



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Avaliação da Disponibilidade de Biomassa Acima do Solo: Contributo para o Ordenamento Florestal no Concelho de Ponte de Lima

Lucas Emanuel Gomes Alves



INSTITUTO POLITÉCNICO
DE VIANA DO CASTELO

Lucas Emanuel Gomes Alves

Avaliação da Disponibilidade de Biomassa Acima do Solo: Contributo para o Ordenamento Florestal no Concelho de Ponte de Lima

Mestrado em Engenharia do Território e do Ambiente

Trabalho efetuado sob a Orientação do

Professor Doutor Leonel Jorge Ribeiro Nunes

Dezembro 2024

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	viii
AGRADECIMENTOS	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
Capítulo 1. Caracterização Biogeofísica Regional.....	1
1.1. Enquadramento/Localização	1
1.2. Caracterização Socioeconómica	2
1.2.1. Demografia	2
1.2.2. Economia	6
1.3. Caracterização biogeofísica	9
1.3.1. Caracterização geológica e geomorfológica	9
1.3.2. Caracterização climática.....	11
1.3.3. Carta de solos	14
1.3.4. Hidrografia.....	17
1.3.5. Ocupação e uso do solo.....	19
Capítulo 2. Estrutura do Trabalho.....	22
2.1. Questão-Problema	22
2.2. Objetivos.....	23
2.3. Motivação	23
2.4. Organização	24
Capítulo 3. Revisão de Literatura	26
3.1. Análise bibliométrica	26
3.2. Análise Bibliográfica	33
3.2.1. Biomassa	33
3.2.2. Técnicas de Detecção Remota para estimativa de Biomassa.....	40

Capítulo 4. Metodologia	48
4.1. FASE I: Desenvolvimento de cartografia de ocupação do solo.	48
4.1.1. Recolha e tratamento das imagens Sentinel-2.....	48
4.1.2. Harmonização das imagens	49
4.1.3. Cálculo de índices vegetativos	50
4.1.4. Marcação de Áreas de Treino	52
4.1.5. Classificação assistida pelo classificador Random Forest.....	53
4.2. FASE II: Modelo da Altura da Canópia	55
4.3. FASE III: Desenvolvimento de um Modelo Preditivo de Biomassa para aferir a quantidade de biomassa acima do solo.	56
4.3.1. Biomassa acima do solo.....	56
4.3.2. Variáveis utilizadas no modelo preditivo.....	57
Capítulo 5. Resultados.....	60
5.1. Cartografia da Ocupação e Uso do Solo.....	60
5.2. Modelo da Altura da Canópia	64
5.3. Cartografia do Modelo Preditivo de Biomassa para 2024	67
5.4. Importância das variáveis.....	75
5.5. Descrição das variáveis	79
5.5.1. Altura da Canópia	79
5.5.2. Índice de Vegetação Hiperespectral (HSI).....	80
5.5.3. Precipitação média	81
5.5.4. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)	82
5.5.5. Temperatura Média.....	83
5.5.6. Severidade do Inverno (WFR).....	84
5.1.7. Capacidade de Retenção de Água (AWC)	85
5.5.8. Capacidade de Troca Catiónica (CEC).....	87
5.5.9. N (Azoto).....	88

5.5.10. Relação Carbono Azoto.....	88
5.5.11. pH.....	89
5.5.12. Argila	90
5.5.13. Areia	91
5.5.14. Limo	92
5.5.15. Outras variáveis.....	93
5.6. Erros associados ao desempenho do modelo	94
Capítulo 6. Discussão de resultados	98
7.Conclusão	103
Anexos.....	105
Bibliografia.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Enquadramento da Área de Estudo.....	1
Figura 1-2. Índice de Longevidade (Adaptado do INE- Estimativas anuais da população residente).	5
Figura 1-3. Estrutura Empresarial por ramo de atividade.	7
Figura 1-4. Representatividade dos setores de atividade em percentagem.	7
Figura 1-5. Exportações e Importações do Alto Minho dos últimos 12 anos.....	8
Figura 1-6. Geologia da região do Alto Minho.	10
Figura 1-7. Médias das temperaturas.....	11
Figura 1-8. Média anual da precipitação acumulada.	12
Figura 1-9. Zonagem climática do Alto Minho.	13
Figura 1-10. Carta de solos do Alto Minho.	15
Figura 1-11. Carta de declives do Alto Minho.	16
Figura 1-12. Rede Hidrográfica do Alto Minho.	18
Figura 1-13. Carta de uso e ocupação do solo do Alto Minho (2018).....	20
Figura 3-1. N° de publicações anuais.	28
Figura 3-2. N°. de citações por ano.	29
Figura 3-3. Fontes mais relevantes.	29
Figura 3-4. Autores mais relevantes a nível local.....	30
Figura 3-5. Mapa Temático.....	31
Figura 4-1. Fluxograma da metodologia aplicada.	48
Figura 4-2. Imagem adaptada de: Lanaras et al., 2018.....	50
Figura 4-3. Funcionamento do classificador "Random Forest".	54
Figura 5-1. Cartografia de Ocupação solo melhorada.	63
Figura 5-2. Modelo da altura da canópia no ano de 2022 e 2024.....	65
Figura 5-3. Disponibilidade de biomassa em Ponte de Lima no ano de 2022 e 2024 expresso em Ton/ha.	68
Figura 5-4. Diferença dos níveis de biomassa entre 2022 e 2024 expressos em Ton/ha.....	69
Figura 5-5. . Evolução da disponibilidade de biomassa referente ao período 2022-2024.	73
Figura 5-6. Ganhos e perdas de biomassa entre 2022 e 2024.....	74
Figura 5-7. Importância da Altura da Canópia.	79
Figura 5-8. Índice de Vegetação Hiperespectral (HSI).....	80

Figura 5-9. Importância da Precipitação Média.	81
Figura 5-10. Importância do SRTM.	82
Figura 5-11. Importância da Temperatura Média.	83
Figura 5-12. Importância do Recorde de Frio no Inverno (Wfr).	85
Figura 5-13. Importância da Capacidade de Retenção de Água (AWC).	86
Figura 5-14. Importância da Capacidade de Troca Catiônica (CEC).	87
Figura 5-15. Importância do Azoto.	88
Figura 5-16. Importância da Relação C/N.	89
Figura 5-17. Importância do pH.	90
Figura 5-18. Importância da Argila.	91
Figura 5-19. Importância da Areia.	92
Figura 5-20. Importância do Limo.	93
Figura 5-21. Contribuição das variáveis para o desempenho do modelo preditivo.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Tipos de uso do solo do Alto Minho.	20
Tabela 2. Palavras-chave utilizadas para a pesquisa na plataforma Scopus.	27
Tabela 3. Índices Vegetativos utilizados.	51
Tabela 4. Áreas de Treino (COS 2018).	52
Tabela 5. Fontes e resoluções das variáveis utilizadas.	57
Tabela 6. Diferenças de Ocupação do solo para o período temporal de 2022-2024.	62
Tabela 7. Resultados do Modelo Preditivo de Biomassa Acima do Solo em 2022 e 2024.	71
Tabela 8. Importância das variáveis para explicar o modelo.	76
Tabela 9. Resultados do Modelo Preditivo de Biomassa Florestal de 2024.	94
Tabela 10. Análise detalhada da contribuição das variáveis utilizadas no modelo.	96

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Professor Doutor Leonel Nunes por todo o apoio demonstrado ao longo de toda a investigação e pesquisa, a sua experiência e conhecimento técnico-científico foram fundamentais para a realização deste estudo, agradeço também toda a disponibilidade, a paciência e rigor técnico com que sempre abordou todas as questões.

Um agradecimento especial ao Professor Joaquim Alonso pela sua experiência e indicações assertivas que certamente contribuíram para o resultado deste estudo.

Um agradecimento muito grande para todos os meus colegas da Sala 10, ao Diogo, Hélder e Renato que tornaram possível a realização deste estudo, bem como a sua boa vontade e disponibilidade que sempre demonstraram ao receber as minhas questões e dúvidas contribuindo com questões e sugestões extremamente enriquecedoras, a todos eles os meus sinceros agradecimentos.

Um grande agradecimento também à minha família por todo o apoio incondicional e por serem eles o principal suporte para que este trabalho tenha sido realizado, por toda a confiança transmitida e incentivo à realização desta etapa através de discussões impulsionadoras e motivadoras, foram sem dúvida a base deste trabalho e o meu porto seguro.

Por último agradecer aos meus amigos que de uma forma ou outra demonstraram apoio e permitiram que completasse esta etapa da minha vida.

Para terminar agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para esta longa caminhada.

Ao escrever os agradecimentos as palavras não são suficientes para transmitir a minha gratidão, no entanto gostaria de manifestar a minha maior gratidão para com todos os envolvidos, a todos o meu profundo obrigado.

RESUMO

A biomassa florestal pode ser de ajuda num futuro próximo para controlar as emissões de carbono para a atmosfera através da sua utilização no setor da energia, como tal, este estudo pretende servir como contribuição para o desenvolvimento de modelos preditivos de biomassa florestal.

A área de estudo é Ponte de Lima um Concelho pertencente ao Distrito de Viana do Castelo e enquadrado no Alto Minho, e entende-se como importância maior neste estudo perceber quais as zonas com maior disponibilidade deste recurso.

A metodologia utilizada para estimar valores de biomassa acima do solo para as áreas florestais é única e assenta em técnicas da deteção remota para tratamento e harmonização de dados, bem como um conjunto de ambientes virtuais de forma a elevar a precisão e diminuir a incerteza criada pelos classificadores.

O modelo preditivo criado para o ano de 2024 sustenta-se ele próprio por dados recolhidos via satélite para o ano de 2022, bem como um conjunto de fatores como a ocupação do solo e índices vegetativos e texturais que foram calculados de forma a permitir a realização do modelo.

Os resultados apontam que o modelo criado possui um bom grau de confiança e um grau de erro considerado baixo, bem como uma boa disponibilidade de biomassa nas zonas florestais e uma diversidade considerável de espécies florestais.

Palavras-Chave: deteção remota; biomassa florestal; modelo preditivo; classificadores.

ABSTRACT

Forest biomass may play a key role in the near future to help control carbon emissions into the atmosphere through its use in the energy sector. As such, this study aims to contribute to the development of predictive models for forest biomass.

The study area is Ponte de Lima, a municipality in the District of Viana do Castelo, located in Alto Minho, and the main focus of this research is to identify the areas with the highest availability of this resource.

The methodology used to estimate above-ground biomass values for forest areas is unique, relying on remote sensing techniques for data processing and harmonization, as well as a set of virtual environments designed to increase precision and reduce uncertainty caused by classifiers.

The predictive model created for 2024 is based on satellite data collected in 2022, along with various factors such as land use and vegetative and textural indices that were developed to enable the creation of the model.

The results indicate that the model has a good degree of confidence and a low degree of error, as well as good availability of biomass in forested areas and a considerable diversity of forest species.

Keywords: remote sensing; forest biomass; predictive model; classifiers.

LISTA DE ABREVIATURAS

COS	Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018
DGT	Direção Geral do Território
IEFP	Instituto do Emprego e Formação Profissional
IGESPAR	Instituto de Gestão do Património Arquitetónico e Arqueológico
INE	Instituto Nacional de Estatística
LNEG	Laboratório Nacional de Energia e Geologia
RH	Região Hidrográfica
SROA	Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário
SNIS	Sistema Nacional de Informação do Solo

Capítulo 1. Caracterização Biogeofísica Regional

1.1. Enquadramento/Localização

O território alvo para a execução deste estudo é o concelho de Ponte de Lima, concelho integrado no Alto Minho uma região enquadrada na NUT III correspondente à região do Minho-Lima e abrange os municípios de Arcos de Valdevez, Caminha, Melgaço, Monção, Paredes de Coura, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Valença, Viana do Castelo e Vila Nova de Cerveira.

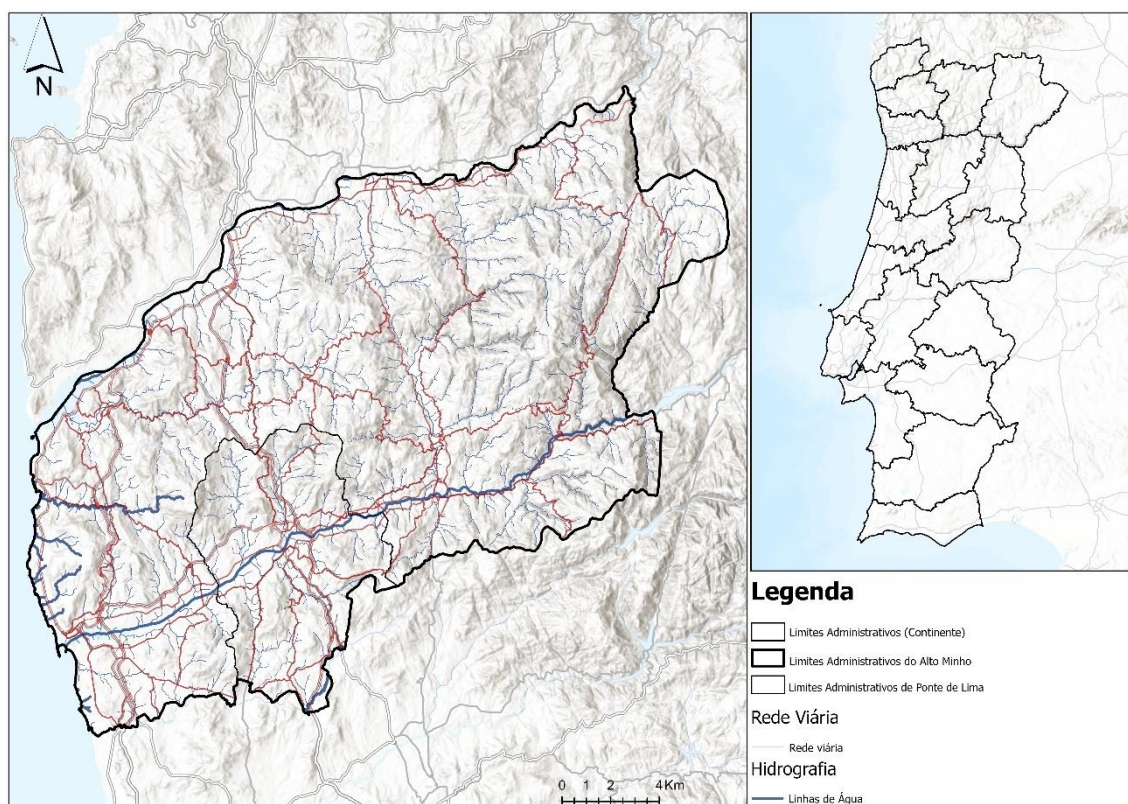


Figura 1-1. Enquadramento da Área de Estudo.

Seguindo dados presentes na CAOP 2022 (Carta Administrativa Oficial de Portugal), disponibilizada em 2022 pela Direção Geral do Território (DGT), a área total do Alto Minho é de aproximadamente 2.219 km² (Carta Administrativa Oficial de Portugal | DGT, 2022.).

O Alto Minho é uma região não apenas rica em paisagens naturais, mas é também uma região com um legado patrimonial e cultural considerável. Casos comprovados deste legado incluem os famosos Caminhos de Santiago assim como as aldeias históricas integradas na rede “Aldeias de Portugal”, como Soajo, Lindoso, Germil, Cabração,

Sistelo, Branda da Aveleira, Covas, Castro Laboreiro, Bico e Vascões, Porreiras, e Serra d'Arga.

Com base no IGESPAR (Instituto de Gestão do Património Arquitetónico e Arqueológico) no Alto Minho estão identificados cerca de 871 locais arqueológicos um número bastante representativo e que mostra o imenso património da região (Altinho, n.d.).

A nível de limites administrativos e territoriais, o Alto Minho encontra-se limitado a Norte e a Leste por Espanha, a Oeste pelo Oceano Atlântico e a Sul faz fronteira com o distrito de Braga, caracterizando-se pelas suas formações montanhosas de elevado relevo e floresta até zonas de costa planas e com o Atlântico de fundo, locais estes muito procurados pelas suas conhecidas praias (Carta Administrativa Oficial de Portugal | DGT, 2022).

Do ponto de vista topográfico o Alto Minho é caracterizado por possuir uma tendência de declives com maior acentuação a norte do rio Lima, cenário que começa a não se verificar de forma tão intensa na fronteira com Espanha, onde predominam declives um pouco mais baixos com exceção nas partes mais interiores do território.

O foco principal deste estudo é perceber as dinâmicas e características do concelho de Ponte de Lima assim como perceber a sua disponibilidade a nível de biomassa florestal, sendo que a nível geográfico faz fronteira a Norte com Paredes de Coura, a Sul com Barcelos, a Oeste com Viana do Castelo, a Leste com Arcos de Valdevez e Ponte da Barca, a Noroeste com Vila Nova de Cerveira, e a Sudeste com Vila Verde.

1.2. Caracterização Socioeconómica

1.2.1. Demografia

Através de resultados divulgados no relatório “Alto Minho desafio 2030”, que seguiu dados das “Estimativas Anuais da População Residente” disponibilizados pelo INE (Instituto Nacional de Estatística) referentes aos Censos de 2011 e 2021, verifica-se um abandono significativo da população residente no Alto Minho, região que nos censos 2011 contava com uma população de 244.149 habitantes, valor entretanto que sofreu um decréscimo de 15.083 habitantes totalizando nos censos de 2021, 229.066 habitantes (Marques et al., 2024.).

No período temporal entre os Censos 2011 e 2021 os números demonstram uma perda populacional significativa na região do Alto Minho, sendo que neste período foi identificada uma redução de 9548 indivíduos até aos 24 anos (em 2011 foram identificados 58019 jovens e em 2021, apenas 48561). Na faixa etária compreendida entre os 25 e os 64 anos verificou-se também uma redução da população seguindo um padrão idêntico ao dos jovens.

A nível da população total na região em 2011 foram identificados 130573 habitantes e em 2021 apenas 121958 habitantes, o que se traduz numa perda total de 8615 habitantes o que de facto se traduz em perdas significativas e com grande impacto económico e social na região.

Em sentido oposto à população das faixas etárias mais jovens e da população ativa, a população idosa superior a 65 anos registou um breve aumento passando de 55.467 habitantes para 58.547 habitantes em 2021, o que em números se traduz num aumento de 3.085 habitantes que passaram para esta faixa etária.

Num cenário global e visto de forma mais abrangente nos Censos de 2011 na região a representatividade das faixas etárias eram as seguintes: a faixa etária entre os 0 e os 24 anos representava sensivelmente 24% da população (23.8%), a população ativa compreendida entre os 25 e os 64 anos, 53.5% e a população com idade superior a 65 anos representava cerca de 22.7% da população total.

Passando para o cenário dos Censos 2021, verifica-se um panorama preocupante com a população jovem (0-24 anos) a diminuir para os 21.2% da população total, uma diminuição pouco significativa da população ativa que passou a representar cerca de 53. % da população e por fim um aumento da população idosa que cresceu para os 25.6%

Através destes dados é possível perceber-se os problemas demográficos que a região enfrenta, pois, as faixas etárias mais jovens estão em declínio e a população idosa está a acentuar-se, uma situação que socialmente pode ter consequências na economia e no desenvolvimento da região.

Analisando mais profundamente os dados dos dois Censos, percebe-se uma diminuição de 6.2% da população residente na região do alto Minho, o que se traduz consequentemente na perda de 6.6% de população ativa, 16.4% de população de faixa etária jovem e um aumento de 5.6% da população idosa. Indicadores estimam ainda para um índice de fecundidade de 1.13 crianças nascidas por mulher em idade fértil, um valor

considerado baixo para aquilo que é a realidade quer da zona Norte (1.25) quer do resto do País (1.41) (Marques et al., 2024).

O Alto Minho possui um total de 10 Municípios, e a sua demografia oscila consoante os mesmos, seguindo neste ponto de vista o município de Melgaço possui uma agravante a ter em conta e que necessita de ser monitorizada e controlada (população idosa), onde aproximadamente existem 100 jovens para cerca de 468.1 idosos, dos quais 53.5% contam com 75 anos ou mais, estimativas mais elevadas do que as comparadas com a região Norte (46.5) e Continente (48.9) assim como apresentado na Figura 2.

Uma maneira exequível de compreender as dinâmicas de um determinado território é analisando diversos parâmetros que permitam obter uma boa perceção sobre indicadores como a taxa de crescimento natural, a taxa de crescimento efetivo ou o índice de fecundidade. Na região em estudo a taxa de fecundidade geral à data dos Censos constatou-se baixa o que pode indicar problemas demográficos mais acentuados no futuro caso não sejam tomadas políticas adequadas à sua reversão.

Em 2020, todos os municípios da região do Alto Minho apresentaram uma dinâmica demográfica negativa, evidenciando que o número de óbitos supera o número de nascimentos. Destacam-se, neste contexto, os municípios de Viana do Castelo, Arcos de Valdevez e Monção, que apresentam as maiores discrepâncias entre esses dois indicadores.

No Concelho de Ponte de Lima existe mm média 100 jovens para 231.5 idosos, valores que se mostram mais elevados quando comparados com a restante zona Norte e Continente.

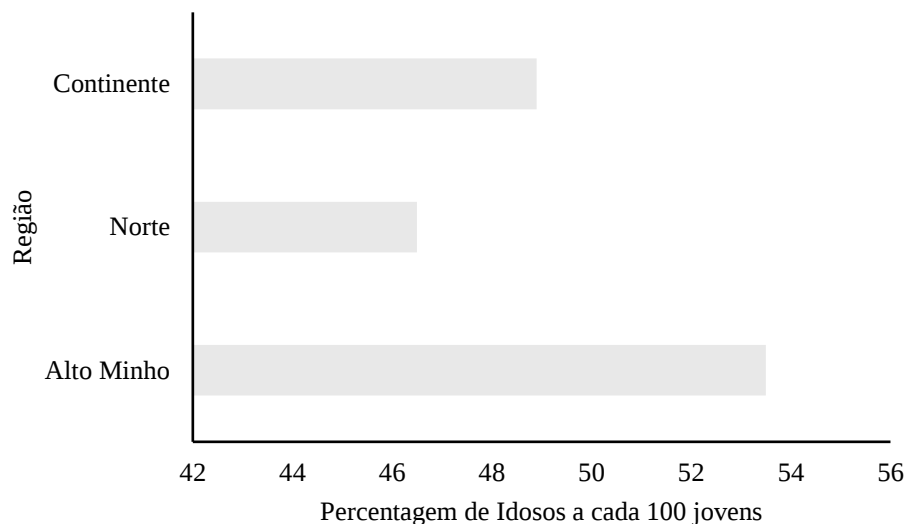


Figura 1-2. Índice de Longevidade (Adaptado do INE- Estimativas anuais da população residente).

Através de dados presentes no relatório Alto Minho 2030 observa-se que na região entre 2018 e 2020 o crescimento migratório foi positivo, e desde 2011 o número de população estrangeira com residência fixa aumentou (Marques et al., 2024).

Ao nível do desemprego, dados provenientes do IEFP e do Pordata, no Alto Minho em 2021 estimava-se existir cerca de 1.116 desempregados com menos de 35 anos, 2.338 desempregados com baixo nível de escolaridade e cerca de 3.146 desempregados correspondentes ao sexo feminino (Marques et al., 2024).

Em 2020 na região, 5 em cada 100 jovens com idades compreendidas entre os 25 e os 34 anos encontravam-se desempregados (Marques et al., 2024).

A nível concelhio, no requisito dos jovens e da população ativa os valores também não são os melhores encontrando-se com a mesma tendência do Alto Minho, sendo que à data dos Censos 2011 Ponte de Lima possuía 15,5% de jovens, valor que decresceu para os 11.9%. A população ativa compreendida entre os 15 e os 64 anos decresceu dos 64.7 para os 63.7%.

A percentagem de idosos apresenta a mesma tendência crescente do Alto Minho, com a percentagem a crescer dos 19.8% para os 24.5%, o que contribui para um índice de envelhecimento de 205.8 idosos por cada 100 nascimentos.

O cenário de Ponte de Lima segue o mesmo padrão do Alto Minho, com menos jovens, menos população ativa e em sentido oposto a população idosa encontra-se a subir significativamente.

Até à data dos Censos 2011, Ponte de Lima encontrava-se com uma população residente de 43.498 indivíduos, e nos Censos 2021 viu esses mesmos valores decaírem para 41.164 indivíduos a residirem no seu território. Estes valores fazem com que em 2021 a densidade populacional em Ponte de Lima se situe nos 128.5 indivíduos por Km².

1.2.2. Economia

A economia é um dos fatores que melhor retrata a realidade social de um determinado País ou região, sendo um “motor” que estabelece a velocidade de crescimento/ desenvolvimento e permite a governos, investidores e analistas observar o desenvolvimento da sociedade no seu todo, uma vez que é capaz de arrastar setores nicho como a saúde, educação, finanças, serviços sociais públicos entre outros (*Portal Do INE, 2021*).

O Alto Minho segundo dados do INE apresentados no relatório “sistemas de contas integradas das empresas” apresenta uma boa dinâmica empresarial, sendo que desde 2011 os números de empresas têm vindo a crescer de forma gradual e consecutiva, tendo-se registado em 2020, 1.390 empresas, ou seja, um aumento significativo de mais de 41% face a 2011 (*Portal Do INE, 2021*).

Quando comparados no mesmo período (2011-2020) a região Norte apresenta um crescimento de 4,1% e o Continente 2,2%, destacando assim o bom desenvolvimento empresarial no Alto Minho (*Portal Do INE, n.d.-a*).

A atividade empresarial na região do Alto Minho para além de se encontrar em ascensão, é também bastante diferenciada e diversificada ao nível dos setores de atividade, sendo que os setores mais representativos pertencem ao grupo do comércio e agrícola, enquanto o ramo da saúde humana e apoio social e as indústrias transformadoras são as que menos representatividade possuem na região, tal como demonstram as Figuras 1-3 e 1-4 (*Portal Do INE, 2021*).

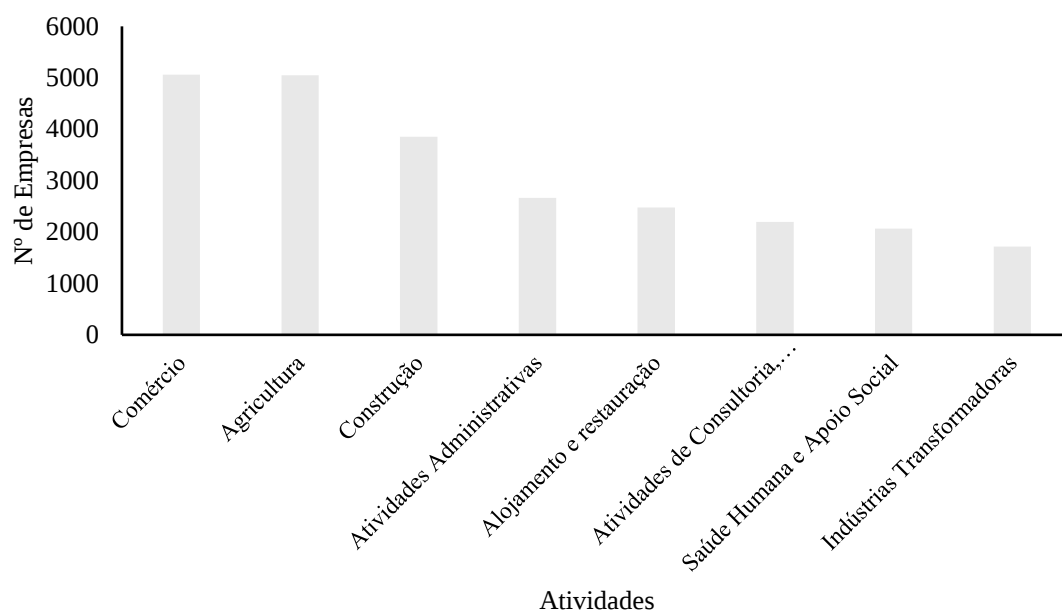


Figura 1-3. Estrutura Empresarial por ramo de atividade.

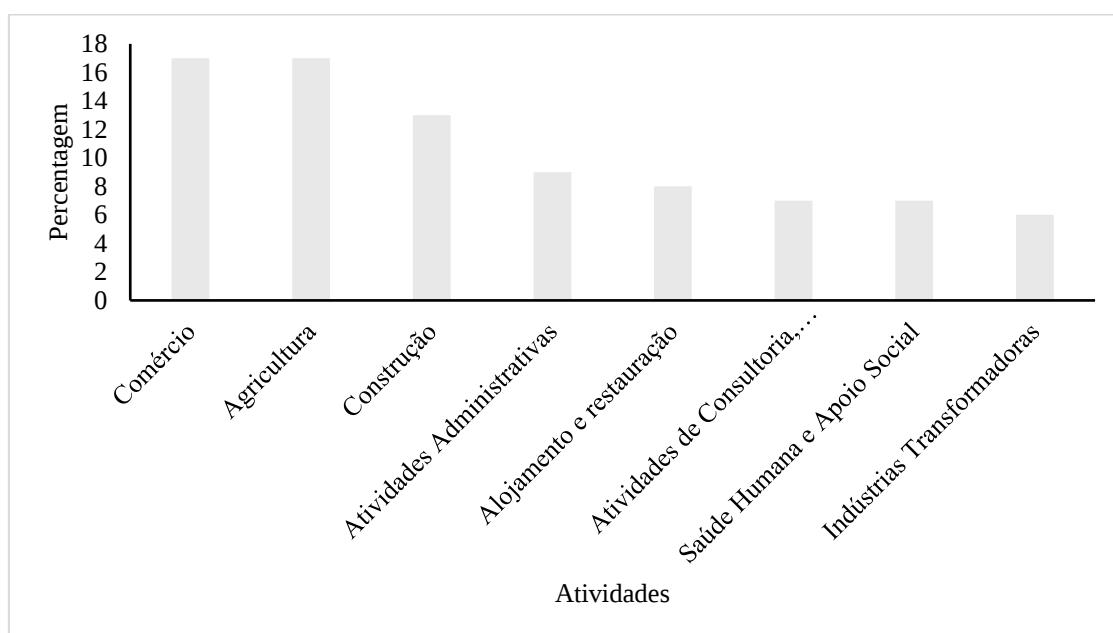


Figura 1-4. Representatividade dos setores de atividade em percentagem.

Como é possível constatar, os setores que mais movimento exercem na região é de facto o setor do comércio e da agricultura, reforçando ainda mais a hipótese que a região é forte nos setores primário e terciário.

Desde 2011 que se verifica uma tendência de redução das importações, no entanto tem-se observado uma oscilação considerável das exportações, que parecem apresentar uma tendência de carácter diminutivo tal como nas importações, no entanto os valores menores nas exportações são registados a partir de 2018 e foram ainda mais afetados provavelmente devido à pandemia da COVID-19. É importante perceber que estes valores correspondem aos quatro principais mercados (Figura 1-5).

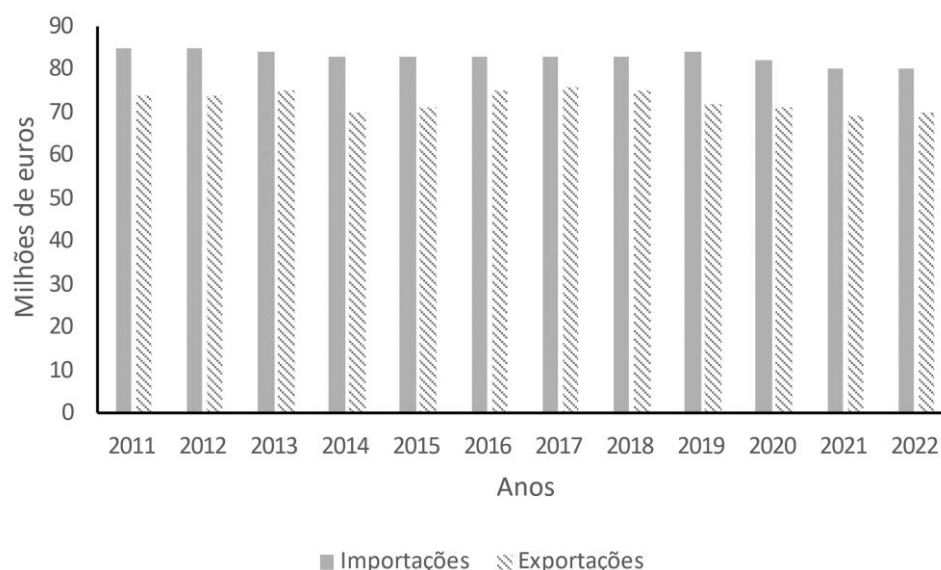


Figura 1-5. Exportações e Importações do Alto Minho dos últimos 12 anos.

Em 2021 com base em dados de indicadores de empresas, o Alto Minho possuía um total de 3.822 empresas das quais cerca de 222.164 possuíam título de empresas individuais e 8.658 sociedades. Ainda em 2021 os indicadores apontavam para a existência de 80.789 pessoas afetas ao serviço e um volume de negócio de 6.444 145 997 €, um valor acrescentado bruto das empresas de 1. 706 713, 074 € e cerca de 31. 902 estabelecimentos (Portal Do INE, 2021.).

A região, segundo dados provenientes do INE referentes a estatísticas do comércio internacional de bens é uma grande exportadora de materiais de transporte que representam 40% do seu total de exportações refletindo-se em aproximadamente 754 milhões de euros, seguindo-se das máquinas gerando 286 milhões de euros e representando 15% das suas exportações.

Outro fator de grande importância para a região é a indústria das pastas de madeira e papel que economicamente se traduz numa receita de 242 milhões de euros, representando 13%

do total das exportações, seguindo da indústria dos plásticos e borrachas a contribuir com um valor de 134 milhões de euros, representando 7% do total exportado.

Analisando ainda mais os Censos 2021, o Município de Ponte de Lima é caracterizado por ver a sua população ativa aglomerar-se mais no setor afeto aos serviços representando 54.4% da sua população total fazendo-se seguir pelo setor afeto à indústria e construção com uma representatividade de 42.3%.

Apesar de se verificar um grande uso do solo atribuído ao setor primário (agricultura e pescas) no concelho, à data dos Censos 2021 apenas 3.3% da população exercia práticas profissionais neste setor, o que em contraste com a quantidade de população a desempenhar funções no setor dos serviços demonstra que o setor da agricultura e pescas está cada vez mais a encaminhar-se para a sua desertificação.

Para concluir a análise económica do concelho à data dos Censos verificou-se que 76.8% da população exerce atividade por conta de outrem e que cerca de 10.4% destaca-se por ser empregador. No sentido oposto constatou-se que sensivelmente 10.4% da população encontrava-se numa situação de trabalhador isolado.

1.3. Caracterização biogeofísica

1.3.1. Caracterização geológica e geomorfológica

A geologia desempenha um papel importante pois permite perceber um pouco do passado e da história de uma região assim como outros fatores nomeadamente o relevo, o tipo de solos, fatores topográficos ou edáficos.

O LNEG através da sua plataforma de geo visualização online disponibiliza a carta geológica de Portugal, onde é possível perceber os diferentes grupos litológicos presentes num determinado território. Na localização onde se insere o Alto Minho é possível ver que a nível litológico a maior parte do território possui diversos tipos de granitos e quartzitos, porém à medida que se caminha para as zonas mais costeiras é possível encontrar zonas ricas em cascalheiras, areia, argilas e siltes. Ainda que a sua presença não seja muito significativa na região é possível também encontrar algumas regiões compostas por filitos (*GeoPortal Do LNEG, 2024.*).

A nível estrutural, o Alto Minho é composto por quatro grandes bacias sendo elas: a bacia Meso-Cenozoica identificada na extremidade com Espanha, na zona mais litoral e nas margens do rio Lima a Zona Centro-Ibérica, e Zona de Ossa Morena presentes na zona mais interior da região, a Zona Centro Ibérica na zona mais litoral e ainda a Zona de Galiza-Trás-os-Montes que é observável nas zonas de Trás-os-Montes e parte do litoral.

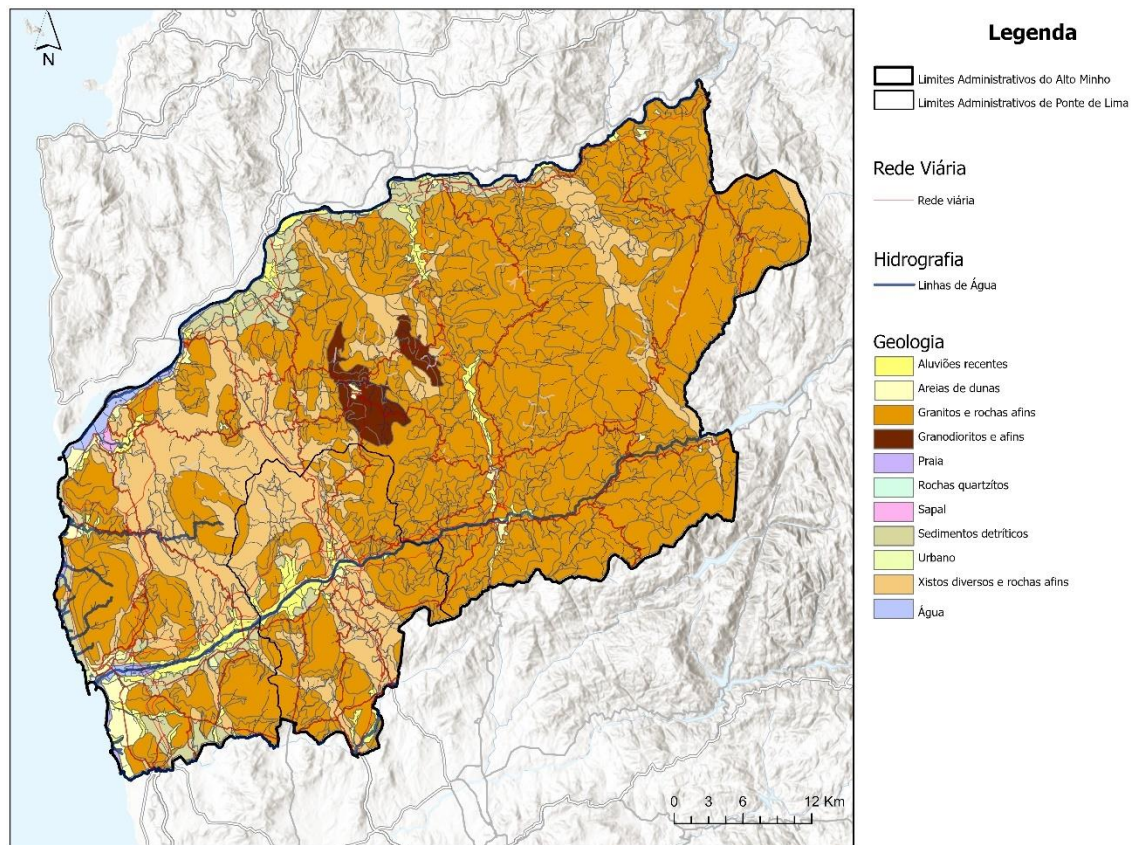


Figura 1-6. Geologia da região do Alto Minho.

Ponte de Lima encontra-se situado numa zona maioritariamente composta por Granitos e alguns tipos de xistos, sendo que próximo às margens do Rio Lima é observável pequenas zonas de aluviões e sedimentos detríticos indicando que nas margens do Rio Lima é possível encontrar diversos materiais provenientes de longas distâncias através de processos de erosão. O concelho é particularmente influente na indústria e comércio da extração e comercialização da rocha possuindo alguns locais legalmente aptos para a prática desta atividade (Figura 1-6).

1.3.2. Caracterização climática

Com as alterações climáticas a fazer cada vez mais parte do dia a dia da sociedade e com o aumento da frequência de fenómenos extremos torna-se imperial monitorizar e compreender as dinâmicas do clima de forma a criar planos que permitam ações mais eficazes no meio de crises ou até mesmo como forma de preparações para este tipo de fenómenos.

Para perceber melhor o clima e as suas características é necessário ter uma boa compreensão de indicadores como a precipitação, a humidade relativa, a temperatura entre outros tantos que são frequentemente associados a estudos e materiais científicos sobre o clima.

