior biomassa foliar e ciclos fenológicos relativamente estáveis devido ao regime hídrico mais regular. Esta continuidade e alta produtividade primária traduzem-se em assinaturas espectrais homogêneas e de elevada refletância no infravermelho próximo (NIR). Assim, qualquer perturbação, tal como corte, clareira, desbaste, incêndios tendem a produzir quedas abruptas facilmente mensuráveis nesses índices, criando contraste forte entre o antes e o depois de qualquer perturbação.

No Sul, a vegetação apresenta menor vigor fotossintético e uma estrutura mais aberta, com maior predominância de matos, azinhais e montados, onde a diferença entre os estados de corte e de repouso é menos expressiva no sinal do NDVI. As condições climáticas mais áridas e a menor disponibilidade hídrica reduzem também a amplitude da resposta espectral, contribuindo para as variações mais suaves observadas. O sul de clima mediterrânico, dominado por séries de vegetação áridas ou semi-áridas frequentemente mais abertas, a vegetação apresenta maior heterogeneidade espacial e forte adaptação xeromórfica tendo

copas mais pequenas, folhas escleromórficas, maior dispersão dos indivíduos, presença recorrente de solos nus e subcobertos herbáceos muito sazonais. Esta estrutura descontínua implica que, mesmo antes de uma intervenção humana, o sinal captado pelos satélites já possui variabilidade intrínseca elevada e valores espectrais mais baixos, tornando o contraste pós-intervenção menos pronunciado ou, por vezes, difícil de distinguir do sinal fenológico natural. Por outro lado, o regime sazonal mediterrânico, com forte amplitude entre inverno produtivo e o verão seco, introduz flutuações naturais no NDVI potencialmente equivalentes, em magnitude, a alguns tipos de corte de vegetação. Em geral, estes resultados apelam a uma análise mais cautelosa dos resultados nestas regiões e a uma contextualização ecoregionalizada de qualquer processo de monitorização da vegetação. De forma mais geral, a eficácia dos dados de satélite em detetar alterações vegetais depende e deve considerar a ecologia e a biogeografia das comunidades vegetais, a sua composição (espécies dominantes, por exemplo), estrutura e dinâmica sazonal.

Quanto ao uso do solo, verificou-se que as áreas florestais apresentaram variações mais intensas no NDVI em comparação com as áreas de matos. Este resultado decorre da diferença na estrutura e densidade do coberto vegetal. O corte de árvores implica uma redução significativa da refletância no infravermelho próximo, ao passo que a remoção de matos, compostos por vegetação mais baixa, tem um impacto espectral mais limitado.

A validação das intervenções realizadas mostra que a metodologia é eficaz na deteção das zonas intervencionadas. As áreas em tons de vermelho, que representam reduções acentuadas do vigor, coincidem espacialmente com as faixas intervencionadas e a comparação entre as zonas dentro e fora da faixa mostra que as diferenças não se devem a fatores fenológicos ou climáticos, mas sim à execução efetiva dos trabalhos. No entanto, a interpretação dos resultados exige alguma prudência, nomeadamente em zonas onde o corte é parcial ou seletivo, o contraste espectral nem sempre é suficientemente forte para gerar uma diferença significativa. Estes casos demonstram que, embora o método seja robusto para identificar remoções de elevada magnitude, a sua sensibilidade diminui em contextos de vegetação heterogénea, intervenções pouco intensas ou previamente intervencionadas (diminuindo assim a biomassa e, por conseguinte, o sinal da vegetação no “referencial” pré-corte usado) ou, potencialmente, em zonas de vegetação com baixa produtividade primária. Assim, o modelo de validação constitui um avanço relevante, mas em alguns contextos a sua aplicação operacional deve ser complementada com verificações em campo.

A monitorização temporal do crescimento da vegetação, demonstrou que o período médio de regeneração é de cerca de seis a nove meses após a intervenção. Esta evolução é coerente com o comportamento típico dos ecossistemas mediterrâneos, nos quais o crescimento vegetativo é fortemente condicionado pela sazonalidade climática/meteorológica, mais particularmente pela disponibilidade hídrica (Lloret et al., 2011). A leitura das curvas temporais permite identificar o intervalo de realização das intervenções e evidencia fases distintas de recuperação. No entanto, como as linhas são intervencionadas em momentos distintos, isto é, quando se está a concluir a última zona, já a primeira área executada tem algum tempo de regeneração, esta diferença pode reduzir as magnitudes das variações e por vezes não tornar claro os períodos de corte e de regeneração da vegetação.

