



IANIZE MAIRA DE CARVALHO CARDOSO

Licenciada em ciências de Engenharia do Ambiente

O EFEITO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA FLORESTA DE PINHEIROS NO PINHAL DE LEIRIA NOS SÉCULOS XX E XXI

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA DO
AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Março, 2023



O EFEITO DAS ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS NA PRODUTIVIDADE DA FLORESTA DE PINHEIROS NO PINHAL DE LEIRIA NOS SÉCULOS XX E XXI

IANIZE MAIRA DE CARVALHO CARDOSO

Licenciada em ciências de Engenharia do Ambiente

Orientadora: Maria Teresa Calvão Rodrigues,
Professora Auxiliar, NOVA School of Science and Technology, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientadora: Carla Pimentel,
Investigadora Doutorada, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor José Carlos Ribeiro Ferreira,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

Arguentes: Doutor João Rui Dias Pinto Ribeiro

Orientador: Prof.^a Doutora Maria Teresa Calvão Rodrigues,
Professor Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade Nova de Lisboa

O Efeito Das Alterações Climáticas na Produtividade da Floresta de Pinheiros no Pinhal de Leiria nos Séculos XX e XXI.

Copyright © Ianize Maira de Carvalho Cardoso, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

À minha orientadora, Professora Doutora Teresa Calvão, e à minha coorientadora, Doutora Carla Pimentel, por sugerirem o tema e por orientarem esta dissertação, pela sua ajuda, paciência, disponibilidade e espírito crítico, que contribuíram significativamente para a qualidade deste trabalho.

Ao João Campôa, por ter estado presente em todas as fases da tese e me ter auxiliado em tudo que precisei. Sem a sua orientação não teria sido possível completar este projeto, pelo qual ficarei eternamente grata.

À FCT, ao ICNF, ao ISA e a todos os colaboradores, por me terem concedido parte do material estudo e um local de trabalho.

Aos meus pais, tios, primos e irmã, pelo apoio emocional e financeiro, afeto e disponibilidade que me permitiu completar a faculdade com sucesso.

Aos meus colegas e amigos, que mesmo a distância, deram sempre todo o apoio e alívio cómico que precisei durante todo este processo.

Resumo

Atualmente, um dos grandes desafios a nível mundial é lidar com as alterações climáticas. Algumas das muitas consequências negativas deste fenómeno são o aumento da temperatura, alterações no regime de precipitação, o aumento do risco de desertificação e de incêndios florestais, e o aumento de eventos climáticos extremos. Apesar disto, tem sido constatado um aumento na produtividade primária líquida e na biomassa nas florestas, em contextos onde a disponibilidade de água não é fator limitante ao crescimento.

Nesta dissertação foi então realizada uma análise dendrocronológica de várias amostras de *Pinus pinaster* Ait. (pinheiro-bravo) provenientes da Mata Nacional de Leiria (MNL) recolhidas em 2013, 2016, 2017 e 2022, com a finalidade de avaliar como os efeitos das alterações climáticas na temperatura e na precipitação afetaram o crescimento radial das árvores nos seus primeiros 20 anos de vida. A MNL é uma floresta costeira cuja espécie vegetal dominante é o pinheiro-bravo. Para além do seu valor histórico e simbólico, contribui positivamente a nível económico, social e ambiental, principalmente com a produção de madeira e extração de resina, proteção das zonas costeiras, regulação do clima e como sumidouro de carbono.

O período de análise vai desde 1887 até 2021, tendo as amostras sido divididas em grupos de idades diferentes para se perceber quais as principais divergências no padrão de crescimento de árvores que germinaram em décadas distintas. Foi calculado o incremento médio em área basal de cada grupo a partir das espessuras dos anéis de crescimento, e concluiu-se que desde a década de 90 as árvores da região têm tido em média um crescimento radial superior. Por outro lado, foi feita a análise dendroclimatológica, para aferir sobre o impacto do clima, correlacionando as cronologias aos dados mensais de precipitação e de temperatura. Foram constatadas poucas correlações estatisticamente significativas, não se podendo afirmar que existiu um comportamento específico da espécie.

Palavras chave: *Pinus pinaster* Aiton, dendrocronologia, alterações climáticas.

Abstract

Currently, one of the major challenges worldwide is dealing with climate change. Some of the many negative consequences of this phenomenon are the increase in temperature, changes in the precipitation regime, the increased risk of desertification and forest fires, and the increase in extreme weather events. Despite this, an increase in net primary productivity and biomass in forests has been observed, when water is not a limiting factor of growth.

In this dissertation, a dendrochronological analysis of several samples of *Pinus pinaster* Ait. (maritime pine) from the Leiria National's Forest (LNF) collected in 2013, 2016, 2017 and 2022, in order to assess how the effects of climate change on temperature and precipitation affected the radial growth of trees in their first 20 years of life. The LNF is a coastal forest whose dominant plant species is maritime pine. In addition to its historical and symbolic value, it contributes positively at an economic, social and environmental level, mainly with the production of wood and resin extraction, protection of coastal areas, climate regulation and as a carbon sink.

The analysis period ranges from 1887 to 2021, with the samples being divided into different age groups to understand the main differences in the growth pattern of trees that germinated in different decades. The average increment in basal area of each group was calculated from the ring width, and it was concluded that since the 90's the trees in the region have had, on average, a higher radial growth. On the other hand, a dendroclimatological analysis was carried out to assess the impact of the climate, correlating the tree ring chronologies with the monthly data of precipitation and temperature. Few statistically significant correlations were found, not being able to state that there was a specific behavior of the species.

Key-words: *Pinus pinaster* Aiton, dendrochronology, climate change

Índice

1. Introdução.....	1
2. Revisão da Literatura	2
2.1 Importância das florestas	2
2.2 Alterações climáticas e sua influência nos ecossistemas florestais	3
2.3 Pinheiro-bravo	5
2.4 Dendrocronologia e dendroclimatologia	7
3. Metodologia.....	11
3.1 Área de estudo: Mata Nacional de Leiria.....	11
3.2 Amostragem	16
3.3 Preparação e processamento das amostras	17
3.4 Tratamento dos dados	18
4. Resultados e Discussão.....	21
5. Conclusão.....	33
6. Referências Bibliográficas	34
ANEXOS.....	39

Índice de figuras

Figura 1: Anomalia das temperaturas médias anuais da superfície terrestre e oceânica em comparação com a temperatura média anual observada no século XX	4
Figura 2: Área de distribuição do pinheiro-bravo em Portugal Continental	6
Figura 3: Seção transversal de uma conífera	8
Figura 4: Limites administrativos da Mata Nacional de Leiria (MNL)	11
Figura 5: Divisão da MNL em talhões	12
Figura 6: Diagrama Termopluviométrico	13
Figura 7: Altitude da MNL	13
Figura 8: Litologia da MNL	14
Figura 9: Tipo de solos na MNL	14
Figura 10: Carta de ocupação e uso do solo da MNL	15
Figura 11: Distribuição florestal das principais espécies arbóreas.....	15
Figura 12: a) Verruma de Pressler; b) Broca	16
Figura 13: Manuseamento da verruma	17
Figura 14: Amostras já lixadas no suporte de madeira	17
Figura 15: Limites dos anéis de crescimento identificados no MtreeRing.....	18
Figura 16: Intervalo de tempo que cada classe abrange.....	21
Figura 17: Séries de crescimento radial da classe A.....	22
Figura 18: Séries de crescimento radial da classe B.....	22
Figura 19: Séries de crescimento radial da classe C	23
Figura 20: Séries de crescimento radial da classe D	23
Figura 21: Séries de crescimento radial da classe E.....	24
Figura 22: Incremento em área basal durante o período de 20 anos definido em cada classe	24
Figura 23: Temperatura média anual (°C) do local em estudo no período de 1901 a 2021 e respetiva linha de tendência (a laranja).....	26
Figura 24: Precipitação total anual (mm) do local em estudo no período de 1901 a 2021 e respetiva linha de tendência (a laranja).....	26
Figura 25: Cronologia final da classe A	27
Figura 26: Cronologia final da classe B	27
Figura 27: Cronologia final da classe C	27
Figura 28: Cronologia final da classe D	28
Figura 29: Cronologia final da classe E	28
Figura 30: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1901 a 1906 (classe A). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	30

Figura 31: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1943 a 1962 (classe B). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respectivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	30
Figura 32: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1988 a 2007 (classe C). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respectivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	30
Figura 33: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1995 a 2014 (classe D). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respectivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	31
Figura 34: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 2005 a 2021 (classe E). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respectivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	31
Figura 35: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 2005 a 2021 (classe E). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respectivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento	32

Índice de tabelas

Tabela 1: Histórico de incêndios na MNL	16
Tabela 2: Diferentes classes e número de árvores em cada uma das classes	21
Tabela 3: Largura média dos anéis e respetivo desvio padrão de cada classe durante o período de 20 anos definido	25
Tabela 4: Resultados da ANOVA.....	25
Tabela 5: Resultado do teste de Tukey	25
Tabela 6: Indicadores estatísticos de cada classe durante o período de 20 anos definido.....	28

1. Introdução

A população humana, particularmente desde a revolução industrial, tem sido o principal agente responsável pelo aumento significativo da concentração dos gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono e o metano, na atmosfera, acarretando diversas consequências negativas para o planeta, nomeadamente as alterações climáticas.