Estudar e investigar as dinâmicas do clima pode ser benéfico do ponto de vista do melhoramento e aproveitamento dos recursos hídricos bem como dos múltiplos tipos de ecossistemas (Chen et al., 2023).

Por via do Portal do Clima e a sua base de dados referentes a um período de 30 anos desde 1971 a 2000 é perceptível que o Alto Minho possui um clima caracterizado por frio e chuva moderada no período de Inverno, com Janeiro a marcar o período onde se verifica a menor temperatura média (7°C) e com ventos moderados com um valor máximo de até 10 dias e ventos fracos até 55 dias e períodos de calor com alguma seca no Verão, com o mês de Agosto a registar a maior média de temperatura anual (18.9°C) e ventos moderados com média de 1 dia. No período da Primavera verifica-se ventos fracos que podem ir até aos 47 dias (*PORTAL DO CLIMA*, 2024).

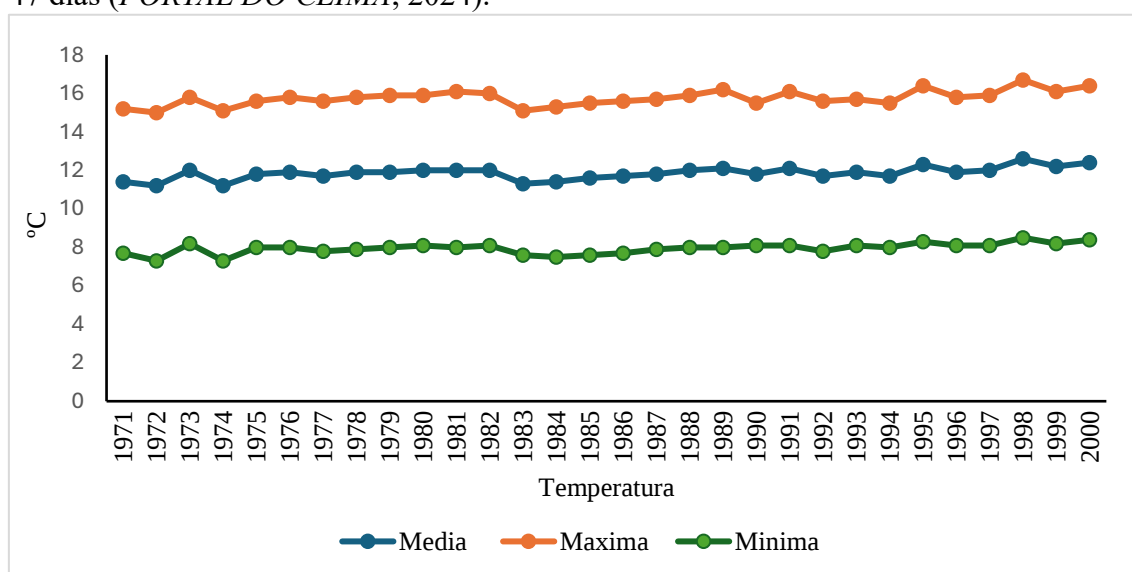


Figura 1-7. Médias das temperaturas.

No Alto Minho registaram-se temperaturas médias compreendidas entre os 11.4°C e os 12.4°C não se tendo verificado variações muito significativas ao longo do período em análise (1971-2000), apresentando ainda temperaturas máximas entre os 15.0°C e os 16.7°C e mínimas entre os 7.3°C e os 8.5°C (Figura 1-7).

Outro parâmetro importante para perceber as características do clima de uma região é a amplitude térmica, que na região possui valores mais elevados nos meses de Junho, Julho e Agosto em contraste com os meses de Novembro e Dezembro que são os meses em que se verifica valores mais baixos deste indicador (*PORTAL DO CLIMA*, 2024).

Em relação à humidade relativa a região segue a mesma tendência padrão da precipitação com valores mais expressivos no período de Inverno e menores no período de Verão com Agosto a ser o mês com menor humidade relativa.

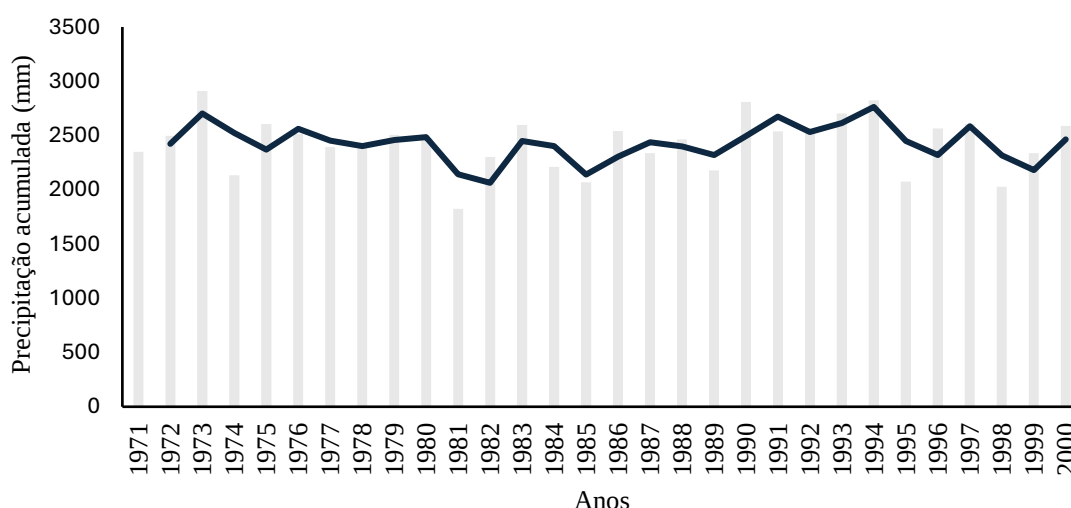


Figura 1-8. Média anual da precipitação acumulada.

Ainda em foco o período temporal de 1971 a 2000, ao analisar o gráfico anteriormente apresentado correspondente à precipitação acumulada anualmente em milímetros é possível perceber uma ligeira tendência de diminuição para o acúmulo da precipitação, o que pode ser interpretado como uma consequência da falta de precipitação (Figura 1-8).

Neste período temporal verificou-se que na região os valores de precipitação variam entre os 1924 mm anuais e os 2909.1 mm anuais, que apesar de ser uma discrepância considerável os valores mostram alguma consistência com o passar dos anos (*PORTAL DO CLIMA*, 2024).

A Figura 1-9 abaixo inserida apresenta um mapa com as principais zonas climáticas da região do Alto Minho em Portugal e adota a nomenclatura e designação oficiais utilizadas na cartografia de solos utilizada para descrever o clima, presentes no site do Sistema Nacional de Informação do Solo (SNIS). A legenda do mapa divide o território em diversas zonas climáticas, classificadas de acordo com o clima.

O sistema de cores ajuda a diferenciar essas categorias, como a "Terra fria de alta montanha", representada em azul-escuro que indica regiões de maior altitude e, consequentemente temperaturas mais frias. Essas áreas encontram-se concentradas nas regiões mais elevadas do mapa, mais concretamente na zona nordeste da região. O contraste destas regiões frias com outras áreas mais baixas e quentes reflete a transição abrupta entre as zonas de montanha e as planícies ou vales.

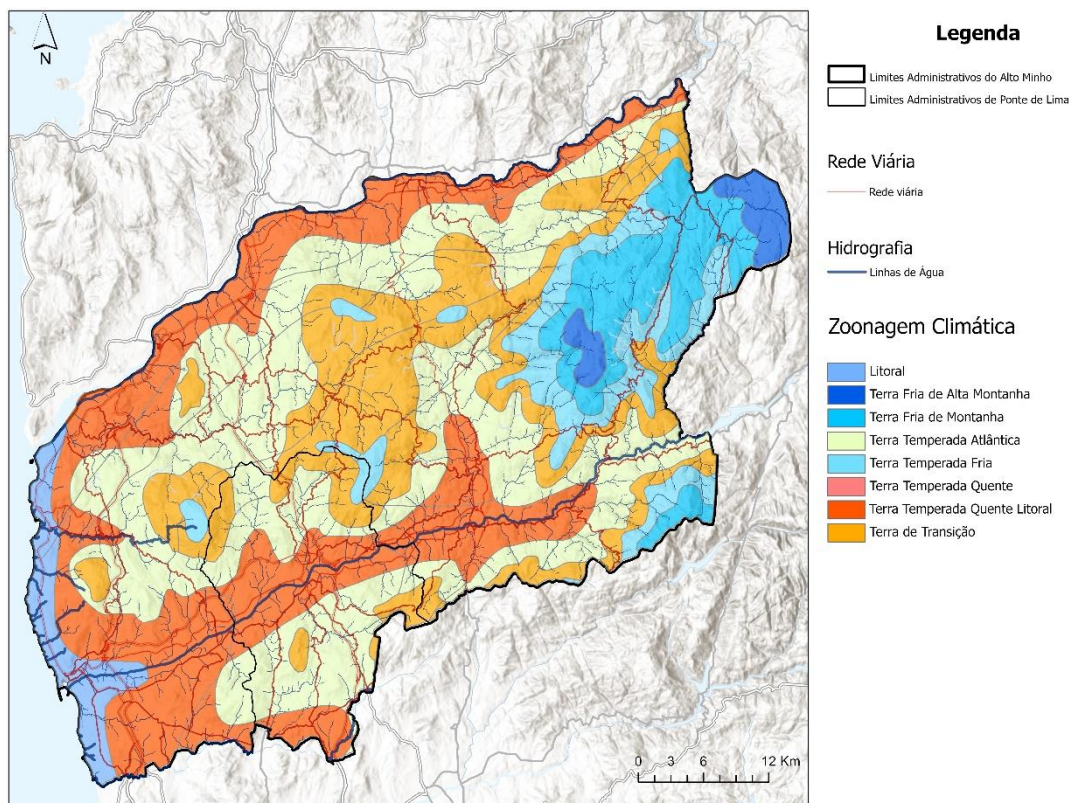


Figura 1-9. Zonagem climática do Alto Minho.

A "Terra temperada atlântica", apresentada em tons verde, predomina em grande parte da região, especialmente em áreas de altitudes médias e baixas. Essa camada sugere uma influência significativa do clima atlântico, caracterizada por temperaturas mais amenas e maior humidade, favorecendo uma vegetação vasta e dispersa. As áreas costeiras, representadas azul-claro e denominadas "Litoral", formam uma faixa estreita, sugerindo

uma transição entre o ponto onde acaba a zona costeira e começa o oceano. Estas áreas são diretamente afetadas pelas brisas marítimas o que as diferencia das zonas mais interiores.

Outra zona climática importante é a "Terra de transição" a laranja representada, ocupando pequenas porções do mapa e encontra-se em locais onde o clima e a geografia fazem a ponte entre zonas climáticas distintas. Essa transição indica áreas que podem apresentar características mistas de vegetação e temperatura, devido à proximidade tanto de áreas montanhosas quanto de zonas costeiras. A presença desta camada revela a complexidade ecológica da região, com variações rápidas de clima e relevo.

As transições entre as diferentes zonas encontram-se evidentes em algumas secções do mapa, especialmente nas áreas de maior elevação, exemplo disso é a transição da "Terra fria de alta montanha" para a "Terra temperada quente litoral" (vermelho) que ilustra como as altitudes podem influenciar diretamente o clima. Em contrapartida, em áreas mais baixas, como na "Terra temperada quente" (laranja), as transições surgem de forma mais suave, sugerindo uma topografia menos declivosa.

1.3.3. Carta de solos

O primeiro contacto de Portugal com a preparação de uma carta de solos surgiu em 1958, através do SROA (Serviço de Reconhecimento e Ordenamento Agrário), um serviço que na época sucedeu ao “Plano de Fomento Agrário”. Anos depois na década de 70 é produzida uma carta de solos que adaptava nomenclatura do SROA, onde se classificava os solos, tendo em conta o seu nível de evolução, o tipo de material orgânico, horizontes, bem como outros minerais (*Estudo Do Solo: Pedologia e Cartas Do Solo Em Portugal*, 2024).

No Alto Minho destacam-se maioritariamente solos classificados como Regossolos, Leptossolos e Cambissolos. Os Regossolos são solos conhecidos por serem derivados de rocha não-consolidada, e onde o Horizonte A é pouco profundo, sendo formados a partir de materiais piroclásticos.

Os Leptossolos por norma são caracterizados como solos esqueléticos que não possuem grande teor de matéria orgânica e encontram-se vulgarmente em zonas de maior relevo, por outro lado os Cambissolos são solos também pouco desenvolvidos com pouco tempo de formação e a sua textura é típica de material franco-arenoso, podendo apresentar um

horizonte A rico em matéria orgânica (*Estudo Do Solo: Pedologia e Cartas Do Solo Em Portugal*, 2024).

Desde tempos passados para combater o fraco desenvolvimento destes solos a população adotou sistemas de pastagens e agrários de forma a incorporar grandes quantidades de matéria orgânica no solo (*Estudo Do Solo: Pedologia e Cartas Do Solo Em Portugal*, 2024).

Com recurso à Figura 1-10 é possível verificar as várias classificações atribuídas aos solos da região do Alto Minho, tendo como principal fonte dados oficiais da Carta de solos de Portugal (*Cartas de Solos e Capacidade de Uso, Série SROA/CNROA Formato Analógico*, 2024).

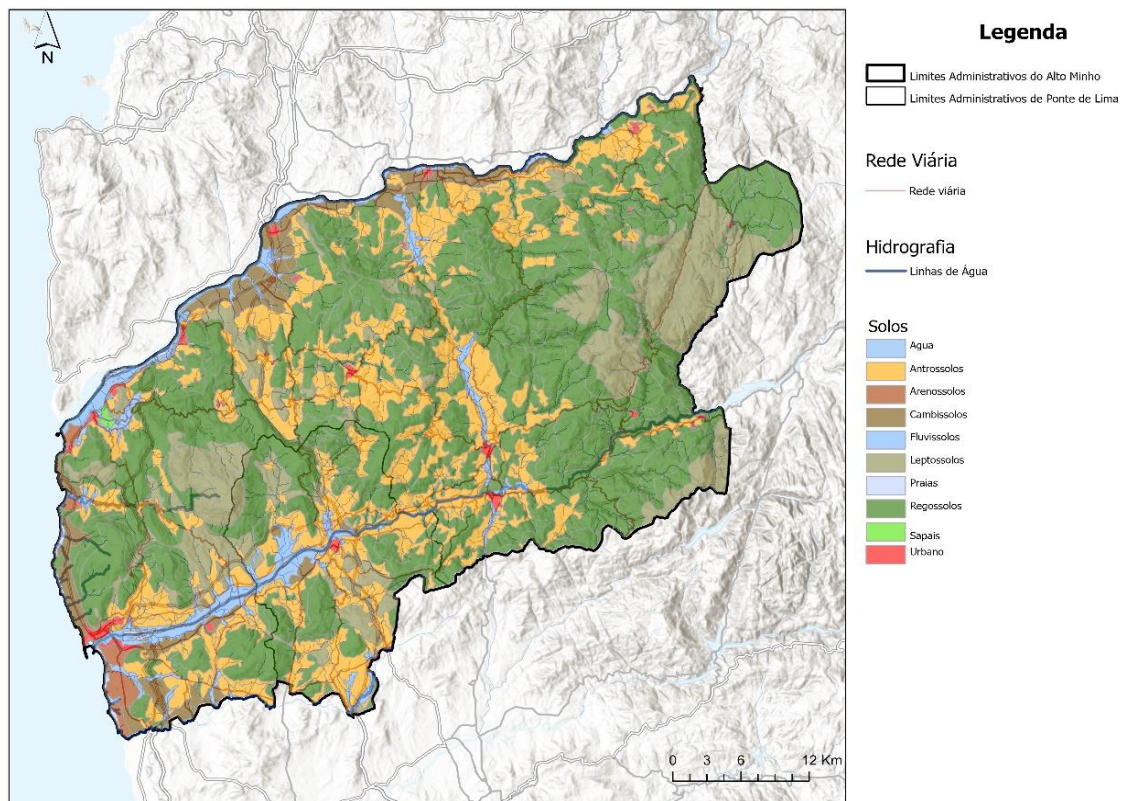


Figura 1-10. Carta de solos do Alto Minho.

Na região é visível que o tipo de solo predominante são os Regossolos, com maior representatividade nas zonas mais interiores mas com bastante presença nas zonas litorais também. Os solos que se encontram nas margens dos rios são essencialmente Antrossolos, solos que ao longo dos tempos sofreram alterações estruturais pela mão do homem, e por norma são um pouco ácidos com valores médios de matéria orgânica (Figura 1-10).

Quando sobreposta com a carta de declives é perceptível que as zonas ocupadas pelos Leptossolos são as mesmas que correspondem às zonas de maior declive, e por isso caracterizam-se por possuir uma estrutura um pouco fraca e com baixos teores de matéria orgânica tal como demonstra a carta de declives apresentada na Figura 1-11.

Tendo em conta as diversas categorias de solo, o concelho de Ponte de Lima apresenta uma ampla diversidade de solos em virtude do seu clima único e da sua morfologia, sendo que as classes de solo mais predominantes são os Regossolos, os Cambissolos, os Leptossolos e os Fluvisolos.

O território de Ponte de Lima possui uma grande diversidade fisiográfica, apresentado diferentes níveis de declives, que para melhor representação gráfica foram enquadrados em 5 classes para um melhor diagnóstico da região (Figura 1-11).

O território enquadra-se maioritariamente nas classes dos 0-50 metros e dos 200-255 metros, com a classe dos 0-50 metros a sobressair-se mais junto ao Rio Lima e nas zonas mais urbanizadas, e a dos 200-255 metros inserida mais em zonas de montanha, o que confere um clima único e dinâmico.

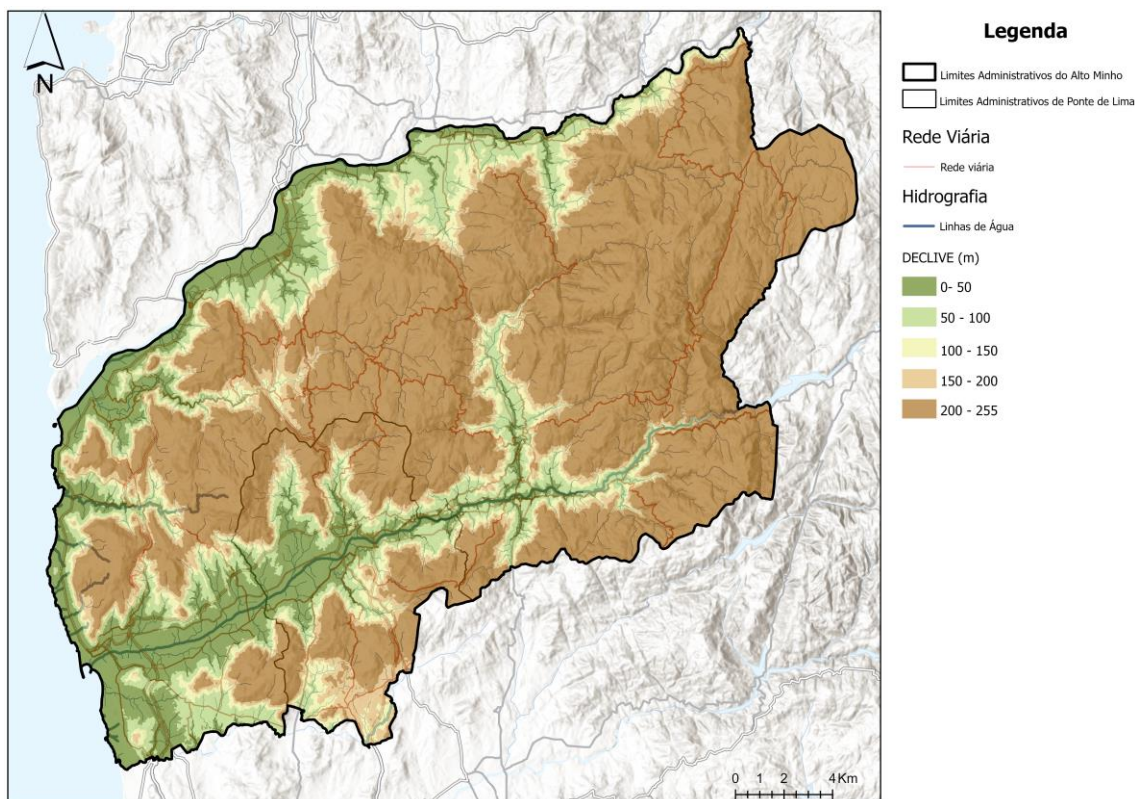


Figura 1-11. Carta de declives do Alto Minho.

1.3.4. Hidrografia

A água é um recurso escasso e o seu uso para o consumo humano é limitado, por esta razão é importante gerir da forma mais apropriada este importante recurso assim como planear e ter uma boa perceção do estado da rede hidrográfica que abastece as comunidades sejam elas rurais ou citadinas.

Portugal definiu estratégias para monitorizar melhor este tipo de circuitos e em 2007 aprovou o Decreto-Lei nº. 347/2007 que aprova a delimitação georreferenciada das regiões hidrográficas.

Com base no Plano de Gestão da região hidrográfica Minho-Lima, o território do Alto Minho encontra-se inserido na região hidrográfica do Minho e Lima (RH1) com uma extensão total de 2465 km² das quais fazem parte as bacias hidrográficas dos rios Minho e Lima e as ribeiras de costa em conjunto com massas de água subterrânea e costeiras adjacentes. Este plano segue as diretivas do Decreto de Lei nº. 347/2007 de 19 de outubro mais tarde retificado e alterado através do Decreto de Lei nº. 117/2015 de 23 de junho (*Instituto Hidrográfico, n.d.*)(*REGIÃO HIDROGRÁFICA DO MINHO E LIMA (RH1)*, 2024).

A região no seu total tem um alcance capaz de englobar de forma total todos os concelhos do Alto Minho e parcialmente os Concelhos circundantes como o caso de Barcelos, Esposende, Terras de Bouro, Vila Verde e Montalegre.

O Rio Lima e o Rio Minho têm a sua origem fora de território Nacional, mais concretamente com o Rio Minho a nascer em território espanhol na Serra da Meira a 700 metros de altitude e o Lima a nascer também em território espanhol no entanto na Serra de Mamede a 950 metros de altitude sendo que em ambos os casos no final dos seus percursos ambos desaguam em território Português em pleno Oceano Atlântico.

Analisando com mais detalhe o Rio Minho possui uma extensão total de 300 km dos quais apenas 70 km são decorridos em território português e os restantes 230 Km em território espanhol, sendo que em território Nacional decorre nos rios de montante a jusante: o Rio Trancoso (29 km²), o Rio Mouro (141 km²), o Rio Gadanha (82 km²) e o Rio Coura (268 km²).

A bacia do Rio Minho geograficamente é limitada a Norte pelas bacias hidrográficas de Espanha, a Sul pela bacia do Rio Lima e Ribeiras de Costa e a Sudeste pela bacia do Douro. A Figura 1-12 a baixo apresentada demonstra geograficamente o decorrer do Rio

Minho assim como o seu trajeto em território Nacional assim como os restantes rios de relevância no Alto Minho, representando ainda as regiões hidrográficas inseridas no território (*Instituto Hidrográfico*, n.d.; *REGIÃO HIDROGRÁFICA DO MINHO E LIMA (RH1)*, 2024).

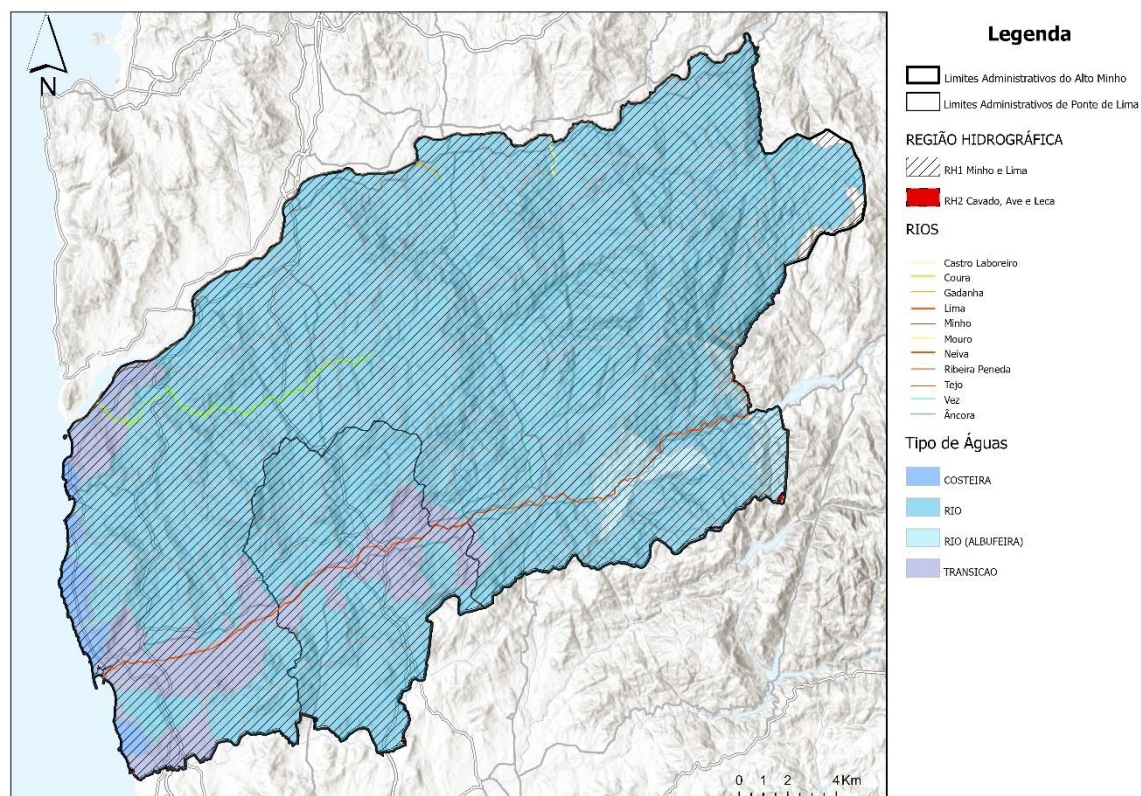


Figura 1-12. Rede Hidrográfica do Alto Minho.

Quando comprado com o Rio Minho, o Rio Lima possui uma extensão menor contando apenas com 108 km² tendo como principais afluentes o Rio Vez e o Rio de Castro Laboreiro. A sua bacia possui uma dimensão de 2470 km², dos quais apenas 1140 km² são decorridos em território Nacional, encontrando-se limitado a Norte pela bacia do Rio Minho, a Sul pela bacia do Rio Cávado e do Neiva e a Leste pelo Rio douro (*Instituto Hidrográfico*, 2024.; *REGIÃO HIDROGRÁFICA DO MINHO E LIMA (RH1)*, 2024).

A nível local, Ponte de Lima como o próprio nome indica possui como principal plano de água o Rio Lima que serve como base para o desenvolvimento de setores como a agricultura e pescas, setor representativo na região.

1.3.5. Ocupação e uso do solo

A ocupação e uso do solo têm vindo a sofrer alterações consoante as necessidades da sociedade e claro do homem, e o Alto Minho não é exceção pois tem vindo a sofrer alterações ligeiras com o passar do tempo e em função das atividades humanas.

Na paisagem que engloba a região observa-se diversas zonas de prática agrícola que formam os minifúndios característicos da região, assim como zonas de florestas com diversos tipos de folhagem que formam matos sobre diferentes tipos de relevos desde zonas montanhosas a zonas de planícies e de menor relevo (*Carta Administrativa Oficial de Portugal* | DGT, 2018). As zonas urbanas localizam-se na sua generalidade na parte mais litoral a fazer fronteira com o Oceano Atlântico, bem como nas margens do rio Minho, Lima e do rio Vez.

As zonas mais interiores são as que se observa maior relevo e maiores áreas de mato e floresta, alterando por completo a paisagem quando comparada com o litoral, onde as zonas urbanas, redes viárias e indústrias são as áreas de maior destaque. (*Carta Administrativa Oficial de Portugal* | DGT, 2018). A maior parte do território do Alto Minho é ocupado por ocupação florestal onde é possível encontrar diversas espécies de folhosas e resinosas, mas também matos com espécies arbustivas (Figura 1-13).

Um grande proporção de ocupação do solo deve-se à prática da agricultura onde é possível encontrar culturas anuais e temporárias. Ligados às práticas agrícolas pode-se observar também focos de culturas como as oliveiras e as vinhas que são duas culturas com forte presença e dinamismo económico para a região nomeadamente para a comercialização de produtos típicos da região como o caso do vinho e azeite.

A Figura 1-13 representa o mapa de ocupação e uso do solo afeto ao território do Alto Minho.

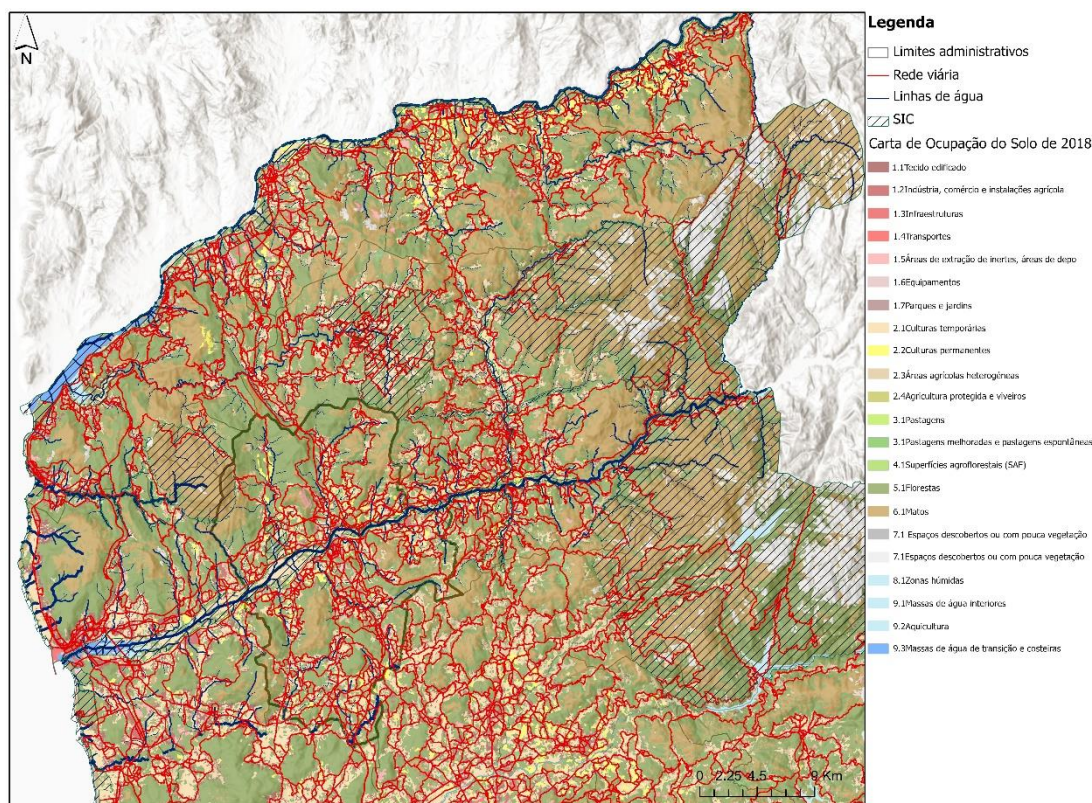


Figura 1-13. Carta de uso e ocupação do solo do Alto Minho (2018).

O Alto Minho caracteriza-se como sendo uma região onde predomina as áreas agrícolas, possuindo um clima propício a um bom desenvolvimento de culturas temporárias e anuais, bem como zonas de floresta e matos, sendo que a maior parte de tecidos edificados são encontrados sobretudo próximo às linhas de água. Com base no nível um da COS 2018, foram consideradas as seguintes designações:

Tabela 1. Tipos de uso do solo do Alto Minho.

Nível 1	Área (ha)
Agricultura	40982.03
Espaços descobertos ou com pouca vegetação	5845.759
Florestas	94046.29
Massas de água superficiais	2857.723
Matos	58527.79
Pastagens	842.8269
Territórios artificializados	18324.9
Zonas húmidas	456.8556

Nas zonas fronteiriças com Espanha é perceptível pequenos aglomerados de tecido edificado que ilustra a presença das comunidades locais. Essa mesma zona é considerada estratégica devido à sua localização geográfica, pois está perto de Espanha, mas também possui acesso às principais vias de comunicação viária, sendo comumente utilizada para transporte de mercadorias e retalho.

Seguindo os mesmos cenários de Alto Minho, Ponte de Lima é caracterizado por possuir uma ocupação do solo fortemente caracterizada por florestas, solos agrícolas e matos, cenário que só muda perto dos planos de água onde as urbanizações se foram estabelecendo e continuam a se expandir.

Nos pontos de maior altimetria, o território é ocupado por solos de rocha nua ou com pouca vegetação e mosaicos de matos e florestas com espécies resinosas e folhosas.

Capítulo 2. Estrutura do Trabalho

2.1. Questão-Problema

Segundo dados apresentados no 6º relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), no período entre 2011 e 2020 foi registado um aumento de 1.09 °C na temperatura média global à superfície da terra tendo em conta o período de referência de 1850 a 1900, sendo apontando como uma das possíveis causas o aumento dos gases de efeito de estufa (*AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC, 2023.*).

Com a agravante desta temática, têm vindo a surgir cada vez mais a necessidade de aproveitar matérias ambientalmente sustentáveis com o objetivo de criar fontes de energia que possam de facto ajudar a travar o aumento de gases com efeito de estufa para a atmosfera e conseguir mitigar as alterações climáticas. Com este objetivo em mente a biomassa enquanto recurso desde que explorada de forma sustentável pode ser um complemento para a transição energética e ainda que seja considerada neutra pode servir para produzir energia ao passo que pode exercer um papel ativo na prevenção de incêndios florestais e a controlar a carga de combustível nessas mesmas áreas.

Ainda que se trate de uma fonte de energia “neutra” a sua exploração só deve ser equacionada quando se verifica uma boa gestão do território nomeadamente dos territórios florestais, locais onde se verifica um maior aglomerado de biomassa lenhosa e onde se verifica uma necessidade de controlar o crescimento da carga de combustível.

Ainda que a biomassa florestal possa ter utilidade do ponto de vista energético é também importante analisar se é ambientalmente sustentável isto porque grande parte da biomassa que têm potencial energético é lenhosa e encontra-se em espécies arbóreas muitas delas com idade já considerável, o que significa que durante o seu ciclo de vida sequestram quantidades de CO₂ consideráveis e que desempenham uma função de sumidouro de carbono, bem como de regulação de ecossistemas influenciando diversos seres vivos.

Uma vez que se procede ao corte da árvore todo o carbono que sequestrou durante a sua vida útil é libertado para a atmosfera, o que faz com que não seja sustentável do ponto de vista ambiental. Com este ponto em mente um dos desafios da exploração da biomassa passa precisamente por saber explorá-la de forma sustentável procurando proteger áreas de floresta de conservação e que estas sejam no geral constituídas por espécies com alto sequestro de carbono e resilientes aos incêndios bem como a condições edafoclimáticas

por vezes extremas, e ao mesmo tempo não comprometendo a integridade dos territórios explorados.

No sentido desta descrição o presente estudo procura ir ao encontro de soluções referentes às seguintes questões:

- i. É possível avaliar a disponibilidade de biomassa acima do solo com recurso a técnicas de deteção remota?;
- ii. Quais os fatores ambientais e edafo climáticos com maior influência na dinâmica da biomassa?;
- iii. Qual o potencial de exploração de biomassa em território florestal no Concelho de Ponte de Lima?;

2.2. Objetivos

Para ser possível responder às questões problema anteriormente colocadas é necessário conhecer um pouco mais a temática da biomassa, sendo o objetivo basilar deste estudo avaliar a disponibilidade de biomassa florestal no concelho de Ponte de Lima com recurso a técnicas de deteção remota. Para conseguir dar resposta a este objetivo, o presente estudo integra o seguinte conjunto de objetivos:

- i. Execução de uma análise biogeofísica para perceber potenciais parâmetros com influência na avaliação de biomassa;
- ii. Desenvolvimento de uma análise bibliométrica e consequente revisão do estado da arte assente numa ampla visão de técnicas de deteção remota para avaliação de biomassa e posterior análise afeta ao potencial desta enquanto recurso;
- iii. Identificação dos locais de maior abundância de biomassa e de maior sequestro de CO₂;
- iv. Desenvolvimento de um Modelo Preditivo de Biomassa para o ano de 2024 para o concelho de Ponte de Lima;

2.3. Motivação

A biomassa pode ser considerada um recurso importante na medida em que pode ser visto como um indicador importante no sequestro e armazenamento de carbono, tendo potencial para mitigar as alterações climáticas e surge como um potencial recurso energético.

Uma vez que a biomassa detém um alto potencial como recurso, identificar a sua disponibilidade e fazer uma gestão equilibrada e sustentável torna-se imprescindível para qualquer decisor dos mais diversos ramos, sendo decisor político ou ambiental sendo que a detecção remota pode e deve ser utilizada como ferramenta na hora de proceder a análises e consequentemente na hora de tomar decisões.

No seguimento deste enquadramento, este estudo nasce da vontade de contribuir de forma ativa para o desenvolvimento e aperfeiçoamento de métodos para avaliar a disponibilidade de biomassa através da utilização de técnicas de detecção remota.

2.4. Organização

O presente estudo encontra-se segmentado em 6 capítulos, para além da conclusão e dos anexos que possuem também informação relevante ao estudo, no entanto não é possível abordar de forma tão pormenorizada devido à sua extensão.

Em síntese o estudo encontra-se estruturado da seguinte forma:

Capítulo 1 – Capítulo dedicado à compreensão do território e análise da região alvo deste estudo. Neste capítulo é abordado uma série de parâmetros económicos, demográficos e sociais, bem como biogeofísicos capazes de retratar o território como um todo, são retratados em específico os seguintes dados:

- i. Caracterização socioeconómica de forma a perceber as principais dinâmicas económicas e sociais da região. A análise deste ponto permite descobrir quais os setores da economia mais influentes na região, bem como as dinâmicas sociais com maior representatividade;
- ii. Caracterização demográfica para perceber as principais faixas etárias ativas no mercado e as tendências da evolução da população;
- iii. Caracterização biogeofísica visando a compreensão de variáveis relacionadas com o solo, clima, geologia e hidrografia;
- iv. Identificação dos diversos tipos de ocupação e uso do solo presentes no território;

Capítulo 2 – Este capítulo foi pensado de modo a apresentar a forma como o estudo foi organizado, quais as questões problema presentes no estudo e ao que o estudo pretende dar resposta. Neste capítulo são apresentados também os objetivos definidos e a estrutura do estudo.

Capítulo 3 – Capítulo focado na escrita da análise bibliométrica e posterior revisão de literatura, dividindo-se em 2 subcapítulos temáticos sendo eles:

- i. O primeiro subcapítulo refere-se à execução de uma análise à cerca da biomassa enquanto recurso, identificação de potenciais espécies para produção de energia através de diferentes meios de transformação, assim como uma visão geral das práticas que têm vindo a ser praticadas ao longo dos anos e de que forma pode a biomassa ser utilizada para proteger áreas florestais contra incêndios;
- ii. O segundo subcapítulo apresenta uma abordagem referente ao conhecimento já existente das técnicas de avaliação de disponibilidade de biomassa através da deteção remota;

Capítulo 4 – Capítulo assente na metodologia do estudo. Este capítulo oferece uma visão ampla dos materiais e métodos utilizados para chegar aos resultados apresentados no Capítulo 5. No seu conteúdo constam todas as fases desenvolvidas bem como a sua descrição e explicação dos processos de formação do modelo preditivo de biomassa para o ano de 2024.