Por fim, a classificação e priorização das áreas de risco que permite distinguir zonas com diferentes níveis de regeneração e, por conseguinte, de prioridade de intervenção. As camadas temáticas geradas permitem distinguir áreas de baixo, médio e alto risco, fornecendo um indicador visual direto do estado da vegetação ao longo das faixas, especialmente útil para priorizar ações de monitorização em locais onde a regeneração rápida pode comprometer novamente as distâncias de segurança da rede elétrica e apresentar elevada carga combustível, aumentando o risco de incêndio. Contudo, em áreas com cobertura vegetal densa, pequenas variações espectrais podem ser amplificadas e interpretadas como risco elevado, enquanto em zonas áridas o método tende a subestimar o potencial de regeneração.

4.3. Desafios enfrentados e oportunidades de melhoria

A execução deste trabalho envolveu um conjunto de desafios técnicos e operacionais associados à integração de diferentes tipos de dados e à implementação de uma aplicação funcional em ambiente de computação em nuvem. O desenvolvimento da aplicação ForestVAR no ambiente *cloud-based* do Google Earth Engine exigiu o equilíbrio entre a complexidade associada à deteção remota e a simplicidade de utilização esperada de uma ferramenta prática de apoio à gestão.

Um dos principais desafios enfrentados prendeu-se com a heterogeneidade dos dados de satélite. A variabilidade na resolução espacial, temporal e radiométrica entre os sensores Sentinel-2 e Landsat-8 exigiu um esforço adicional de harmonização dos dados,

nomeadamente na correção atmosférica, no mascaramento de nuvens e na uniformização das bandas espectrais. Além disso, a ocorrência de períodos prolongados de nebulosidade, sobretudo durante o inverno, afetou a consistência de algumas séries temporais, reduzindo o número de observações úteis em determinadas regiões e condicionando a análise multitemporal.

Outro obstáculo relevante esteve relacionado com a gestão e processamento de grandes volumes de dados, sobretudo durante a exportação das imagens e no cálculo das diferenças entre períodos. O uso do Google Earth Engine mitigou parcialmente este desafio, ao disponibilizar poder computacional em nuvem, mas a estrutura do ambiente impôs limitações de memória e de tempo de execução que exigiram ajustes contínuos ao código. Ainda assim, persistem algumas limitações no processamento de dados, nomeadamente na geração de gráficos temporais, que obrigam muitas vezes a reduzir o tempo de análise. Melhorias no código fonte da aplicação no sentido de otimizar certas operações podem beneficiar futuramente estas funcionalidades. Paralelamente, a criação de uma interface que reunisse múltiplas opções de forma intuitiva constituiu um processo iterativo, que implicou sucessivos testes e refinamentos até atingir um nível de usabilidade satisfatório.

Outro ponto a destacar relaciona-se com as diferenças nos números de amostras disponíveis entre as diferentes linhas, regiões e classes de uso do solo, o que condicionou a análise efetuada. Uma distribuição mais equilibrada de amostras teria permitido gerar resultados mais consistentes, contudo, esta limitação decorreu da disponibilidade de dados facultados. Ainda assim, procurou-se mitigar este efeito através da análise comparativa e da interpretação contextualizada dos resultados.

No que respeita ao desenvolvimento da aplicação, identificaram-se várias oportunidades de melhoria com vista à sua evolução futura. Em primeiro lugar, seria desejável automatizar o carregamento e atualização dos dados vetoriais das faixas, por exemplo através da integração direta com bases de dados da REN e reduzindo a dependência de processos manuais. A introdução de módulos de alerta automático, baseados em limiares de regeneração definidos para cada região ou tipo de linha, representaria também um avanço relevante, permitindo que o sistema notificasse sempre que se verificasse um crescimento anómalo do índice de vegetação. Outra melhoria importante seria o aperfeiçoamento da interface gráfica, tornando-a mais responsiva e adaptada a diferentes dispositivos, e a inclusão de camadas

complementares como dados topográficos ou de risco de incêndio, que poderiam enriquecer a análise e apoiar decisões integradas.

Em síntese, o desenvolvimento da aplicação ForestVAR revelou-se um processo exigente, mas de elevado valor experimental, tendo permitido demonstrar o potencial existente. Apesar das limitações identificadas, o trabalho desenvolvido abre caminho para futuras versões mais completas e automatizadas.

5. CONCLUSÃO

O presente projeto demonstra que a integração de séries temporais de imagens de satélite com ferramentas de computação em nuvem constitui uma abordagem eficaz para a monitorização da vegetação nas faixas de servidão das linhas de transporte de energia.

A aplicação ForestVAR, desenvolvida em ambiente Google Earth Engine, revelou ser uma ferramenta robusta para a análise multitemporal da vegetação, disponibilizando ao utilizador funcionalidades de seleção de parâmetros, visualização espacial, geração de gráficos temporais e classificação de áreas críticas. A implementação dos requisitos definidos demonstrou elevada eficácia, com cerca de 80% das funcionalidades executadas com sucesso, assegurando que a aplicação cumpre os objetivos essenciais de apoio à decisão.