As árvores, como seres vivos sésseis, são mais vulneráveis às mudanças que ocorrem ao seu redor. Sendo assim, o aumento da temperatura e a alteração no regime da precipitação, duas consequências das alterações climáticas e fatores que afetam o crescimento das árvores, podem ter efeitos no desenvolvimento destes seres. Esta influência do clima fica registada nos anéis de crescimento radial que são produzidos anualmente durante a época favorável ao crescimento, com a variação na espessura dos mesmos ano após ano. A ciência de se dedica ao estudo dos anéis de crescimento é a dendrocronologia.

Desta forma, o presente estudo pretende averiguar de que forma estas mudanças na temperatura e na precipitação têm influenciado o crescimento radial do pinheiro-bravo nos seus primeiros 20 anos de vida na Mata Nacional de Leiria, uma das maiores e mais importantes florestas de Portugal tanto a nível ambiental como económico. Obter estas informações através do estudo dendroclimatológico, ramo da dendrocronologia que associa os fatores climáticos à informação fornecida pelos anéis de crescimento, é essencial para se perceber o rumo da floresta, ainda que gerida, e potencialmente servir de apoio em futuros projetos de recuperação e restauro das áreas afetadas pelos incêndios cada vez maiores e mais frequentes.

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, sendo este o primeiro em que é brevemente introduzida a problemática, apresentados os objetivos e a estrutura do trabalho. O segundo capítulo corresponde à revisão bibliográfica, onde são expostas as temáticas importantes para a compreensão do tema. Inclui uma descrição da importância das florestas, das alterações climáticas e sua influência nos ecossistemas florestais, do pinheiro-bravo e da dendrocronologia e dendroclimatologia. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia de amostragem, preparação e processamento de amostras e tratamento de dados, bem como a descrição da área de estudo. Os resultados e a discussão são apresentados no quarto capítulo onde é exposto o que se obteve, e por último, o quinto capítulo, a conclusão, onde é feita uma análise dos resultados e dos impactos que as variáveis climáticas tiveram no crescimento radial das árvores ao longo do tempo.

2. Revisão da Literatura

2.1 Importância das florestas

Desde os primórdios da humanidade que as florestas desempenham um papel fundamental para a sua subsistência, referente às necessidades de refúgio de outrora e, atualmente, no que concerne à extração de madeira e de outros bens (Pilli & Pase, 2018).

Os ecossistemas florestais são definidos pela *Food and Agriculture Organization* (FAO) como áreas de pelo menos 0.5 hectares, com árvores com no mínimo 5 metros de altura, cujas copas ocupam mais de 10% daquela área, e que não estejam primariamente sob uso agrícola ou urbano. Segundo o 6.º Inventário Florestal Nacional Terreno, para além destes requisitos, as florestas devem ter também uma largura mínima de 20 metros.

Segundo a Lei de Bases da Política Florestal, de 17 de agosto de 1996, “*a floresta, pela diversidade e natureza dos bens e serviços que proporciona, é reconhecida como um recurso natural renovável, essencial à manutenção de todas as formas de vida, cabendo a todos os cidadãos a responsabilidade de a conservar e proteger*” (Lei n.º 33/96, de 17 de agosto). De fato as florestas proporcionam um elevado número de serviços de ecossistemas que contribuem para o bem-estar humano (Haines-Young & Potschin, 2018).

De acordo com o *Common International Standard for Ecosystem Services* (CICES), estes serviços podem ser divididos em três categorias: serviços de aprovisionamento, serviços culturais e serviços de regulação e manutenção, sendo acrescentada a categoria de serviços de suporte, quando considerada a classificação do *Millennium Ecosystem Assessment* (Haines-Young & Potschin, 2018; Millennium Ecosystem Assessment, 2005). No caso das florestas, serviços como a provisão de alimentos, de água e de madeira podem ser classificados como serviços de aprovisionamento; a regulação das cheias, polinização, regulação climática (incluindo o sequestro de carbono), entre outros, são exemplos de serviços de regulação e manutenção; os benefícios recreativos, paisagísticos e religiosos são considerados serviços culturais; por fim, na categoria de serviços de suporte enquadram-se a formação do solo, o ciclo de nutrientes e o ciclo hidrológico (FSC, 2021; Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Tendo em conta todos os benefícios acima citados, outro dos princípios da Lei de Bases da Política Florestal, de 17 de agosto de 1996, é que deve haver uma gestão sustentável, que permita responder às necessidades atuais, bem como das gerações futuras (Lei n.º 33/96, de 17 de agosto).

Atualmente, estima-se que as florestas cubram 4.06 mil milhões de hectares, isto é, cerca de 31% da superfície terrestre. Infelizmente, com o aumento da população e, conseqüentemente, do consumo de cada vez mais recursos, nem sempre há uma gestão adequada das florestas, verificando-se em todo o globo episódios de desflorestação, poluição, degradação do solo, entre outros, que interferem negativamente com o equilíbrio desses ecossistemas florestais. A desflorestação e ânsia por recursos refletiu-se em aproximadamente 420 milhões de hectares de floresta destruídos e convertidos para outros usos entre os anos de 1990 a 2020 (FAO, 2022).

Desta forma, torna-se cada vez mais necessária a procura de medidas novas e mais flexíveis face à incerteza que esse desequilíbrio pode acarretar, sendo importante a gestão focar-se em soluções baseadas na resiliência, de modo a responder de forma adaptativa às alterações futuras do clima (Mori et al., 2017).

Em Portugal cerca de 36% do território é ocupado por floresta, sendo este o principal uso do solo nacional. Embora a floresta nacional tenha passado por vários períodos de evolução, regressão e transformação, atualmente 72% da área florestal portuguesa é constituída por espécies autóctones (AFN, 2015; Nunes et al., 2019).

Estas mudanças em termos estruturais, funcionais e paisagísticos da floresta fazem parte do seu percurso evolutivo e adaptativo, tendo sido impulsionadas por vezes de forma natural e, noutras ocasiões, pela ação humana. Assim sendo, as alterações da floresta nacional foram potenciadas pelas alterações climáticas, introdução de novas espécies, desflorestação intensiva em conjunto com a alteração do uso do solo, de modo a satisfazer as necessidades humanas da época (Nunes et al., 2019).

Atualmente, a floresta portuguesa é constituída principalmente por folhosas silvo-industriais (eucaliptais), por pinhais, com povoamentos de pinheiro-bravo e pinheiro-manso, por folhosas perenifólias, como os sobreiros e as azinheiras e, finalmente, por folhosas caducifólias, dentre elas os carvalhos e os castanheiros (AFN, 2015).

Todos estes tipos de florestas têm importância económica para o país. Os pinhais são explorados principalmente pela madeira, resina e pinhões que produzem, o montado (constituído por folhosas perenifólias) é utilizado como sistema silvipastoril, com animais de pasto e com o aproveitamento da cortiça produzida pelos sobreiros, os carvalhos e castanheiros também pela madeira e pelos frutos, e por fim os eucaliptos para a produção de pasta de papel (Figueiredo et al., 2014; Nunes et al., 2019; Resolução do Conselho de Ministros n.º 6-B/2015, de 4 de fevereiro).

Dado o longo período de tempo necessário para a formação de uma floresta, conclui-se que a floresta existente nos dias de hoje foi resultado das intervenções realizadas nos séculos passados, do mesmo modo que o que for definido agora será determinante no setor florestal no próximo século (Resolução do Conselho de Ministros n.º 6-B/2015, de 4 de fevereiro), reiterando a necessidade de priorizar as medidas de proteção deste ecossistema.

2.2 Alterações climáticas e sua influência nos ecossistemas florestais

As alterações climáticas referem-se a uma alteração no estado do clima, identificando-se mudanças na média e/ou variabilidade nas suas propriedades durante um longo período de tempo (IPCC, 2018).

Tal como referido no capítulo anterior, o rápido crescimento populacional tem sido um grande impulso para o consumo desenfreado de recursos e de energia. Este consumo crescente, a partir da revolução industrial, é responsável pelo aumento da temperatura média do planeta, devido, principalmente, ao aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, pela queima de combustíveis fósseis e pelas alterações no uso do solo (IPCC, 2013, 2018).