Capítulo 5 – Apresentação dos resultados obtidos derivados dos capítulos anteriores, encontra-se estruturado da seguinte forma:

- i. Cartografia de Ocupação do Solo – Subcapítulo dedicado a demonstrar a cartografia de Uso e Ocupação do Solo melhorada através de áreas de treino e um classificador preditivo;
- ii. Modelo da altura da Canóia – Segundo resultado obtido, retrata a altura da canóia das árvores do território do Concelho de Ponte de Lima, variável inserida no modelo preditivo da biomassa para o ano de 2024;
- iii. Modelo Preditivo da Biomassa – Terceiro resultado e modelo que propõe dar respostas às questões problemas apresentados no segundo capítulo.
- iv. Variáveis utilizadas no modelo – Apresentação das variáveis utilizadas para treinar e validar o modelo e a sua importância;

Capítulo 6 – Discussão dos Resultados apresentados no capítulo anterior.

Capítulo 3. Revisão de Literatura

3.1. Análise bibliométrica

A temática envolvida neste estudo é na sua prioridade proteger a floresta contra incêndios do concelho de Ponte de Lima, mas também passa por desenvolver um modelo económico ligado à biomassa residual que pode ser obtida nestas mesmas áreas florestais e com isso gerar cadeias de valor e contribuir para a bioeconomia circular.

Como base de sustentação do modelo a desenvolver foi adotada a decisão de efetuar uma análise bibliométrica e bibliográfica, contando para isso com o “Rstudio” um programa assente em linguagem “R”, que foi desenvolvido por Ross Ihaka e Robert Gentleman no ano de 1993 no departamento de estatística da Universidade de Auckland na Nova Zelândia, este ambiente permite a utilização de múltiplos pacotes de análise complementar tais como o “Bibliometrix package” da autoria de Michael Schreiber um investigador e professor da Universidade de Duisburg-Essen, ou o “Biblioshiny package” criado por Aria, M., & Cuccurullo, C. em 2017.

Ao utilizar estas ferramentas de tratamento de informação e recolha de dados, consegue-se obter um olhar mais amplo e efetuar análises de informação e tratamento de dados mais dinâmicas, coerentes e precisas, sendo ferramentas essenciais para sustentar a parte teórica deste estudo.

Referente à análise bibliométrica, inicialmente foi iniciada uma pesquisa na plataforma científica “Scopus”, com base em palavras-chave relacionadas com o tema em questão.

As palavras-chave utilizadas encontram-se apresentadas na Tabela 2 abaixo inserida.

Tabela 2. Palavras-chave utilizadas para a pesquisa na plataforma Scopus.

Palavras-chave	Nº. de documentos
“Biomass”	502,302
“Biomass” and “fires”	10,574
“Biomass” and “fires” and “value”	1,965
“Biomass” and “fires” and “value” and “chains”	27

A introdução de palavras-chave essenciais para o tema foi efetuada de forma gradual e ponderada de forma que as palavras em questão se relacionassem e se aproximassem do tema pretendido. Foi iniciada a pesquisa com a palavra “biomassa”, onde o leitor de busca encontrou 502,302 documentos com essa palavra chave, acrescentou-se ainda a palavra “fires”, à palavra inserida anteriormente e foram encontrados 10.574 documentos, seguidamente a estas duas palavras acrescentou-se a palavra “value”, onde foram encontrados 1,965 documentos o que é um número bastante elevado de documentos para análise e por isso acrescentou-se uma última palavra denominada de “chains”, onde a plataforma encontrou cerca de 27 documentos, o que representa um número já razoável de documentos para análise temática do estudo, bem como a análise de revisão de leitura.

Num cenário macro, os documentos encontrados representam o trabalho de 25 fontes e 119 autores que se retrata na elaboração de 27 documentos científicos com um rácio de crescimento anual de 5.95% referente ao período temporal de 2004 a 2023, o que sugere que esta temática é atual, recente e na qual existe a necessidade de ser mais estudada e de ser produzido um maior número de material científico.

Para melhor conhecer o tema, foi efetuada uma revisão a matérias como o número de citações por ano, os autores mais relevantes, as fontes mais relevantes e a produção anual de conteúdo científico publicado, material que auxilia a compreender a evolução do tema alvo de estudo.

Com base nas palavras-chave anteriormente mencionadas, verifica-se uma tendência de aumento da produção anual de artigos com essas mesmas palavras-chave, tendo-se registado um pico de número de publicações em 2020 com cerca de 5 publicações publicadas.

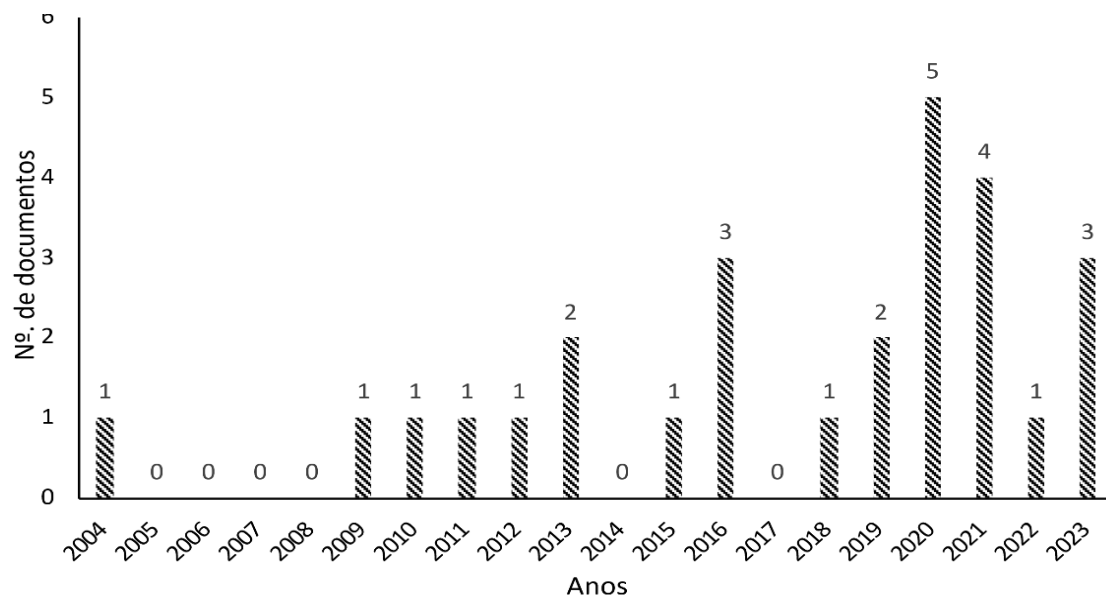


Figura 3-1. Nº de publicações anuais.

A Figura 3-1 apresenta o número de documentos produzidos em cada ano a partir do ano de 2004 até ao presente, sendo que é perceptível as várias oscilações ao longo desse mesmo período temporal, contudo os últimos anos têm vindo a ser produzido cada vez mais conteúdo científico sobre o tema, contrariando os valores extremamente baixos e até mesmo nulos mais evidentes entre os anos de 2005 e 2008.

Ainda com recurso ao “Biblioshiny”(Aria & Cuccurullo, 2017), recolheu-se a informação afeta ao número de citações por ano que cada documento obteve, e mais uma vez se pode ver que o ano 2021 foi um ano muito produtivo para o tema da biomassa e da floresta, com quase 8 citações, no entanto em 2023 os valores surpreendem com um nulo.

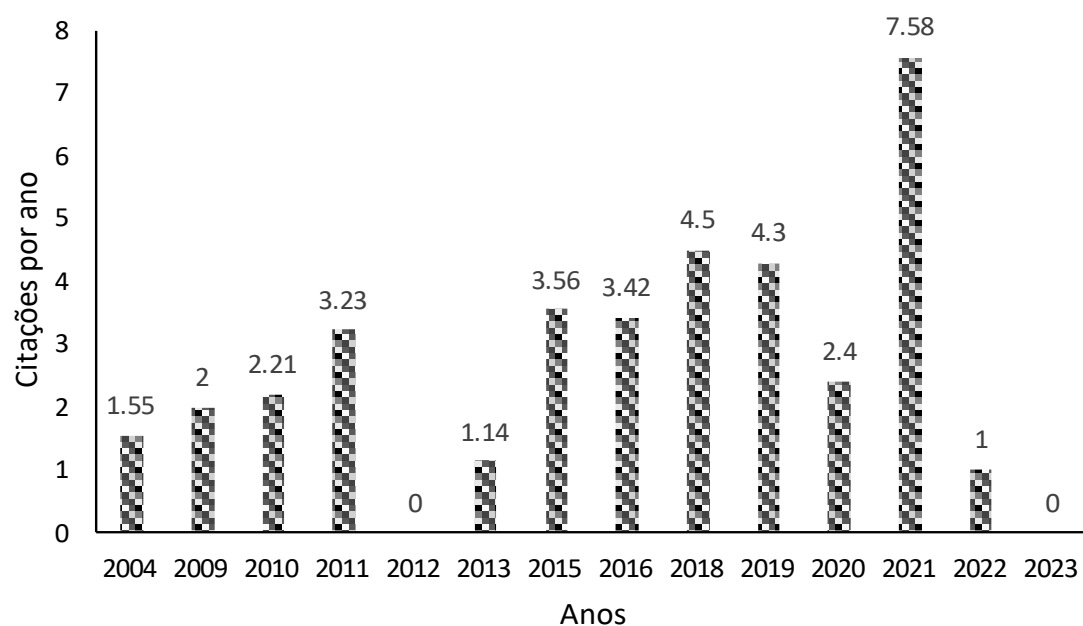


Figura 3-2. N°. de citações por ano.

Respetivamente à 3-2 é claro que a discrepância entre anos, não é tão evidente como no caso do número de documentos publicados anualmente, ainda que o gráfico não identifique todos os anos, no entanto com a importância do tema e a grande procura de recursos energéticos sustentáveis, perspectiva-se que o número de citações aumente.

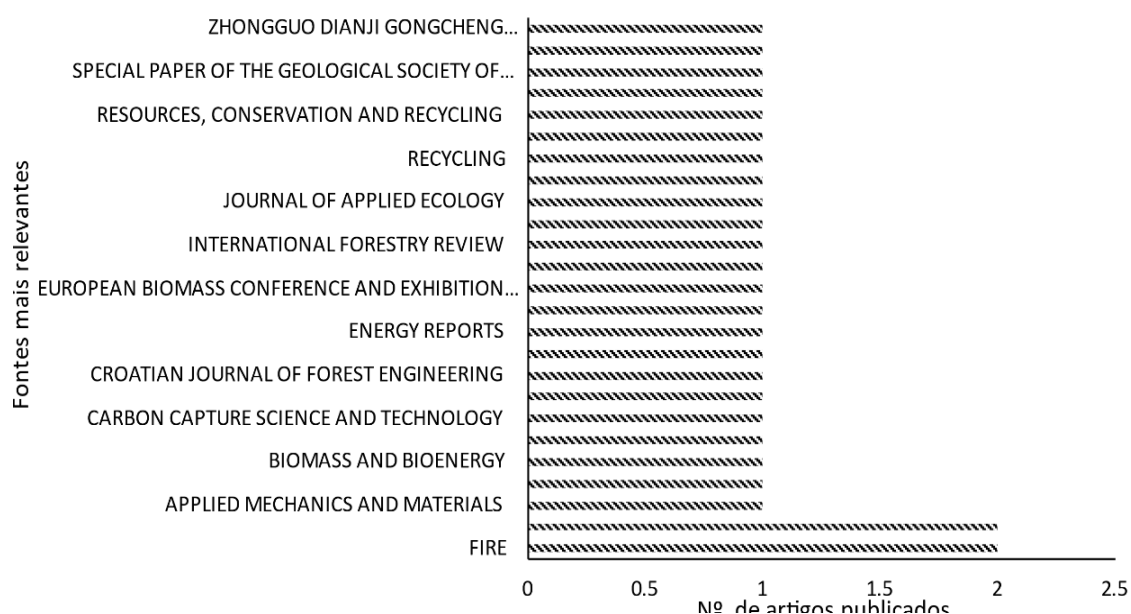


Figura 3-3. Fontes mais relevantes.

Quando se procura obter informações à cerca de um tema é imprescindível e essencial consultar fontes credíveis e precisas, que forneçam segurança devido às suas revisões

rigorosas, e como tal dentro do campo da biomassa e do setor florestal, a 3-3 apresenta as fontes afetas aos documentos analisados posteriormente na revisão de literatura.

Os números demarcados na Figura 3-3 não são expressivos de facto, mas de certa forma pode estar associado ao tema ser atual e até mesmo recente, sendo que as fontes que mais publicaram à cerca deste tema com um total de duas publicações foi no jornal de “Applied mechanics and materials”, e o “Fire”, todas as outras fontes publicaram apenas um documento.

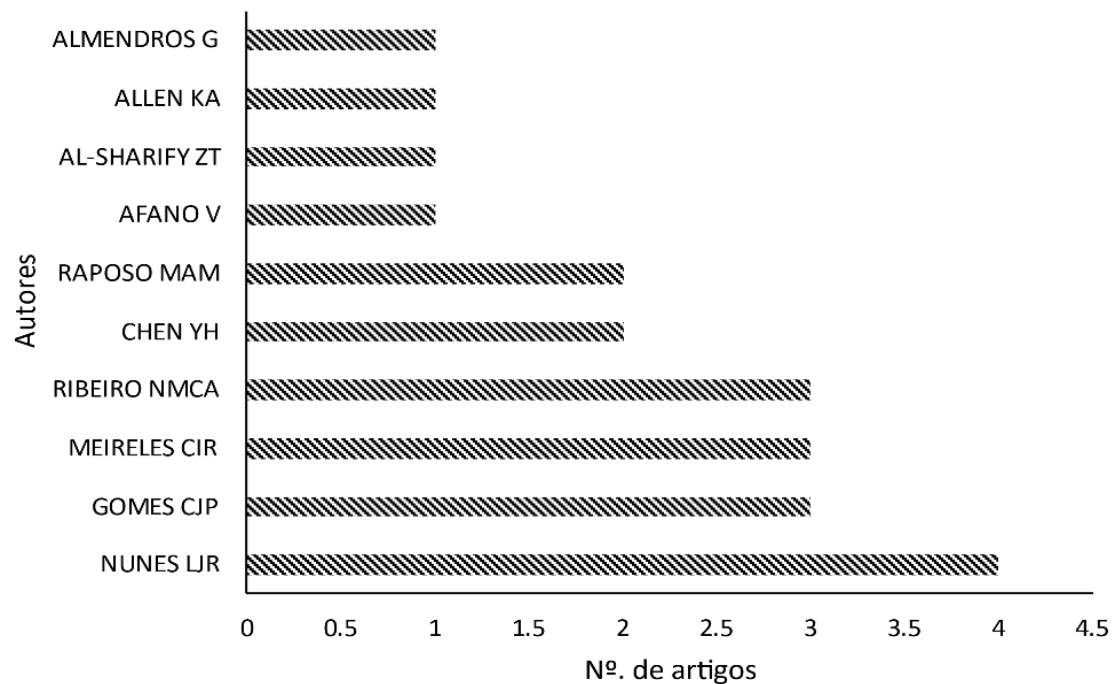


Figura 3-4. Autores mais relevantes a nível local.

Uma vez obtendo informações referentes às fontes, foi vez de procurar quais os autores mais relevantes e com mais conhecimento sobre o tema, informação essa apresentada no Figura 3-4.

A Figura 3-4 apresenta os autores mais relevantes entre o tema sendo que mais uma vez os valores não são expressivos e o número de documentos sobre o tema não é elevado, no entanto destaca-se o autor Nunes LJR, que produziu um total de 4 artigos no período temporal de 2004 e 2023, por outro lado os autores Almendros G, Allen Ka, Al-Sharify ZT, e Afano V produziram um único documento.

Ainda no âmbito de tratamento de informações foi produzido um mapa temático com base nos temas afetos aos documentos encontrados, sendo que esse mapa se encontra dividido

em quatro quadrantes e dois eixos, o eixo do grau de desenvolvimento do tema e o grau de relevância que esse mesmo tema possui.

No espaço interior desses eixos o mapa divide-se como anteriormente mencionado em quatro quadrantes, o quadrante dos temas nicho, dos temas motor, dos temas emergentes ou em declínio e os temas base, tal como é apresentado na Figura 3-5.

Este mapa é importante na medida em que permite saber qual a evolução dos temas ao longo do tempo e quais os temas que são mais atuais.

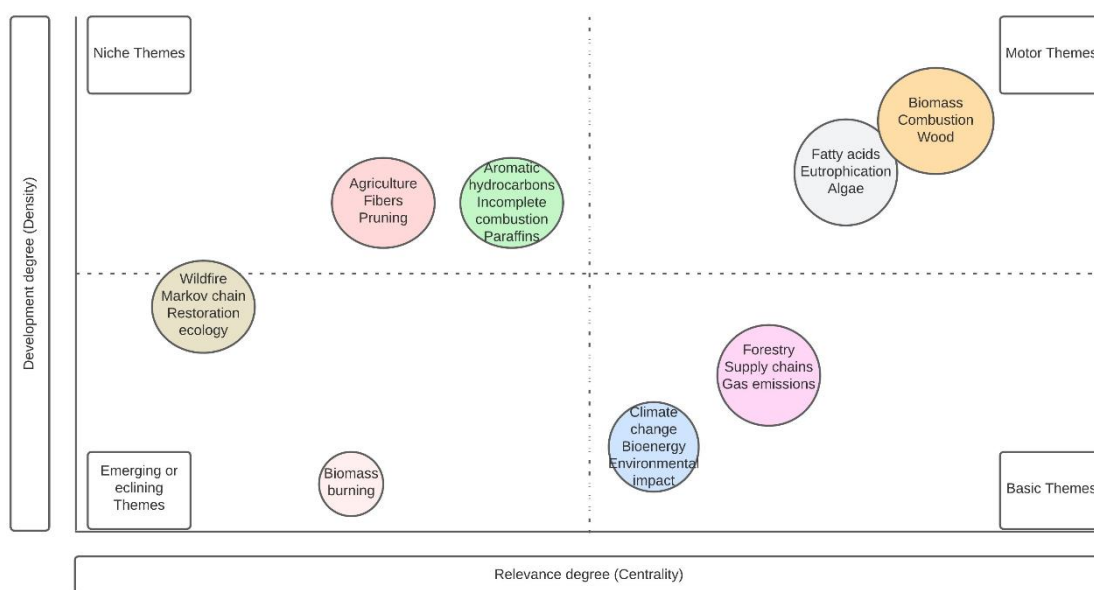


Figura 3-5. Mapa Temático.

Assim como o mapa da Figura 18 demonstra, os temas que são a base e a referência dos documentos encontrados são naturalmente as alterações climáticas, a bioenergia, os impactos ambientais, emissões de gases, redes de fornecimento e silvicultura. No fundo são os temas de maior importância para as sociedades no geral, uma vez que os recursos energéticos e a sua distribuição aliada a uma boa eficiência de logística e ambiental são dos principais pilares para um futuro sustentável.

No quadrante dos temas motor encontramos temáticas tais como, a biomassa, incineração de madeira, eutrofização e algas, que são temas de grande impacto, no entanto possuem alguma incerteza, o que significa que são temas de grande importância e que desempenham um papel influente na análise dos documentos encontrados.

Continuando a analisar o mapa da Figura 3-5, está presente um quadrante afeto aos temas nicho, temas que não possuem grande impacto ou relevância, mas também não possuem grandes incertezas e já existe entendimento sobre ele.

No último quadrante afeto aos temas emergentes ou em declínio possuem baixo impacto, mas alta incerteza, são temas que podem não ter grande impacto no presente, mas podem vir a ter uma maior relevância no futuro.

3.2. Análise Bibliográfica

3.2.1. Biomassa

Este capítulo consiste na sintetização de uma análise crítica e dinâmica aos documentos encontrados na pesquisa bibliométrica e que estes contribuam para ajudar a justificar e sustentar a produção do estudo.

O presente estudo tem como objetivo principal a caracterização da disponibilidade de biomassa residual e a sua avaliação como recurso passível de gestão no concelho de Ponte de Lima. Subsequentemente, visa analisar estratégias de ordenamento que visam aumentar a resiliência do espaço florestal local a incêndios, por meio da criação de cadeias de valor para resíduos de biomassa e espécies invasoras que apresentam um potencial de utilização na geração de energia apelativo.

A aplicação de biomassa residual parece ser hipótese quer para resolver problemas como o excesso de carga de combustível fator de grande influência na propagação de incêndios florestais em determinadas situações e localizações, quer para a produção sustentável de energia (Nunes et al., 2022).

Uma das hipóteses que pode de facto ser viável para a exploração de biomassa são as espécies invasoras que devido à sua rápida disseminação e desenvolvimento requer um grande esforço financeiro para serem controladas e a sua eliminação torna-se praticamente impossível, ou seja, quer isto dizer que existe um motivo para o seu abate e ainda se está a proteger os ecossistemas e a biodiversidade associada aos mesmos. Uma das soluções para controlo das invasoras pode passar por gerar cadeias de valor ao as transformar em biomassa (Pirard, 2023).

Para gerar estas cadeias de valor, existem as indústrias de biomassa, que podem ser de facto uma alternativa sustentável ambientalmente e economicamente, sendo que no meio do processo é necessário ter em conta alguns aspetos tais como (Pirard, 2023):

- i. Reconhecimento dos (des)serviços ambientais;
- ii. Acesso a informações de privados, bem como o grau de disponibilidade do recurso (biomassa);
- iii. Desenvolvimento de um modelo de cadeia e uma logística bem planeada;

As espécies invasoras nas quais são investidos grandes recursos anualmente ao longo do seu desenvolvimento e controlo do mesmo, podem em determinados locais apresentarem-se de forma tão desenvolvida que a sua erradicação fica praticamente impossível (Nunes, Rodrigues, et al., 2021).

Dentro do grupo das espécies invasoras existem espécies com maior e com menor aptidão para produção de biomassa, sendo que o seu problema maior se encontra no processo de produção de energia, mais especificamente nos níveis de azoto, cloro e cinzas, podendo em alguns casos a sua aptidão para a produção de biomassa ser classificada como inviável (Nunes, Rodrigues, et al., 2021).

A biomassa florestal é um componente com grande aptidão dentro do ramo da biomassa, e atualmente é sem dúvida um dos temas com maior relevância, devido à sua afinidade para aquecimento e produção de energia.

No âmbito científico são inúmeros os tipos de materiais estudados de forma a se obter uma maior eficiência energética, sendo que um estudo desenvolvido por (Chang et al., 2019), testou por exemplo a introdução de palha de arroz no processo de co combustão da biomassa junto com o carvão, bem como a madeira, sendo que nesse estudo o autor sugere que a madeira para queima de biomassa produz poucas cinzas, e apresenta altos valores de aquecimento, tornando-a mais adequada junto com carvão do que a palha de arroz para a co combustão junto também com o carvão.

Ainda no mesmo estudo é referenciado o processo de torrefação, que é um processo dentro da produção de biomassa e bastante útil na medida em que aumenta os valores de aquecimento da biomassa, uniformiza as propriedades da mesma, e ainda é responsável por decompor o grupo denominado por hidroxila presente na biomassa.

Os autores deste estudo averiguaram diversos biocombustíveis sólidos, bem como os mais adequados na co combustão com carvão, num sistema industrial de caldeira a vapor de grelha em cadeia com capacidade de 100 KW, tendo sido projetado no âmbito de alcançar emissões livres de carbono.

Os autores (Liu et al., 2012) investigaram o processo de co combustão de misturas de briquetes de carvão/biomassa em caldeiras, e sustentando-se em análises termogravimétricas e fluxos de aquecimento, defendem que a co combustão influencia e reduz significativamente o teor de carbono nos resíduos e nas cinzas volantes, o que por

sua vez leva a uma redução nas perdas de calor, e com isto a combustão das partículas sólidas fica incompleta e em contraste a eficiência da caldeira aumenta.

Outro experimento realizado pelos mesmos autores, revela que a mistura de carvão/palha parece melhorar as propriedades de combustão do carvão, proporcionando assim um aumento do processo da difusão do oxigênio.

Existem ainda elementos que podem influenciar os níveis de temperatura, as quantidades de CO, NO_x e SO₂ na fornalha, como o caso da quantidade/proporção de biomassa/carvão adotada (Liu et al., 2012). Ainda no seguimento do estudo os autores revelam que os testes foram efetuados com uma espessura das misturas de 115 a 120 mm, uma velocidade de rotação de 550 r/min e uma produção de biomassa/carvão de 23 a 25%.

A colheita e a devida queima dos resíduos florestais podem ajudar na diminuição do risco de incêndios. Um estudo efetuado por (Maier et al., 2019) aponta que a maioria dos cenários da cadeia de abastecimento de bioenergia florestal apresenta melhorias no requisito de desempenho ambiental, em parte devido à redução da combustão controlada de resíduos e da redução de combustíveis fósseis. Fatores como a acidificação, eutrofização, efeitos respiratórios e formação de ozono fotoquímico sofrem ligeiras melhorias também.

Por outro lado, os valores de toxicidade sofrem um aumento em parte devido à disposição de cinzas de madeira. No final a eficiência de conversão e a disposição de cinzas de madeira são dois fatores com alta influência nas cadeias de abastecimento de bioenergia (Maier et al., 2019).

As queimas descontroladas contribuem de forma significativa para o impacto ambiental global das cadeias de abastecimento de biomassa florestal, sendo uma prática recorrente em Portugal, mas também na Europa a de proceder à queima dos sobrantes de podas de culturas como as videiras, fruteiras e oliveiras, responsáveis pela libertação de CO₂ para a atmosfera bem como outros gases de efeito de estufa (García-Galindo et al., 2016).

No panorama atual parece existir uma tendência para se intensificar as áreas de cultivo compostas por oliveiras, vinhas e fruteiras o que é perfeitamente normal tendo em conta o aumento da população, e isso pode ter impactos na criação de cadeias de valor através da biomassa (García-Galindo et al., 2016).

Atualmente as podas agrícolas possuem dois destinos, a eliminação das mesmas a céu aberto e consequentemente libertação de CO₂ e gases de efeito de estufa para a atmosfera,

ou em sentido contrário a trituração das mesmas no solo para fins de incorporação de matéria orgânica, uma prática cada vez mais recorrente entre os produtores agrícolas.

Um pormenor que pode causar impacto na produção de biomassa é o aumento de equipamentos mecanizados para fazer a poda, uma vez que ao introduzir estes equipamentos estamos a interferir com o tamanho, e consequentemente as toneladas de sobrantes por hectare. No geral ao nível europeu, as podas estão disponíveis em quantidades suficientes para gerar energia em quantidades razoáveis (García-Galindo et al., 2016).

A biomassa é um tema muito complexo e que a cada ano vai sendo mais explorada e conhecimentos novos são adquiridos, e com o avanço da tecnologia já é possível criar modelos matemáticos que integram e processam decisões ao nível de transporte e produção de biomassa em centrais elétricas, tal como os autores (Duni et al., 2016) sugerem.

Ainda de acordo com o mesmo autor, a adoção da prática de co combustão da biomassa processa-se tendo em vista a diminuição dos gases de efeito de estufa, em centrais elétricas que utilizam materiais como o carvão.

O mesmo estudo sugere um modelo capaz de processar e avaliar os impactos da prática da co combustão inserido num sistema de uma central elétrica a carvão, bem como o custo de produção de eletricidade renovável. Para isso o modelo consiste num programa misto não linear que consegue interpretar a captura e perda de eficiência do processo de combustão da biomassa.

Outros modelos foram desenvolvidos e estudados em outros locais e com outras plantas, exemplo disso é um estudo publicado por os autores (Allen et al., 2013), realizado no Reino Unido referente à *Calluna vulgaris*, introduzida numa área de charnecas. Em Portugal a *Calluna vulgaris* é também conhecida como urze.

A gestão das charnecas no Reino Unido é realizada na sua maioria através de queimadas controladas, sendo que esta prática possui efeitos positivos e negativos, e cabe ao decisor ponderar ambos os lados e perceber qual a melhor solução. Neste exemplo em concreto existe a indicação de que é de carácter positivo a utilização de queimadas controladas de forma a promover o aumento da biodiversidade e a prevenção de incêndios florestais, em contrapartida identificam-se como impactos negativos a libertação de carbono para a atmosfera e a redução na prestação de alguns serviços de ecossistema, fatores que quer

direta quer indiretamente contribuem para o aumento do aquecimento global (Allen et al., 2013).

Ainda no mesmo exemplo foi avaliado a acumulação de carga de combustível acima do solo após a realização de uma queima controlada. No mesmo modelo foi ainda antevisto a estrutura de vegetação através de diferentes rotações utilizando uma matriz que estrutura a idade, foi também ainda calculada a carga de combustível com recurso ao bootstrap (Allen et al., 2013).

As perdas de carbono a longo prazo demonstradas no estudo foram previstas para um período temporal em função dos períodos de retornos dos incêndios florestais. Foi ainda inserida a variável da regeneração tardia. O estudo sugere existir uma interação entre o intervalo de rotação de queima controlada e o intervalo respondente ao retorno de incêndios florestais.

No intervalo de retorno de incêndios florestais de 50 e 100 anos, verifica-se a existência de perdas de carbono mínimas devido a rotações curtas de queimas controladas. Para o intervalo de tempo de retorno de 200 anos a perda de carbono foi minimizada por intervalos de rotação longos. Num período de rotação correspondente a 50 anos, com intervalos de queima controlada de 8 anos o estudo previu a perda de carbono em 22% a 34% em comparação com repetições de 25 e 50 anos (Allen et al., 2013).

Alguma bibliografia aponta a biomassa como sendo uma fonte de energia renovável, contudo alguns autores defendem que a biomassa na sua composição contém gases de produtos manufaturados e até resíduos de combustíveis alguns exemplos são resíduos de produtos agrícolas, de águas residuais e até mesmo de operações de pomares (Razikordmahaleh & Larijani, 2020).

No fundo a principal diferença entre a biomassa e os combustíveis fósseis, é que os níveis de CO₂ libertados a partir de fontes de energia fóssil volatilizam-se para a atmosfera fazendo com que os valores dos gases de efeito de estufa aumentem por outro lado, a biomassa tudo o que liberta de CO₂ para a atmosfera, já foi captado durante o ciclo de vida da planta o que acaba por ser uma fonte neutra.

A nível económico é também de maior interesse produzir combustíveis tendo como base a biomassa uma vez que na maioria dos casos é possível produzir combustíveis por meio de biomassa a nível local e sem investimentos avultados em tecnologia, situação exatamente contrária à produção de combustíveis fósseis. Este ponto é importante na

medida que os países ao produzir combustíveis a partir da biomassa estão a reduzir a dependência energética pois não precisam de importar esses mesmos combustíveis e está a criar cadeias de valor locais ao gerar mais emprego.

A nível ambiental os benefícios na produção da biomassa são igualmente vantajosos uma vez que com a sua produção estamos a melhorar o uso em território florestal, e a limpar as florestas, o que diminui o risco de incêndios florestais (Razikordmahaleh & Larijani, 2020).

Alguns estudos procuram formular e testar hipóteses duplamente verdes, sendo que para isso analisam a parte de colheita de biomassa, a sua logística, o seu transporte e entrega de biomassa às centrais energéticas, a partir de florestas/bosques de regeneração (Jansen & Kuiper, 2004).

Quando se debate sobre biomassa, o processo de logística e de transporte é crucial do ponto de vista económico, chegando a ser um elemento de viabilização de projetos, sendo que existe constantemente a necessidade de perceber quais as formas mais eficazes de transportar maiores quantidades de biomassa a menores custos (Strandgard et al., 2023).

Um dos métodos encontrados para reduzir custos, passa por fazer a biomassa passar por um processo de secagem nas bermas da estrada. Ao adotar esta prática é possível realmente levar maiores quantidades de biomassa e menores custos e aumentar o seu potencial calorífico, uma vez que a biomassa vai perder grande parte do seu teor de humidade.

Outra forma para potencializar a logística e o transporte de biomassa, pode passar por desenvolver um modelo de secagem que no fundo além de incluir o processo de secagem, analisa a cadeia de abastecimento florestal, e determina os tempos de armazenamento ideais (Strandgard et al., 2023).

Um estudo recente efetuado no Parque Natural da Serra da Estrela em Portugal, estudou o crescimento de arbustos heliófilos e espécies arbóreas de pequeno porte localizadas nas margens e em zonas de pastagens, sendo que na investigação foi concluído que quando este tipo de vegetação se encontra localizado em regiões de clima mediterrâneo, o risco de incêndios florestais pode aumentar (Nunes, Raposo, et al., 2021b).

Durante o estudo e com acesso a análises termogravimétricas, químicas e calorimétricas os autores consideram que devido aos valores altos de cinzas e metais que consequentemente aumentam a frequência de fenómenos de incrustação este tipo de

vegetação não é muito fácil de ser valorizada e é pouco apelativa para a exploração de biomassa num plano de maior dimensão (Nunes, Raposo, et al., 2021b).

Em Portugal, e ainda no capítulo de invasoras, é particularmente importante estudar o comportamento e progressão da *Acacia delbata* Link, uma vez que é uma espécie que se encontra em expansão um pouco por todo o território nacional (Nunes, Raposo, et al., 2021a).

Alguns dos impactos negativos identificados é de salientar:

- i. Impactos negativos na biodiversidade local;
- ii. Interferência na competitividade com outras espécies florestais;
- iii. Aumento significativo de risco de Incêndio;

Como é deduzível, por as informações anteriormente descritas, existem impactos de carácter muito negativo e é essencial adotar medidas que travem a sua propagação (Nunes, Raposo, et al., 2021a).

Os incêndios florestais como anteriormente mencionado fazem parte dos ecossistemas, e estão identificados como sendo um dos potencializadores do aquecimento global, no entanto analisando com maior pormenor são também uma importante fonte de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos.

Estudar e compreender estes hidrocarbonetos pode ser útil na medida que estes hidrocarbonetos podem afetar a qualidade quer ambiental, quer do solo (Faboya et al., 2020).

Um olhar mais atento e crítico aos incêndios florestais e percebe-se que estes podem interferir na estrutura da vegetação e ainda nos processos geomorfológicos.

Estudos sugerem que zonas afetadas por incêndios florestais de forma repetitiva, podem de facto alterar a constituição de comunidades e ecossistemas, bem como fatores geomorfológicos como o escoamento e erosão (Malkison et al., 2011).

De acordo com alguns estudos e como é facilmente constatado, os incêndios florestais provocam consequências tais como a poluição do ar e ainda possui impacto sobre a cadeia de suprimento de energia de biomassa (Bo et al., 2020).

Outros autores associam os incêndios florestais a impactos negativos nos parâmetros e estrutura do solo, inclusive ao nível da matéria orgânica. É importante referir que o tipo

de danos e impactos de um incêndio florestal no solo, depende entre outros fatores, da intensidade do incêndio, da estrutura do solo e ainda o dimensionamento das partículas do solo (Jiménez-Morillo et al., 2016).

Outro fator importante de referir é o carbono, um elemento associado ao aquecimento global, e dos gases de efeito de estufa, e que nas últimas décadas têm sido investidos uma grande parte de recursos na procura de soluções que visem aumentar a eficiência do sequestro e armazenamento do mesmo, no entanto esta prática a nível tecnológico é muito dispendiosa, e como tal a melhor forma até hoje é o sequestro e o armazenamento de carbono por meio de plantas (Onyeaka et al., 2021).

Dentro do leque de soluções biológicas (plantas), um estudo elaborado por (Onyeaka et al., 2021), realça a utilização de microalgas como agente de sequestro e armazenamento de CO₂. Estas microalgas parece apresentar uma boa aptidão para reciclar valores de CO₂ que são produzidas por centrais elétricas, transportes e decomposição de matéria orgânica.

Dentro do processo de produção de biomassa existe um processo denominado de pirólise no qual a biomassa é exposta a grandes temperaturas e colocada na ausência de oxigênio de forma a decompor a matéria orgânica em componentes básicos no estado líquido, gasoso ou sólido, sendo por isso um processo essencial na produção de biomassa (Ramalingam et al., 2020).

Estudos procuraram introduzir a vargem de fruto da espécie “Gulmohar delouix”, de forma que neste processo, fosse produzido bio óleo (Ramalingam et al., 2020).

Foram ainda efetuados estudos unicamente projetados para criar cadeias de valor bio circulares para a conversão de biomassa residual baseado em painéis de fibra isolante, úteis para eficiência energética (Bossu et al., 2023).

3.2.2. Técnicas de Detecção Remota para estimativa de Biomassa

A biomassa viva acima do solo desempenha uma importante função na dinâmica global do carbono, sendo por isso estimar quer espacial quer temporalmente a sua quantificação uma prática muito relevante.

No entanto estimar esta biomassa não é de todo fácil e pode ser bastante desafiador quando esta é de estrutura menor e ocupe uma cobertura do solo escassa.

No decorrer dos dias de hoje e com o avanço da tecnologia vão sendo já várias as formas de se estimar biomassa acima do solo de forma remota, no entanto algo comum à maior

parte delas é a inclusão e cruzamento de dados de campo com dados provenientes de sensores tais como o GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*) ou de tecnologias como dados LiDAR.

Aplicando classificadores preditivos como o Random Forest a dados provenientes de sistemas de detecção remota podem ajudar a treinar e validar modelos (Campbell et al., 2024).

As tecnologias de determinação de biomassa acima do solo são a cada dia mais refinadas, sendo até mesmo possível mapear com precisão a biomassa viva acima do solo (AGB) das culturas agrícolas (Suwanlee et al., 2024).

Ao se falar de biomassa inevitavelmente o conceito de incêndios florestais é mencionado por existir de facto uma relação entre estes dois fatores, no entanto utilizando medições de campo e aplicando técnicas de detecção remota é possível avaliar os impactos dos pós incêndio e até mesmo identificar eventuais padrões de recuperação de zonas de floresta.

Autores sugerem que a integração de bandas espectrais bem como métricas texturais provenientes de dados multiespectrais pode auxiliar no mapeamento dos efeitos do fogo e das dinâmicas de recuperação florestal (Tesda et al., 2024).

Estudos efetuados por (Altarez et al., 2024) indicam que florestas tropicais de montanha (TMF) são amplamente ricas em biomassa acima do solo, descrevendo-as ainda como locais com elevado potencial de sequestro de carbono, contudo ainda não existem estudos para sustentarem tal declaração.

Os autores deste estudo procederam à utilização de dados de campo através de métodos de colheita não destrutivos, intercetando-os com dados provenientes de satélite (Sentinel-1 e -2, assim como dados biofísicos e técnicas de “machine learning” para obter valores mais precisos.

Para ajudar a melhorar ainda mais este modelo preditivo os autores contaram ainda com o apoio de índices vegetativos tais como (NDVI e LAI), assim como os fatores, FAPAR FCOVER e a própria elevação do terreno.

Outros estudos para estimar biomassa acima do solo mencionam a dificuldade de estimar a biomassa acima do solo em áreas de pastagem principalmente devido às grandes dificuldades em serem perceptíveis os estados fisiológicos das folhas através da detecção remota (H. Li et al., 2024).

Ainda os autores (H. Li et al., 2024) desenvolveram um modelo assente $AGB = \text{massa foliar por área (LMA)} * \text{índice de área foliar (LAI)}$, bem como a realização de uma análise de regressão e “machine learning”.

Os índices de vegetação são usualmente utilizados para estimar a biomassa acima do solo pois são altamente capazes de capturar informações espectrais, contudo desvalorizam um pouco a estrutura tridimensional da canóia assim como as relações espaciais dos pixels.

Outro método para estimar biomassa acima do solo dentro do panorama da deteção remota é a utilização de veículos não tripulados (VANTs) sendo estimados por disponibilizarem um rápido desempenho, não é um equipamento destrutivo e quando se trata de múltiplas parcelas o custo pode ser considerado baixo (Dhakal et al., 2023).

Na literatura é possível encontrar autores que sugerem que a biomassa acima do solo é um indicador ecológico da saúde e produtividade das pastagens, assim como permite também ter uma estimativa do carbono armazenado na vegetação. É por isso um fator que deve ser monitorizado de forma sazonal (Rapiya et al., 2023).

Uma das formas utilizadas para monitorizar os ecossistemas florestais e avaliar o seu potencial/armazenamento de carbono é a obtenção de estimativas da altura da canóia das espécies florestais.

Autores publicam cada vez mais literatura de forma a aperfeiçoar e avaliar a eficácia de diferentes técnicas de deteção remota para estimar a altura da canóia como o caso do autor (Pinza-Jiménez & Garcés-Gómez, 2023), que a partir de dados de campo e levantamento de dados LiDAR junto com índices vegetativos avaliaram a precisão deste tipo de modelos.

O Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI), desenvolvido pela NASA, é utilizada como uma forma de aceder a dados importantes para a avaliação da altura da canóia através de séries temporais de resolução média. Em todos os casos é sempre conveniente proceder a uma validação de campo, contudo nem sempre é possível, no entanto a não realização deste procedimento não compromete a utilidade de dados provenientes do GED. Os dados do GEDI têm exibido potencial para aprimorar modelos de altura e são importantes para a gestão florestal (Pinza-Jiménez & Garcés-Gómez, 2023).

A integração de dados de LIDAR e radar de abertura sintética (SAR) são também considerados eficazes na hora de proceder a uma avaliação de um modelo da altura da

canópia. Dados do sensor ALOS PALSAR-2, que geram diversos índices polarimétricos, são particularmente úteis para detetar texturas e melhorar a exatidão dos modelos de altura do dossel.

Existem diversos métodos de avaliação da biomassa da vegetação, o(s) autores (Malik et al., 2024) para avaliarem este fator recorreram ao uso de uma equação alométrica, bem como o levantamento de dados numa parcela de 30 x 30 m², tendo realizado ainda uma extrapolação de dados de stock de carbono acima do solo através de modelos de regressão linear bem como cálculos de NDVI proveniente do tratamento de imagens satélite.

Nesse mesmo estudo os autores constataam que as mudanças no uso e cobertura do solo possuem um impacto direto no potencial de stock de carbono acima do solo.

Na literatura alguns autores defendem que a biomassa proveniente dos “sub-bosques” exerce um papel fundamental nas florestas, e que a caracterização da biomassa viva e morta presentes nestas áreas são determinantes para a descrição e estimativa do combustível natural, assim como perceber determinados processos de ecossistemas (Cova et al., 2023).

Um método diferenciado, mas que possui uma precisão elevada de estimar este tipo de fatores (biomassa), é a fotogrametria de curto alcance que se baseia na estrutura a partir do movimento na qual fotografias são sobrepostas para criar uma nuvem de pontos. Um dos pontos característicos desta tecnologia é o seu curto alcance e os seus equipamentos de elevado custo.

Os autores mencionam ainda que a medição utilizando a fotogrametria não difere muito das medidas obtidas em campo tendo chegado a relações muito positivas entre estes dois fatores (Cova et al., 2023).

Ainda o mesmo estudo sugere que as medidas estruturais obtidas por a Nuvem de Pontes proveniente da fotogrametria possuem um bom desempenho em modelos preditivos de biomassa.

Com a modernização das tecnologias e os seus avanços no campo da deteção remota, nas plataformas de nuvem e “machine learning” permitem a aquisição de dados importantes presentes numa parcela de terreno, como a estimativa da idade da parcela ou até a altura da canópia (X. Li et al., 2023).

Com as alterações climáticas a ser tema de discussão um pouco por todo o mundo e as preocupações com a sua intensificação a serem cada vez maiores, já existem estudos a prever quais as alterações das paisagens que podem acontecer no futuro, bem como prever a densidade de biomassa acima do solo para os diferentes cenários climáticos como o RCP 4.5 e 8.5.

Autores como (Ferreira et al., 2023) realizaram estudos neste âmbito, sendo que os seus modelos projetam um aumento em torno dos 8.5% no stock total de carbono, e ainda que 76.9% da Mata Atlântica do Brasil possui boa aptidão para aumentar a biomassa acima do solo até 2100, tendo o cenário 4.5 como referência e considerando a ausência de desmatamento.

Ainda os mesmos autores sugerem nesse estudo que as áreas com maior probabilidade de sofrerem perdas de biomassa acima do solo mais abruptas encontram-se entre as latitudes 13° e 20° sul.

Existe também literatura que consiste em melhorar a precisão de modelos tendo como base imagens do Sentinel-2, melhorando a sua precisão, foi isso mesmo que os autores (Madhuanand et al., 2023) fizeram. O estudo consistiu na utilização de uma abordagem inovadora utilizando um modelo autoencoder variacional (VAE), como forma de aumentar a qualidade preditiva das imagens Sentinel-2.

Ao utilizar este modelo (VAE) caracterizado por estudar e aprender a distribuição estatística de dados de entrada de forma que na consequência do processo, este seja mais regenerativo e plausível, os autores apresentam uma nova abordagem que pode ser utilizada e consequentemente melhorada de forma a avaliar biomassa acima do solo entre outros fatores ambientais.

Ter em mãos estimativas de biomassa acima do solo pode ser útil para diversos fatores, um dos quais compreender a sua variação em florestas é fundamental para quantificar de forma precisa e detalhada as emissões de carbono que consequentemente é útil para perceber o panorama das alterações climáticas.

Existem países que um dos principais fatores associados à perda de biomassa acima do solo é o desmatamento para produção de carvão e que a tendência é ainda de aumento destes valores nos próximos anos.

Perceber este tipo de alterações pode ser efetuado por técnicas de deteção remota assim como os autores (Liang et al., 2023) mencionam na sua literatura, no entanto os desafios

são grandes devido à grande variação intersazonal e a complexidade de estrutura dos ecossistemas.

Dependendo da localização dos autores a fonte das imagens satélite pode variar, sendo as mais comuns provenientes dos satélites Landsat-8 e Sentinel-2, sendo que apesar de ambas poderem ser utilizadas para o mesmo propósito o seu tratamento é um pouco diferente visto que existem algumas mudanças ao nível das bandas espectrais entre um e outro.

O satélite Landsat-8 opera com um período de revisita de 16 dias e oferece ao usuário uma gama de bandas espectrais com diferentes resoluções espaciais, tendo as bandas de 1 a 7 e 9 uma resolução espacial de 30 metros, e a banda 8 uma resolução de 15 metros. Por outro lado, o satélite Sentinel-2 opera com 4 bandas com uma resolução de 10 metros, 6 de 20 metros e 3 de 60 metros.

A partir do processamento e tratamento das bandas espectrais que se encontram nestas imagens é possível calcular índices de vegetação bem como outras variáveis biofísicas (Chinembiri et al., 2022).

O sensor MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) da NASA integra um elemento fundamental no sistema de observação ótica multiangular em séries temporais de longo prazo atuando à escala global. Este sensor é também ele sensível àquilo que é a estrutura tridimensional de uma floresta podendo ser utilizado para estimar variáveis estruturais da floresta, inclusive a biomassa acima do solo, no entanto não é uma metodologia muito utilizada (Cui et al., 2022).

Um estudo efetuado por (Cui et al., 2022) em que consistiu em analisar a eficácia das reflectância em ângulos atípicos reconstruídas pelo MODIS, demonstra que reflectância multiangulares com um número de sombras menores permitem obter estimativas de biomassa acima do solo mais precisas. Outro dado interessante proveniente deste estudo foi a conclusão que a reflectância em ângulos típicos do MODIS na banda NIR é mais sensível e preciso à biomassa acima do solo.

A relação entre a estimativa de biomassa acima do solo e as zonas de pastagem têm sido um tanto quanto complicadas, sendo a detecção remota um dos caminhos encontrados para tentar descomplicar esta relação.

Autores como (Wang et al., 2022) têm estudado este tipo de relação e desenvolvido modelos com ajuda de classificadores preditivos como o Random Forest (RF) de forma a aumentar a precisão dos modelos atuais.

É fundamentalmente importante utilizar abordagens assentes em deteção remota com o intuito de avaliar a degradação e o estado dos ecossistemas de maneira a se proceda à restauração dos mesmos de forma mais competente (Fremout et al., 2022).

A deteção remota é também reconhecida por a sua capacidade de perceber informações pertinentes e confiáveis à cerca do crescimento de culturas numa ampla escala, fazendo com que seja possível desenvolver estratégias mais eficientes quer ao nível de colheita de produtos, quer ao nível de suprimentos alimentares, além de ser possível gerir de forma mais eficiente os recursos hídricos (Servia et al., 2022).

Atualmente devido ao programa Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) da NASA, é possível produzir estimativas de forma precisa à cerca da densidade da biomassa acima do solo das florestas, em particular por causa da recolha de dados LiDAR na forma de onda completa.

Estes tipos de dados têm sido utilizados visando o ponto de vista científico (Duncanson et al., 2022)

Em determinados países os dados provenientes de deteção remota são de tal importância que já são utilizados em conjunto com dados de inventários florestais nacionais, exemplo disso é um estudo desenvolvido por (Guerra-Hernández et al., 2022) que cruza dados de deteção remota com dados provenientes do 4º Inventário Florestal Nacional de Espanha com o intuito de desenvolver um modelo preditivo de variáveis do próprio inventário florestal, como o Volume Total Sobre Casca (V), a Área Basal (G), o incremento anual no volume total (IAVC)) e a biomassa acima do solo (AGB) para os principais estratos florestais.

Os autores mencionam que o desempenho do inventário possui influencias derivadas da escala espacial e da estrutura da vegetação.

Estudos mostram ainda que é possível utilizar tecnologia LiDAR como uma ferramenta útil para estimar a biomassa do tronco, bem como a biomassa do tronco sem casca, como é o caso de um estudo efetuado por (Georgopoulos et al., 2021) que estima precisamente este fator ao cruzar dados LiDAR com medidas de campo destrutivas e não destrutivas para desenvolver duas equações alométricas.

Na detecção remota é possível obter dados por varredura a laser aérea (ALS) ou através de satélite, sendo que ambos apresentam características distintas, com os dados provenientes de (ALS) que permitem realizar modelos precisos de estimativa de biomassa acima do solo, contudo possui uma extensão espacial e temporal limitada, por outro lado dados provenientes de satélite permitem uma maior cobertura espacial e temporal, no entanto pode ser um pouco mais difícil de vincular a biometria da vegetação devido à sua resolução espacial e ainda devido à sua incerteza posicional (Campbell et al., 2021).

A Produtividade Primária Bruta (PPB) é de grande importância para perceber melhor as interações e funções dos ecossistemas, bem como o ciclo de carbono, como tal existem esforços científicos para se proceder à estimativa deste tipo de fator com base na detecção remota, como demonstram os autores (X. Li et al., 2021) ao tentar desenvolver um modelo preditivo para prever o estado da PPB, com base em dados provenientes do ECOSTRESS (Ecosystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station), programa que observa a temperatura da superfície terrestre.

Com o desenvolvimento das tecnologias de detecção remota e com o desenvolvimento de novos satélites, têm também surgido estudos de forma a perceber a sensibilidade de Índices de Vegetação como o NDVI, SAVI, DVI e EVI2 perante a biomassa de forma a diminuir ainda mais as incertezas, bem como refinar modelos preditivos (Adamu et al., 2021).

Capítulo 4. Metodologia

Este trabalho tem como objetivo estimar a biomassa florestal acima do solo (AGB), objetivo suportado por uma metodologia que considera variáveis ambientais e índices provenientes de detecção remota reunidos em modelos espacialmente explícitos. Para tal este estudo divide-se em 3 fases principais:

- Fase I: Desenvolvimento de cartografia de ocupação do solo para o ano de 2022 e de 2024.
- Fase II: Elaboração de um modelo de altura da canópis para o período de referência 2022 e 2024.
- Fase III: Desenvolvimento de um modelo preditivo para aferir a quantidade de biomassa acima do solo para 2024 com dados de referência de 2022.

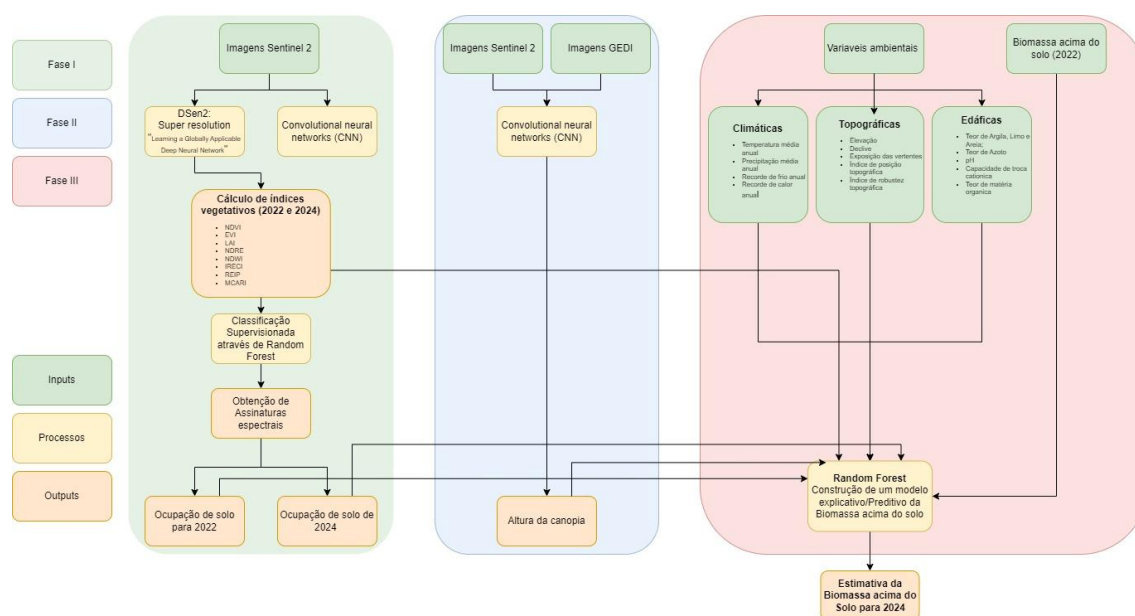


Figura 4-1. Fluxograma da metodologia aplicada.

4.1. FASE I: Desenvolvimento de cartografia de ocupação do solo.

4.1.1. Recolha e tratamento das imagens Sentinel-2

Na fase I o objetivo passou por desenvolver cartografia de ocupação do solo para o ano de 2022 e para 2024, com base em imagens Sentinel L2-A. As imagens satélites utilizadas no decorrer deste estudo são provenientes do Programa de Observação da Terra “Copernicus”, programa nativo da União Europeia focado em serviços como o ambiente,

a atmosfera, o meio marinho, o meio terrestre, as alterações climáticas, segurança e emergências, para além deste tipo de serviços cobre ainda temáticas como a saúde e a energia.

Este programa destaca-se por ser de utilização livre e fornecer dados abertos com uma informação multiespectral de resolução espacial de diferentes medidas, categorizadas em três níveis de resolução espacial, a 10, 20 e 60 metros, tendo sido aplicado um filtro ao proceder à procura das imagens, ao restringir a busca a somente imagens do Tipo L2-A, que são caracterizadas por possuir uma correção atmosférica.

As imagens foram ainda submetidas a um filtro de cobertura de nuvens, ou seja, de percentagem de nuvens a que a imagem está sujeita, tendo sido seleccionadas apenas imagens com percentagem de nuvens até 10%. O período temporal compreendido entre as imagens data o período temporal de 12 a 18 de Agosto de 2022 e de 2024.

4.1.2. Harmonização das imagens

A resolução espectral das diferentes bandas que compõem as imagens é um aspeto de grande importância na hora de proceder à classificação assistida e para garantir que esta resolução usufrua da melhor homogeneização possível as imagens foram submetidas a um pré processamento por meio do ambiente virtual/software Dsen2, um algoritmo de alta resolução com capacidade de uniformizar a resolução espectral das bandas para uma resolução espectral de 10 metros por meio de uma rede neuronal de “deep learning”.

Este modelo através da aplicação de redes neurais convulsionais percebe os padrões das diversas bandas espectrais de cada imagem assim como a textura espacial da mesma, fazendo com que as CNN funcionem como um modelo de regressão, de forma que os blocos de baixa resolução passem para blocos de alta resolução permitindo assim melhorar de forma considerável a qualidade das imagens sem comprometer ou aumentar o grau de erro da informação que cada uma contém.

Para este estudo foi selecionado este algoritmo pois quando comparado com outro tipo de modelos dentro do mesmo âmbito, o DSen2 possui uma eficácia preditiva maior, conseguindo reduzir o erro do quadrado médio das suas predições em pelo menos 50% em relação aos outros modelos.

O DSen2 foi essencialmente projetado para “projetar” as imagens com tamanho de pixel de 20 metros para 10 metros, assim como as bandas com tamanho de 60 metros para 10 metros.

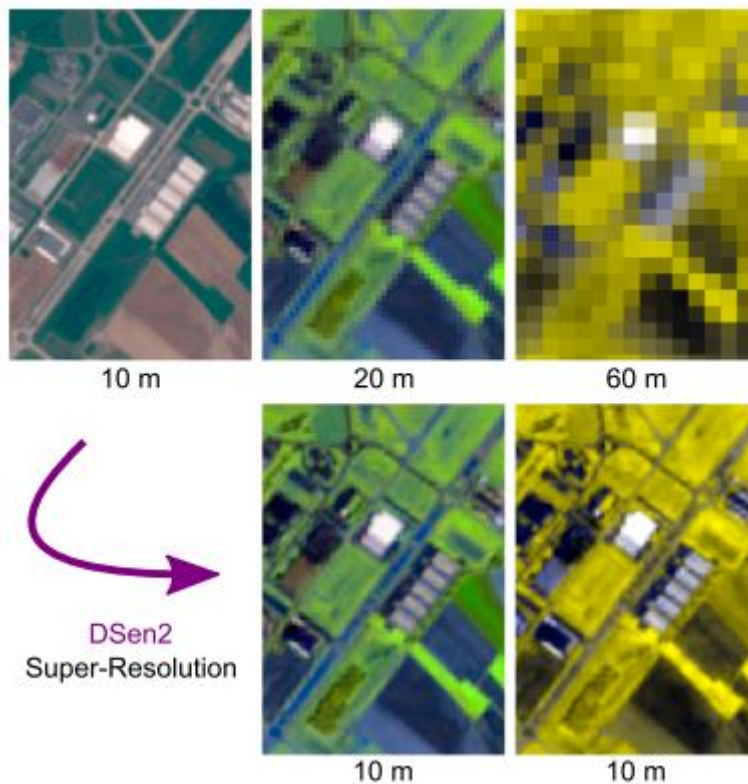


Figura 4-2. Imagem adaptada de: Lanaras et al., 2018.

4.1.3. Cálculo de índices vegetativos

As variáveis espectrais englobam os índices de vegetação que na sua essência não são mais do que algoritmos com base na matemática e na detecção remota que avaliam e proporcionam uma caracterização da cobertura vegetal com base na sua reflectância.

Estes tipos de índices utilizam-se em diversas áreas como a interpretação/acompanhamento da cobertura vegetal do solo de uma determinada região, estimativas de biomassa, alterações de nutrientes nas plantas entre outros.

Tabela 3. Índices Vegetativos utilizados.

Índice	Significado	Descrição	Fórmula específica
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index	Realça as diferenças da vegetação através da fotossíntese. O NDVI varia entre -1 e +1. Quanto maior o valor do NDVI maior o vigor de vegetação.	$\frac{b8 - b4}{b8 + b4}$
EVI	Enhanced Vegetation Index	Considera as bandas do vermelho, do infravermelho e utiliza a banda do azul para minimizar as influências atmosféricas no índice. Distingue as diferenças das copas das árvores, estrutura, arquitetura e fisionomia.	$2.5 + \frac{b8 - b4}{b8 + (6 * b4) - (7.5 * b2) + 1}$
LAI	Leaf Area Index	LAI, também conhecido como índice de área foliar é um índice específico para analisar as folhas, no entanto possui a particularidade de poder ser utilizado à escala da planta individual, ou de uma determinada região, sendo um índice bastante versátil.	$a \cdot NDVI + b$
NDRE	Normalized Difference Red Edge	Mede a atividade de clorofila presente nas folhas, contudo o NDRE é mais sensível que o NDVI num certo período de maturação.	$\frac{b9 - b5}{b9 + b5}$
NDWI	Normalized Difference Water Index	O propósito do NDWI varia um pouco em relação aos restantes índices pois ele procura demonstrar os locais com corpos de água, contando para isso com a combinação de bandas do infravermelho próximo e o verde visível.	$\frac{b3 - b8}{b3 + b8}$
IRECI	Inverted Red Edge Chlorophyll Index	É um algoritmo que por sua vez incorpora a reflectância em quatro bandas do espectro de forma a perceber e estimar o conteúdo de clorofila da canópia.	$\frac{b7 - b4}{b5/b6}$
REIP	Red Edge Inflection Point	O Índice do Ponto de Inflexão do Red Edge foi concebido para a sua utilização na estimativa da biomassa e na absorção de azoto.	$700 + 40 \times \frac{(b4 + b7)/2 - b5}{b6 - b5}$
MCARI	Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index	O MCARI fornece uma medida de profundidade de absorção de clorofila e é muito sensível a variações nas concentrações da clorofila	$((b5 - b4) - 0.2 * (b5 - b3) * (\frac{b5}{b4}))$

4.1.4. Marcação de Áreas de Treino

Para iniciar o processo de “marcação” de “Áreas de Treino” foi obtida e tratada devidamente a COS 2018 disponibilizada pela Direção Geral do Território (DGT). Para tal delimitou-se a área de estudo (Ponte de Lima), e através dos seus múltiplos níveis de informação constatou-se efetivamente os locais onde estão presentes cada classe, destacando mais as áreas florestais e principalmente as espécies florestais arbóreas inseridas nessas mesmas áreas.

A partir deste ponto foram “desenhados” uma série de polígonos correspondentes a cada espécie florestal presente no Nível 4 da COS de forma a aprimorar o treino do modelo e transmitindo informações de pixéis mais detalhadas.

No total só da parte florestal foram realizadas áreas de treino para oito espécies florestais, tendo sido incluída neste lote a classe “matos”, por se considerar relevante o seu potencial de biomassa florestal residual.

Áreas ocupadas com culturas como a vinha e pomares, foram também consideradas devido ao seu potencial de gerar valor de biomassa residual principalmente na época do ano em que ocorre a prática das podas.

Foram ainda marcadas áreas urbanas e outras áreas de ocupação do solo relevantes para treinar o modelo e de forma a obter um resultado mais coerente e assertivo, tal como o Tabela 4 abaixo apresentado demonstra ao apresentar as Áreas de Treino criadas para treinar o classificador.

Tabela 4. Áreas de Treino (COS 2018).

Nr	Classe
1	Pinheiro Bravo
2	Agricultura
3	Temporárias de sequeiro e regadio
4	Pastagens
5	Urbano
6	Água
7	Rocha Exposta
8	Solo

9	<i>Acacia Delbata</i>
10	Matos
11	Eucalipto
12	<i>Acacia Melanoxylon</i>
13	Castanheiro
14	Outras Folhosas
15	Outras Resinosas
16	Outros Carvalhos
17	Pinheiro Manso
18	Pinheiro Bravo

A cada classe foi atribuída um número de identificação único e que permite nas modelações saber a que classe cada pixel corresponde (Tabela 4).

O número efetivo das áreas de treino varia em função da sua representatividade no território e na COS 2018, sendo que a área é um fator que têm grande influência ao treinar o modelo, no entanto uma classe por ter uma área relativamente “baixa” de áreas de treino não quer dizer que não tenham sido marcadas tantas áreas de treino como as de maior área.

Foram marcadas algumas áreas do Nível 1 da COS de forma a transpor um pouco mais o plano real para o virtual e para que o modelo classifique as áreas com o menor grau de incerteza possível.

4.1.5. Classificação assistida pelo classificador Random Forest

Uma vez calculados os índices vegetativos e demarcadas as áreas de treino correspondentes a cada classe, foi então efetuada uma classificação supervisionada através do classificador “Random Forest”.

A classificação supervisionada pode ser descrita como sendo um processo de atribuição de classes a um conjunto de dados raster, sendo para isso necessário que uma pessoa interprete uma imagem satélite e defina um conjunto de “áreas de treino” e as defina em classes que por sua vez compartilhem o máximo de semelhanças a nível espectral.

Para realizar a classificação assistida foi utilizado o software “Rstudio”, um ambiente de desenvolvimento controlado (IDE), que possui uma vasta lista de ferramentas de linguagem em “R” e em “Python”.

Foi instalado devidamente o “Random Forest” “Package”, que contém o algoritmo de classificação “Random Forest”, bem como outros pacotes de algoritmos necessários à execução normal do classificador. O output final derivado desta classificação foi uma “Carta de uso e ocupação do solo”, superior aos instrumentos de gestão territorial atuais, pois encontra-se mais atualizado.

O classificador Random Forest na sua essência é “uma combinação de “árvores preditoras”, em que cada árvore depende dos valores de um vetor aleatório designado de forma independente e com a mesma distribuição para todas as árvores da floresta”, sendo que o erro geral para as florestas converge quase certamente para um limite à medida que o número de árvores na floresta aumenta”, tal como o seu desenvolvedor Leo Breiman explica no seu artigo “Random Forests” do ano de 2001 (Breiman, 2001).

Essencialmente o Random Forest é um modelo que funciona com base em três processos sendo eles, a “Amostragem Bootstrap”, a “Divisão de Nós” e a “Predição”, estando descritos na forma de síntese no fluxograma abaixo apresentado.

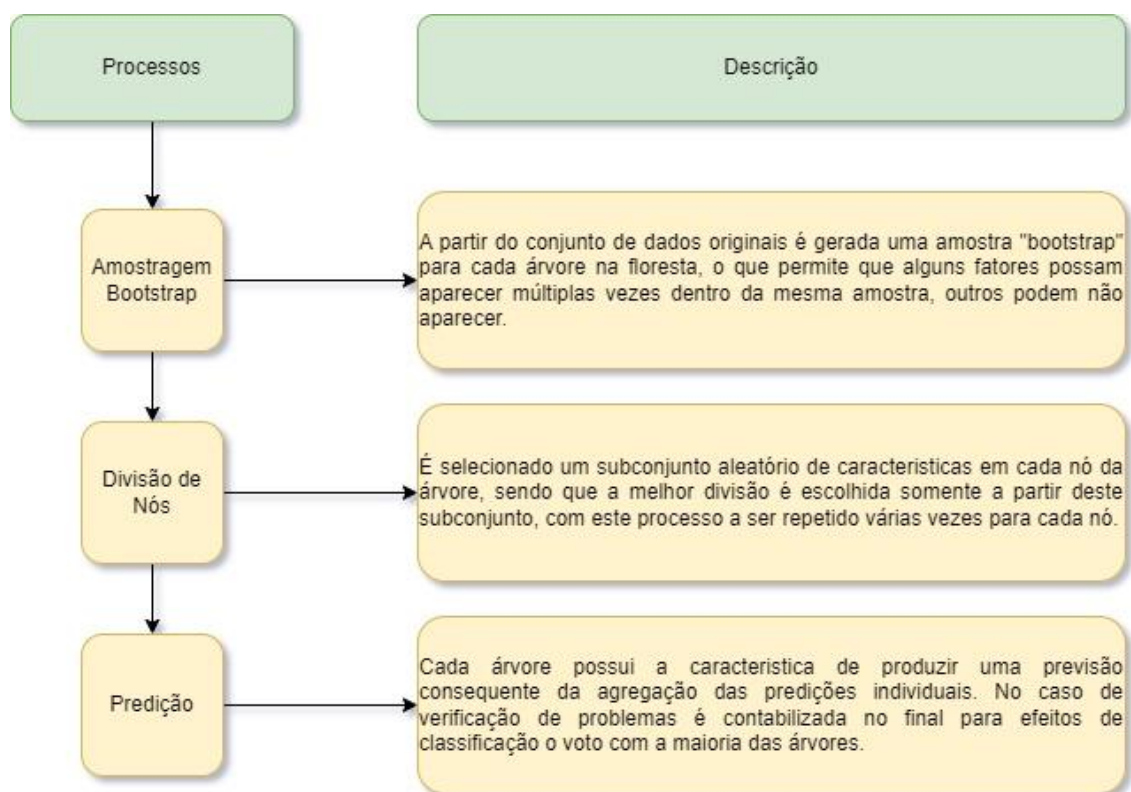


Figura 4-3. Processamento do classificador "Random Forest".

Este classificador por constituir o processo de árvore de decisão é mais eficiente do que os classificadores de estágio único. Os classificadores de árvore de decisão também são conhecidos como classificadores de múltiplos níveis (Kulkarni & Lowe, n.d.).

O classificador Random Forest processa os dados de entrada, como as áreas de treino, utilizando uma rede de árvores de decisão preditoras. Cada árvore na floresta toma decisões sobre a classificação dos pixels com base na sua composição espectral e à medida que o classificador passa por múltiplas árvores de decisão, os pixels são agrupados e classificados nas classes que mais se assemelham, permitindo uma classificação robusta e precisa.

Para que esta etapa seja concluída da forma mais criteriosa possível é necessário garantir uma boa homogeneidade de áreas de treino assim como garantir que estas estão de acordo com a sua cobertura de solo real.

4.2. FASE II: Modelo da Altura da Canópia

No seguimento da revisão de literatura relacionada com a temática da biomassa a opção encontrada e com melhor enquadramento face a este estudo foi um método desenvolvido pelos investigadores Nico Lang, Walter Jetz, Konrad Schindler & Jan Dirk Wegner e abordado no seu artigo “A high-resolution canopy height model of the Earth”.

Com a aplicação deste modelo é possível obter uma visão mais aprofundada do estado das florestas do território e de perceber ainda o grau de erro atribuído à altura das árvores.

O modelo da altura da canópia consiste em utilizar um conjunto de redes neurais convolucionais profundas (CNN) e imagens GEDI para transformar imagens óticas Sentinel-2 em mapas com informação relativa à altura da canópia das árvores.

As CNNs (Convolutional Neural Networks) são essencialmente um tipo de modelo utilizado na interpretação de imagens de satélite. Elas são projetadas para aprender automaticamente padrões complexos e características relevantes nas imagens, o que as torna úteis para a deteção e classificação de objetos, incluindo tipos de cobertura do solo e características da vegetação.

Estes meios são utilizados como referência para treinar e validar modelos que procuram estimar a altura da copa das árvores, ainda que sendo mais aconselhado estimar este tipo de dados nas estações de Primavera/Verão.

Durante o processo de treino é otimizado apenas pixels de referência válidos, no entanto o modelo gera uma previsão de altura para todos os pixels de entrada. As CNN utilizam imagens Sentinel-2 e coordenadas geográficas codificadas como entrada para estimar a altura da canópia das árvores e a sua incerteza preditiva.

Ainda que o modelo tenha uma alta capacidade preditiva e produza estimativas com baixo erro no seu geral, a incerteza destas estimativas geralmente não é bem conhecida ou é irrealisticamente baixa, no entanto o modelo ainda assim é confiante e credível.

Para diminuir a incerteza relacionada ao erro são integradas técnicas probabilísticas de “deep learning”, projetadas para quantificar a incerteza preditiva, levando em consideração o ruído inevitável nos dados de entrada e a incerteza dos parâmetros do modelo resultante da falta de dados de referência para determinadas condições.

Numa fase final, as incertezas aleatórias estimadas são usadas para combinar previsões redundantes de diferentes datas de imagem por meio de uma média ponderada proporcional ao inverso da variância. Embora o peso inverso da variância seja conhecido por produzir o menor erro esperado, no modelo é observado uma deterioração na calibração da incerteza para valores baixos.

Este modelo foi calculado para o ano de 2022 e 2024 respectivamente e foram gerados dois outputs, onde é possível observar a variação do estado da vegetação no que à altura da canópia das árvores diz respeito.

4.3. FASE III: Desenvolvimento de um Modelo Preditivo de Biomassa para aferir a quantidade de biomassa acima do solo.

4.3.1. Biomassa acima do solo

O propósito da última fase deste estudo é dar resposta às questões inicialmente mencionadas no segundo capítulo passando por criar um modelo preditivo da disponibilidade da biomassa para o ano 2024 a partir de dados de 2022, de forma a perceber as zonas com maior potencial de explorabilidade, assim como estimar de forma quantitativa este recurso.

O modelo consiste na estimativa de biomassa com base em múltiplas variáveis ambientais, fisiográficas, climáticas, parâmetros do solo e ainda variáveis espectrais nomeadamente subprodutos derivados de imagens satélite.

Uma vez procedida à consulta de literatura e referências optou-se por utilizar para a previsão do modelo o algoritmo Random Forest devido à sua capacidade e competência em dar resposta ao grande número de dados de entrada, bem como a sua capacidade de detetar padrões e relações entre eles.

Os dados de entrada referentes à biomassa acima do solo foram obtidos por meio do Center for Environmental Data Analysis, referentes ao ano de 2021, mas adaptado a uma imagem satélite de 2022, e as suas variáveis todas elas referentes ao período temporal da imagem satélite (2022). Esta metodologia é sustentada por meio de cruzamento de dados de múltiplos sensores e equipamentos tais como os satélites ALOS-2 e Sentinel-1 através de dados de radar de abertura sintética (SAR) em comprimentos C e L, assim como dados LiDAR através do equipamento GEDI, que têm como função obter leituras à cerca da quantidade de folhagem e material lenhoso acima do solo ao longo de um determinado período (Santoro, 2023).

Uma vez conseguido o resultado deste dados, estes foram submetidos a um processo de validação por meios aéreos e terrestres de forma garantir uma boa qualidade e uma estimativa o mais próximo do plano real.

Com este tipo de informação são múltiplas as vertentes para que podem ser utilizados, desde a estimativa de biomassa para diferentes períodos temporais, bem como analisar e compreender melhor o ciclo do carbono ou até aprofundar o conhecimento atual à cerca das alterações climáticas.

4.3.2. Variáveis utilizadas no modelo preditivo

No decorrer deste estudo foi necessário transpor ao máximo o plano “real” para o “virtual”, tendo sido por isso recorrido à utilização de variáveis organizadas em quatro grupos: Espectrais, Climáticas, Fisiográficas e Edáficas, sendo compostas por múltiplas sub variáveis tais como as apresentadas na Tabela 5 abaixo inserida.

Tabela 5. Fontes e resoluções das variáveis utilizadas.

	Variável	Fonte	Resolução
Espectrais	NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada)	ESA Copernicus	- 10m
	Altura da Canópia (GCHM)	ESA Copernicus	- 10m

	EVI (Índice de Vegetação Aprimorado)	ESA Copernicus	- 10m
	NDPI (Índice Diferencial Normalizado da Plantação)	ESA Copernicus	- 10m
	IRECI (Índice Red Edge Chlorophyll)	ESA Copernicus	- 10m
Climáticos	HSI (Índice de Stress Hídrico)	Climate-EU	1000m
	WFR (Recorde Geada no Inverno)	Climate-EU	1000m
	Temperatura Média Anual (TEMP_MED)	Climate-EU	1000m
	Precipitação Média Anual (PPT_MED)	Climate-EU	1000m
	Modelo Digital de Elevação (SRTM)	USGS	25m
Fisiografia	Declive (Slope)	USGS	25m
	Aspecto (Aspect)	USGS	25m
	Índice de Posição Topográfica (TPI)	USGS	25m
	Índice de Rugosidade Topográfica (TRI)	USGS	25m
	Teor de Argila (Clay)	ESDAC	500m
Edáficos	Teor de Limo (Silt)	ESDAC	500m
	Teor de Areia (Sand)	ESDAC	500m
	pH do Solo (PH)	ESDAC	500m
	Capacidade de Troca Catiônica (CEC)	ESDAC	500m
	Azoto (N)	ESDAC	500m
	Capacidade de Água Disponível (AWC)	ESDAC	500m

As variáveis foram obtidas de diferentes entidades e com diferentes resoluções tal como é mencionado na Tabela 5 acima apresentada. A resolução espacial neste estudo é 10 x 10 metros, logo as variáveis que não cumpram este requisito foram naturalmente submetidas a um processo de correção de tamanho de pixel.

As variáveis climáticas são parâmetros que caracterizam o clima de cada região variando consoante as regiões, sendo essenciais para perceber as alterações climáticas. Para efeitos práticos foram seleccionadas as variáveis da Temperatura Média anual, Precipitação Média Anual, Recorde de geada no Inverno e Índice de Stresse Hídrico por assentarem nos princípios básicos do clima em qualquer região.

As condições tanto climáticas quanto edáficas são importantes para explicar a distribuição de plantas e são comumente utilizadas no âmbito da modelação ambiental de forma a prever a sua futura distribuição, mas também de forma a explicar a sua presença em determinados locais, ajudando a prever as suas condições de crescimento e desenvolvimento mais favoráveis (Beauregard & De Blois, 2014).

Ao mencionar variáveis fisiográficas são referidas todas as características físicas e geográficas de uma determinada região e com capacidade de afetar múltiplos processos ambientais.

Estes tipos de variáveis são responsáveis por fornecer dados afetos ao terreno, tais como a elevação, a sua cota de altura e o declive, mostrando-se ser bastante útil quando se trata de perceber fatores externos ao desenvolvimento de espécies vegetativas.

As variáveis fisiográficas podem ser consideradas em diversas escalas temporais e espaciais devido a fenômenos climáticos extremos como a alteração do relevo devido a inundações ou terremotos, no entanto em condições “normais” são variáveis que para sofrerem alterações são necessários grandes períodos temporais como séculos ou milénios (Theobald et al., 2015).

As variáveis fisiográficas são também variáveis com um vasto leque de utilização podendo ser utilizadas quer para compreender processos ecológicos atuais até prever como determinadas paisagens possam estar daqui a alguns anos (Theobald et al., 2015).

Capítulo 5. Resultados

5.1. Cartografia da Ocupação e Uso do Solo

Neste capítulo encontram-se apresentados os resultados fruto da metodologia aplicada neste estudo descrita no capítulo anterior com destaque para a presença de ferramentas presentes no software “ArcGIS Pro”, como a “Zonal Statistics as Table” que foram úteis na medida de extração de informação diretamente dos pixéis para fins de análise estatística.

O período de análise dos dados é referente ao período temporal de 2022 a 2024 (2 anos) e pretende demonstrar a evolução dos diferentes usos e ocupações do solo ao longo deste período, passando por apresentar os ganhos e perdas de área afetas a cada área de ocupação do solo.

No geral verificou-se um maior número de classes de ocupação do solo que diminuíram a sua área (9) do que as que aumentaram área (8), sendo que classes como a agricultura, as culturas temporárias ou de sequeiro e regadio, urbano, solo, *acacia melanoxylon*, castanheiro, outras folhosas e outros carvalhos aumentaram a área, e classes como o pinheiro bravo, as pastagens, a rocha exposta, a *acacia delbata*, os matos, o eucalipto, as outras resinosas e o pinheiro manso perderam área no período temporal de 2 anos.

Dentro das perdas sobressaem-se aqui duas classes o pinheiro-bravo e o eucalipto, espécies muito representativas a nível nacional e que possuem muito peso na indústria da madeira e dos seus subprodutos e que perderam sensivelmente 663 hectares de área e 178 hectares respetivamente, valores elevados ainda para mais tendo em conta o período temporal do estudo. Um dos fatores destas perdas pode ser precisamente a sua exploração excessiva assim como o planeamento de florestas de carácter produtivo com compassos de regime intensivo.

Outra perda significativa à qual deve ser prestada alguma atenção é também à classe das pastagens onde se verifica uma perda a rondar os 280 hectares e que pode ter um grande impacto para o setor da agricultura, nomeadamente para os produtores pecuários da região, bem como para a diversidade de fauna e flora local. A classe que envolve os cursos de água também viu a sua área sofrer um pequeno declínio embora pequeno comparando com as outras classes, contudo por ser um importante recurso deve ser dada maior atenção.

A *Acacia delbata* conhecida por ser uma espécie invasora já com bastante presença na região, registou um declínio de área de aproximadamente 122 hectares, um ponto positivo pois pode indicar que as medidas de combate e controlo da sua propagação podem estar a ser eficazes.

Espécies florestais classificadas como outras resinosas e o pinheiro manso viram também a sua área decrescer, no entanto não são áreas muito significativas perdendo aproximadamente 4.7 e 594 hectares de área.

As classes em que se verificou um aumento de área na sua maioria são classes afetadas a espécies florestais, com particular destaque à classe das outras folhosas onde se verificou o maior aumento de área com aproximadamente 563 hectares, um dado positivo na medida em que são plantas resilientes aos fogos e que pode auxiliar no controlo da sua propagação. A classe “outros carvalhos” viu também a sua área aumentar em praticamente 132 hectares o que indica que cada vez se está a priorizar uma maior biodiversidade de espécies florestais e florestas de conservação. A classe do castanheiro também registou um aumento embora não muito significativo (8.84 hectares).