A comparação sistemática entre satélites, índices e funções de agregação permitiu identificar a combinação Sentinel-2 / NDVI / Mediana como a mais sensível e consistente na deteção das intervenções. Esta combinação apresentou as maiores variações negativas no vigor da vegetação dentro das faixas intervencionadas, demonstrando elevada capacidade para identificar cortes de vegetação, mesmo em contextos territoriais distintos. A resolução espacial de 10 m do Sentinel-2 mostrou-se decisiva na deteção de alterações localizadas, superando o desempenho do Landsat-8 em grande parte dos cenários analisados.

A avaliação comparativa entre linhas, regiões, classes e usos do solo evidenciou padrões coerentes com a estrutura ecológica e biogeográfica do território e com a natureza das operações de gestão da REN. As linhas novas apresentaram reduções mais expressivas do NDVI, refletindo a abertura inicial de faixa, enquanto as linhas existentes, sujeitas a cortes mais seletivos, registaram variações menos intensas. Regionalmente, o norte e o centro de Portugal continental destacaram-se com maiores reduções, consequência da maior densidade florestal e vigor fotossintético, enquanto o sul apresentou variações mais subtis devido ao carácter mais seco e menos produtivo da vegetação. A distinção entre áreas florestais e de matos confirmou igualmente diferenças espectrais expectáveis, com as áreas florestais a evidenciar quebras mais acentuadas. Pode-se concluir que a metodologia é conceptualmente aplicável a todo o território continental, e os resultados obtidos sugerem elevada robustez. No entanto, a eficácia poderá variar localmente devido a fatores como cobertura de nuvens, tipo de vegetação, condições topográficas e padrões climáticos regionais, pelo que a sua validação total exigiria testes adicionais em segmentos adicionais da rede.

O processo de validação das intervenções demonstrou ser eficaz na diferenciação entre áreas intervencionadas e não intervencionadas, confirmando que as reduções do índice de vegetação observadas correspondem de facto a ações de corte e não apenas a variações sazonais ou interanuais. Por sua vez, a funcionalidade de monitorização temporal permitiu identificar tendências de regeneração e caracterizar o ritmo de recuperação da vegetação. A camada de classificação de risco complementou esta abordagem, permitindo localizar áreas com crescimento acelerado e, portanto, com necessidade de maior vigilância.

Apesar dos resultados positivos, foram identificadas limitações importantes, nomeadamente a variabilidade na disponibilidade de imagens sem nuvens, as restrições impostas pelo processamento em nuvem e a sensibilidade reduzida em zonas com vegetação dispersa ou intervenções pouco intensas. Ainda assim, estas limitações representam oportunidades claras de evolução futura, nomeadamente a integração de novos sensores, o aperfeiçoamento dos critérios de classificação e o desenvolvimento de funcionalidades adicionais, como sistemas de alerta automático e maior automatização do carregamento de dados.

Em síntese, o trabalho realizado demonstra a viabilidade e relevância de uma abordagem baseada em deteção remota e análise multitemporal para apoiar a gestão das faixas de servidão da RNT. A aplicação ForestVAR constitui uma ferramenta operacional, escalável e tecnicamente fundamentada, capaz de contribuir para a segurança das infraestruturas elétricas, a redução do risco de incêndio e a gestão sustentável da paisagem. O seu aperfeiçoamento contínuo poderá consolidar-se como um instrumento estratégico para a REN e para outras entidades com responsabilidades na gestão do território.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGIF (2022). *Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30*. Obtido de <https://www.agif.pt/pt/plano-nacional-de-gestao-integrada-de-fogos-rurais-20-30>
- Amani, Meisam, Ghorbanian, Arsalan, Ahmadi, Seyed Ali, Kakooei, Mohammad, Moghimi, Armin, Mirmazloumi, S. Mohammad, ... Brisco, Brian (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326–5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Bueno, Erick Armando Sedeño, Fernández, José Luis Capote, Rodríguez, René González, Macides, Nelson Ivan Escalona, Bueno, Erick Armando Sedeño, Fernández, José Luis Capote, ... Macides, Nelson Ivan Escalona (2024). Monitoring, Inspection and Early Warning System in Electrical Distribution Networks Using Satellite Images. *Proceedings 2024*, Vol. 110, 110(1), 27. <https://doi.org/10.3390/PROCEEDINGS2024110027>
- DGOTDU (2011). Servidões e restrições de utilidade pública. Obtido 7 de Setembro de 2025, de https://www.gaiurb.pt/gaiurb/uploads/writer_file/document/456/servidoes_e_resticoes_utilidade_publica_dgotdu.pdf
- DGT (2021, Agosto 16). SMOS – sistema para inovar a monitorização do território | Direção-Geral do Território. Obtido 14 de Outubro de 2025, de <https://www.dgterritorio.gov.pt/SMOS-sistema-para-inovar-monitorizacao-do-territorio>
- DGT (2025). SMOS. Obtido 28 de Novembro de 2025, de <https://smos.dgterritorio.gov.pt/visualizadores>
- Diário da República (1976, Junho 5). Decreto-Lei n.º 446/76. Obtido 14 de Novembro de 2025, de <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/446-1976-427162>
- Diário da República (1992, Fevereiro 18). Decreto Regulamentar n.º 1/92. Obtido 14 de Novembro de 2025, de site da Diário da República n.º 41/1992, Série I-B de