O dióxido de carbono (CO₂), o óxido nitroso (N₂O) e o metano (CH₄) são os principais GEE responsáveis pelo aquecimento global, aprisionando o calor da radiação solar na atmosfera, o que tem como consequência a transformação significativa da estrutura e do funcionamento do sistema terrestre (IPCC, 2013).

Desta forma, a influência humana tornou-se o principal agente de mudança na Terra, ao ponto de se considerar uma nova era geológica: o Antropoceno, com evidências estratigráficas distintas nos sedimentos e nos glaciares das que se encontram no Holoceno, a era geológica anterior (Waters et al., 2016).

A Figura 1 apresenta a variação da anomalia das temperaturas médias anuais desde a Revolução Industrial (NOAA, 2022). A anomalia corresponde ao desvio em relação a um valor de referência (temperatura média observada no século XX). Uma anomalia positiva indica que a temperatura observada foi superior ao valor de referência e uma anomalia negativa o contrário. Pode-se constatar que desde a década de 80 a temperatura média anual tem vindo a aumentar progressivamente (NOAA, 2022).

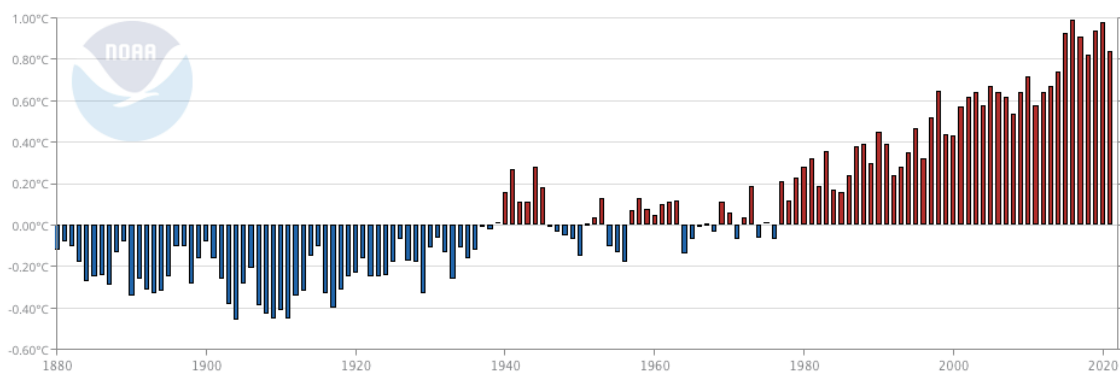


Figura 1: Anomalia das temperaturas médias anuais da superfície terrestre e oceânica em comparação com a temperatura média anual observada no século XX (Fonte: NOAA, 2022)

Para além do aumento da temperatura, são previstas outras consequências das alterações climáticas, tal como a mudança no regime da precipitação, verificando-se alterações nos padrões de chuva, havendo mais períodos de seca em algumas regiões do mundo, bem como um aumento na intensidade e frequência da precipitação noutras. Antecipa-se também um aumento dos fenómenos naturais extremos, como as tempestades e as ondas de calor, perdas de biodiversidade, acidificação dos oceanos, aumento do nível médio dos oceanos, pelo derretimento dos glaciares, entre outras consequências (Hardy, 2003; IPCC, 2018)

A região mediterrânica, onde se encontra Portugal, não está isenta dos efeitos das alterações climáticas. Segundo a Agência Europeia do Ambiente (AEA), esta região irá sofrer com um aumento de temperatura acima da média europeia, ocasionando um crescimento no número de mortes devido a ondas de calor, e ainda na expansão dos habitats de organismos vetores de doenças, uma diminuição na precipitação anual e do fluxo fluvial anual, havendo uma redução do rendimento das colheitas e do potencial hidroelétrico, um aumento do risco de desertificação e de incêndios florestais, estando presente também a ameaça da perda de biodiversidade (EEA, 2015).

Por outro lado, com as alterações climáticas constatou-se um aumento da produtividade primária líquida e de biomassa nas florestas, em contextos onde a precipitação e a disponibilidade de água não se tornam um fator limitante ao crescimento. Isto ocorre dado o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera (Boisvenue & Running, 2006; Norby et al., 2005). O aumento da biomassa pode também resultar num maior risco de incêndios, como consequência de uma maior quantidade de biocombustível disponível e o aumento das temperaturas, especialmente nos meses de verão (Romano & Ursino, 2020).

As espécies estão adaptadas para crescer dentro das restrições de um determinado clima e regime hídrico. Embora os ecossistemas florestais mostrem alguma plasticidade para lidar com condições instáveis, espera-se que sejam afetados com as alterações no regime de precipitação e que sofram com a imprevisibilidade e duração do *stress* hídrico (Resco de Dios et al., 2007).

Nos ecossistemas florestais, ocorrem naturalmente trocas de carbono entre estes sistemas e a atmosfera, a partir da fotossíntese, respiração, decomposição e combustão. Até mesmo florestas recém-plantadas ou em regeneração, na ausência de grandes distúrbios, continuarão a absorver carbono por 20 a 50 anos ou mais após o seu estabelecimento (IPCC, 2000).

No entanto, caso as árvores sejam abatidas e haja a degradação da floresta, uma quantidade significativa do carbono anteriormente armazenado é novamente libertado, reforçando assim o efeito de estufa (IPCC, 2000).

Deparando-se com esta realidade, no relatório The State of the World's Forests (SOFO) de 2022, são definidos três caminhos a seguir relativos à gestão dos ecossistemas florestais de modo não só a retardar o avanço das alterações climáticas, como também a gerar benefícios económicos (FAO, 2022):

1. Deter a desflorestação e a degradação florestal;
2. Restaurar florestas e paisagens degradadas, bem como introduzir mais árvores nos sistemas agrícolas de monocultura;
3. Aumentar o uso sustentável das florestas, para atender as necessidades por recursos florestais.

2.3 Pinheiro-bravo

O pinheiro-bravo, de nome científico *Pinus pinaster* Aiton e objeto de estudo da presente dissertação, é a conífera mais abundante de Portugal, ocupando uma área total de cerca de 673 mil hectares em 2019 (AFN, 2015; Centro Pinus, 2020).

Para além de Portugal, esta espécie estende-se naturalmente pelo oeste da bacia do Mediterrâneo, bem como ao longo da costa atlântica em Espanha e em França (Alía & Martín, 2003). Dado o seu elevado interesse económico, foi introduzido em muitos outros países, como é o caso da Austrália, Nova Zelândia, África do Sul, Chile, entre outros (Oliveira et al., 2000).

A sua presença no território nacional está confirmada há pelo menos 33 mil anos, de acordo com uma análise feita a vestígios de carvão vegetal, provando-se ser uma espécie autóctone da região mediterrânica. No entanto, durante o último período glacial, a espécie terá praticamente desaparecido, sobrevivendo apenas em zonas abrigadas, de baixa altitude e próximas à costa atlântica, como vales e encostas viradas a sul (Figueiral, 1995).

A sua posterior expansão por grande parte do território nacional deveu-se fortemente à intervenção humana. Assim, o pinheiro-bravo encontra-se atualmente disperso por quase todo território, particularmente no norte e centro do país, e nas encostas onde ainda se faz sentir a influência marítima, dado que, para além da influência humana, existem outros fatores limitantes ao seu crescimento (Figueiral, 1995; Oliveira et al., 2000).

Na Figura 2 é possível observar a verde claro a área de maior probabilidade de existência de povoamentos de pinheiro-bravo e a verde escuro os maiores povoamentos cartografados na década de 90 (Aguiar et al., 2007).