Ao contrário da *Acacia Delbata*, a *Acacia melanoxylon* registou um aumento significativo de 30.96 hectares indicando que é preciso monitorizar e aplicar mais medidas no controlo desta espécie invasora que pode destruir a fauna e flora dos ecossistemas locais. Áreas afetadas às classes do solo aumentaram também o que pode indicar uma redução na vegetação do concelho sendo um sinal que é preciso intervir e criar condições para que não se proceda a novos aumentos deste tipo de áreas. Por outro lado a classe da rocha exposta perdeu cerca de 326 hectares.

Áreas de matos registaram uma diminuição considerável da sua área diminuindo em 2 anos 216 hectares, um dado que pode ser considerado negativo até porque pode desempenhar um papel crucial no combate e controlo de incêndios florestais.

As culturas temporárias de sequeiro e de regadio registaram um aumento da sua área demonstrando que o concelho ainda tem uma forte ligação com a prática agrícola ainda que seja de forma sazonal (461 hectares).

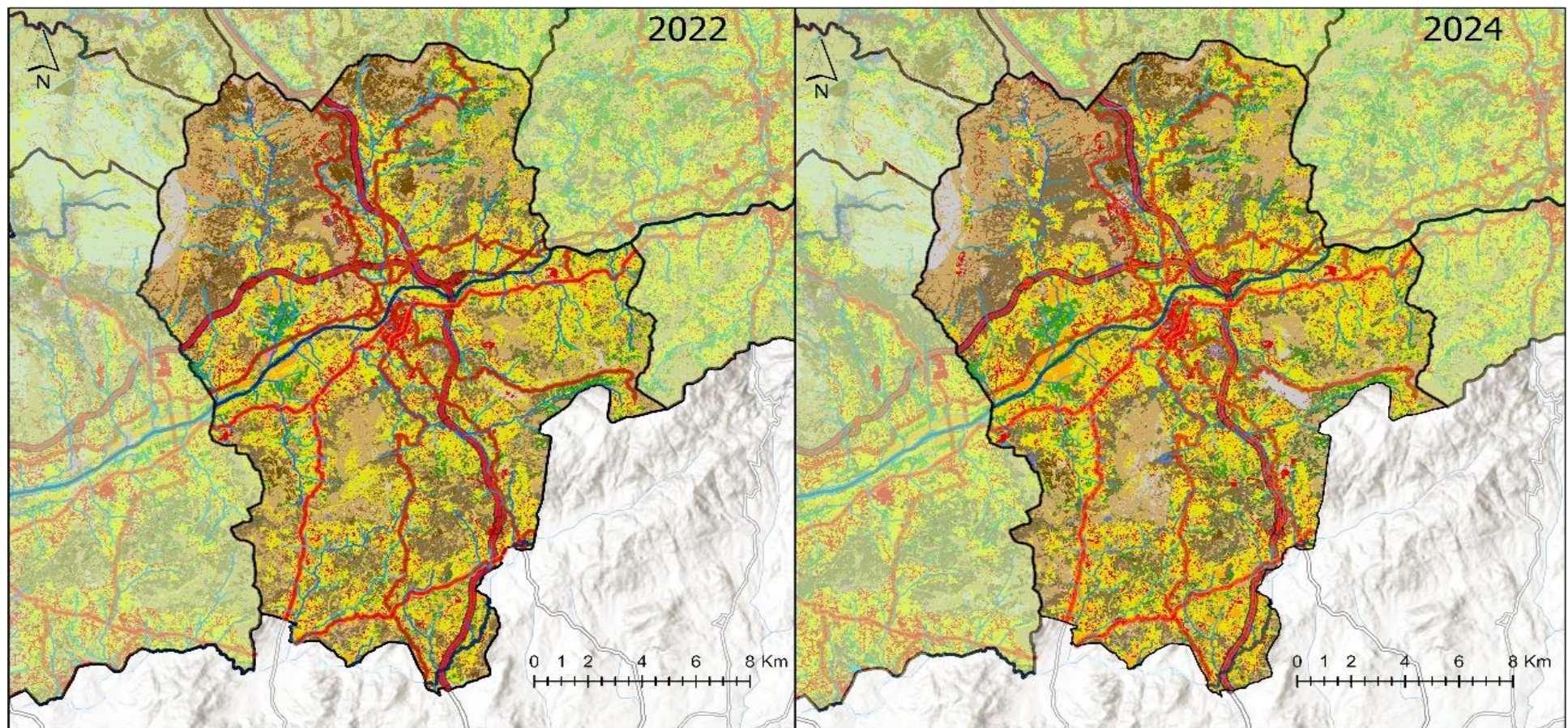
A classe urbano indica também um aumento de quase 375 hectares indicando que a população pode estar a aumentar no concelho, principalmente ao redor dos aglomerados habitacionais, dado que pode ser um bom indicador, contudo também é preciso ter em conta que para uma classe aumentar outra vai ter que diminuir pois o espaço é limitado e

os limites concelhios não mudam indicando por isso que as alterações de uso do solo apenas se transformam e não existe verdadeiramente o conceito de ganhos e perdas, apenas evolução e transformação da cobertura e uso do solo.

Tabela 6. Diferenças de Ocupação do solo para o período temporal de 2022-2024.

Evolução do uso e ocupação do solo entre 2022 e 2024			
Classe	Área em 2022(ha)	Área em 2024(ha)	Diferença entre 2022-2024(ha)
Pinheiro Bravo	1569.11	905.94	-663.17
Agricultura	10068.65	10278.61	209.96
Temporárias de Sequeiro e regadio	545.28	1007.03	461.75
Pastagens	440.09	159.98	-280.11
Urbano	2117.78	2493.04	375.26
Água	131.61	129.52	-2.09
Rocha Exposta	1829.52	1502.98	-326.54
Solo	74.09	91.7	17.61
<i>Acacia Delbata</i>	221.26	99.07	-122.19
Matos	8290.32	8073.7	-216.62
Eucalipto	4836.48	4657.83	-178.65
<i>Acacia Melanoxylon</i>	176.21	207.17	30.96
Castanheiro	4.42	13.26	8.84
Outras Folhosas	1124.28	1687.5	563.22
Outras Resinosas	17.2	12.5	-4.7
Outros Carvalhos	539.9	672.31	132.41
Pinheiro Manso	1316	722	-594
Total	33302.2	32714.14	-588.06

A Tabela 6 apresenta a área de ocupação do solo no ano de 2022 e de 2024, apresentando no seu final a diferença de ganhos e perdas de área de uso e ocupação do solo.



Legenda

- Alto Minho
- Ponte de Lima
- Linhas de Água
- Auto-estrada
- Estrada Nacional
- Estrada Regional
- Itinerário Complementar
- Ramos de Ligação

- Pinheiro Bravo
- Agricultura
- Temporárias de sequeiro e regadio
- Pastagens
- Urbano
- Água
- Rocha exposta
- Solo
- Acacia Delbata
- Matos
- Eucalipto
- Acacia Melanoxylon
- Castanheiro
- Outras Folhosas
- Outras Resinosas
- Outros Carvalhos
- Pinheiro Manso

Figura 5-1. Cartografia de Ocupação solo melhorada.

Para melhor compreensão da evolução do uso e cobertura do solo procedeu-se à elaboração de cartografia onde é possível ver a evolução das classes em 2022 e em 2024 tal como demonstra a Figura 5-1.

5.2. Modelo da Altura da Canóbia

No seguimento da obtenção de resultados e com base na metodologia aplicada neste estudo foi adquirida cartografia relacionada com a altura da canóbia das árvores, um indicador de biomassa muito utilizado em estudos de estimativa de biomassa em áreas florestais bem como para estimar carbono entre outros, sendo por isso um resultado importante para este estudo.

Foram desenvolvidos dois mapas que mostram a evolução da altura da canóbia em 2 anos (2022-2024) assim como no resultado anterior do uso e ocupação do solo verificando-se alguns pontos importantes de referir.

O modelo durante o período de 2 anos previu um aumento significativo da altura da canóbia evidenciando que as condições presentes no concelho durante este tempo foram favoráveis para o desenvolvimento das espécies arbóreas fazendo com que o seu crescimento se acentuasse. Verificou-se também que áreas onde anteriormente continham valores mais baixos de altura da canóbia, em 2024 viram os seus valores aumentados, indicando também que não houve nenhum fenómeno contraditório grave como os incêndios florestais.

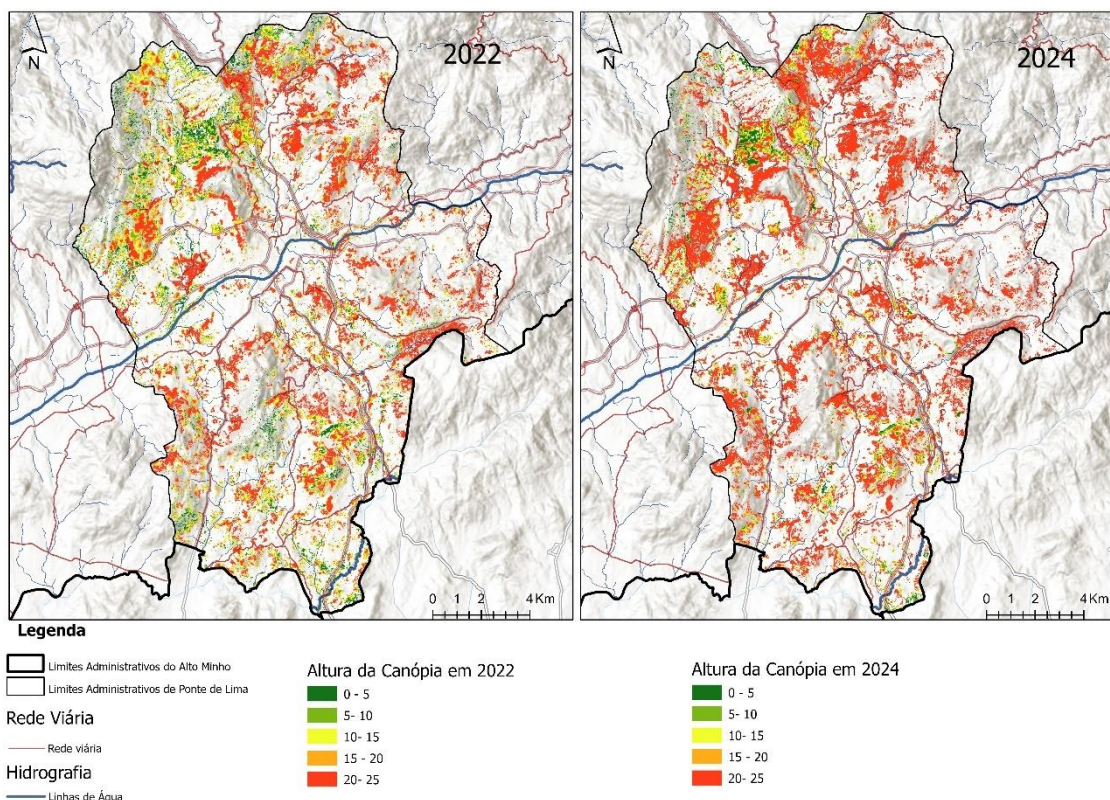


Figura 5-2. Modelo da altura da canópi no ano de 2022 e 2024.

As áreas florestais relativamente próximas a infraestruturas como a rede viária apresentam um padrão de valores mais baixos da altura da canópi, sugerindo que a sua presença interfere no desenvolvimento normal da vegetação ao seu redor, em sentido contrário em locais com maior distância a este tipo de infraestruturas e em zonas com menor presença humana registou-se valores de altura da canópi mais elevados, o que pode indicar que locais onde existe uma menor intervenção humana possuem um desenvolvimento mais eficaz da sua vegetação tal como é perceptível ao consultar a Figura 5-2.

Locais como pastagens, matos e eventualmente algumas zonas onde se verifica a prática de atividades agrícolas apresentam valores um pouco mais elevados do que o esperado, podendo conter um maior grau de erro associado, pois principalmente as pastagens e os matos apresentam uma elevada reflectância traduzindo-se em valores de NDVI mais elevados e consequentemente aumentando o erro.

As áreas agrícolas apresentam um comportamento de interferência semelhante devido à sua volatilidade, isto é, devido ao facto de estarem em constante transformação,

procedendo-se em muitas das áreas à prática de culturas sazonais ou de menor período ,daí também o aumento do erro associado a estas áreas.

Devido ao aumento das áreas com maior valor de altura da canópia pode concluir-se que não houve nenhum fenómeno que interferisse de forma negativa no seu desenvolvimento quer por mão do homem como é o caso da exploração da madeira (desmatamento), quer por fenómenos naturais.

5.3. Cartografia do Modelo Preditivo de Biomassa para 2024

O último resultado a ser obtido é o resultado que pretende dar resposta à questão problema e que no fundo é o propósito deste estudo, ou seja, com os resultados do modelo da biomassa acima do solo em áreas de floresta em 2022 e em 2024 pretendeu-se perceber se Ponte de Lima possui aptidão para a exploração da biomassa e se é possível quantificar essa mesma biomassa.

A Figura 24 visa apresentar as diferentes classes de disponibilidade de biomassa acima do solo em área florestal nos anos de 2022 e de 2024, permitindo perceber a evolução da mesma ao longo de dois anos e saber onde é possível explorar de forma mais intensiva e de forma menos intensiva este recurso.

As diferenças entre as classes de biomassa não são muito significativas sendo de difícil interpretação as diferenças visuais entre elas, devido a este ponto procedeu-se a uma análise estatística para conseguir perceber melhor o que separa as duas datas, assim como um mapa onde é possível perceber a nível local quais as zonas onde se verificou ganhos e perdas de biomassa, conforme apresentado nas Figura 5-3 e Figura 5-4.

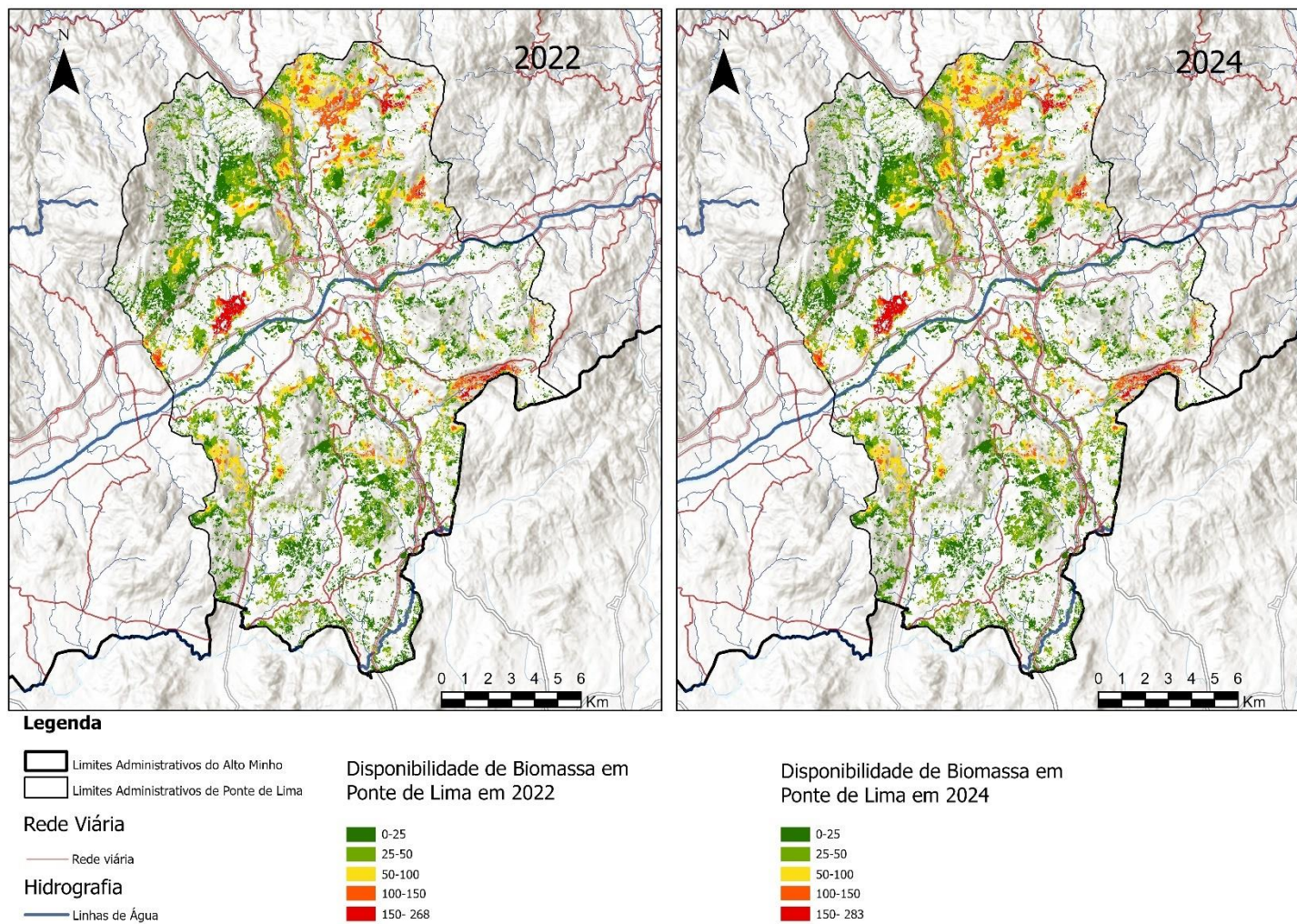


Figura 5-3. Disponibilidade de biomassa em Ponte de Lima no ano de 2022 e 2024 expresso em Ton/ha.

Em 2022 o território localizado mais a Nordeste apresenta valores de biomassa mais elevados, sendo provavelmente um local interessante para a exploração deste recurso no entanto o declive nesta região pode ser um entrave, ao contrário de outras zonas como a Sudeste do Rio Lima perto de Vila Verde, onde o declive é um pouco menor e a disponibilidade de biomassa continua alta.

As zonas onde se encontram localizadas as Lagoas de Bertiaandos indicam altos valores de biomassa derivado da sua alta biodiversidade de fauna e flora local assim como as suas espécies arbóreas de alto porte que auferem à localização em específico altos valores de sequestro e armazenamento de carbono.

Ainda com base no ano de 2022, a região inserida acima do Rio Lima possui maiores valores de biomassa acima do solo em geral quando comparados com o território localizado abaixo do rio, onde este tipo de disponibilidade aparenta não ser tão elevada.

Analizando o território florestal no ano de 2024, Ponte de Lima não aufer grandes mudanças a nível visual por essa razão procedeu-se à elaboração de um mapa onde é possível observar os ganhos e perdas de biomassa acima do solo entre o período de 2022-2024.

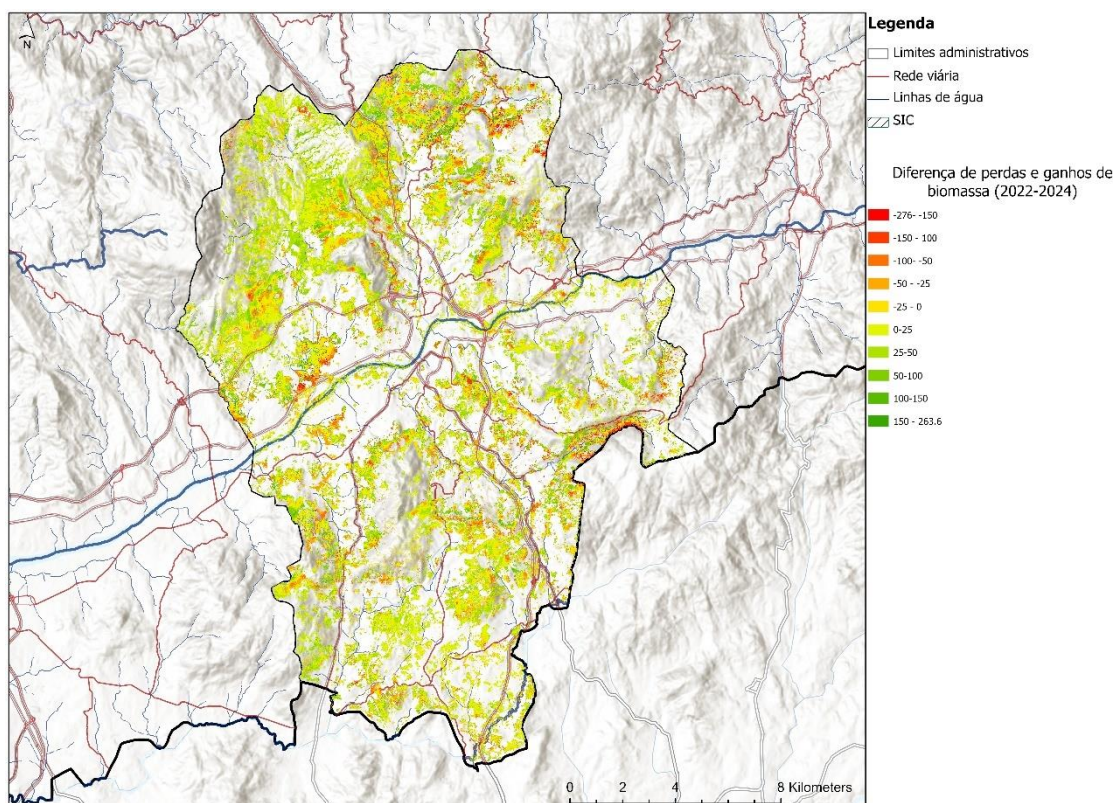


Figura 5-4. Diferença dos níveis de biomassa entre 2022 e 2024 expressos em Ton/ha.

Como é observável na Figura 5-4, no município de Ponte de Lima no período 2022-2024 nas áreas florestais verificou-se uma tendência de estabilidade da biomassa acima do solo, contudo, os valores mostram que existe uma breve tendência de redução dos valores embora seja residual, com exceção em pequenas áreas como o caso das Lagoas de Bertandos, o Parque de Lazer situado na União de Freguesias de Arca e Ponte de Lima ou pequenas zonas em torno do Rio Lima onde de facto se regista um aumento da biomassa. O modelo indica ainda que algumas regiões perto da fronteira com concelhos vizinhos como Vila Verde e Viana do Castelo possuem também alguns ganhos expressivos de biomassa acima do solo.

No geral Ponte de Lima não registou perdas nem ganhos muito expressivos, mantendo-se estável a nível de disponibilidade de biomassa sendo que as classes que predominam segundo os resultados obtidos e apresentados na Figura 5-3 é a classe das 0 a 25 Ton/ha, confirmando assim a estabilidade de biomassa no território com um pequeno ganho de biomassa.

Apesar de se verificar uma presença frequente de classes de perda de biomassa um pouco por todo o território não são perdas muito avultadas sendo compensadas por outras classes que apresentam bons ganhos de biomassa.

Uma vantagem do modelo desenvolvido é que permite aprofundar ainda mais a análise a cada classe de ocupação do solo de carácter florestal, neste caso é possível também proceder à quantificação da biomassa acima do solo na unidade de medida toneladas para cada uma das espécies florestais.

Com este tipo de informação em mão é possível obter a perceção dos ganhos e perdas de biomassa em termos quantitativos ao longo do período de 2 anos (2022-2024) e perceber quais as espécies com maior interesse de exploração, auxiliando na hora de tomar a decisão sobre explorá-la ou não. A Tabela 7 abaixo apresentada demonstra exatamente este tipo de informação, a área ocupada por cada tipo de ocupação do solo assim como a quantidade de biomassa disponível em toneladas.

Tabela 7. Resultados do Modelo Preditivo de Biomassa Acima do Solo em 2022 e 2024.

Classe	2022		2024		Diferença de Biomassa 2024-2022
	Área Hectares	Quantidade de Biomassa Toneladas	Área Hectares	Quantidade de Biomassa Toneladas	
Pinheiro Bravo	1560	80247,82	904.38	57.943,90	-22.303,92
Acacia Delbata	221.02	13.149,95	99.07	6.223,19	-6.926,76
Eucalipto	4803.34	217.795,63	4655.95	224.959,44	7.163,81
Acacia Melanoxylon	175.14	9.611,27	207.17	12.114,97	2.503,70
Castanheiro	4.37	321,07	13.26	803,44	482,37
Outras Folhosas	1119.01	93.128,07	1687.4	127.396,80	34.268,73
Outras Resinosas	17.18	1.542,15	12.5	1.073,83	-468,32
Outros Carvalhos	538.5	49.573,41	672.3	42.289,56	-7.283,85
Pinheiro Manso	13.05	702,39	7.22	392,40	-309,99
Total	31719.28	466.071,76	31877.94	473.197,53	7.125,77

Em 2022, o modelo previu um total de 466.071,76 Toneladas de biomassa acima do solo em áreas florestais, e em 2024, um total de 473.197,53 toneladas, o que demonstra que num período temporal de 2 anos nas zonas florestais do concelho de Ponte de Lima se verificou um ganho total de biomassa acima do solo a rondar sensivelmente as 7.125,77 toneladas.

As classes ligadas às espécies invasoras (*Acacia delbata* e *Acacia melanoxylon*), são duas classes que apresentam comportamentos completamente opostos com a *Acacia delbata* a sofrer um declínio tanto em área como em quantidade de biomassa e a *Acacia melanoxylon* a aumentar a sua área de cobertura do solo assim como a quantidade de biomassa tal como a Tabela 7 apresenta.

Por outro lado, espécies como os carvalhos, outras resinosas e o pinheiro manso registaram uma perda acentuada nos valores de biomassa no entanto no caso da classe “outros carvalhos” verifica-se um aumento da sua área.

A nível da biomassa presente acima do solo na categoria das folhosas e castanheiros verifica-se um aumento considerável dos valores, com ganhos de aproximadamente 34.268,73 toneladas e 482,37 toneladas respetivamente, demonstrando que a região possui um clima favorável para o desenvolvimento deste tipo de espécies.

O Pinheiro Bravo é uma espécie com forte presença quer na região, quer no restante da zona Norte contudo em 2 anos os resultados mostram uma perda de área e de quantidade de biomassa, passando de 80.247,82 toneladas em 2022 para 57.943,90 toneladas em 2024, traduzindo-se numa perda de biomassa de sensivelmente 22.303,92 toneladas, um valor bastante representativo e que é necessário perceber se este aumento se encontra relacionado com o modelo ou se no plano real existiu alguma outra razão para uma perda tão elevada.

Contrariamente ao padrão do Pinheiro Bravo, uma espécie em que se detetou uma considerável subida dos valores de biomassa foi o Eucalipto uma espécie importante nomeadamente para a indústria do papel que em 2022 contava com 217.795,63 toneladas e que em 2024 aumentou para os 224.959,44 toneladas, valores bastante interessantes para a indústria da madeira e subprodutos mas que pode estar a aumentar de forma excessiva a carga de combustível em determinadas localizações

As espécies resinosas também conhecidas pela sua pouca resistência aos incêndios florestais e pela sua contribuição para a propagação dos mesmos devido às suas características pirofitas são espécies que devem ser controladas e a carga de combustível presente nestas áreas deve ser monitorizada. O modelo relativamente a este ponto demonstra uma perda de sensivelmente 468,32 toneladas afetas a espécies resinosas com exceção do pinheiro-bravo que se encontra separado numa categoria à parte.

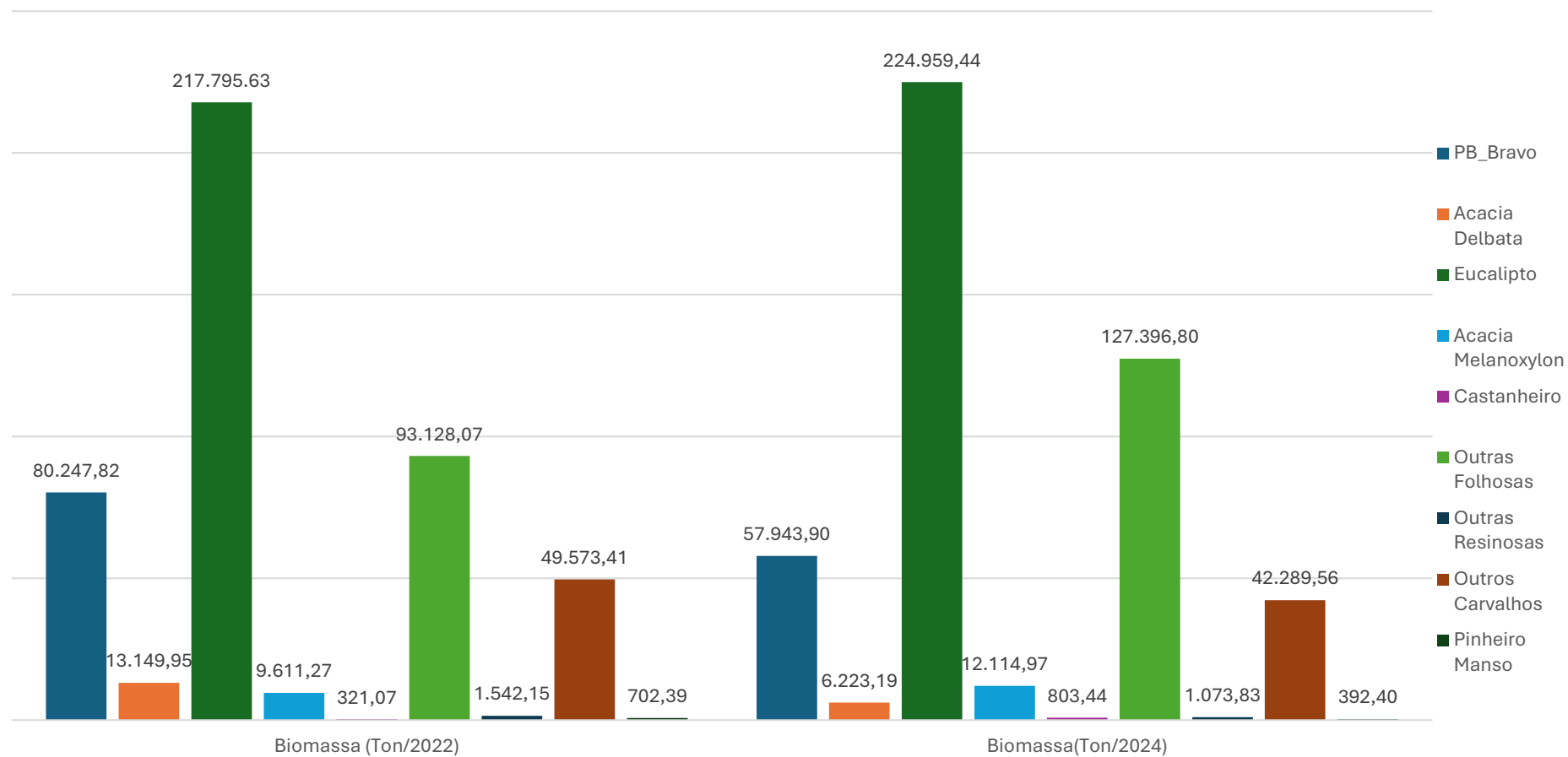


Figura 5-5. Evolução da disponibilidade de biomassa referente ao período 2022-2024.

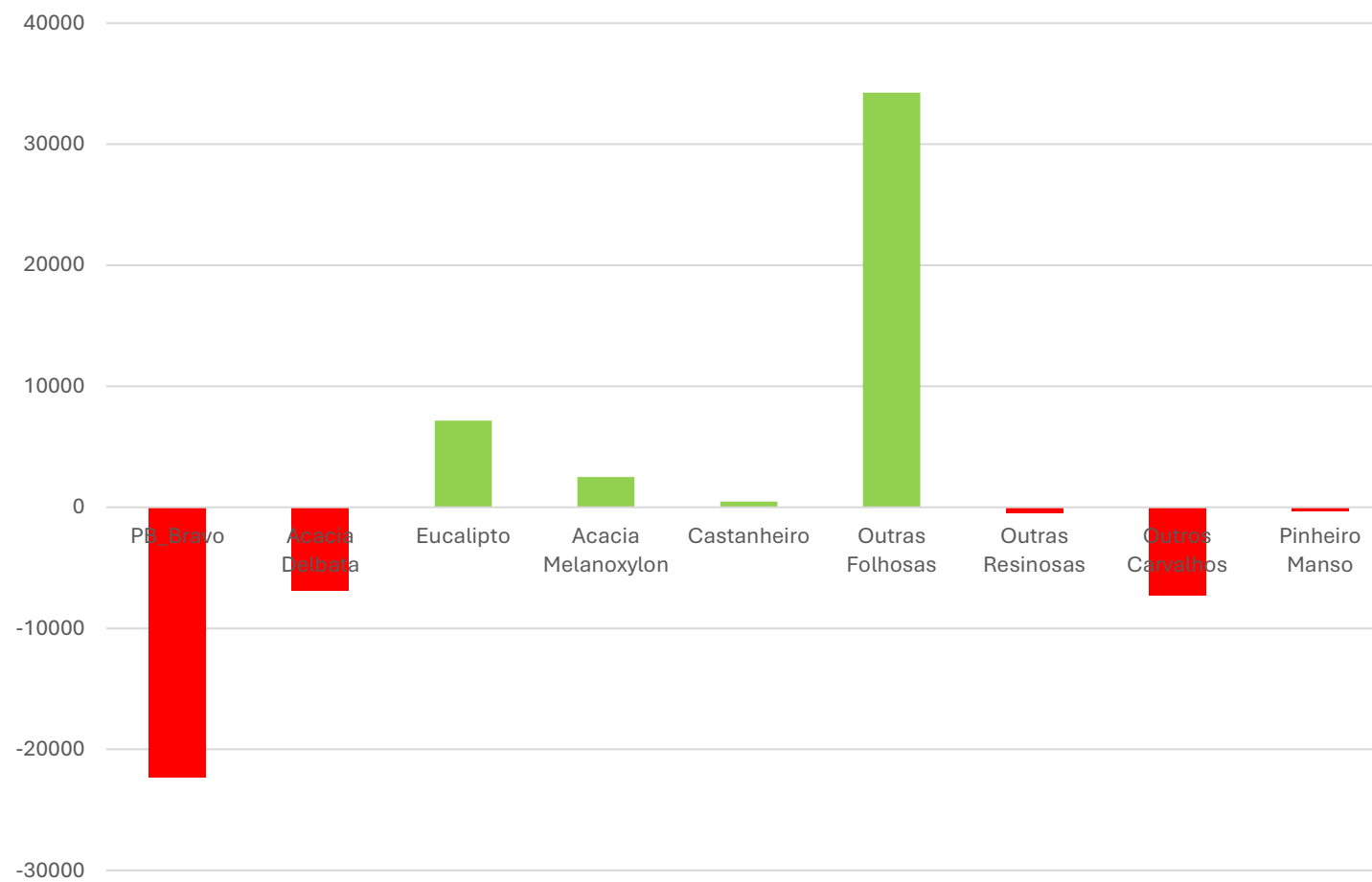


Figura 5-6. Ganhos e perdas de biomassa entre 2022 e 2024.

Os níveis de biomassa florestal no concelho são bastante diversificados, sendo que em 5 categorias de ocupação do solo (ocupações florestais) registaram-se perdas de biomassa e em 4 um aumento de biomassa acima do solo, é também perceptível que as espécies mais representativas na floresta do concelho é o Pinheiro bravo e o Eucalipto, espécies bastante relacionadas com a indústria da madeira e dos seus subprodutos contudo, com o auxílio da Tabela 7, é possível perceber que ainda que a biomassa tenha aumentado no período temporal de 2 anos, a ocupação relativa a estas duas espécies sofreu uma redução significativa (Figura 5-5 e Figura 5-6).

Espécies frequentemente associadas a tipos de florestas de conservação como as caducifólias e outras folhosas apresentam um comportamento positivo a nível de aumento de biomassa pois o modelo em 2 anos previu um aumento significativo das classes de outras folhosas e de castanheiros, no entanto a categoria “outros carvalhos” sofreu um pequeno decréscimo a par da classe do pinheiro manso. Um comportamento semelhante a todas estas espécies é o de ver um aumento na sua área de ocupação, o que pode a médio/longo prazo aumentar a resiliência de fogos da floresta do concelho face aos incêndios florestais que apresentam uma grande ameaça todos os anos.

5.4. Importância das variáveis

A análise da importância das variáveis num modelo Random Forest é uma técnica que permite identificar os fatores que mais contribuem para o desempenho preditivo do modelo. Este tipo de análise é muito importante para compreender os processos subjacentes à predição e para otimizar a seleção de variáveis, garantindo maior eficiência e precisão na modelação. No caso do Random Forest aqui utilizado, trata-se de um algoritmo de aprendizagem automática baseado na combinação de múltiplas árvores de decisão, onde subconjuntos aleatórios de dados e variáveis são utilizados para construir árvores independentes. Durante o treino, a divisão dos nós de cada árvore é feita com base na variável que maximiza a redução da impureza, o que facilita a identificação das variáveis mais relevantes.

O cálculo da importância das variáveis no Random Forest pode ser feito por diferentes métodos, sendo o mais utilizado a impureza Gini, que foi a abordagem aplicada no presente trabalho. A impureza Gini mede a heterogeneidade dos valores numa divisão e avalia a capacidade de cada variável para reduzir essa heterogeneidade ao longo das árvores. As contribuições de cada variável para a redução da impureza são somadas e

normalizadas, resultando numa métrica que reflete a sua importância relativa. Outra abordagem possível, embora não utilizada neste estudo, é o método de permutação, onde os valores de uma variável são aleatoriamente alterados nos dados de teste, avaliando-se o impacto na precisão do modelo. Uma redução significativa do desempenho do modelo após a permutação indica elevada importância dessa variável.

No modelo desenvolvido para previsão de biomassa acima do solo, foram consideradas 24 variáveis preditoras relacionadas com a vegetação, o clima, o solo e a topografia, das quais se apresentam as mais significativas na Tabela 8. Durante o treino, a importância das variáveis foi calculada com base na redução da impureza Gini e os resultados apresentados em percentagens normalizadas, indicando o peso de cada variável na explicação da variabilidade do modelo. Foi definida uma linha de corte de 4,16%, abaixo da qual as variáveis foram consideradas menos relevantes e analisadas de forma mais superficial. Esta abordagem permitiu concentrar a análise nas variáveis mais influentes.

Tabela 8. Importância das variáveis para explicar o modelo.

Variável	Designação	Importância	Valor decimal	Percentagem
1	altura_canopia	2748547992	0.100624	10.06238
2	hsi	2032921802	0.074425	7.442489
3	ppt_med	1866185194	0.068321	6.832069
4	srtm	1624631066	0.059477	5.947744
5	temp_med	1583602674	0.057975	5.79754
6	wfr	1521969300	0.055719	5.571901
7	awc	1464186567	0.053604	5.36036
8	cec	1407018371	0.051511	5.151068
9	n	1378826555	0.050479	5.047858
10	cn	1374181539	0.050309	5.030853
11	ph	1362091335	0.049866	4.986591
12	clay	1351645757	0.049484	4.94835
13	sand	1252275098	0.045846	4.584556
14	silt	1233105482	0.045144	4.514376

Com base na Tabela 8, a variável com maior importância no treino do modelo é a altura da canóia, representando aproximadamente 10% da explicação dos resultados do modelo. Esta variável está diretamente relacionada com a estrutura da vegetação, sendo

um indicador chave da acumulação de biomassa acima do solo. A segunda variável mais importante é o Índice de Vegetação Hiperespectral (HSI), com uma contribuição de 7,44%. Este índice, que pertence ao grupo dos índices vegetativos, é relevante para determinar a cobertura de vegetação e a sua composição, refletindo a densidade e o vigor das plantas. Após estas variáveis associadas à vegetação, o modelo identificou a precipitação média anual como a terceira variável mais relevante, explicando cerca de 6,83% dos resultados. Trata-se de uma variável bioclimática fundamental, uma vez que a disponibilidade hídrica tem um impacto significativo no crescimento e desenvolvimento da vegetação. A topografia do terreno, representada pela variável SRTM, também desempenhou um papel relevante no modelo, com uma importância de 5,95%. Esta variável auxilia na compreensão das condições locais que influenciam a distribuição e o crescimento das espécies florestais, como o microclima e o acesso a recursos naturais. Outras variáveis com importância próxima de 5% incluem a temperatura média, o fluxo de água no solo, a capacidade de retenção de água, a capacidade de troca catiónica, os níveis de azoto e a relação carbono/azoto. Estas variáveis estão, na sua maioria, relacionadas com as características químicas e hídricas do solo, à exceção da temperatura média, que é um fator bioclimático. Estes parâmetros destacam-se por influenciar a fertilidade e a disponibilidade de recursos para o crescimento da vegetação. As variáveis com importância inferior a 5% concentram-se em características texturais e químicas do solo, como os teores de areia, argila, limo e pH. Embora tenham menor relevância, estas variáveis continuam a ser indicadores cruciais da qualidade do solo, que é um recurso limitado e determinante para a acumulação de biomassa. De forma geral, os resultados do modelo evidenciam que o solo, a topografia e a vegetação são os principais fatores que determinam a presença e a quantidade de biomassa acima do solo. Contrariamente ao esperado, a variável "ocupação do solo" apresentou uma relevância menor, não sendo considerada uma das principais influências na cartografia da biomassa.