- 1992-02-18, páginas 960 - 984: <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-regulamentar/1-1992-158575>
- Diário da República (2021, Outubro 13). *Decreto-Lei n.º 82/2021*. Obtido de <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163>
- Eom, Sean B. (2020). Decision Support Systems. *Oxford Research Encyclopedia of Politics*. <https://doi.org/10.1093/ACREFORE/9780190228637.013.1008>
- ESA (2025). European Space Agency. Obtido 14 de Outubro de 2025, de <https://www.esa.int/>
- FireHub (2020). FireHub. Obtido 14 de Outubro de 2025, de <http://beyond-eocenter.eu/index.php/web-services/firehub>
- Gonçalves, João, Marcos, Bruno, Regos, Adrián, Portela, Paula, Alves, Cristiana, Castro, Pedro, ... Honrado, João (2024). *SeverusPT - Data Products and Data Portal Manual*. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.10640961>
- Gorelick, Noel, Hancher, Matt, Dixon, Mike, Ilyushchenko, Simon, Thau, David, & Moore, Rebecca (2017). *Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone*. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- ICNF (2025). ICNF - Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. Obtido 13 de Outubro de 2025, de <https://www.icnf.pt/>
- Internacional Energy Agency (2021). *Power Systems in Transition*. Obtido de https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/04/power-systems-in-transition_21c5c348/101e90ac-en.pdf
- Karagiannakis, George, Panteli, Mathaios, & Argyroudis, Sotirios (2025). Fragility Modeling of Power Grid Infrastructure for Addressing Climate Change Risks and Adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 16(1), e930. <https://doi.org/10.1002/WCC.930>;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:17577799;WEBSITE:WEBSITE:WIRES;WGROUPE:STRING:PUBLICATION
- Lloret, Francisco, Keeling, Eric G., & Sala, Anna (2011). Components of tree resilience: Effects of successive low-growth episodes in old ponderosa pine

- forests. *Oikos*, 120(12), 1909–1920. <https://doi.org/10.1111/J.1600-0706.2011.19372.X;SUBPAGE:STRING:FULL>
- Matikainen, Leena, Lehtomäki, Matti, Ahokas, Eero, Hyypä, Juha, Karjalainen, Mika, Jaakkola, Anttoni, ... Heinonen, Tero (2016). Remote sensing methods for power line corridor surveys. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 119, 10–31. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.04.011>
- NASA (2025). Your Gateway to NASA Earth Observation Data | NASA Earthdata. Obtido 14 de Novembro de 2025, de <https://www.earthdata.nasa.gov/>
- Radočaj, Dorijan, Obhodaš, Jasmina, Jurišić, Mladen, Gašparović, Mateo, Radočaj, Dorijan, Obhodaš, Jasmina, ... Gašparović, Mateo (2020). Global Open Data Remote Sensing Satellite Missions for Land Monitoring and Conservation: A Review. *Land 2020*, Vol. 9, 9(11), 1–24. <https://doi.org/10.3390/LAND9110402>
- REN (2023). *Compromisso em Ação*. Obtido de <https://www.ren.pt/media/3jygtiwd/ponto-1-relatorio-integrado-2023-ren.pdf>
- REN (2024). *Relatório Integrado 2024 - Energia em equilíbrio*. Obtido de www.ren.pt
- REN (2025). REN | Redes Energéticas Nacionais. Obtido 12 de Setembro de 2025, de <https://www.ren.pt/>
- Rosemary Lyster, Daniel A. Farber, & Robert R.M. Verchick (2022). Chapter 15: Climate-induced disasters and electricity infrastructure in: Research Handbook on Climate Change Adaptation Law. *Elgaronline*, Law 2022, 358–391. Obtido de <https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781800371491/book-part-9781800371491-20.xml>
- Wulder, Michael A., Loveland, Thomas R., Roy, David P., Crawford, Christopher J., Masek, Jeffrey G., Woodcock, Curtis E., ... Zhu, Zhe (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, 225, 127–147. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.02.015>
- Xue, Jinru, & Su, Baofeng (2017). Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. *Journal of Sensors*, 2017(1), 1353691. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>