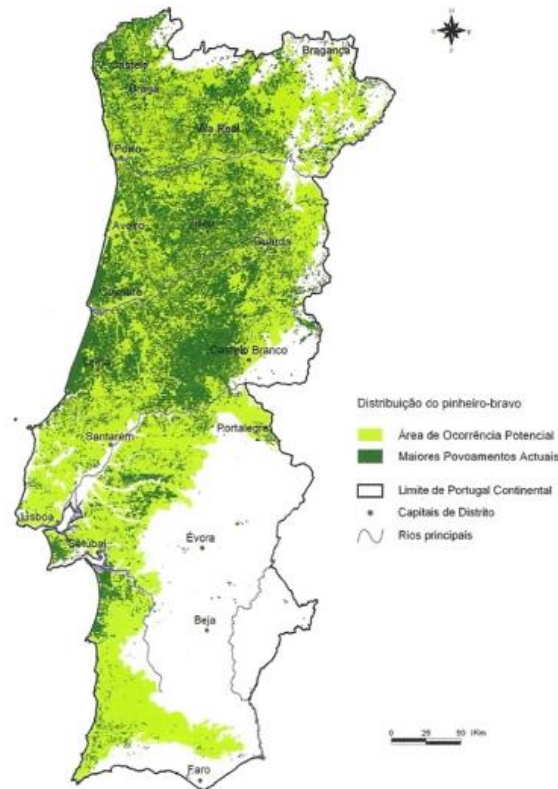


Figura 2: Área de distribuição do pinheiro-bravo em Portugal Continental (Aguiar et al., 2007)

O pinheiro-bravo caracteriza-se por ser uma árvore de grande porte, atingindo até 40 metros de altura, com uma copa piramidal nos primeiros 20 anos, que com o tempo vai adquirindo uma forma mais esférica e achatada. Pode viver até aos 200 anos, mas geralmente não ultrapassa os 100 anos de idade. As agulhas duram entre 4 a 5 anos e são maiores quanto mais velha for a árvore. Relativamente ao ciclo reprodutivo, apresenta flores femininas, localizadas na parte superior da copa, e flores masculinas localizadas nos troços intermédios e inferiores da copa. A floração ocorre na primavera, a partir dos 7 anos de idade, mas só regularmente a partir dos 10-15 anos. As pinhas crescem orientadas para baixo, e a sua maturação só acontece 18 meses após a floração, produzindo então os peniscos. Estas sementes têm “asas” grandes, sendo a sua dispersão efetuada pelo vento (anemocoria) (Fernandes et al., 2016; Figueiredo et al., 2014; Marques et al., 2012; Oliveira et al., 2000).

É uma espécie de clima atlântico temperado, desenvolvendo-se melhor nas regiões em que a temperatura média anual está entre os 13 a 15° C, e com uma precipitação média anual de 800 mm, com pelo menos 100 mm na estação seca, até aos 700 a 900 metros de altitude. É pouco resistente ao frio e à neve (Oliveira et al., 2000).

No que diz respeito ao tipo de solo, esta espécie não tem grandes exigências a nível de nutrientes, pelo que está bem adaptado a solos pobres, desde que sejam permeáveis. Para além desta característica, o facto de ser intolerante à sombra, resistente a condições de défice hídrico durante a estação seca, produzir um grande número de sementes e ser uma espécie de crescimento rápido, justifica que o pinheiro-bravo seja considerada uma espécie pioneira (Correia & Oliveira, 2003; Oliveira et al., 2000).

Desde o início dos anos 80 que se tem verificado o declínio da área de pinheiro-bravo, sendo alguns dos fatores apontados o êxodo rural, a conversão dos pinhais em espaços urbanos, o declínio da resinagem, a falta de investimento em reflorestação, as pragas e doenças provocadas por insetos e fungos, e o número crescente de incêndios (Figueiredo et al., 2014; Mendes, 2007; Oliveira et al., 2000).

De fato, os incêndios são responsáveis pela redução significativa da área plantada de pinheiro-bravo não só em Portugal, mas por toda a bacia do Mediterrâneo (Fernandes & Rigolot, 2007). De um modo geral, apesar de apresentar algumas estratégias de resistência ao fogo, dependendo da severidade do incêndio, o pinheiro-bravo é uma espécie bastante vulnerável, apresentando um grau de inflamabilidade de 3 numa escala de 1 a 4, e de 7 em combustibilidade, sendo 1 o valor mínimo e 9 o máximo (ICNF, 2022; Oliveira et al., 2000). Na Mata Nacional de Leiria, onde o pinheiro-bravo é a principal espécie, percebem-se as consequências desastrosas do incêndio de 2017, com uma perda de 85% dos povoamentos de pinheiro-bravo (Aguiar et al., 2021; Departamento de Gestão de Áreas Públicas e de Proteção Florestal, 2017).

Esta é também uma espécie classificada como muito vulnerável a pragas e doenças, pelo que existem vários aspetos a ter em consideração para reduzir o risco de mortalidade em povoamentos. De um modo geral, as medidas adotadas tanto para a prevenção dos incêndios como das pragas, consistem na limpeza da área em torno das árvores, eliminando o mato e as árvores infestadas, na redução da densidade de árvores e em evitar deixar no terreno material combustível, como troncos e galhos secos (ICNF, 2022; Fernandes & Rigolot, 2007; Oliveira et al., 2000).

O pinheiro-bravo tem uma grande importância económica e ambiental em Portugal. A nível económico destacam-se as indústrias madeireira e de resinagem, onde a madeira é usada em diferentes setores, como na produção de móveis, pasta de papel, construção civil, entre outros, e a resina na fabricação de vernizes, parafina. A nível ambiental, na arborização de dunas e de terrenos baldios, ajudando a proteger o solo da erosão, e configura também o maior reservatório de carbono da floresta nacional, sendo o total de carbono armazenado nos diversos reservatórios de biomassa desta espécie 90,3 milhões de toneladas (CO₂ equivalente) (AFN, 2015; Figueiredo et al., 2014; Marques et al., 2012).

2.4 Dendrocronologia e dendroclimatologia

A dendrocronologia é a ciência que estuda os anéis de crescimento das árvores. O termo provém das palavras gregas *dendron* ou árvore, *chronos* ou tempo, e o sufixo “logia”, que significa a ciência de ou estudo de (Cook, 2006).

Os anéis de crescimento são círculos visíveis que podem ser examinados observando uma secção transversal da árvore, tendo em consideração que cada anel representa um ano de vida da árvore, e o anel do centro representa o primeiro ano, aumentando a idade à medida que se contam os anéis em direção à casca (Fritts, 1971).

No entanto, é primeiro necessário mencionar como funciona o crescimento radial das árvores. Este crescimento em diâmetro dá-se graças ao câmbio vascular, uma camada fina de células do meristema lateral que une a madeira e a casca, e produz a maior parte do sistema vascular. As células que são produzidas no exterior da camada cambial tornam-se o floema, e as células que são produzidas no interior tornam-se o xilema, tecidos vasculares responsáveis pelo transporte de nutrientes e de água, respetivamente (Fritts, 1976b).

Os anéis anuais de crescimento correspondem a células que se formam no xilema. No início da estação favorável ao crescimento, as células são grandes e com a parede celular fina, formando o lenho de início de estação (*earlywood*). À medida que camadas sucessivas de células são diferenciadas ao longo da estação de crescimento, as condições fisiológicas dentro da árvore mudam gradualmente, de modo que as células do xilema resultantes são menores e têm paredes mais espessas do que as células formadas no início da estação, formando assim o lenho de fim de estação (*latewood*), com uma cor mais escura que define bem a fronteira entre dois anos consecutivos (Fritts, 1971).

Na Figura 3 é possível observar a estrutura celular ao longo de uma seção transversal de uma conífera.

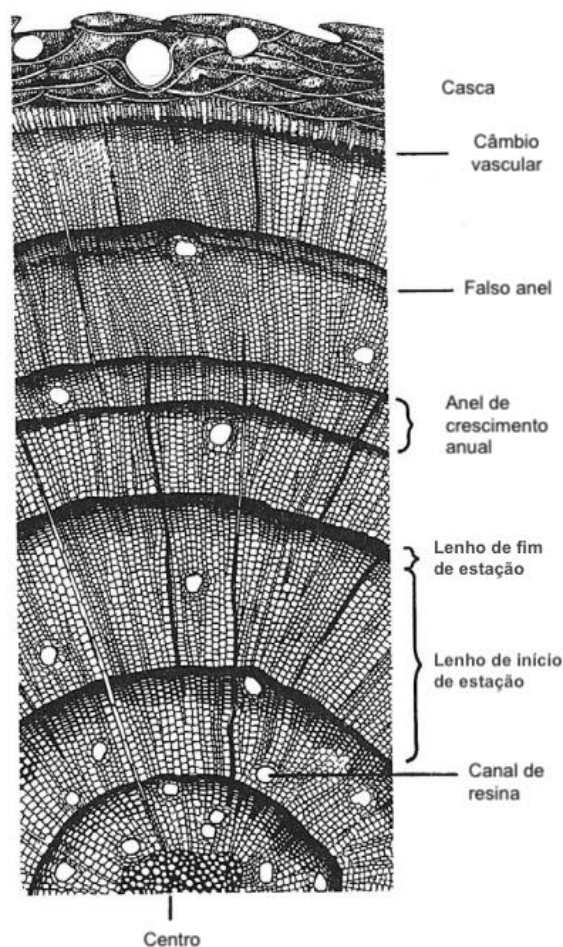


Figura 3: Seção transversal de uma conífera (Adaptado de Fritts, 1976)

Os anéis das árvores formam-se em regiões com clima que permite que haja um período de crescimento seguido de um período de dormência por parte das árvores. Tais padrões são comuns em zonas temperadas. No caso da região do Mediterrâneo, o pinheiro-bravo tem o início da atividade cambial regulado pela temperatura, enquanto a cessação do crescimento é desencadeada pela baixa disponibilidade de água, dando origem a um anel menor (Vieira et al., 2014). Sob condições climáticas favoráveis (invernos relativamente quentes e verões relativamente frios e húmidos), o crescimento radial das árvores pode ser mantido durante todo o ano, enquanto que sob condições adversas (principalmente relacionadas à seca) a reativação do câmbio vascular pode não ocorrer (Luis et al., 2007; Raventós et al., 2001).