Desta forma, os resultados mostraram que as variáveis relacionadas com a vegetação, como a altura da canópis e os índices de vegetação, foram as mais importantes no modelo, explicando uma parcela significativa da variabilidade. Estas variáveis refletem diretamente a estrutura e densidade da vegetação, fatores determinantes para a biomassa acima do solo. As variáveis climáticas, como a precipitação e a temperatura média, também demonstraram relevância significativa, evidenciando o papel do clima no crescimento e na distribuição da vegetação. A topografia, representada por variáveis como

a elevação, teve uma importância moderada, sendo essencial para captar variações regionais que afetam a biomassa, como diferenças de microclima e acesso a recursos hídricos. Além disso, os parâmetros edáficos, que incluem características químicas e texturais do solo, mostraram-se relevantes, refletindo o papel fundamental do solo como base para o crescimento da vegetação. Por outro lado, a variável ocupação do solo apresentou uma importância inferior à esperada, possivelmente devido à sua natureza genérica, em contraste com outras variáveis mais específicas e diretamente relacionadas à biomassa.

A análise realizada revelou-se eficaz na identificação de variáveis-chave para o modelo, destacando a altura da canóia e os índices de vegetação como os fatores mais determinantes. Variáveis climáticas, topográficas e do solo também desempenharam papéis importantes, embora em menor escala. Esta abordagem oferece vantagens significativas, como a possibilidade de simplificar modelos futuros, eliminar variáveis pouco relevantes e aprofundar a compreensão das relações entre fatores ambientais e a biomassa acima do solo. Contudo, é importante considerar algumas limitações, como a dependência dos resultados em relação ao algoritmo Random Forest, a possível subestimação da relevância de variáveis correlacionadas e a sensibilidade do método ao tamanho do conjunto de dados.

5.5. Descrição das variáveis

5.5.1. Altura da Canóvia

Ao investigar a relação entre a altura da canóvia e a estimativa da biomassa, observa-se que, à medida que a altura da canóvia aumenta, também aumenta a quantidade de biomassa. Esta relação é linear e mostra que valores mais elevados da altura da canóvia estão associados a maiores valores de biomassa tal como se pode confirmar na Figura 5-7.

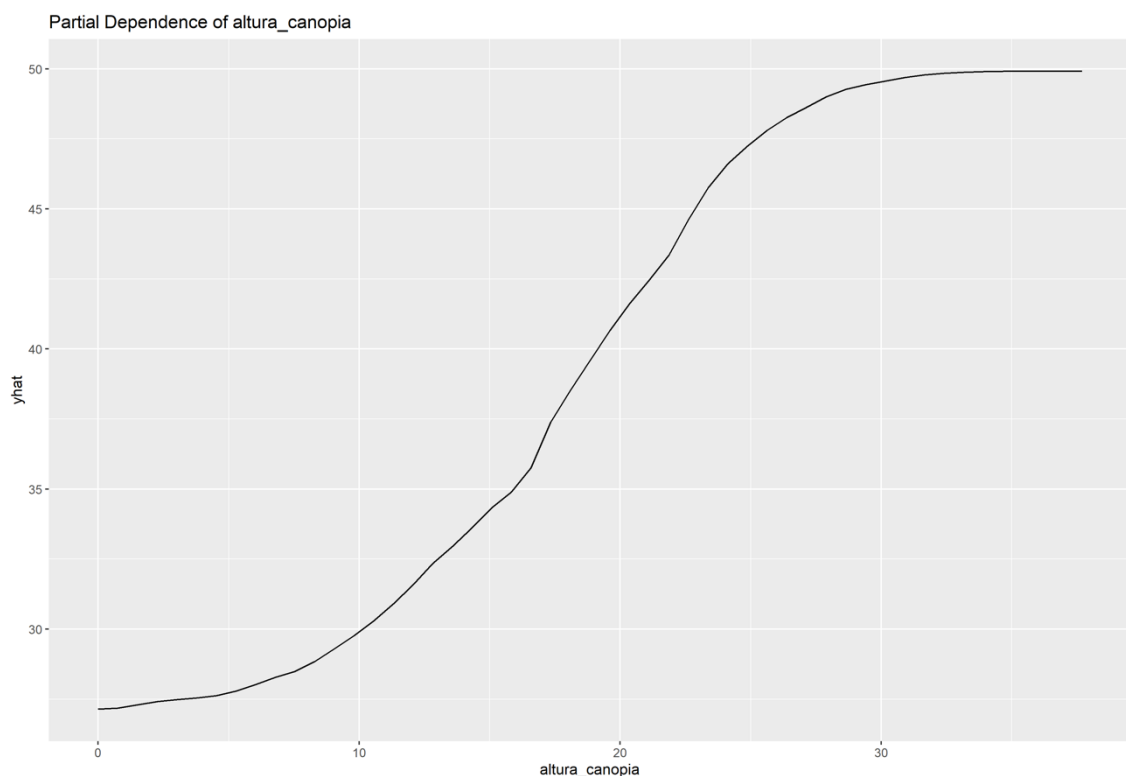


Figura 5-7. Importância da Altura da Canóvia.

Com um olhar mais aprofundado do território e tendo em conta as espécies florestais faz sentido esta relação uma vez que a região é composta por diversas espécies arbóreas o que na teoria com o aumento da altura, aumenta também a quantidade de biomassa.

Teoricamente faz também sentido que quanto maior a altura da canóvia, maior será a árvore e como tal é provável existir um maior comprimento do tronco, ramos e maior número de folhas o que faz com que os valores de biomassa aumentem.

5.5.2. Índice de Vegetação Hiperespectral (HSI)

O modelo considerou que a relação entre o HSI e a biomassa não é de todo linear, inicialmente o modelo demonstra que com valores baixos de HSI, os valores de biomassa acima do solo tendem a apresentar uma tendência decrescente, apresentando num determinado intervalo um breve período de estabilização nos valores de biomassa seguido por um término com tendência crescente quando se atinge altos valores desta variável (HSI).

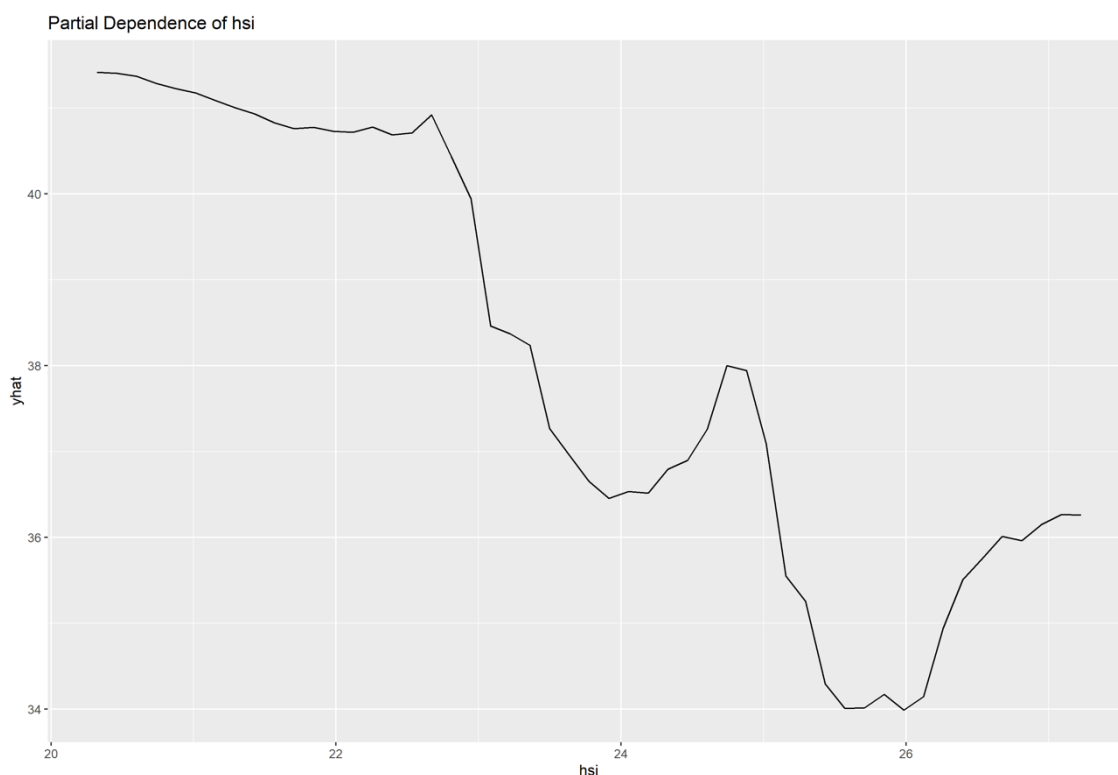


Figura 5-8. Índice de Vegetação Hiperespectral (HSI).

O gráfico da Figura 5-8 extraído pelo modelo sugere diferentes picos nos valores de biomassa, não sendo possível visualizar de todo um padrão de valores ótimos de HSI, pois os valores de biomassa demonstram muita instabilidade. Os valores de HSI extraídos situam-se numa escala de 20 a 26 sendo que inicialmente, os valores de biomassa aumentam consoante o aumento do HSI, atingindo um pico próximo a 23.

A partir desse ponto, a biomassa tende a diminuir, exceto por uma breve estabilização entre os valores de HSI 24 e 25, contudo a partir de 26 o gráfico apresenta uma curvatura ascendente. Esta instabilidade pode estar relacionado a diferentes fatores, uma vez que

numa primeira fase a biomassa diminui procedendo por um período de breve estabilidade podendo ser explicado por saturação, quer de nutrientes do solo, quer de água no solo.

Outra razão que pode explicar estes picos e valores mínimos e máximos é a heterogeneidade de vegetação, ou seja, a tipologia de vegetação onde cada tipo de vegetação pode ter um valor de HSI diferente. A relação entre estes dois eixos evidencia por isso uma relação não linear e complexa.

5.5.3. Precipitação média

A precipitação média é um fator relevante na medida que pode ser um indicador de determinação para o crescimento de uma demarcada espécie numa delimitada região.

Segundo resultados do modelo a variável da precipitação média encontra-se diretamente relacionada com os valores de biomassa, sendo visível uma relação mais linear ao contrário do HSI.

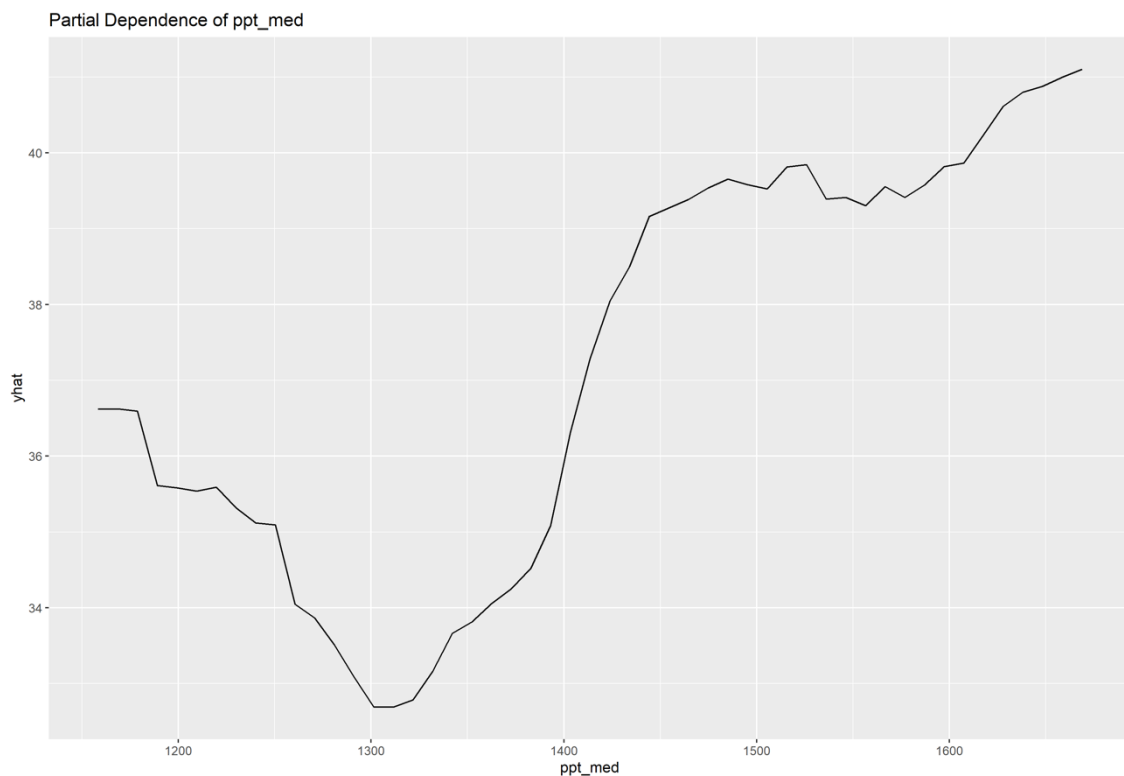


Figura 5-9. Importância da Precipitação Média.

Os valores obtidos pelo modelo e expressos na Figura 5-9 indicam que o intervalo de precipitação média se situa entre os 1150 e os 1650 aproximadamente, sendo que se verificam baixos valores de biomassa quando se verifica valores de precipitação média

de 1150 mm a 1300 mm, um ponto de reversão pois a partir deste ponto a curvatura evidencia que quanto maior for os valores de precipitação média maior também serão os valores de biomassa.

A linha de curvatura indica uma estabilização de valores de biomassa no intervalo aproximado de 1450 e 1600 mm, sugerindo que durante este intervalo a quantidade de precipitação média em nada interfere nos valores de biomassa.

Esta estabilização pode ser explicada pelo excesso de água no solo e consequentemente saturação de água no sistema radicular das plantas provocando asfixia radicular e diminuindo o crescimento vegetativo.

5.5.4. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

SRTM, também designado como Shuttle Radar Topography Mission, aparece também como sendo uma variável com relativa importância no modelo.

O modelo proporciona uma visão clara, em que até aos 500 m os valores de biomassa atingem picos interessantes, contudo a tendência é de quanto maior a altitude menor é a quantidade de biomassa.

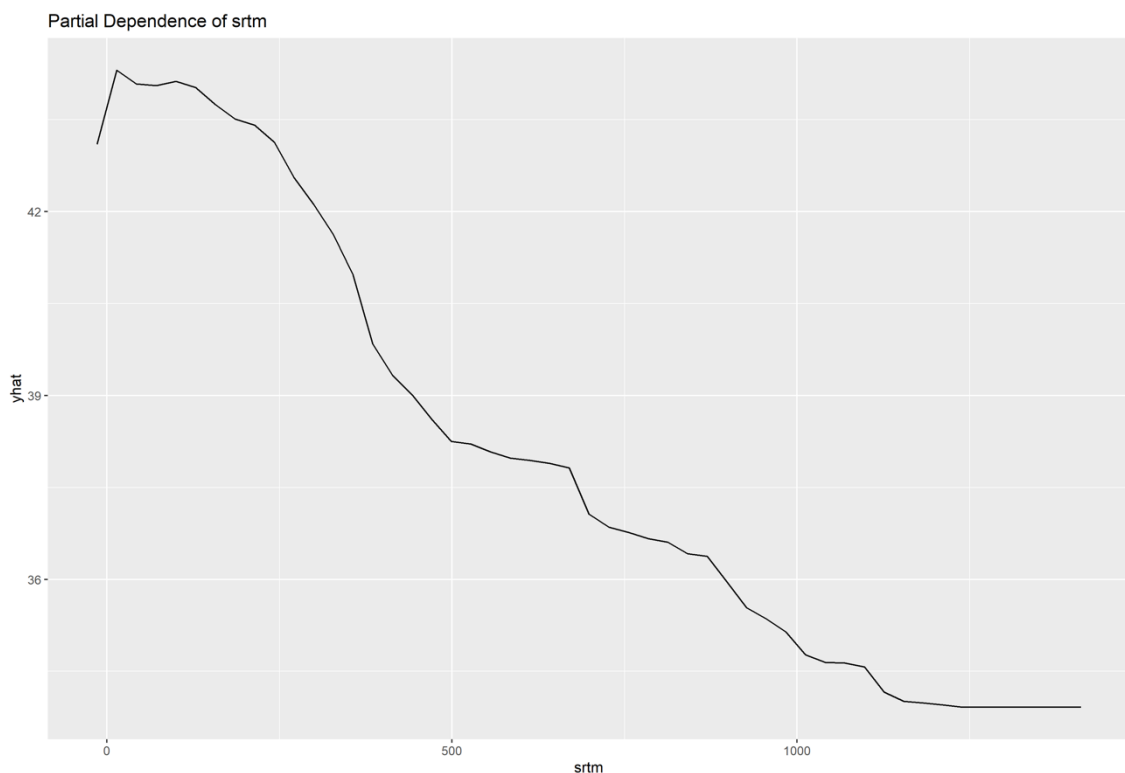


Figura 5-10. Importância do SRTM.

É possível ainda observar que no intervalo de 500 a 1000m apesar da acentuada diminuição da biomassa ainda se verifica uma ligeira oscilação onde a queda não é tão abrupta (Figura 5-10). No cenário a partir dos 1000m a biomassa parece ser extremamente baixa ou até mesmo inexistente.

Uma quantidade considerável de área florestal na zona de estudo situa-se em locais de vale e com alguma acentuação, no entanto não se verifica áreas florestais em locais de grande altitude, o que sugere que é relativamente normal aparecer valores de biomassa de maior relevância em zonas de menor altitude e valores praticamente inexistentes em zonas de maior altitude.

5.5.5. Temperatura Média

A Temperatura Média é uma variável bioclimática responsável por ser um indicador de aptidão para a instalação de espécies vegetais.

Na temperatura média o modelo demonstra que até aos 12°C é quando os valores de biomassa são mais expressivos e com poucas oscilações, contudo o cenário reverte-se a partir deste ponto, onde a biomassa decresce acentuadamente até valores de temperatura a rondar os 14°C.

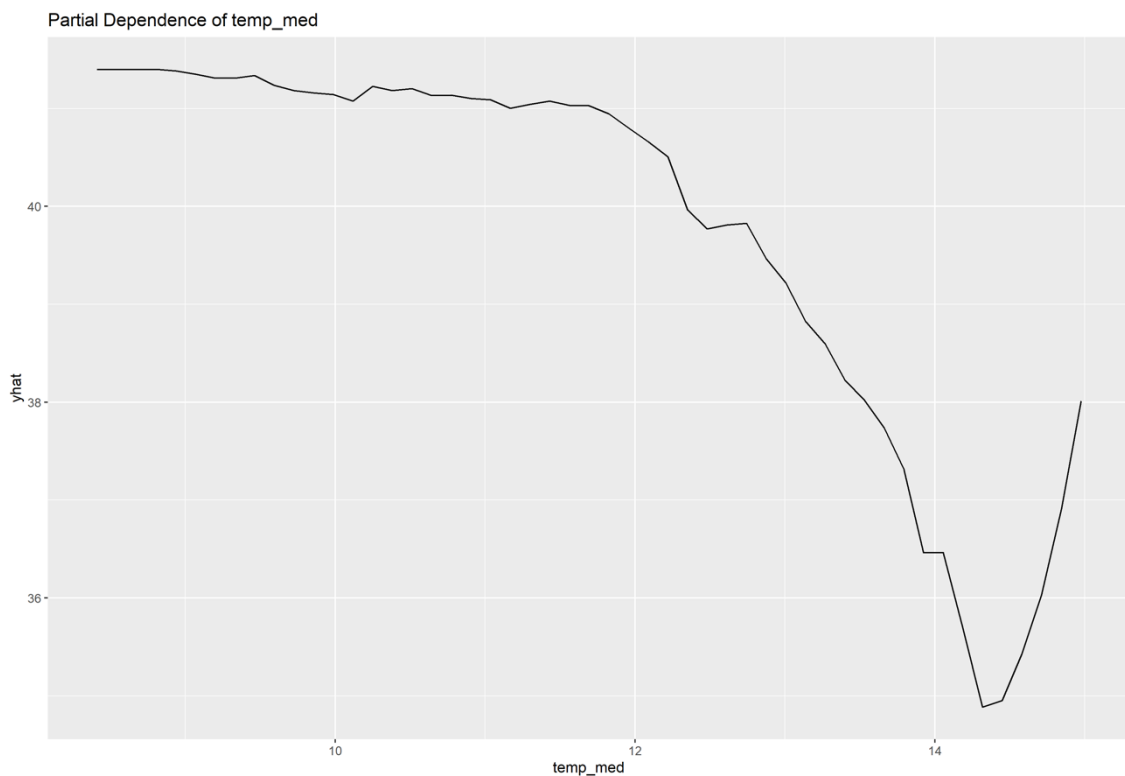


Figura 5-11. Importância da Temperatura Média.

A partir dos 14°C verifica-se uma nova subida dos valores de biomassa, o que sugere que a biomassa é menos abundante quando se verificam temperaturas médias correspondentes ao intervalo de 12 a 14°C.

5.5.6. Severidade do Inverno (WFR)

A Severidade do Inverno, representada pela variável **Winter Freeze Record (WFR)**, é um indicador importante para compreender a intensidade e os extremos das condições inverniais. Este parâmetro permite avaliar como os períodos de frio intenso afetam o crescimento da vegetação e a acumulação de biomassa acima do solo. Com base nos resultados do modelo, observa-se uma relação não linear entre a biomassa e o WFR. Inicialmente, o aumento do WFR favorece o crescimento da biomassa, indicando que níveis moderados de severidade invernal podem estimular o desenvolvimento das plantas. No entanto, a partir de um determinado ponto, verifica-se um decréscimo abrupto nos valores de biomassa, evidenciando que níveis elevados de WFR têm um efeito adverso significativo.

Na Figura 5-12, observa-se que até um valor de WFR de 2,5, os valores de biomassa se mantêm elevados, atingindo o seu pico neste intervalo. Contudo, a partir desse ponto, e até valores de WFR de 6, o gráfico revela uma queda acentuada na biomassa, indicando que a severidade do inverno começa a ter um impacto negativo. Neste intervalo, a variável WFR deixa de contribuir positivamente para o aumento da biomassa, refletindo uma redução drástica nos valores observados.

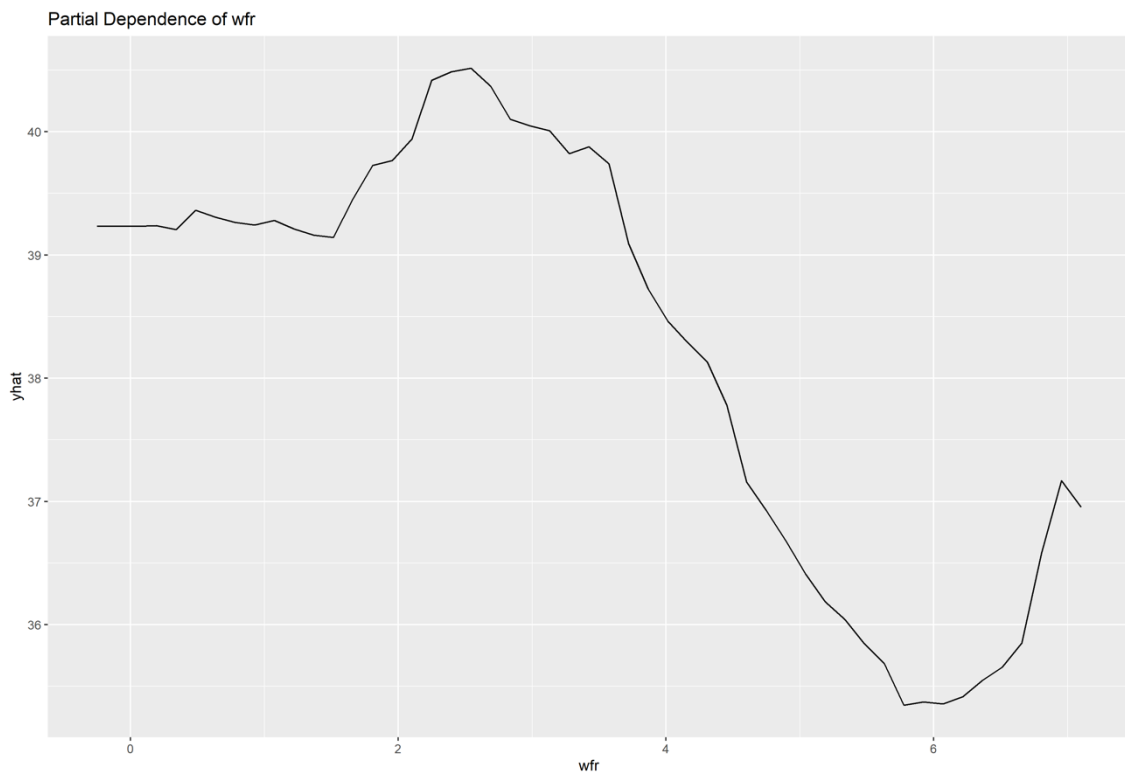


Figura 5-12. Importância do Recorde de Frio no Inverno (Wfr).

Este comportamento pode ser explicado pelo efeito das condições inverniais extremas sobre a vegetação. Quanto mais severos e intensos forem os períodos de inverno, maior é a probabilidade de as plantas enfrentarem dificuldades no seu crescimento. Em muitos casos, a vegetação pode não resistir às temperaturas extremamente baixas e às amplas variações térmicas, resultando em perdas de biomassa.

Por outro lado, os valores intermédios e iniciais do gráfico, onde a biomassa é elevada, podem ser atribuídos à capacidade adaptativa das plantas, especialmente das espécies autóctones. Estas espécies estão frequentemente bem ajustadas ao clima local e dispõem de mecanismos de proteção contra períodos de desconforto térmico moderado. Esta resiliência inicial é suficiente para suportar condições de frio moderado, promovendo um crescimento sustentado.

5.1.7. Capacidade de Retenção de Água (AWC)

É sempre importante para o desenvolvimento da vegetação encontrar-se localizada em solos com boa capacidade de retenção de água pois situações de stress hídrico podem levar a perdas de crescimento ou em situações mais extremas pode levar à morte das plantas.

Uma vez que plantas saudáveis significa maior quantidade de biomassa por planta e que plantas saudáveis necessitam de uma boa capacidade de retenção de água, é de todo normal que na relação de AWC, os valores ótimos de biomassa se encontrem em valores que vão desde o 0 até um valor intermediário como 3 ou 4.

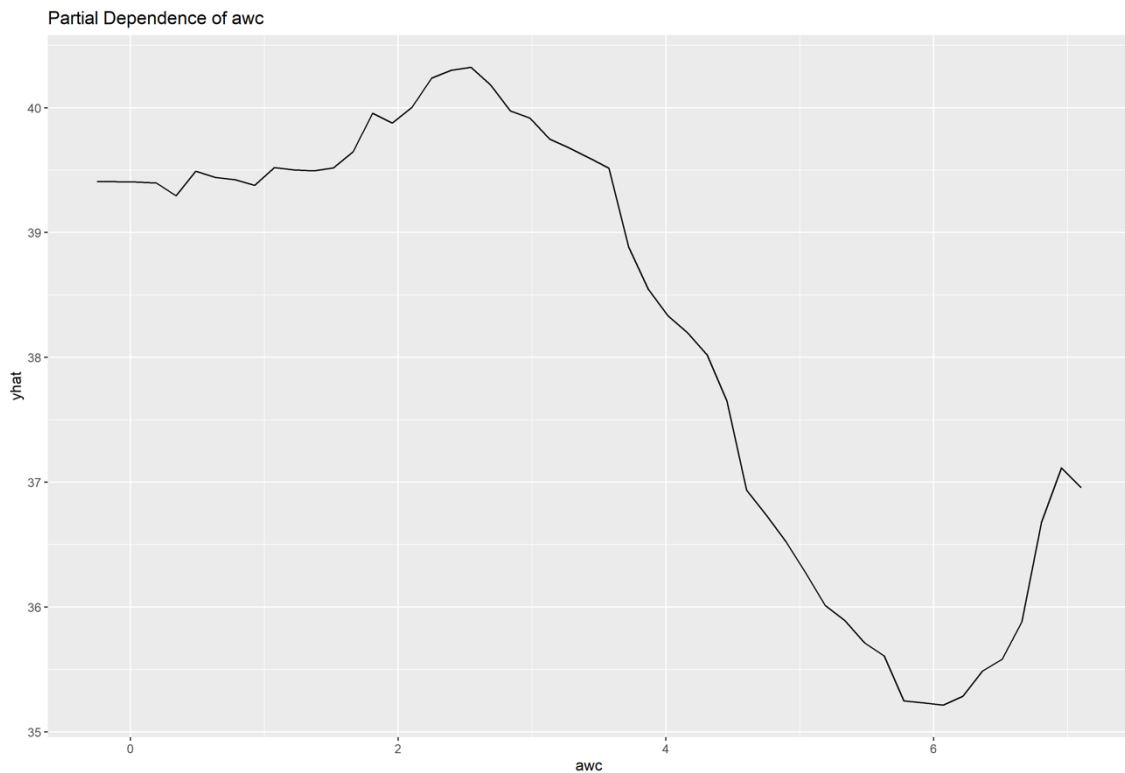


Figura 5-13. Importância da Capacidade de Retenção de Água (AWC).

Assim como o gráfico sugere os valores de biomassa são altos e estáveis até um valor de AWC de 2.5, situação de pico e de onde a partir desse valor a quantidade de biomassa vai decrescer.

No intervalo de 2.5 a 6 como já referido verifica-se uma diminuição dos valores de biomassa, no entanto a partir de um valor de retenção de água de 6, os valores de biomassa acima do solo voltam a aumentar.

Em síntese o modelo demonstra que na medida em que existem solos com maior capacidade de retenção de água menor são os valores de biomassa, no entanto a partir de grandes valores de capacidade de retenção os valores de biomassa voltam a subir.

5.5.8. Capacidade de Troca Catiônica (CEC)

A capacidade de troca catiónica corresponde a um dos parâmetros químicos do solo e é frequentemente associado a estudos de espécies vegetais. Os resultados obtidos pelo modelo parecem demonstrar que este parâmetro possui um intervalo muito abrangente para as condições de quantidade de biomassa.

Quando se verifica valores de CEC mais baixos (4 a 6), não se verifica impacto significativo nos valores de biomassa, no entanto quando se encontra valores entre os 6 e 8 é visível uma tendência de diminuição nos valores de biomassa.

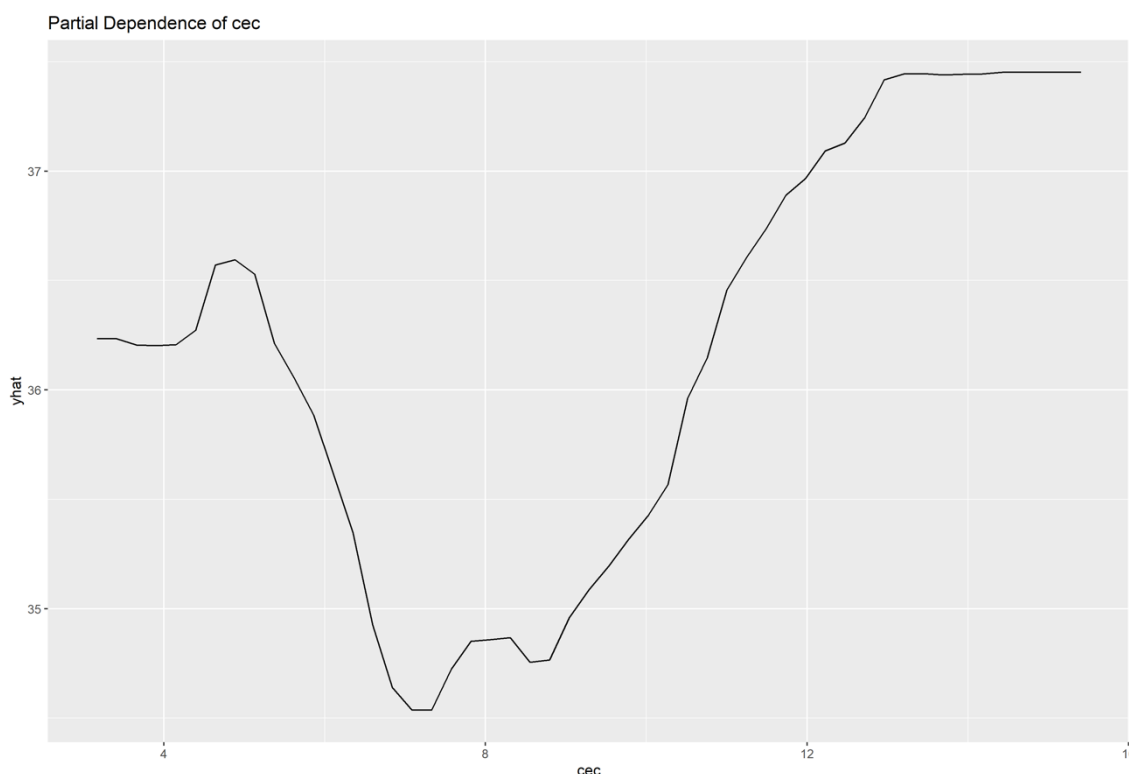


Figura 5-14. Importância da Capacidade de Troca Catiônica (CEC).

Em situação inversa uma vez que os valores de CEC se posicionam entre os 8 e 12 valores, faz com que surja uma curva crescente acentuada sugerindo que quando se atinge estes valores de CEC, os valores de biomassa são influenciados e aumentam significativamente, contudo ao rondar os 12 e até aos 16 valores verifica-se uma estagnação da curvatura, demonstrando que a partir destes valores esta variável pouca influência têm na estimativa da biomassa.

Espécies florestais costumam desenvolver-se em solos com maiores valores de cec, por outro lado vegetação mais esparsa e forrageira possui valores de cec mais intermediários,

o que pode explicar os baixos valores de biomassa acima do solo no intervalo aproximado entre os 6 e os 10 cmolc/kg.

5.5.9. N (Azoto)

O azoto é sem dúvida um dos componentes de maior importância para as plantas e é considerado um macronutriente do ponto fisiológico devido à sua influência no crescimento e desenvolvimento das plantas.

A relação do azoto para com a biomassa segundo o modelo aplicado, demonstra que quanto maior for os níveis de azoto no solo maiores valores de biomassa as plantas apresentam.

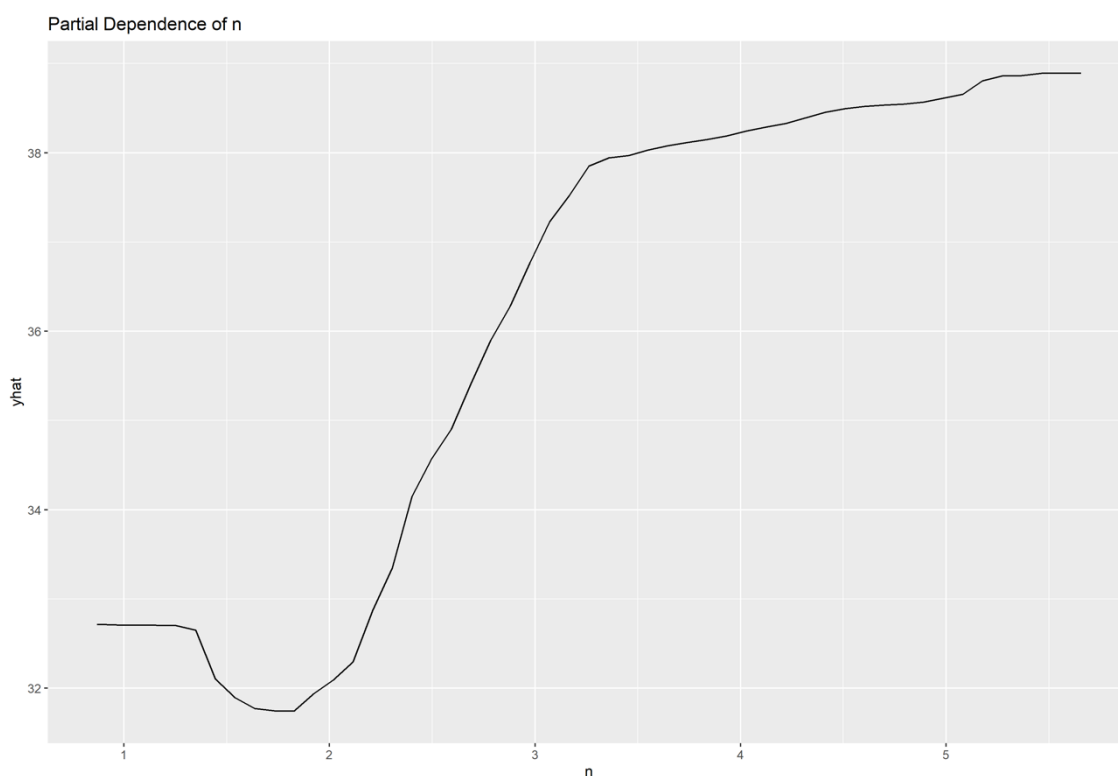


Figura 5-15. Importância do Azoto.

Valores de azoto baixos possuem grande impacto na quantidade da biomassa disponível, uma vez que este é um fator que afeta diretamente o crescimento das plantas.

5.5.10. Relação Carbono Azoto

Os dados obtidos através do modelo mostram fortes evidências que para se obter altos valores de biomassa é essencial também possuir uma razão C/N igualmente significativa.

Quando estes valores são baixos (abaixo de 20) a quantidade de biomassa diminui significativamente.

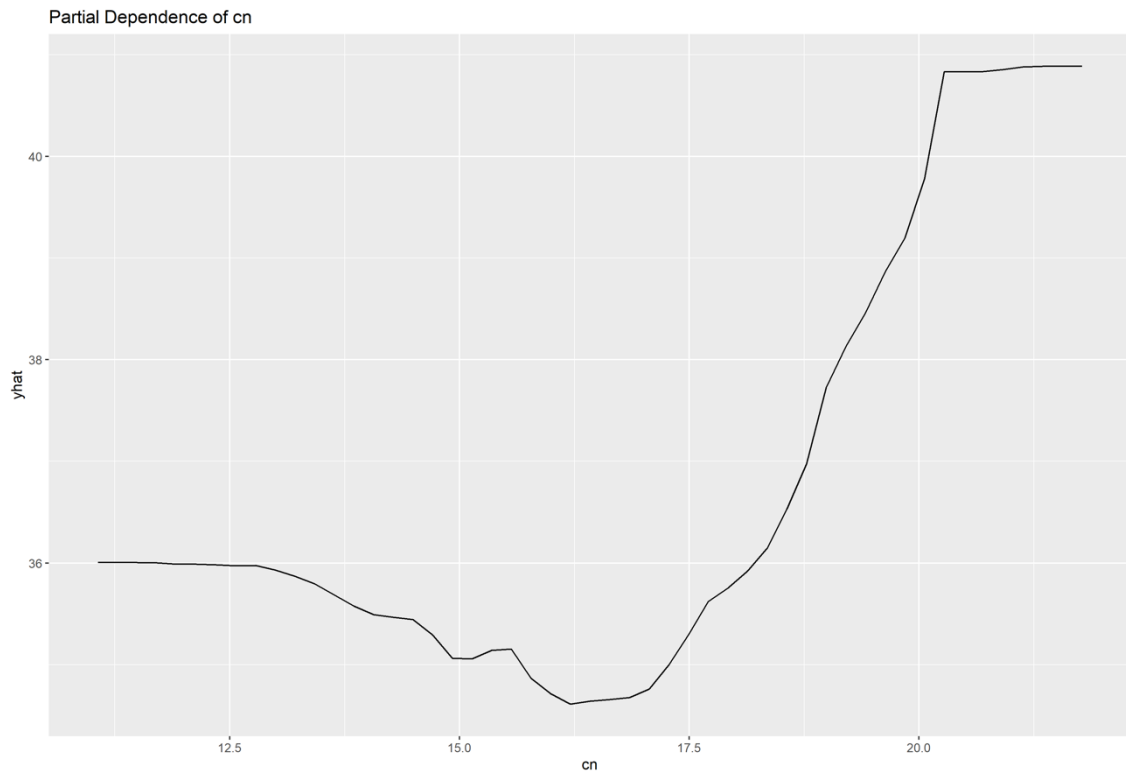


Figura 5-16. Importância da Relação C/N.