Desta forma, mesmo durante a estação favorável, as condições podem tornar-se temporariamente adversas, estimulando a produção de células menores e de paredes celulares espessas, dando origem a uma camada de lenho de fim de estação. Mais tarde, ainda na estação de crescimento, as condições de humidade favoráveis podem voltar e permitir que a árvore retorne à produção de células de lenho de início de estação de grande diâmetro e paredes finas. Esta série de eventos resulta na formação de uma faixa intra-anual de lenho de fim de estação, comumente conhecida como anel falso. Os anéis falsos não se formam uniformemente em toda a árvore, uma vez que o sinal químico para formar o lenho tardio origina-se do meristema lateral ativo. Portanto, galhos e porções do caule que estão perto de galhos em crescimento ativo têm maior probabilidade de formar anéis falsos do que as secções inferiores e sem galhos do caule (Fritts, 1976b).

Nenhum processo de desenvolvimento é contínuo e nenhum organismo cresce sem interrupção. O facto de uma árvore ser um ser vivo estacionário, torna-a mais vulnerável para os fatores externos que ocorrem no seu meio ambiente. A copa, tronco e raízes são capazes de reagir aos fatores ambientais,

algumas partes da árvore recebem sinais do ambiente enquanto outras reagem a eles (Schweingruber, 1988).

De um modo geral, o crescimento cambial depende principalmente do clima (temperatura e precipitação). Por outro lado, as pragas, o tipo e a estrutura do solo, a exposição à luz, ao vento e à neve, a idade e a hereditariedade, são outros fatores que podem afetar o crescimento (Fritts, 1976a; Savva et al., 2002; Schweingruber, 1993; Speer, 2010).

Assim, a dendrocronologia usa a história do crescimento da árvore, expressa nos anéis de crescimento radial produzidos anualmente, para fornecer informações sobre o passado. Essencialmente, é uma forma de monitorização ambiental que utiliza as árvores como bioindicadores de longo prazo, justamente pela sua capacidade de registrar os acontecimentos ou fatores citados anteriormente que têm impacto no processo de formação dos anéis. O ramo da dendrocronologia que usa as análises das cronologias anuais dos anéis das árvores para reconstruir o clima do passado é denominado dendroclimatologia (Cook, 2006; Fritts, 1971).

A calibração é o processo em que se compara o registo conhecido de alguma variável ambiental, como a temperatura, com a cronologia dos anéis das árvores com o objetivo de determinar a resposta de crescimento da árvore a essa variável (Speer, 2010).

Como todas as ciências, a dendrocronologia segue alguns princípios e conceitos fundamentais (Fritts, 1976a; Speer, 2010):

- Princípio da uniformidade: implica que os mesmos tipos de condições limitantes que afetaram os processos físicos e biológicos no passado, afetam da mesma forma no presente. Portanto, pode-se estabelecer a relação entre as variações do crescimento das árvores e as variações do clima atual e inferir, a partir dos anéis passados, a natureza do clima passado. Usando este princípio, os dendrocronologistas podem comparar dados meteorológicos e registos históricos de eventos ambientais com dados de anéis de árvores para construir um modelo.

- Princípio dos fatores limitantes: afirma que qualquer característica ambiental que restrinja o crescimento de forma mais significativa, isto é, que seja o fator limitante, controlará a taxa de crescimento do organismo. Mesmo que um fator deixe de ser limitante, a taxa de crescimento da planta aumentará até que algum outro fator se torne limitante. As larguras dos anéis só poderão ser cruzadas se um ou mais fatores ambientais se tornarem criticamente limitantes, persistirem por tempo suficiente, e atuarem em uma área geográfica ampla o suficiente para fazer com que as larguras dos anéis ou outras características variem da mesma maneira em muitas árvores.

- Amplitude ecológica: sabendo que cada espécie pode crescer e reproduzir-se numa certa faixa de habitats, ou seja, cada espécie tem a sua amplitude ecológica, é esta amplitude ecológica que determina a sua sensibilidade a diferentes fatores ambientais. Na dendrocronologia é imperativo que as árvores analisadas estejam dentro da faixa de amplitude ecológica suportada pela espécie.

- Princípio da seleção do local: os exemplares selecionados para um estudo dendrocronológico deverão ser escolhidos com base na lei dos fatores limitantes e o conceito de amplitude ecológica para garantir a seleção das árvores que darão as informações que se deseja.

- Sensibilidade: refere-se à variabilidade nas espessuras dos anéis, determinada pela sensibilidade a diferentes fatores ambientais. Dá-se o nome de anéis sensíveis quando o padrão das espessuras dos anéis de crescimento variam acentuadamente de ano para ano, ou seja, o crescimento da árvore esteve mais limitado por fatores limitantes, e aos anéis que tiveram uma variação semelhante de crescimento a cada ano são chamados de complacentes. Estas flutuações na largura dos anéis são visualizadas pela sensibilidade média, um indicador estatístico que mede a diferença relativa na largura de um anel para o próximo.

- Princípio da datação cruzada: o princípio mais importante da dendrocronologia, consiste na identificação e cruzamento de padrões na espessura dos anéis de amostras diferentes, possibilitando a atribuição de datas do calendário a cada um dos anéis das árvores. Fazer este cruzamento é então

possível justamente porque há informação climática ou ambiental comum às árvores amostradas que ficou registada nos anéis, isto é, as condições limitantes para o crescimento foram as mesmas ou muito semelhantes num número elevado de árvores. A datação cruzada é também importante para se identificar tanto falsos anéis, como a ausência de anéis.

- Princípio do crescimento agregado da árvore: sugere que as árvores registam todas as variáveis, naturais ou artificiais, que afetam o seu crescimento.

- Princípio da replicação: consiste na recolha de um número elevado de amostras por árvore, e um número elevado de árvores por local de amostragem, para evitar a possibilidade de que falte um anel em um ano ou que tenham anéis falsos, reforçando o que se verificou com a datação cruzada. Se o clima for limitante para o crescimento, todas as amostras replicadas mostrarão aproximadamente a mesma variação de largura do anel e os anéis serão fáceis de cruzar.

Outro conceito fundamental da dendrocronologia é o de padronização. A padronização consiste em remover o efeito que as variações de origem não climática têm no crescimento, como a idade da árvore, a genética e as diferenças nas condições de produtividade a nível local (Fritts, 1976a).

De um modo geral, o crescimento das árvores tende a decair quase exponencialmente com o tempo, pelo que a idade constitui um fator não climático que influencia no crescimento. Assim, caso as séries de crescimento individuais não sejam padronizadas, quando calculada a média das séries de crescimento de árvores com diferentes idades para se obter a cronologia média do local, a série resultante exibirá picos positivos e negativos de crescimento principalmente associados à idade variável das amostras, o que não é interessante num estudo dendroclimatológico. Esta influência da idade pode ser removida ajustando uma curva para cada série de crescimento e dividindo a largura de cada anel pelo valor correspondente da curva, assim como apresentado na equação (1) (Cook, 2006; Cook & Kairiukstis, 1990; Fritts, 1976a):

$$(1) I_t = \frac{R_t}{G_t}$$

Onde I_t é o índice, R_t é a largura do anel e G_t é a curva de crescimento ajustada, para o ano t . Esta curva ajustada representa o que seria o crescimento da árvore caso todas as influências climáticas e ambientais fossem constantes de ano para ano (Cook, 2006). Existem diversas funções capazes de se ajustar aos dados: lineares, exponenciais negativas ou polinomiais. Dentre elas, a curva exponencial negativa é a mais conservadora quando se trata de coníferas e se pretende eliminar o efeito da idade, pois segue o modelo de crescimento natural da árvore. As curvas polinomiais são mais flexíveis e capazes de se adaptar ao comportamento da série de crescimento da árvore, no entanto podem remover efeitos das alterações climáticas a longo prazo, dependendo do intervalo em que se ajustou a curva (Cook & Kairiukstis, 1990; Fritts, 1976d; Speer, 2010).

Resumidamente, a padronização transforma séries de crescimento não estacionárias em estacionárias, resultando numa cronologia em que os índices têm um valor médio de 1 e uma variância relativamente constante (Cook & Kairiukstis, 1990; Fritts, 1976a).