Como o gráfico demonstra quando os valores de biomassa aumentam a relação C/N aumenta também e vice-versa.

5.5.11. pH

O ph é um fator utilizado numa ampla diversidade de estudos inclusive no crescimento de plantas e estimativas de biomassa e como tal foi uma variável inserida no modelo.

Os resultados obtidos pelo modelo indicam que os valores de biomassa são relativamente baixos quando se verifica valores de biomassa entre os 4.5 e os 5, solos ácidos portanto, no entanto desde os 5 até aos 6 valores verifica-se um grande crescimento dos valores da biomassa, sendo que estes valores estabilizam à medida que se caminha para solos ph neutro (ph 7).



Figura 5-17. Importância do pH.

Solos com ph próximo do neutro (7) são por isso os solos mais adequados para se obter um maior rendimento de biomassa.

5.5.12. Argila

A argila é considerada um parâmetro físico do solo, e um componente de baixa granulometria quando comparado com outros componentes como a areia ou o limo.

A argila demonstra também ser uma variável determinante quando o assunto é biomassa, uma vez que altos valores de argila no solo demonstra ter relação direta para com a biomassa no solo.

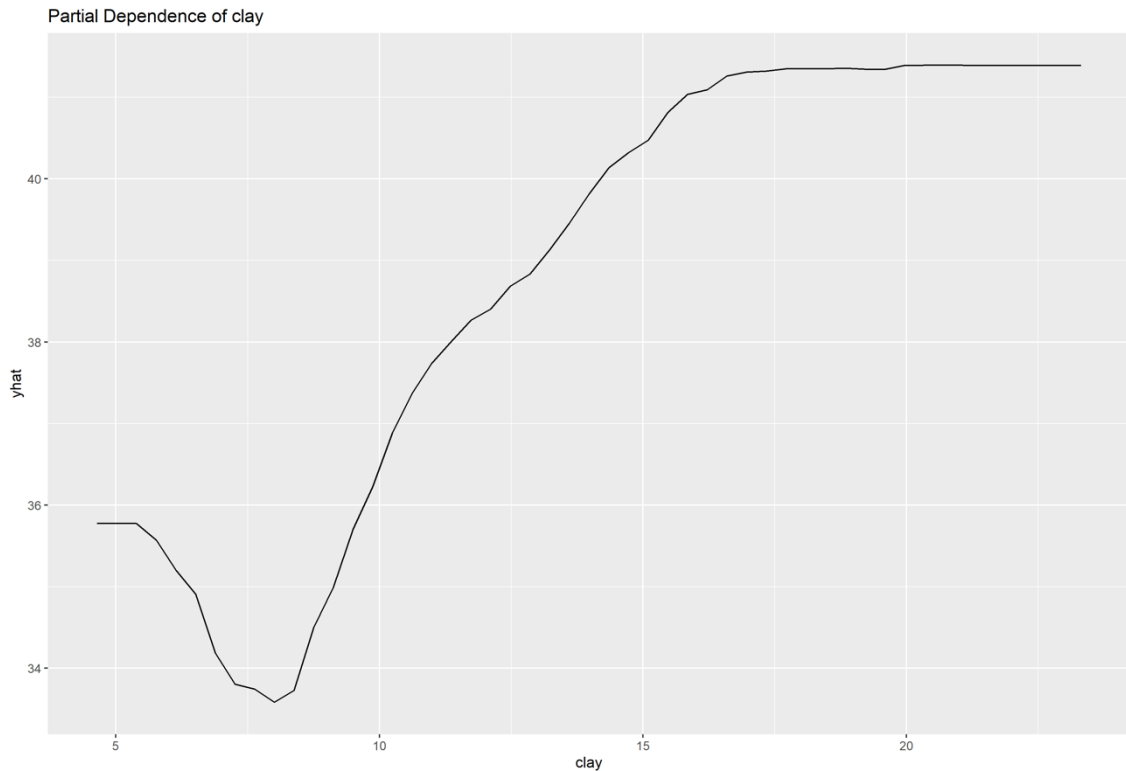


Figura 5-18. Importância da Argila.

Sendo a argila um componente do solo importante por ter a capacidade de reter a água no solo durante mais tempo e fazer com que as plantas usufruam de mais reservas de água este gráfico confirma essas mesmas características ao demonstrar que quanta menos argila disponível o solo tiver menor disponibilidade de água as plantas vão ter e consequentemente menores valores de biomassa estão disponíveis.

5.5.13. Areia

A areia devido à sua textura de maior granulometria a capacidade de reter água por parte do solo é mais limitada e como tal existem menos reservas de água disponíveis para as plantas.

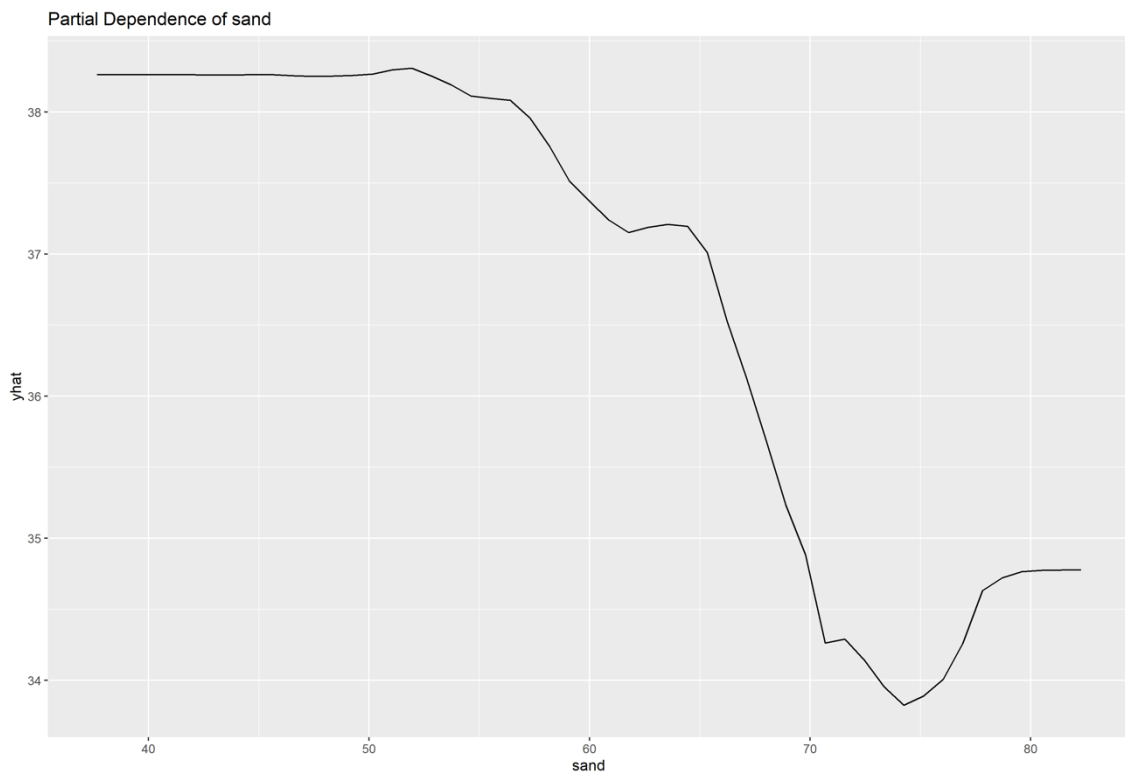


Figura 5-19. Importância da Areia.

Como o próprio gráfico evidência, os valores de biomassa estabilizam e não sofrem grandes oscilações quando os valores de areia presentes no solo se encontram mais baixos (até 55), no entanto a partir deste ponto verifica-se uma queda abrupta dos níveis de biomassa. Esta queda pode estar relacionada com a capacidade deficiente de retenção e reservas de água por parte de solos mais arenosos.

A maioria das espécies florestais onde teoricamente os valores de biomassa são mais elevados encontram-se em solos com valores baixos de areia, e este gráfico pode evidenciar isso mesmo pois solos com muita areia não possuem grandes espécies arbóreas e arbustivas, logo os níveis de biomassa despencam.

5.5.14. Limo

O limo a par da argila no requisito de textura possui a capacidade de reter e criar reservas de água no solo, no entanto em menor escala.

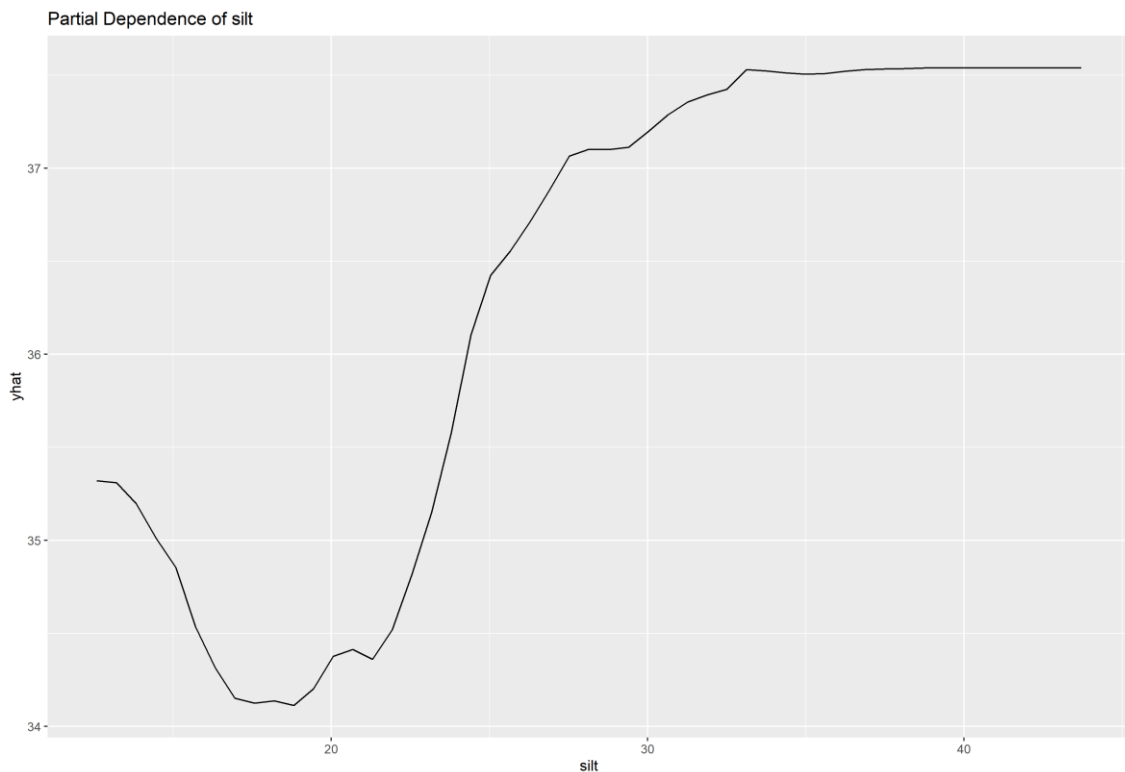


Figura 5-20. Importância do Limo.

Alta presença de limo nos solos parece ter relação com altos valores de biomassa, no entanto verifica-se uma pequena exceção significativa uma vez que entre os 10 e os 15 se verifica valores de biomassa não altos, mas sim intermediários, valores que despencam de vez à medida que se aproxima dos 20.

5.5.15. Outras variáveis

A fim de simplificar a interpretação do modelo, optou-se por apresentar com maior destaque apenas as variáveis com maior poder explicativo da biomassa. A visualização dos resultados das restantes variáveis embora relevantes para o modelo, são apresentados em anexos.

5.6. Erros associados ao desempenho do modelo

A análise dos erros associados ao modelo é essencial para avaliar a sua fiabilidade e garantir a robustez dos dados apresentados. Embora o modelo tenha sido desenvolvido com uma abordagem inovadora, utilizando uma classificação não supervisionada e sem a aplicação de áreas de treino tradicionais para validação, é importante reconhecer que todos os modelos estão sujeitos a erros. Nenhum modelo consegue transpor com total precisão o plano físico para o plano virtual.

Apesar das dificuldades associadas à definição de áreas de treino, o modelo alcançou uma precisão elevada, na ordem dos 97%, com um intervalo de confiança de 95%. Estes resultados, apresentados na Tabela 9, refletem o desempenho robusto do modelo preditivo de biomassa florestal para 2024. Além da precisão, indicadores como sensibilidade, especificidade e coeficiente de determinação (R^2) foram analisados para avaliar o desempenho do modelo de forma mais abrangente.

Tabela 9. Resultados do Modelo Preditivo de Biomassa Florestal de 2024.

Métrica	Valor (%)
Precisão	97.35
Intervalo de Confiança	95.00
Sensibilidade	97.02
Especificidade	97.93
Coeficiente de Determinação (R^2)	98.28 (0.98)
Erro do Quadrado Médio (RMSE)	5.85
Medio do Erro Absoluto	3.28

A sensibilidade, com um valor de 97,02%, demonstra a capacidade do modelo para identificar corretamente áreas com elevada biomassa acima do solo. Este resultado reflete a eficiência do modelo em detetar praticamente todas as amostras positivas de biomassa, assegurando que os locais com elevada densidade de biomassa sejam corretamente identificados. Por outro lado, a especificidade, que atingiu 97,93%, evidencia a capacidade do modelo para reconhecer amostras negativas, ou seja, áreas onde a biomassa

é inexistente ou muito reduzida. Este elevado desempenho em ambos os indicadores transmite confiança na aplicação do modelo, pois ambos os valores ultrapassam a fasquia de 95%, reforçando a sua robustez.

O coeficiente de determinação (R^2) é outro indicador crucial, representando a proporção da variância explicada pelo modelo em relação à biomassa real. Com um valor de 0,98, o modelo demonstra ser altamente confiável, uma vez que um R^2 próximo de 1 indica um desempenho excelente. Na prática, este resultado significa que o modelo é capaz de explicar 98% da variação da biomassa acima do solo, refletindo uma forte correspondência entre as previsões do modelo e os dados reais.

Os erros associados ao modelo também foram avaliados, nomeadamente a média do erro absoluto (MAE) e o erro do quadrado médio (RMSE). Estes indicadores apresentaram valores baixos, de 3,28 e 5,85, respetivamente, o que reforça a credibilidade do modelo. A média do erro absoluto avalia a diferença média em termos absolutos entre os valores reais de biomassa e os valores preditos pelo modelo. Já o erro do quadrado médio representa a média das diferenças quadráticas entre os mesmos valores. Ambos os erros indicam que as previsões do modelo estão alinhadas com os valores reais, minimizando discrepâncias significativas.

Para aprofundar a análise do modelo preditivo, foi realizada uma avaliação da contribuição relativa de cada variável utilizada no processo de modelação. Este tipo de análise é fundamental para compreender quais os fatores que mais influenciam os resultados do modelo, ajudando a reforçar a sua robustez e a identificar possíveis melhorias.

A Figura 5-21 e a Tabela 10 apresentam a contribuição individual e acumulada das variáveis, enquanto a tabela correspondente fornece os dados detalhados utilizados para a construção do gráfico. Estes resultados permitem avaliar a relevância de cada variável na explicação da biomassa florestal acima do solo. A variável com maior impacto é a altura da canópia, que sozinha explica mais de 10% da variabilidade no modelo. Esta relevância está de acordo com a relação direta entre a altura das árvores e a acumulação de biomassa. Outras variáveis associadas à vegetação, como o índice de vegetação hiperespectral (HSI) e a precipitação média anual (PPT_MED), também se destacam, contribuindo com 7,44% e 6,83%, respetivamente. Estes resultados sublinham a importância de fatores vegetativos e climáticos no desempenho do modelo.

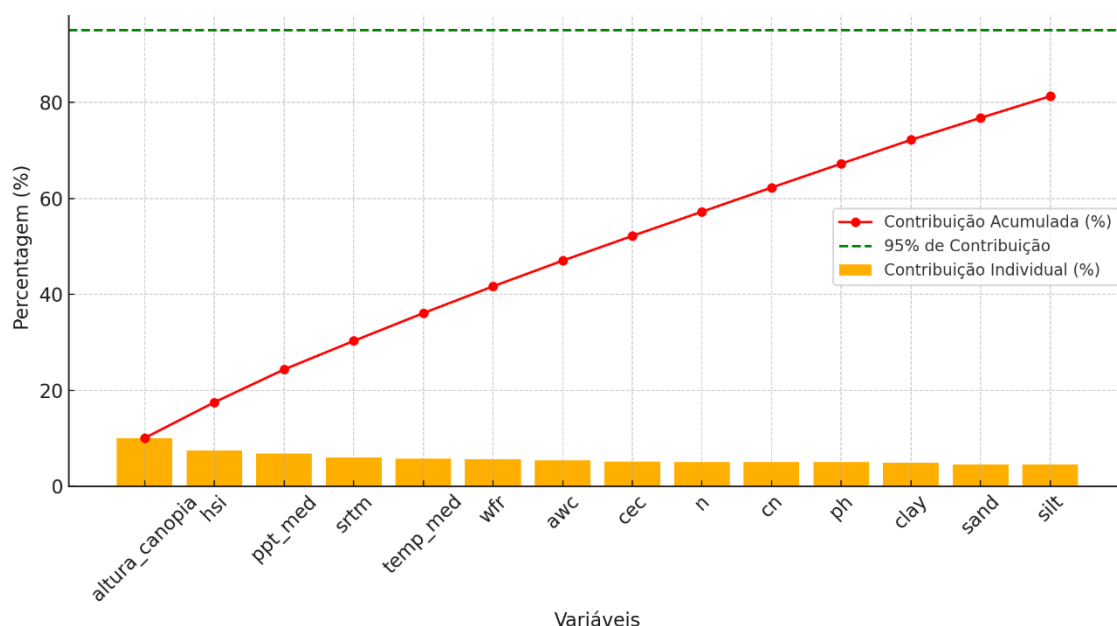


Figura 5-21. Contribuição das variáveis para o desempenho do modelo preditivo.

Tabela 10. Análise detalhada da contribuição das variáveis utilizadas no modelo.

		Contribuição Acumulada	
Variável	Percentagem	(%)	
1 altura_canopia	10.06	10.06	
2 hsi	7.44	17.50	
3 ppt_med	6.83	24.34	
4 srtm	5.95	30.28	
5 temp_med	5.80	36.08	
6 wfr	5.57	41.65	
7 awc	5.36	47.01	
8 cec	5.15	52.17	
9 n	5.05	57.21	
10 cn	5.03	62.24	
11 ph	4.99	67.23	
12 clay	4.95	72.18	
13 sand	4.58	76.76	
14 silt	4.51	81.28	

À medida que se analisa a contribuição acumulada das variáveis, observa-se que as quatro primeiras (altura da canóia, HSI, precipitação média e elevação - SRTM) explicam mais de 30% da variância total do modelo, o que evidencia o peso destas variáveis principais. As restantes contribuições seguem uma tendência decrescente, com algumas variáveis a

apresentarem percentagens em torno de 5%. Estas variáveis destacam a influência do clima e das condições hídricas e edáficas no desenvolvimento da biomassa.

A análise detalhada permite ainda identificar que os indicadores texturais e químicos do solo, como os teores de areia, limo e argila, assim como o pH, têm menor impacto individual (abaixo de 5%). No entanto, continuam a ser relevantes para compreender os fatores que condicionam a biomassa em regiões específicas, dado que as suas contribuições acumuladas suportam uma parte considerável do desempenho global do modelo.

Estes resultados confirmam que o modelo preditivo é robusto, com as variáveis mais relevantes a capturarem uma elevada proporção da variação na biomassa. A análise das contribuições acumuladas reforça a importância da seleção criteriosa das variáveis utilizadas, demonstrando que o desempenho do modelo está fortemente ancorado em variáveis que representam a vegetação, o clima e, em menor grau, as condições do solo. A análise também sugere que o modelo pode ser otimizado, por exemplo, reduzindo o número de variáveis de menor impacto sem comprometer a precisão. Este tipo de análise detalhada fornece uma base sólida para justificar os resultados obtidos, demonstrando que os erros associados ao modelo são baixos e que a contribuição das variáveis foi maximizada para explicar com eficácia a biomassa acima do solo.

Capítulo 6. Discussão de resultados

Este estudo distingue-se pela sua abordagem inovadora, não sendo diretamente comparável a metodologias frequentemente encontradas na literatura. Tal especificidade deriva da utilização de técnicas diferenciadas que combinam deteção remota, modelação preditiva e análise espacial, com o objetivo de avaliar a disponibilidade de biomassa acima do solo de forma mais precisa e contextualizada.

Como se viu anteriormente, geograficamente, verifica-se que o município de Ponte de Lima apresenta uma aptidão considerável para a exploração deste recurso. A região beneficia de uma rede de acessos bem estruturada até às zonas florestais e de eixos viários estratégicos que facilitam a ligação com o território espanhol e outras regiões do país. Esta infraestrutura robusta constitui um fator crucial para a instalação de empresas relacionadas com a indústria da biomassa e subprodutos da madeira, promovendo o desenvolvimento económico local.

A exploração sustentável da biomassa em Ponte de Lima pode trazer benefícios económicos significativos, incluindo a criação de emprego local, o aumento do valor económico das florestas e a dinamização de setores relacionados, como a produção de energia renovável e a indústria de subprodutos de madeira. Estas oportunidades, quando combinadas com uma gestão adequada, têm o potencial de contribuir para a revitalização económica do município, enquanto promovem o uso eficiente dos recursos florestais.

No que respeita à ocupação e uso do solo, os dados indicam uma tendência de redução de espécies florestais predominantes na exploração de biomassa, como o eucalipto e o pinheiro-bravo. Estas espécies têm sido progressivamente substituídas por árvores mais resilientes aos incêndios florestais, como carvalhos, castanheiros e outras folhosas. Esta alteração reflete uma mudança estratégica na gestão florestal, orientada para objetivos de conservação e resiliência climática. Contudo, esta visão mais conservadora pode criar desafios para a exploração da biomassa, ao limitar o acesso a recursos florestais destinados predominantemente à preservação ambiental e ao sequestro de carbono.

Adicionalmente, a manutenção das florestas e a transição para espécies nativas reforçam o valor cultural e paisagístico da região. Florestas biodiversas, compostas por espécies autóctones, não só desempenham um papel ecológico crucial, como também representam

uma herança cultural que atrai visitantes e fomenta o ecoturismo. Este impacto positivo na imagem da região pode ser explorado para criar sinergias entre conservação ambiental e desenvolvimento económico sustentável.

Além das implicações económicas e de gestão, a transição para espécies florestais mais resilientes, como carvalhos e castanheiros, contribui para a recuperação ecológica das florestas locais. Estas espécies promovem maior biodiversidade, ao criar habitats favoráveis para a fauna e flora nativas, e melhoram a qualidade do solo, reduzindo a sua erosão. Este benefício ecológico pode gerar efeitos positivos a longo prazo, como o aumento da capacidade de retenção de água no solo e a mitigação de fenómenos extremos associados às alterações climáticas.

A exploração sustentável da biomassa pode também gerar benefícios sociais significativos. A criação de postos de trabalho diretos e indiretos nas áreas de recolha, transporte e processamento promove a fixação de populações em áreas rurais, reduzindo a desertificação humana e fortalecendo as comunidades locais. Além disso, a gestão ativa das florestas contribui para uma maior consciência ambiental entre os residentes, incentivando práticas mais sustentáveis e a valorização do património natural.

A biomassa tem também um papel crescente nas políticas nacionais e europeias de transição energética, sendo considerada uma fonte renovável e sustentável de energia. Em Ponte de Lima, a exploração deste recurso pode ser integrada em programas de bioenergia, contribuindo para a redução da dependência de combustíveis fósseis e para o cumprimento das metas de descarbonização. Esta abordagem permite alinhar os benefícios económicos locais com os objetivos globais de sustentabilidade, consolidando o papel do município na economia verde.

A mudança no perfil de ocupação florestal reflete não apenas uma adaptação às condições ambientais, mas também uma resposta a políticas públicas e incentivos que têm promovido a transição para florestas mais biodiversas e resilientes. Estas medidas visam não apenas mitigar os impactos dos incêndios florestais, mas também contribuir para a captura de carbono, a melhoria da qualidade do solo e a promoção de habitats para a fauna local, alinhando-se com os objetivos de sustentabilidade nacionais e europeus.

Os resultados da ocupação do solo mostram que de facto existe potencial para a exploração de biomassa, pois existe bastante espaço florestal no concelho, contudo classes como as pastagens e agricultura não podem sofrer declínios tão acentuados razão

pela qual é necessário rever os planos de gestão territoriais locais de forma a perceber as razões que estão a levar a este declínio.

A nível concelhio verifica-se também um declínio de recursos hídricos descritos através da classe “Água”, algo preocupante dada a importância deste recurso e os esforços e recursos gastos anualmente para a proteção e salvaguarda deste recurso tão importante para atividades básicas para a sustentabilidade humana como é o caso da agricultura.

Entre 2022 e 2024, foi registado um crescimento significativo na altura da canópia das árvores em áreas florestais. Este indicador sugere condições climáticas favoráveis ao crescimento da vegetação, bem como uma ausência de incêndios florestais significativos nesse período. A integridade dos ecossistemas florestais parece, assim, ter sido preservada, contribuindo para o aumento da biomassa disponível.

O aumento da altura da canópia pode também ser interpretado como um indicador indireto da resiliência climática da floresta local. A ausência de eventos climáticos extremos e de incêndios significativos durante este período sugere que a floresta de Ponte de Lima tem mantido a sua capacidade de adaptação e crescimento, mesmo num contexto de alterações climáticas. Este cenário reforça a importância de políticas de gestão que combinem conservação e produção florestal para garantir a resiliência das florestas face a condições futuras imprevisíveis.

Apesar do elevado desempenho demonstrado pelo modelo, é importante reconhecer algumas limitações. A precisão das previsões depende da qualidade e resolução dos dados utilizados, bem como da representatividade das variáveis incluídas. Além disso, os resultados estão sujeitos a variações climáticas e alterações na gestão florestal que podem impactar a biomassa no futuro. Assim, recomenda-se a atualização contínua dos dados e a validação do modelo com novas amostras para assegurar a sua aplicabilidade em contextos dinâmicos.

Apesar do potencial identificado para a exploração de biomassa em Ponte de Lima, os resultados indicam uma tendência ligeiramente crescente na sua disponibilidade. Este dado sublinha a importância de uma gestão cuidadosa e sustentável, assegurando que a exploração de biomassa não comprometa os ecossistemas nem reduza significativamente a cobertura florestal. As áreas ocupadas por espécies típicas de florestas de conservação, que desempenham um papel crucial no sequestro e armazenamento de carbono, devem ser tratadas com especial atenção. Nestas zonas, a exploração intensiva deve ser evitada,

sendo recomendada apenas uma gestão seletiva para controlo da carga de combustível e mitigação do risco de incêndios.

Ainda assim, a exploração de biomassa pode ser uma oportunidade positiva para a região, especialmente no âmbito do controlo da carga de combustível, na manutenção da paisagem e como medida preventiva contra incêndios florestais. Esta abordagem permite conciliar a produção de biomassa com a preservação dos ecossistemas e dos serviços ambientais prestados pelas florestas.

A exploração de biomassa para controlo da carga de combustível também se alinha com as estratégias nacionais de prevenção de incêndios florestais, que enfatizam a necessidade de intervenções ativas para reduzir o risco de propagação de fogos de grande dimensão. A integração destas práticas com programas de silvicultura preventiva pode maximizar os benefícios ambientais e económicos, enquanto reduz o impacto dos incêndios na biodiversidade e nos serviços ecossistémicos.

O modelo apresenta uma descida de ocupação do solo associada a uma espécie invasora e a subida de outra sendo elas a *Acacia Delbata* e *Acacia Melanoxylon* respetivamente, estes resultados são importantes para perceber a qualidade das medidas incluídas nos programas de gestão territoriais na secção de medidas de proteção e mitigação das espécies invasoras, como tal é necessário dar mais atenção a estas áreas e fazer um controlo de vegetação mais abrasivo e que possa manter a integridade e bom funcionamento dos ecossistemas locais, e mediante o possível reencaminhar para locais onde a sua biomassa possa ser devidamente aproveitada.

Os resultados do modelo desenvolvido reforçam a confiança na sua aplicação, com um coeficiente de determinação de 98,28%, refletindo uma correspondência robusta entre as previsões e os dados reais. Este método inovador oferece uma base sólida para futuras abordagens, permitindo integrar tecnologias avançadas de deteção remota e técnicas de modelação preditiva mais sofisticadas. Assim, o estudo constitui um ponto de partida para avaliações mais abrangentes da disponibilidade de biomassa acima do solo, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de gestão florestal.

Além de prever a biomassa acima do solo, o modelo desenvolvido pode ser adaptado para estimar outros indicadores relacionados, como o potencial de armazenamento de carbono, a vulnerabilidade a incêndios e a identificação de áreas prioritárias para intervenções de gestão florestal. Estas aplicações complementares reforçam o valor do modelo como uma

ferramenta integrada para o planeamento sustentável e a monitorização contínua das florestas locais.

Por fim, a implementação de um sistema de monitorização contínua, utilizando tecnologias de deteção remota e sensores avançados, será essencial para avaliar a eficácia das práticas de gestão florestal ao longo do tempo. Esta abordagem permitirá ajustar estratégias de exploração e conservação de forma dinâmica, garantindo que a sustentabilidade ambiental e económica seja mantida a longo prazo. O estudo aqui apresentado constitui um primeiro passo importante, mas reforça a necessidade de integrar ciência, políticas públicas e participação comunitária para o sucesso da gestão florestal.

O modelo demonstra ainda que variáveis do solo, topografia do terreno e do clima são dados impactantes na disponibilidade de biomassa, o que demonstra que olhando do ponto de vista técnico do produtor florestal ou dos decisores políticos deve existir uma compreensão destas temáticas de forma a explorar o potencial deste recurso e que seja o mais sustentável possível a nível ambiental.

7. Conclusão

O presente estudo apresenta uma metodologia inovadora que permite avaliar a disponibilidade de biomassa acima do solo, bem como proceder à sua quantificação mesmo tendo em consideração as suas limitações de resolução espacial, o que comprova que é de facto possível obter este tipo de dados com recurso à deteção remota.

Com este estudo ficaram perceptíveis as dificuldades na localização e quantificação da disponibilidade de biomassa não só por questões técnicas como a limitação dos pixéis, mas também devido ao facto da volatilização da biomassa e também pelo facto de ser um ser vivo que está em constante transformação quer por mãos naturais, quer por mão do homem. Contudo através da análise de parâmetros do solo, clima e de vegetação aliados a indicadores fisiográficos é possível perceber que estes estão relacionados com o crescimento e desenvolvimento da biomassa.

Com todos estes resultados é possível dizer que Ponte de Lima dispõe de múltiplas espécies arbóreas que lhe auferem uma boa disponibilidade de biomassa lenhosa, e que ao mesmo tempo possui condições externas como a rede viária e bons acessos de comunicação para chegar a áreas florestais, contudo é também importante referir que muitas das espécies presentes são espécies adaptadas à região e algumas delas até autóctones e devem ser preservadas, logo a exploração destas áreas deve ser evitada e conservada mediante o possível.

Apesar de se verificar elevadas áreas com grande disponibilidade de biomassa, uma grande parte delas são de baixa disponibilidade, razão pela qual é importante refletir se é ou não viável proceder à exploração da biomassa nestes locais, já nos locais com disponibilidade de moderada para cima é importante ter em atenção quais espécies se está a explorar e proceder sempre que possível à sua reposição de forma a criar áreas florestais sustentáveis.

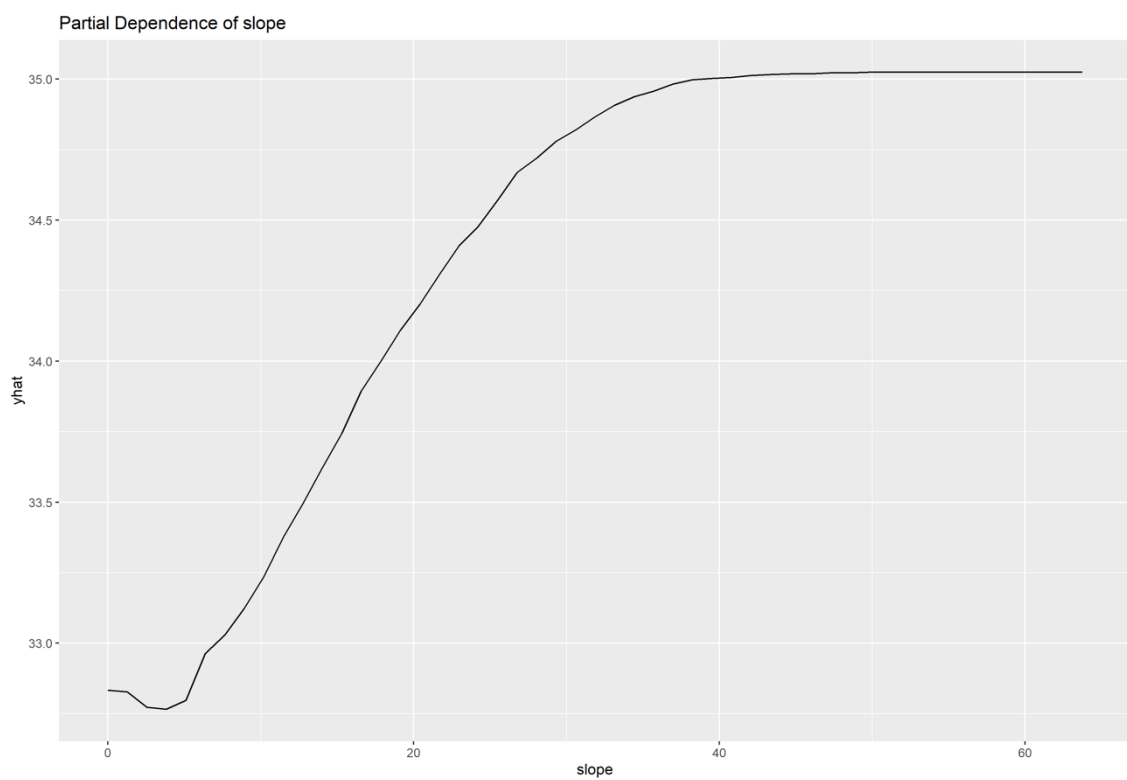
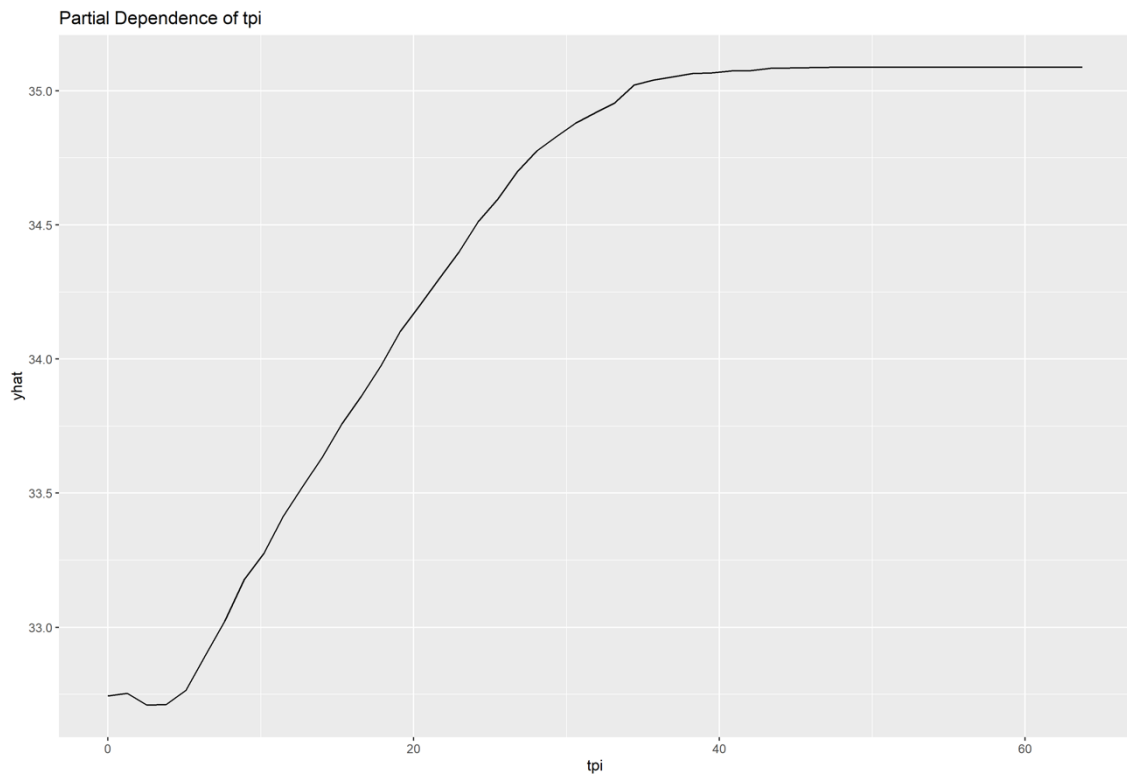
Uma das limitações deste modelo prende-se ao facto de o tamanho do pixel ser de 10x10m, o que torna mais difícil o algoritmo detetar certos padrões e por vezes pode classificar de forma errada o pixel, por este motivo em futuras abordagens seria interessante complementar e cruzar novos dados e aumentar o número de variáveis preditoras, bem como considerar o uso de outras tecnologias nomeadamente dados LiDAR e imagens com maior resolução e pixel menor, podendo depois ser validados com dados de campo.