3. Metodologia

3.1 Área de estudo: Mata Nacional de Leiria

A Mata Nacional de Leiria (MNL) (Figura 4), como o nome indica, está localizada no distrito de Leiria, mais especificamente no concelho da Marinha Grande, abrangendo as freguesias da Marinha Grande e de Vieira de Leiria. Ocupando uma área de 11 021,44 hectares, preenche cerca de 60% do referido concelho (ICNF, 2022).

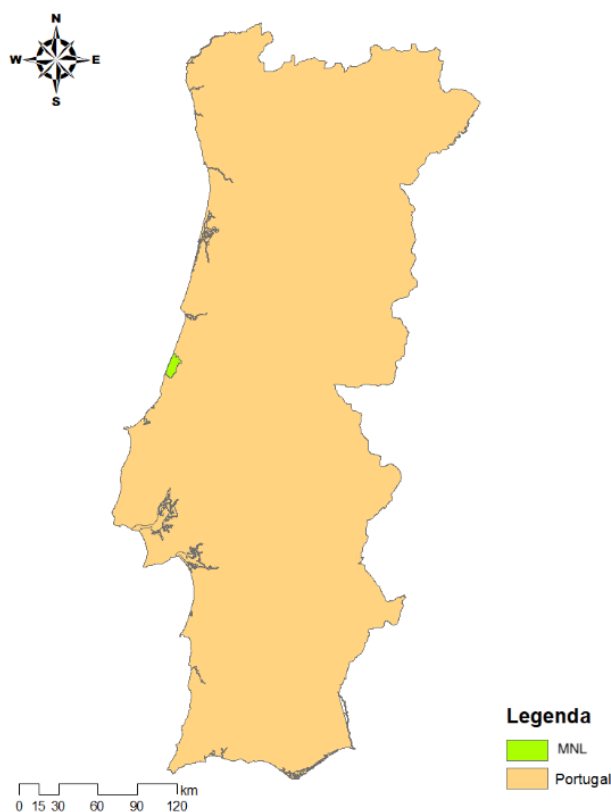


Figura 4: Limites administrativos da Mata Nacional de Leiria (MNL) (Adaptado de: [//geocatalogo.icnf.pt/](http://geocatalogo.icnf.pt/) em SIG ArcGIS, consultado em julho de 2023)

A MNL situa-se entre as latitudes 39° 42' 51''N e 39° 52' 90'' N e as longitudes 8° 53' 45''W e 9° 01' 28''W, fazendo fronteira a Norte com o Rio Lis e a Sul com o Vale de Água de Madeiros (ICNF, 2022).

Atualmente, a MNL é propriedade do Estado português, sendo administrada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), sob a gestão operacional da Divisão de Gestão Florestal do Centro Litoral (DGFCL) (ICNF, 2022). O Pinhal tem uma história anterior ao reinado de D. Dinis (séculos XIII e XIV). De fato, teria sido implantado por D. Afonso III, pai de D. Dinis. No entanto, D. Dinis terá tido um papel determinante na expansão da MNL para as dimensões que apresenta atualmente, tendo também apresentado o primeiro regulamento para a sua gestão (Oliveira et al., 2017; Santos et al., 2015).

De acordo com Santos et al. (2015) e com Pinto (1938) (como citado por Aguiar et al., 2021), o objetivo inicial do estabelecimento deste pinhal foi impedir o avanço das areias para o interior, protegendo assim as culturas agrícolas dos ventos costeiros carregados de sal e areia, e de fornecer a madeira utilizada nas embarcações para comércio externo. Mais tarde, durante os séculos XV e XVI, a MNL terá fornecido madeira de qualidade e pez. O pez, obtido através da resina extraída das árvores antes do corte final, era utilizado na calafetagem das embarcações, tendo-se assim tornado crucial

para a construção das naus e caravelas que permitiram a exploração marítima na época dos descobrimentos (Aguiar et al., 2021; Oliveira et al., 2017; Santos et al., 2015).

Bernardino Barros Gomes elaborou o primeiro plano de ordenamento, em 1892, onde se estabeleceu a divisão da MNL em talhões, e também a primeira planta rigorosa do Pinhal de Leiria. Este plano de ordenamento remonta àquilo que se considera a génese dos serviços florestais em Portugal e perdura essencialmente até aos dias de hoje (ICNF, 2022).

Esta compartimentação da mata consiste numa divisão em 342 retângulos com cerca de 35 hectares cada, denominados talhões (Figura 5), numerados de Este para Oeste e de Norte para Sul. Os talhões são limitados por aceiros, com 10 metros de largura, perpendiculares à linha de costa e nomeados por letras de A a T no sentido Norte-Sul, e por arrifes, perpendiculares aos aceiros e com 5 metros de largura, identificados de Este para Oeste pelos números de 0 a 22 (ICNF, 2022).

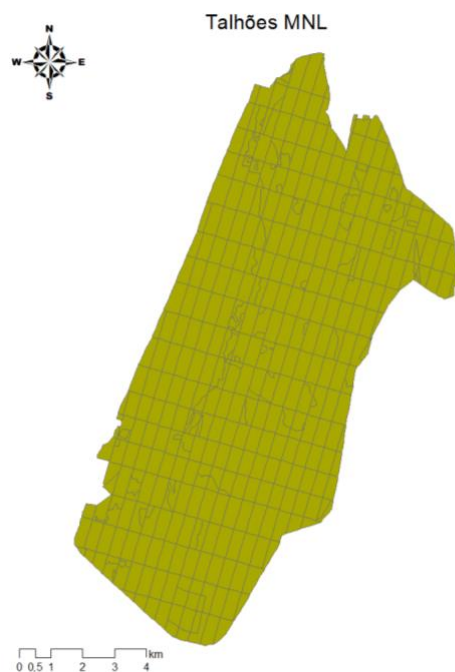


Figura 5: Divisão da MNL em talhões (Adaptado de: [//geocatalogo.icnf.pt/](https://geocatalogo.icnf.pt/) em SIG ArcGIS, consultado em julho de 2023)

A divisão do território desta forma é particularmente importante para uma melhor gestão e acessibilidade aos espaços florestais, bem como aumenta a probabilidade de sucesso na prevenção, contenção e combate aos incêndios florestais (ICNF, 2022; Moreira et al., 2010).

Relativamente ao clima, como se pode observar no diagrama termopluviométrico (Figura 6), identificam-se duas épocas do ano distintas: uma com temperaturas mais elevadas e menor precipitação (primavera e verão) e outra com temperaturas mais baixas e maior precipitação (outono e inverno). A temperatura média anual é de 15.4 °C e a precipitação anual é de cerca de 804 mm. O diagrama retrata o clima mediterrânico, característico da zona, com inverno chuvoso e verão seco e que pode ser mais ou menos quente, segundo a classificação de Köppen-Geiger (Kottek et al., 2006).

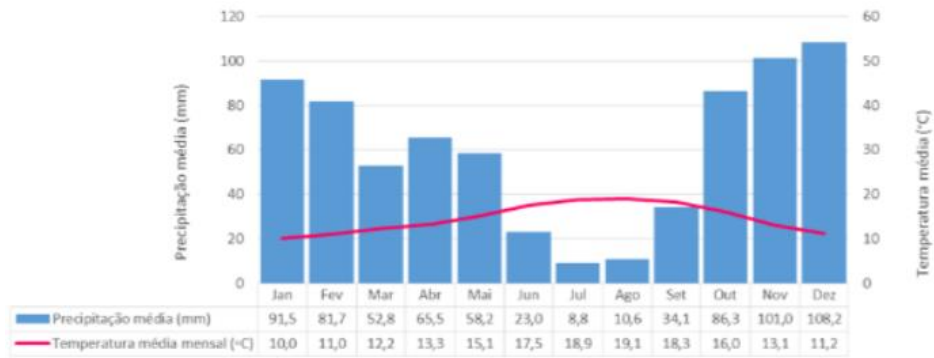


Figura 6: Diagrama Termopluiométrico (ICNF, 2022)

Apresenta-se na Figura 7 a altitude da MNL com valores compreendidos entre 3 e 135 m.

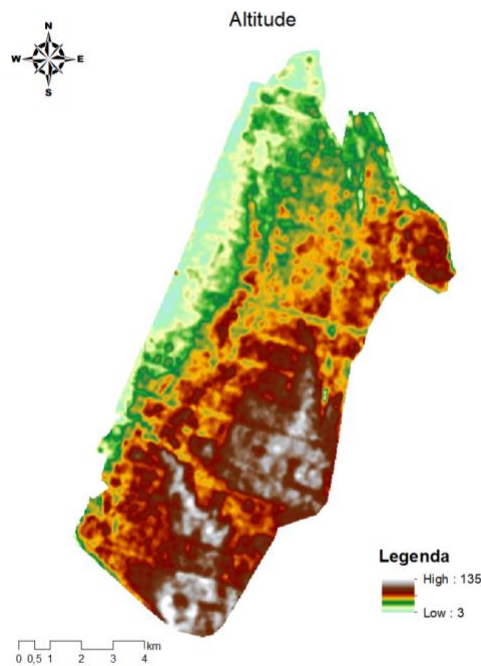


Figura 7: Altitude da MNL (Adaptado de: Shuttle Radar Topographic Mission em SIG ArcGIS, consultado em julho de 2023)

A Figura 8 apresenta a Litologia da MNL (Atlas Digital do Ambiente, 2021), sendo possível observar a dominância da classe: “dunas e areias eólicas”.

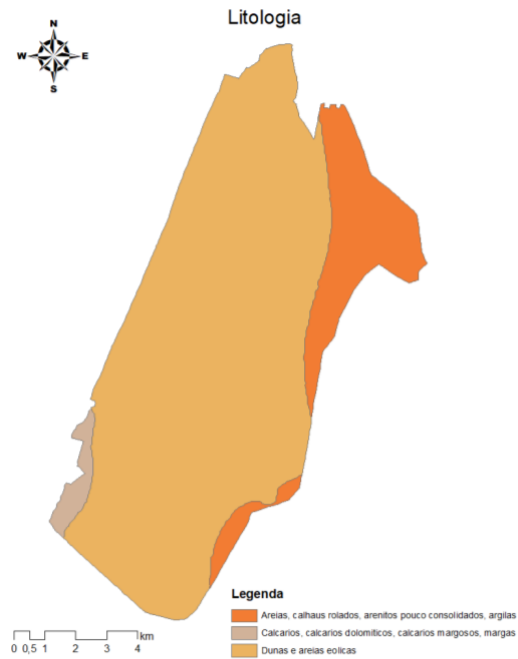


Figura 8: Litologia da MNL (Adaptado em ArcGIS com base na Litologia do Atlas Digital do Ambiente, 2021)

Na Mata Nacional de Leiria predominam os podzóis órticos associados a regossolos êutricos (Figura 9) (Atlas Digital do Ambiente, 2021). Tratam-se de solos ácidos, de elevada permeabilidade, com baixa capacidade de retenção de água e de nutrientes.

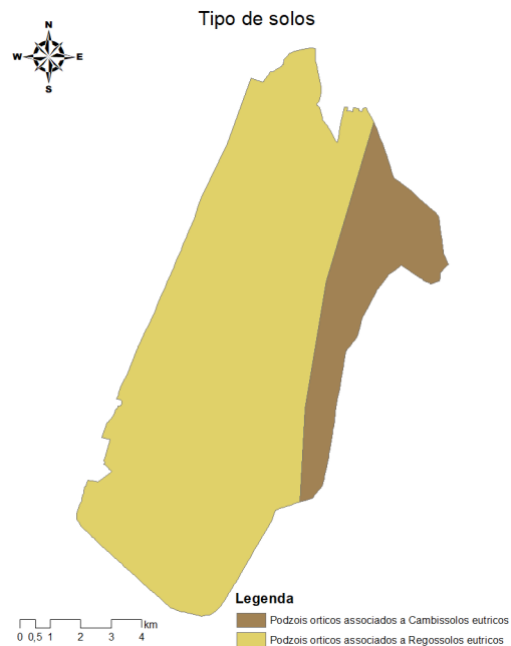


Figura 9: Tipo de solos na MNL (Adaptado em ArcGIS com base no tipo de Solo do Atlas Digital do Ambiente, 2021)

Na carta da ocupação e uso do solo (Figura 10) verifica-se, como esperado, uma predominância da classe “Floresta”.

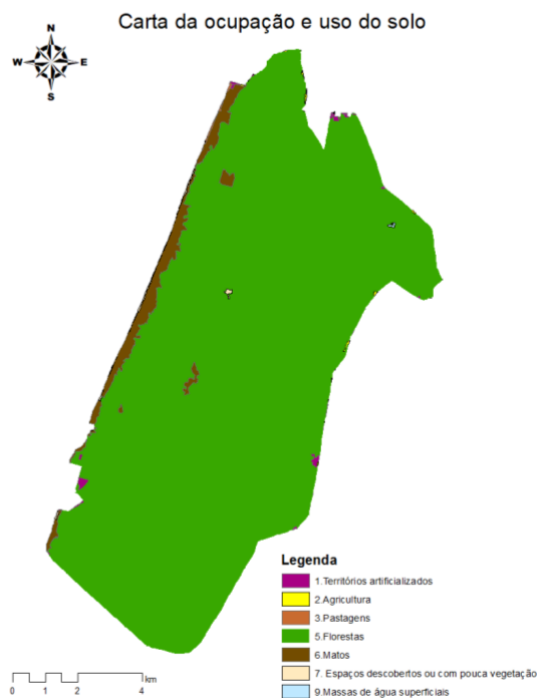


Figura 10: Carta de ocupação e uso do solo da MNL (Adaptado em ArcGIS)

Quanto à componente florestal o pinheiro-bravo (*Pinus pinaster* Aiton) é a espécie arbórea dominante, ocupando cerca de 4 540 ha. O pinheiro-bravo não seria a espécie dominante da vegetação primitiva antes da instalação da mata, tendo tido um grande incremento devido às atividades humanas. Na MNL existem também algumas manchas de menor dimensão de pinheiro-manso (*Pinus pinea*) e outras espécies arbóreas que foram sendo introduzidas ao longo do tempo (ICNF, 2022; Nunes et al., 2019). A Figura 11 apresenta a distribuição das principais espécies arbóreas.

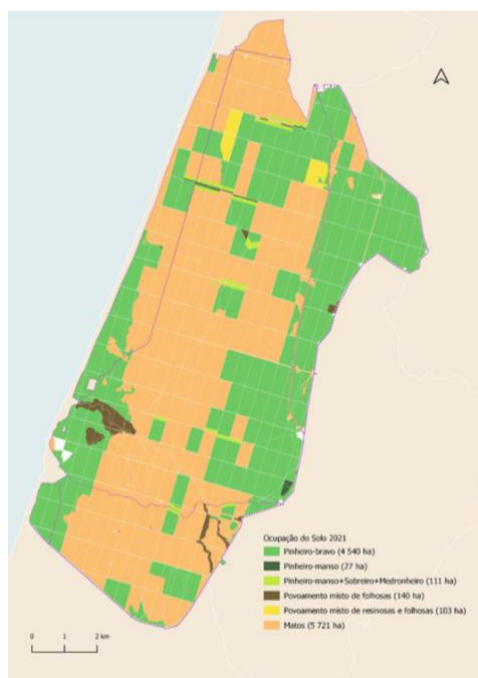


Figura 11: Distribuição florestal das principais espécies arbóreas (Fonte: ICNF, 2022)

A MNL é altamente suscetível à ocorrência de incêndios, tal como de um modo geral é a floresta portuguesa, tendo sido afetada por vários incêndios (Tabela 1).

Tabela 1: Histórico de incêndios na MNL (Fonte: ICNF, 2022)

ANO	1980	1981	1984	1986	1990	1991	1995	2003	2007	2012	2017	Total
N.º incêndios	1	4	1	2	1	1	2	1	1	1	2	17
Área (ha)	43,6	36,6	279,4	29,1	187,8	529,9	39,2	2 577,9	38,5	1,1	9 475,2	13 238,3

Em 2017 ocorreu um incêndio florestal de grandes dimensões que assolou a região, tendo queimado 9475 ha da MNL, ou seja 86% da mata. Este incêndio foi estimulado principalmente por um período de seca prolongada com ventos muito fortes e secos, o que culminou em centenas de ignições registadas nesse dia e o conseqüente incêndio devastador (Viegas et al., 2019).

Para além do seu valor histórico e simbólico, a MNL contribui positivamente a nível económico, social e ambiental (Oliveira et al., 2010). Desde a sua criação, com a proteção das zonas costeiras, a produção de madeira e a extração da resina, esta floresta tem demonstrado um equilíbrio sustentável entre a produção e a conservação dos recursos naturais (ICNF, 2022; Santos et al., 2015), evidenciando ainda um grande potencial para atividades recreativas e turismo, como piqueniques e caminhadas. Outros benefícios da Mata estão relacionados com os serviços do ecossistema, como a regulação do clima e melhoria da qualidade do ar, a preservação da água e do solo e a provisão de habitat para a biodiversidade local (Oliveira et al., 2010, 2017).

3.2 Amostragem

Nesta etapa o primeiro passo consistiu na escolha da área de estudo. Tal como já referido, a área escolhida foi a Mata Nacional de Leiria, pela sua importância a nível nacional, por apresentar um número elevado de exemplares da espécie de interesse (pinheiro-bravo) e por ser uma área florestal muito antiga, em que seria possível encontrar amostras dentro do período de tempo determinado (séculos XX e XXI).