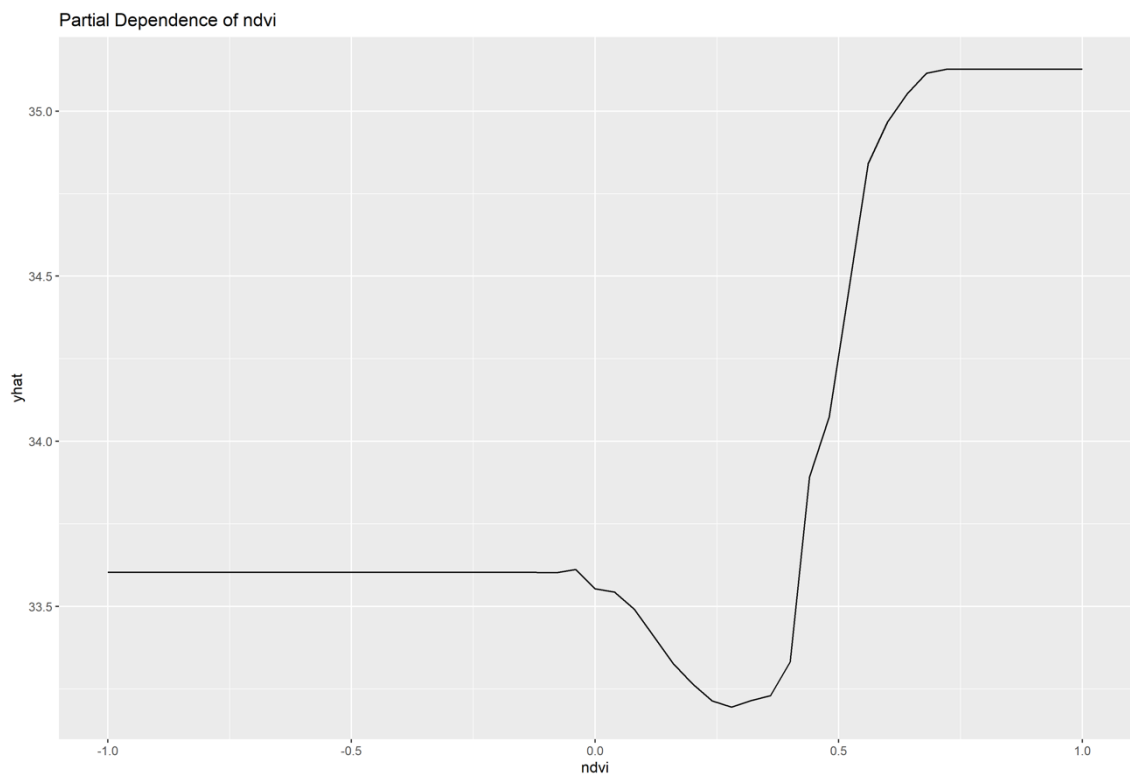
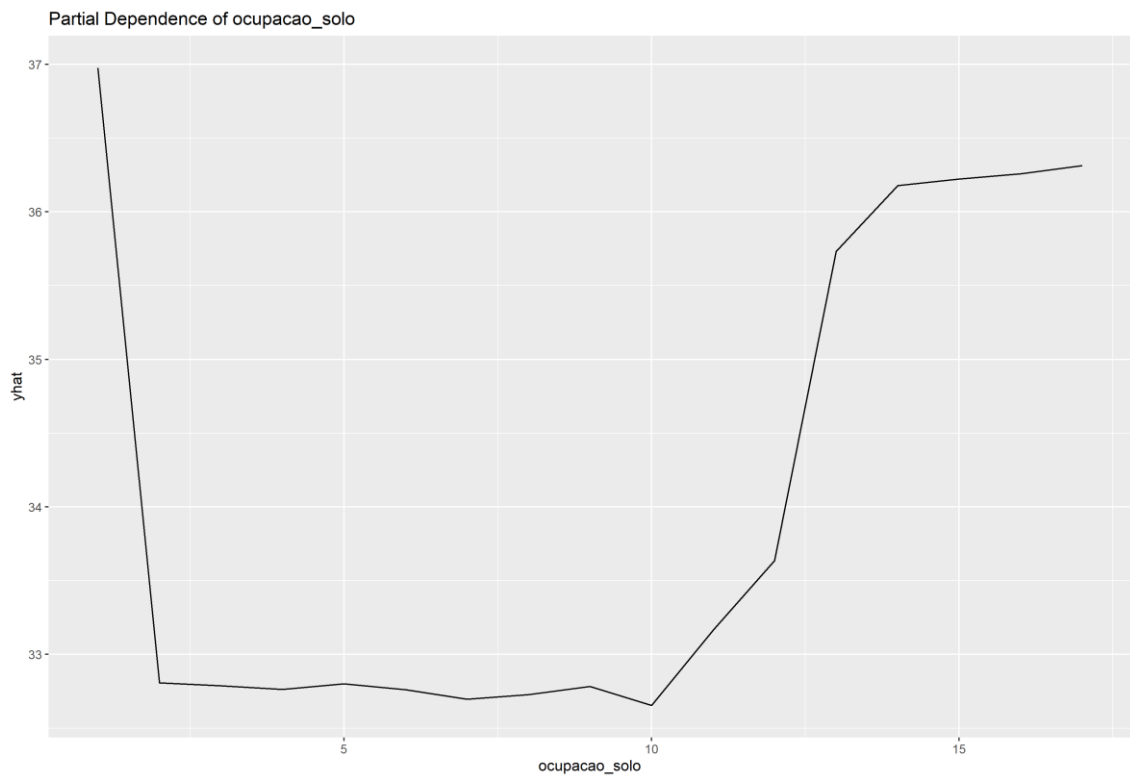
Futuramente para dar sequência a este estudo seria interessante proceder à recolha de amostras de campo para análise e posterior validação para aumentar a precisão dos dados e diminuir os erros associados ao modelo. Seria interessante alargar a área de estudo a uma escala de maior dimensão e utilizar mais variáveis de forma a melhorar a precisão e qualidade dos resultados, nomeadamente o aperfeiçoamento da quantificação da biomassa em áreas florestais.

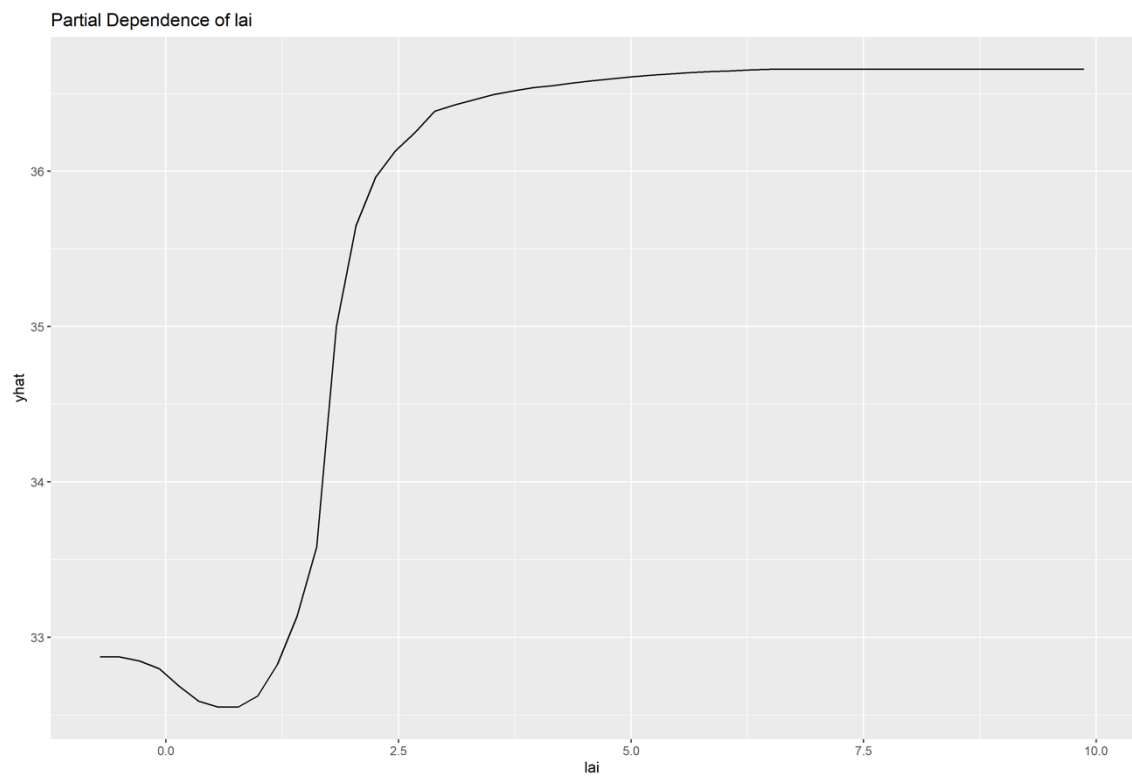
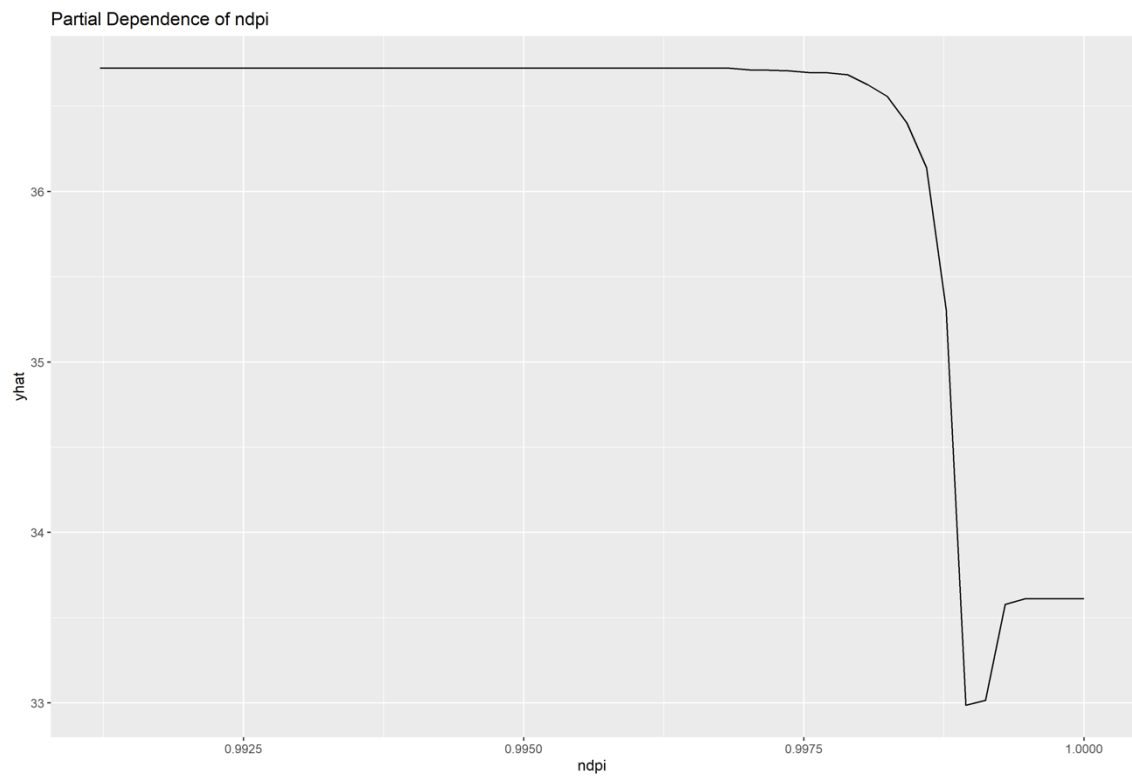
Ainda à cerca do aproveitamento futuro desta metodologia, seria também interessante quantificar a capacidade de acumulação de carbono que a floresta concelhia possui e ainda perceber o sequestro que esta mesma exerce assim como os benefícios para os ecossistemas da região.

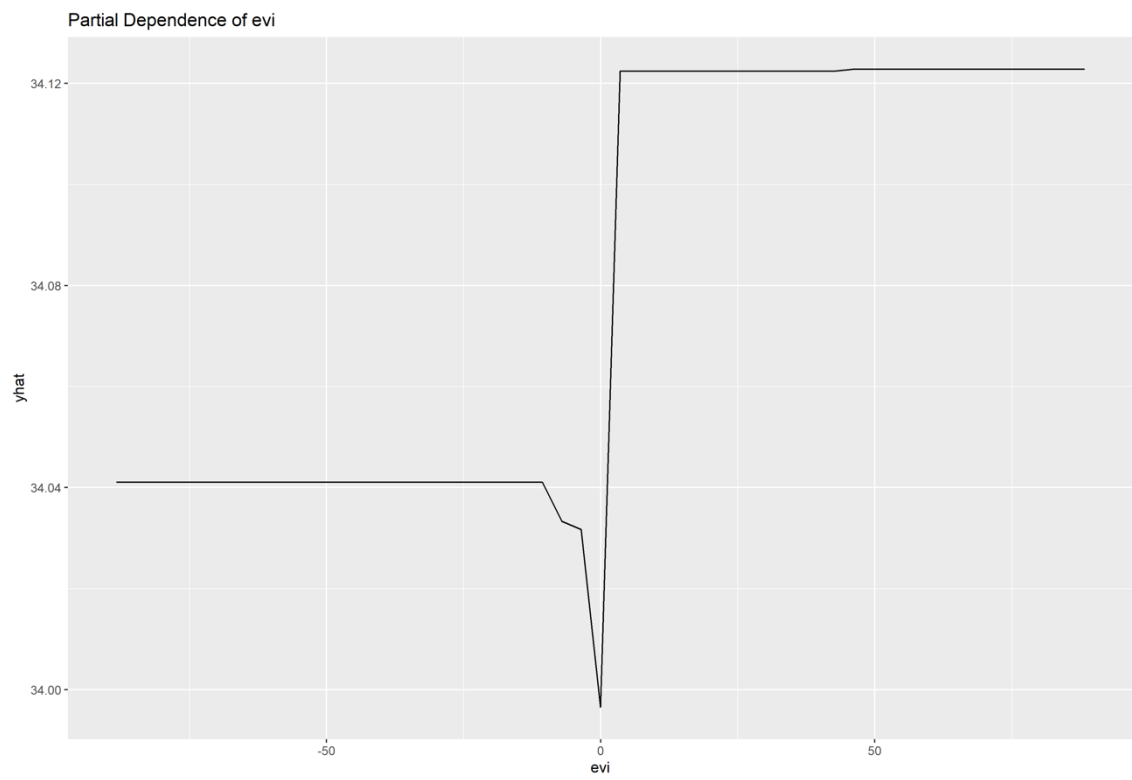
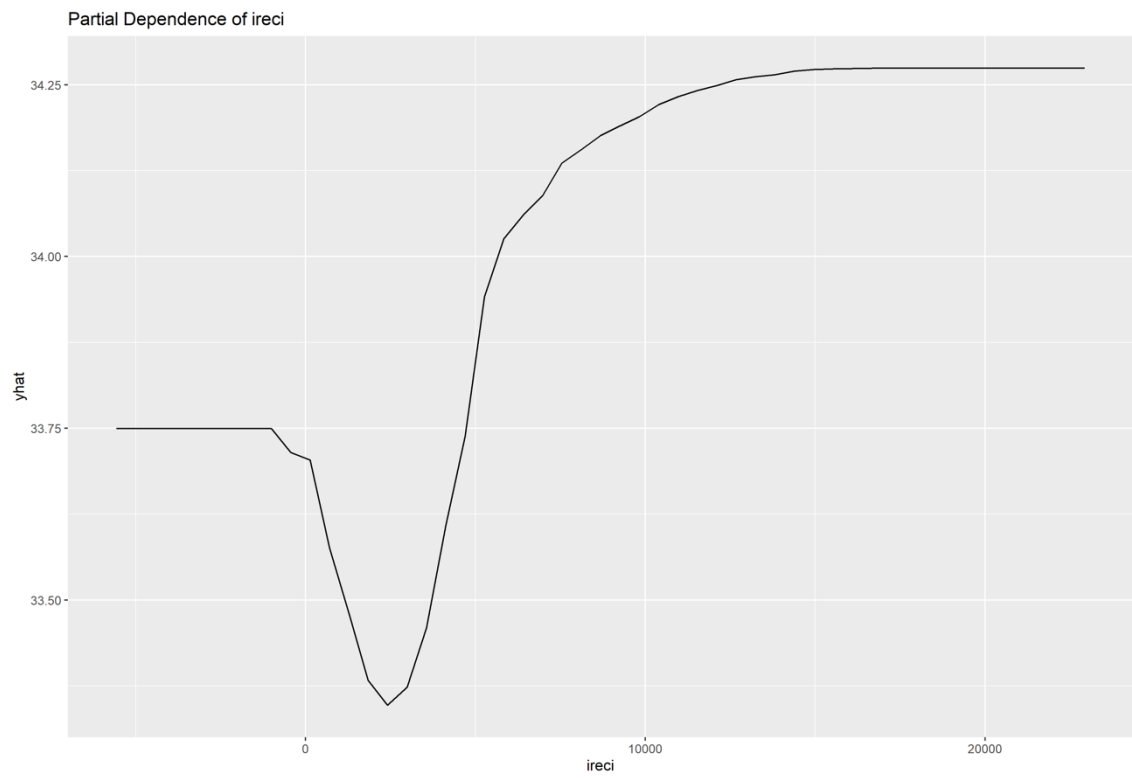
Seria também de todo interessante trazer e incorporar conhecimento empresarial e colaborar com entidades da indústria da madeira e dos seus sub produtos de forma a melhorarem a sua logística e consequentemente melhorarem a eficácia na gestão da quantidade de biomassa provenientes de áreas florestais.

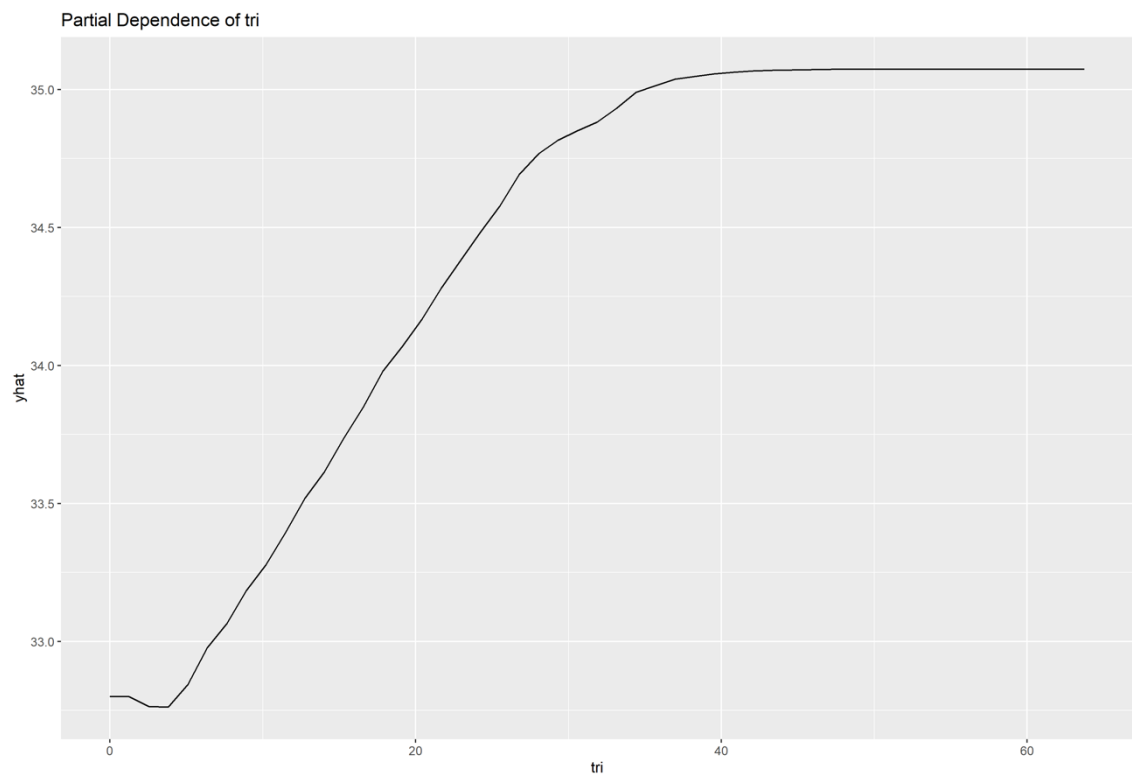
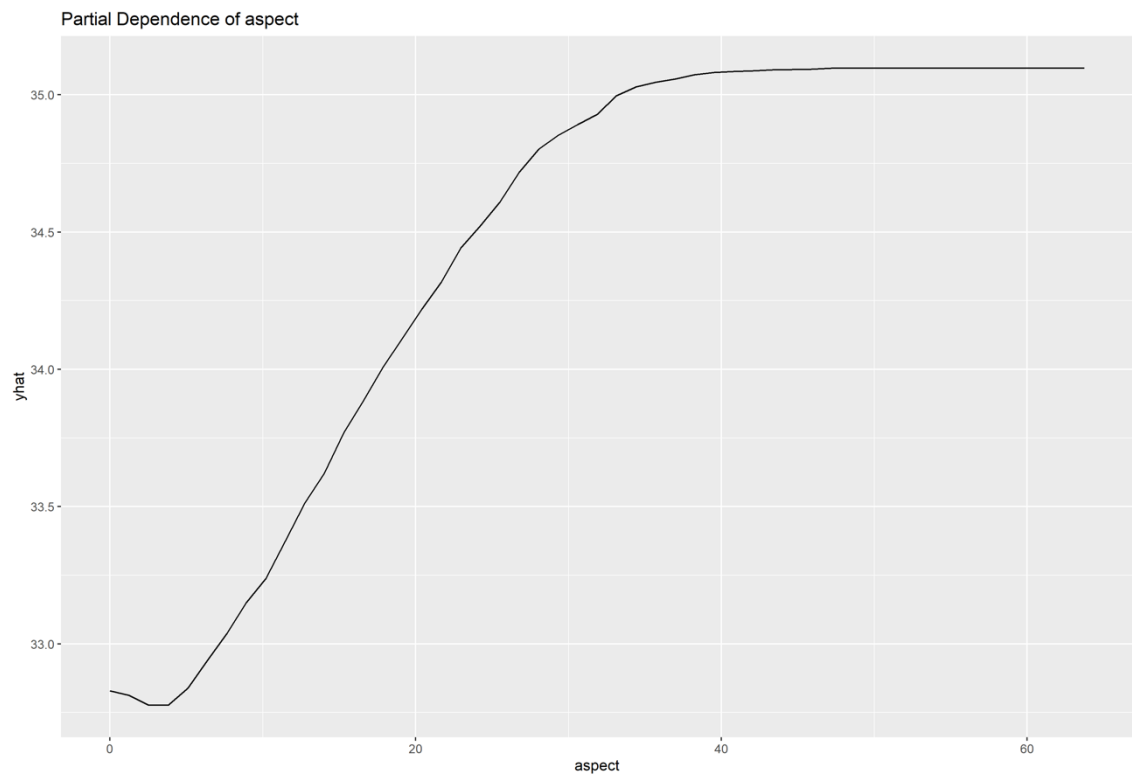
Anexos











Bibliografia

- Adamu, B., Ibrahim, S., Rasul, A., Whanda, S. J., Headboy, P., Muhammed, I., & Maiha, I. A. (2021). Evaluating the accuracy of spectral indices from Sentinel-2 data for estimating forest biomass in urban areas of the tropical savanna. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22, 100484. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100484>
- Allen, K. A., Harris, M. P. K., & Marrs, R. H. (2013). Matrix modelling of prescribed burning in *Calluna vulgaris*-dominated moorland: short burning rotations minimize carbon loss at increased wildfire frequencies. *Journal of Applied Ecology*, 50(3), 614–624. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12075>
- Altarez, R. D. D., Apan, A., & Maraseni, T. (2024). Uncovering the Hidden Carbon Treasures of the Philippines' Towering Mountains: A Synergistic Exploration Using Satellite Imagery and Machine Learning. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 92(1), 55–73. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00264-w>
- AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 — IPCC*. (n.d.). Retrieved September 30, 2024, from <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>
- Aria, M., & Cuccurullo, C. (2017). bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, 11(4), 959–975. <https://doi.org/10.1016/J.JOI.2017.08.007>
- Beauregard, F., & De Blois, S. (2014). Beyond a Climate-Centric View of Plant Distribution: Edaphic Variables Add Value to Distribution Models. *PLOS ONE*, 9(3), e92642. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0092642>
- Bo, M., Mercalli, L., Pognant, F., Cat Berro, D., & Clerico, M. (2020). Urban air pollution, climate change and wildfires: The case study of an extended forest fire episode in northern Italy favoured by drought and warm weather conditions. *Energy Reports*, 6, 781–786. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2019.11.002>
- Bossu, J., Moreau, J., Delisée, C., Le Moigne, N., Corn, S., Sonnier, R., Viretto, A., Beauchêne, J., & Clair, B. (2023). Revealing the Potential of Waste Fibers from Timber Production and Clearings for the Development of Local Bio-based Insulation

- Fiberboards in French Guiana. *Waste and Biomass Valorization*, 14(12), 4281–4295.
<https://doi.org/10.1007/S12649-023-02085-9/FIGURES/14>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324/METRICS>
- Campbell, M. J., Dennison, P. E., Kerr, K. L., Brewer, S. C., & Anderegg, W. R. L. (2021). Scaled biomass estimation in woodland ecosystems: Testing the individual and combined capacities of satellite multispectral and lidar data. *Remote Sensing of Environment*, 262, 112511. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112511>
- Campbell, M. J., Eastburn, J. F., Dennison, P. E., Vogeler, J. C., & Stovall, A. E. L. (2024). Evaluating the performance of airborne and spaceborne lidar for mapping biomass in the United States' largest dry woodland ecosystem. *Remote Sensing of Environment*, 308, 114196. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2024.114196>
- Carta Administrativa Oficial de Portugal | DGT.* (n.d.). Retrieved September 26, 2023, from <https://www.dgterritorio.gov.pt/cartografia/cartografia-tematica/caop>
- Cartas de Solos e Capacidade de Uso, Série SROA/CNROA Formato Analógico.* (n.d.). Retrieved September 29, 2023, from <https://www.dgadr.gov.pt/cartografia/cartas-solos-cap-uso-analogico>
- Chang, C. C., Chen, Y. H., Chang, W. R., Wu, C. H., Chen, Y. H., Chang, C. Y., Yuan, M. H., Shie, J. L., Li, Y. S., Chiang, S. W., Yang, T. Y., Lin, F. C., Ko, C. H., Liu, B. L., Liu, K. W., & Wang, S. G. (2019). The emissions from co-firing of biomass and torrefied biomass with coal in a chain-grate steam boiler. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 69(12), 1467–1478.
<https://doi.org/10.1080/10962247.2019.1668871>
- Chen, W., Liu, S., Zhao, S., Zhu, Y., Feng, S., Wang, Z., Wu, Y., Xiao, J., Yuan, W., Yan, W., Ju, H., & Wang, Q. (2023). Temporal dynamics of ecosystem, inherent, and underlying water use efficiencies of forests, grasslands, and croplands and their responses to climate change. *Carbon Balance and Management*, 18(1).
<https://doi.org/10.1186/S13021-023-00232-2>
- Chinembiri, T. S., Mutanga, O., & Dube, T. (2022). Landsat-8 and Sentinel-2 Based Prediction of Forest Plantation C Stock Using Spatially Varying Coefficient

- Bayesian Hierarchical Models. *Remote Sensing*, 14(22), 5676. <https://doi.org/10.3390/rs14225676>
- Cova, G. R., Prichard, S. J., Rowell, E., Drye, B., Eagle, P., Kennedy, M. C., & Nemens, D. G. (2023). Evaluating Close-Range Photogrammetry for 3D Understory Fuel Characterization and Biomass Prediction in Pine Forests. *Remote Sensing*, 15(19), 4837. <https://doi.org/10.3390/rs15194837>
- Cui, L., Sun, M., Jiao, Z., Park, J., Agca, M., Zhang, H., He, L., Dai, Y., Dong, Y., Zhang, X., Lian, Y., Chen, L., & Zhao, K. (2022). Effectiveness of the Reconstructed MODIS Typical-Angle Reflectances on Forest Biomass Estimation. *Remote Sensing*, 14(21), 5475. <https://doi.org/10.3390/rs14215475>
- Dhakal, R., Maimaitijiang, M., Chang, J., & Caffè, M. (2023). Utilizing Spectral, Structural and Textural Features for Estimating Oat Above-Ground Biomass Using UAV-Based Multispectral Data and Machine Learning. *Sensors*, 23(24), 9708. <https://doi.org/10.3390/s23249708>
- Duncanson, L., Kellner, J. R., Armston, J., Dubayah, R., Minor, D. M., Hancock, S., Healey, S. P., Patterson, P. L., Saarela, S., Marselis, S., Silva, C. E., Bruening, J., Goetz, S. J., Tang, H., Hofton, M., Blair, B., Luthcke, S., Fatoyinbo, L., Abernethy, K., ... Zraggen, C. (2022). Aboveground biomass density models for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar mission. *Remote Sensing of Environment*, 270, 112845. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112845>
- Duni, S., Karimi, H., Ekşioğlu, B., Ekşioğlu, E., Glu, Ş., Ekşioğlu, B., & Glu, E. Ş. (2016). Optimization models to integrate production and transportation planning for biomass co-firing in coal-fired power plants. *IIE Transactions*, 48(10), 901–920. <https://doi.org/10.1080/0740817X.2015.1126004>
- Estudo do solo: pedologia e cartas do solo em Portugal*. (n.d.). Retrieved September 28, 2023, from <https://florestas.pt/conhecer/o-estudo-do-solo-a-pedologia-e-as-cartas-de-solo-em-portugal/>
- Faboya, O. L., Sojinu, S. O., Oguntuase, B. J., & Sonibare, O. O. (2020). Impact of forest fires on polycyclic aromatic hydrocarbon concentrations and stable carbon isotope compositions in burnt soils from tropical forest, Nigeria. *Scientific African*, 8, e00331. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2020.E00331>

- Ferreira, I. J. M., Campanharo, W. A., Fonseca, M. G., Escada, M. I. S., Nascimento, M. T., Villela, D. M., Brancalion, P., Magnago, L. F. S., Anderson, L. O., Nagy, L., & Aragão, L. E. O. C. (2023). Potential aboveground biomass increase in Brazilian Atlantic Forest fragments with climate change. *Global Change Biology*, 29(11), 3098–3113. <https://doi.org/10.1111/gcb.16670>
- Fremout, T., Cobián-De Vinatea, J., Thomas, E., Huaman-Zambrano, W., Salazar-Villegas, M., Limache-de la Fuente, D., Bernardino, P. N., Atkinson, R., Csaplovics, E., & Muys, B. (2022). Site-specific scaling of remote sensing-based estimates of woody cover and aboveground biomass for mapping long-term tropical dry forest degradation status. *Remote Sensing of Environment*, 276, 113040. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113040>
- García-Galindo, D., Gómez-Palmero, M., Pueyo, E., Germer, S., Pari, L., Afano, V., Dyjakon, A., Sagarna, J., Rivera, S., & Poutrin, C. (2016). Agricultural pruning as biomass resource: Generation, potentials and current fates. an approach to its state in Europe. *Volume 2016, Issue 24thEUBCE, Pages 1579 - 1595, 2016(24thEUBCE)*, 1579–1595.
- geoPortal do LNEG*. (n.d.). Retrieved September 25, 2023, from https://geoportal.lneg.pt/pt/dados_abertos/cartografia_geologica/cgplm/cgplm/
- Georgopoulos, N., Gitas, I. Z., Stefanidou, A., Korhonen, L., & Stavrakoudis, D. (2021). Estimation of individual tree stem biomass in an uneven-aged structured coniferous forest using multispectral LiDAR data. *Remote Sensing*, 13(23), 4827. <https://doi.org/10.3390/rs13234827>
- Guerra-Hernández, J., Botequim, B., Bujan, S., Jurado-Varela, A., Molina-Valero, J. A., Martínez-Calvo, A., & Pérez-Cruzado, C. (2022). Interpreting the uncertainty of model-based and design-based estimation in downscaling estimates from NFI data: a case-study in Extremadura (Spain). *GIScience and Remote Sensing*, 59(1), 686–704. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2051383>
- Instituto Hidrográfico*. (n.d.). Retrieved September 29, 2023, from <https://www.hidrografico.pt/>
- Jansen, P., & Kuiper, L. (2004). Double green energy from traditional coppice stands in the Netherlands. *Biomass and Bioenergy*, 26(4), 401–402. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2003.08.004>

- Jiménez-Morillo, N. T., de la Rosa, J. M., Waggoner, D., Almendros, G., González-Vila, F. J., & González-Pérez, J. A. (2016). Fire effects in the molecular structure of soil organic matter fractions under *Quercus suber* cover. *CATENA*, *145*, 266–273. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2016.06.022>
- Kulkarni, A. D., & Lowe, B. (n.d.). *Random Forest Algorithm for Land Cover Classification Random Forest Algorithm for Land Cover Classification Recommended Citation Recommended Citation International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication Random Forest Algorithm for Land Cover Classification*. Retrieved July 25, 2024, from <http://www.ijritcc.org>
- Li, H., Liu, K., Yang, B., Wang, S., Meng, Y., Wang, D., Liu, X., Li, L., Li, D., Bo, Y., & Li, X. (2024). Continuous monitoring of grassland AGB during the growing season through integrated remote sensing: a hybrid inversion framework. *International Journal of Digital Earth*, *17*(1), 2329817. <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2329817>
- Li, X., Wang, X., Gao, Y., Wu, J., Cheng, R., Ren, D., Bao, Q., Yun, T., Wu, Z., Xie, G., & Chen, B. (2023). Comparison of Different Important Predictors and Models for Estimating Large-Scale Biomass of Rubber Plantations in Hainan Island, China. *Remote Sensing*, *15*(13), 3447. <https://doi.org/10.3390/rs15133447>
- Li, X., Xiao, J., Fisher, J. B., & Baldocchi, D. D. (2021). ECOSTRESS estimates gross primary production with fine spatial resolution for different times of day from the International Space Station. *Remote Sensing of Environment*, *258*, 112360. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112360>
- Liang, M., Duncanson, L., Silva, J. A., & Sedano, F. (2023). Quantifying aboveground biomass dynamics from charcoal degradation in Mozambique using GEDI Lidar and Landsat. *Remote Sensing of Environment*, *284*, 113367. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113367>
- Liu, L., Gou, X., Lu, J., Gao, Y., & He, C. (2012). Experimental investigations on the layer co-combustion of coal/biomass briquette blends. *Volume 32, Issue 8, Pages 124 - 132*, *32*(8), 124–132.
- Madhuanand, L., Philippart, C. J. M., Wang, J., Nijland, W., de Jong, S. M., Bijleveld, A. I., & Addink, E. A. (2023). Enhancing the predictive performance of remote sensing for ecological variables of tidal flats using encoded features from a deep learning

- model. *GIScience and Remote Sensing*, 60(1), 2163048.
<https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2163048>
- Maier, J. M., Sowlati, T., & Salazar, J. (2019). Life cycle assessment of forest-based biomass for bioenergy: A case study in British Columbia, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 146, 598–609.
<https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2019.02.035>
- Malik, A. D., Arief, M. C. W., Withaningsih, S., & Parikesit, P. (2024). Modeling regional aboveground carbon stock dynamics affected by land use and land cover changes. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(1), 245–266.
<https://doi.org/10.22034/gjesm.2024.01.16>
- Malkinson, D., Wittenberg, L., Beerli, O., & Barzilai, R. (2011). Effects of Repeated Fires on the Structure, Composition, and Dynamics of Mediterranean Maquis: Short- and Long-Term Perspectives. *Ecosystems*, 14(3), 478–488.
<https://doi.org/10.1007/S10021-011-9424-Z/TABLES/3>
- Marques, T. S., Maia, C., Ribeiro, D., Torres, M., Gonçalves, P., & Ferreira, M. (n.d.-a). *ALTO MINHO 2030 Dashboard sub-regional | abril 2022*.
- Marques, T. S., Maia, C., Ribeiro, D., Torres, M., Gonçalves, P., & Ferreira, M. (2024). *ALTO MINHO 2030 Dashboard sub-regional | abril 2022*.
- Nunes, L. J. R., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2022). Acacia dealbata Link. Aboveground Biomass Assessment: Sustainability of Control and Eradication Actions to Reduce Rural Fires Risk. *Fire* 2022, Vol. 5, Page 7, 5(1), 7.
<https://doi.org/10.3390/FIRE5010007>
- Nunes, L. J. R., Raposo, M. A. M., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2021a). Carbon Sequestration Potential of Forest Invasive Species: A Case Study with Acacia dealbata Link. *Resources* 2021, Vol. 10, Page 51, 10(5), 51.
<https://doi.org/10.3390/RESOURCES10050051>
- Nunes, L. J. R., Raposo, M. A. M., Meireles, C. I. R., Gomes, C. J. P., & Ribeiro, N. M. C. A. (2021b). Energy Recovery of Shrub Species as a Path to Reduce the Risk of Occurrence of Rural Fires: A Case Study in Serra da Estrela Natural Park (Portugal). *Fire* 2021, Vol. 4, Page 33, 4(3), 33. <https://doi.org/10.3390/FIRE4030033>

- Nunes, L. J. R., Rodrigues, A. M., Loureiro, L. M. E. F., Sá, L. C. R., & Matias, J. C. O. (2021). Energy Recovery from Invasive Species: Creation of Value Chains to Promote Control and Eradication. *Recycling 2021, Vol. 6, Page 21*, 6(1), 21. <https://doi.org/10.3390/RECYCLING6010021>
- Onyeaka, H., Miri, T., Obileke, K. C., Hart, A., Anumudu, C., & Al-Sharify, Z. T. (2021). Minimizing carbon footprint via microalgae as a biological capture. *Carbon Capture Science & Technology*, 1, 100007. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2021.100007>
- Pinza-Jiménez, C. J., & Garcés-Gómez, Y. A. (2023). Assessing the performance of random forest regression for estimating canopy height in tropical dry forests. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 13(6), 6787–6796. <https://doi.org/10.11591/ijece.v13i6.pp6787-6796>
- Pirard, R. (2023). Rethinking the role of value-added industries for invasive trees in South Africa. *International Forestry Review*, 25(2), 223–243. <https://doi.org/10.1505/146554823837244428>
- PORTAL DO CLIMA. (2024.). Retrieved September 27, 2023, from <http://portaldoclima.pt/pt/>
- Portal do INE. (n.d.-a). Retrieved September 26, 2023, from https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&userLoadSave=Load&userTableOrder=10765&tipoSeleccao=1&contexto=pq&selTab=tab1&submitLoad=true
- Portal do INE. (n.d.-b). Retrieved September 26, 2023, from https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&userLoadSave=Load&userTableOrder=9337&tipoSeleccao=1&contexto=pq&selTab=tab1&submitLoad=true&xlang=pt
- Ramalingam, S., Subramanian, S., R, B., & Subramanian, A. (2020). Suitability analysis of Gulmohar bio oil from pyrolysis process as a fuel for CI Engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1759734>
- Rapiya, M., Ramoelo, A., & Truter, W. (2023). Seasonal evaluation and mapping of aboveground biomass in natural rangelands using Sentinel-1 and Sentinel-2 data.

- Environmental Monitoring and Assessment*, 195(12), 1544.
<https://doi.org/10.1007/s10661-023-12133-5>
- Razikordmahaleh, L., & Larijani, M. (2020). Identification and green grading of jobs in the renewable energy field of the biomass: A grounded theory study. *Volume 16, Issue 6, Pages 40 - 52, 16(6)*, 40–52.
- REGIÃO HIDROGRÁFICA DO MINHO E LIMA (RHI). (n.d.).
- Santoro, M. , & C. O. (2023). ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2010, 2017, 2018, 2019 and 2020, v4. *NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis*.
- Servia, H., Pareeth, S., Michailovsky, C. I., de Fraiture, C., & Karimi, P. (2022). Operational framework to predict field level crop biomass using remote sensing and data driven models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 108, 102725. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102725>
- Strandgard, M., Taskhiri, M. S., & Turner, P. (2023). Evaluating the Impact of Meteorological Data Sources on Moisture Prediction Accuracy of Eucalyptus nitens Log Pile Natural Drying Models. *Croatian Journal of Forest Engineering*, 44(2), 337–346. <https://doi.org/10.5552/CROJFE.2023.1757>
- Suwanlee, S. R., Pinasu, D., Som-ard, J., Borgogno-Mondino, E., & Sarvia, F. (2024). Estimating Sugarcane Aboveground Biomass and Carbon Stock Using the Combined Time Series of Sentinel Data with Machine Learning Algorithms. *Remote Sensing*, 16(5), 750. <https://doi.org/10.3390/rs16050750>
- Tesha, D. L., Madundo, S. D., & Mauya, E. W. (2024). Post-fire assessment of recovery of montane forest composition and stand parameters using in situ measurements and remote sensing data. *Trees, Forests and People*, 15, 100464. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100464>
- Theobald, D. M., Harrison-Atlas, D., Monahan, W. B., & Albano, C. M. (2015). Ecologically-Relevant Maps of Landforms and Physiographic Diversity for Climate Adaptation Planning. *PLOS ONE*, 10(12), e0143619. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0143619>
- Wang, Y., Qin, R., Cheng, H., Liang, T., Zhang, K., Chai, N., Gao, J., Feng, Q., Hou, M., Liu, J., Liu, C., Zhang, W., Fang, Y., Huang, J., & Zhang, F. (2022). Can Machine

Learning Algorithms Successfully Predict Grassland Aboveground Biomass?
Remote Sensing, 14(16), 3843. <https://doi.org/10.3390/rs14163843>