As amostras foram recolhidas nos anos de 2013, 2016 e 2022, tendo também dois exemplares sido retirados da Mata após o incêndio de 2017.

Parte das amostras recolhidas em 2016, assim como as de 2017, são um corte transversal no tronco de árvores já cortadas, obtendo-se até quatro amostras de cada árvore. Contudo, todas as outras amostras foram coletadas com auxílio a uma verruma de *Pressler* (Figura 12), um instrumento que apesar de deixar um furo na árvore, no caso das coníferas, estas têm a capacidade de o selar autonomamente, representando assim um baixo impacto negativo na árvore viva (Pilcher et al., 1990; Speer, 2010; Worbes, 2004).



Figura 12: a) Verruma de Pressler; b) Broca (Fonte: <https://blog.uvm.edu/jpconsta-dendrochronology/in-the-field/>, consultado em julho de 2023)

Em campo priorizaram-se árvores de diferentes portes, de modo a abranger um período de tempo maior.

De um modo geral, foram escolhidas árvores com uma aparência saudável, que não apresentassem fungos no tronco, e que não estivessem inclinadas. As amostras foram retiradas à altura do peito (a cerca de 1,30 metros de altura), de modo a obter as sequências de anéis mais longas possíveis com um mínimo de variabilidade individual, e de cada árvore recolheram-se duas amostras em direções diferentes (uma a Norte e outra a Este), também para reduzir a variabilidade individual por via da média dos valores medidos nas duas direções, tal como apontado pelo princípio da replicação (Fritts, 1976a; Pilcher et al., 1990; Speer, 2010).

A verruma é um equipamento que consiste essencialmente numa broca com o interior oco capaz extrair uma pequena amostra cilíndrica do interior da árvore (Figura 12), perfurando perpendicularmente o tronco desta através da rotação do manípulo no sentido horário até que a ponta da verruma tenha passado pelo centro da árvore. Quando a profundidade de penetração desejada é atingida, insere-se um extrator na parte de trás da verruma, dentro da broca, e efetua-se a rotação do manípulo no sentido anti-horário para se retirar a verruma do tronco (Figura 13) (Schweingruber, 1988; Speer, 2010).

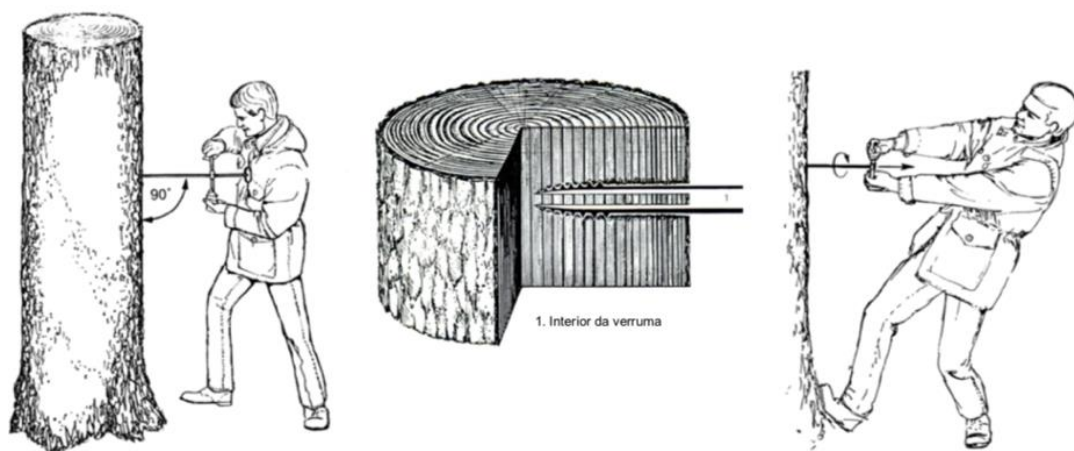


Figura 13: Manuseamento da verruma (Adaptado de Speer, 2010)

A amostra é então retirada de dentro da verruma e armazenada numa palhinha de plástico, devidamente rotulada, para protegê-la durante o transporte (Schweingruber, 1988; Speer, 2010).

Foram também recolhidos outros dados: a altura da árvore, o diâmetro do tronco, as coordenadas GPS, a espessura da casca e a vegetação a volta da árvore.

3.3 Preparação e processamento das amostras

Nesta etapa, já no laboratório, as amostras foram retiradas das palhinhas e deixadas a secar em temperatura ambiente. Depois de secas, cada uma das amostras foi colada num suporte de madeira, para posteriormente serem lixadas (Figura 14). Só assim é possível a identificação clara dos anéis de crescimento. Por fim, todas as amostras foram digitalizadas.



Figura 14: Amostras já lixadas no suporte de madeira

3.4 Tratamento dos dados

Com as amostras já digitalizadas, foram medidas as larguras dos anéis de cada uma no MtreeRing. Este é um pacote gratuito do software estatístico *Rstudio* e vem com uma interface gráfica capaz de medir automaticamente as larguras dos anéis das árvores, dando também a possibilidade do utilizador marcar manualmente os limites de cada anel. É então possível identificar e delimitar os anéis de crescimento, gerando uma tabela com as larguras de cada anel e os anos a que correspondem (Shi et al., 2019).

Na Figura 15 é possível observar a imagem resultante da medição, sendo o ponto 1, o último anel a ser formado correspondendo então ao ano de amostragem (2022).



Figura 15: Limites dos anéis de crescimento identificados no MtreeRing

É importante referir que nem sempre foi possível chegar ao centro da árvore durante a amostragem. Sendo assim, as séries de crescimento obtidas não necessariamente correspondem à idade cambial. Houve também algumas amostras em que, dada a baixa qualidade do digitalizador (600 dpi), não foi possível visualizar digitalmente alguns dos anéis mais recentes, pelo que foi necessário deduzir da amostra o número de anéis em falta.

Assim, cada amostra retirada da árvore gera uma série de crescimento, e a média de séries de uma mesma árvore é considerada a série representativa. No entanto, antes mesmo de ser feita esta média, é efetuada a datação cruzada entre as diferentes amostras da mesma árvore.

A datação cruzada consiste em assegurar a correspondência dos anos em que se formaram os anéis de crescimento nas diferentes amostras. Inicialmente, efetuou-se a sobreposição das séries de crescimento de cada árvore com recurso ao *Microsoft Excel*, comparando-as visualmente e por fim, caso necessário, reorganizando os anos, para uma maior sincronia entre amostras. A seguir, recorreu-se ao software COFECHA, onde foi possível fazer um controlo de qualidade, verificando as correlações fortes, ausência de anéis de crescimento e as anomalias entre as séries de crescimento. Este software transforma cada série de crescimento em índices a partir de uma curva polinomial, deduzindo grande parte dos efeitos não climáticos, e com a média das séries dá origem a uma curva padronizada. A seguir, divide cada série em diferentes segmentos e calcula os coeficientes de correlação entre a curva padronizada e as séries dentro dos diferentes intervalos de tempo (segmentos) pré-definidos.

Para este estudo utilizaram-se as configurações padrão do COFECHA, excetuando o comprimento do segmento a ser testado, que foi escolhido com base na idade das séries. Esta decisão foi tomada pois a configuração padrão é testar segmentos sucessivos de 50 anos com períodos sobrepostos de 25 anos, que não é um intervalo adequado para séries com menos de 100 anos. Quanto mais curto for o intervalo selecionado, maior será o valor de correlação determinado pelo COFECHA como o ideal (Grissino-Mayer, 2001). No entanto, nem sempre se deve ter em consideração este valor, pois o COFECHA é apenas uma ferramenta de auxílio e a decisão final cabe ao dendrocronologista.

Rejeitaram-se as séries com correlações abaixo de 0.3, seguindo o mesmo critério de Nabais *et al.* (2014). Dependendo dos resultados fornecidos pelo COFECHA, reorganizam-se os anos e volta-se a inserir as séries no software, de modo a garantir uma boa correlação entre elas.

Após fazer as médias das séries de crescimento aprovadas de uma mesma árvore, agruparam-se as séries representativas em diferentes classes consoante a semelhança visual entre os perfis de crescimento e consoante a idade média das árvores. Realizou-se o mesmo teste para cada uma das classes definidas, ou seja, voltou-se a verificar a correlação no COFECHA, mas desta vez entre as árvores de uma mesma classe, para cada classe. Por fim, foram rejeitadas as séries com um baixo grau de correlação (abaixo de 0,3) e com fraca sobreposição visual entre elas.

Já com as classes definidas, selecionaram-se apenas os primeiros 20 anos a começar pelo ano mais antigo da série mais recente de dentro da classe, obtendo desta forma o maior número de séries possível para o primeiro ano em análise. Foi selecionado este intervalo de tempo pois o pinheiro-bravo é uma espécie de crescimento rápido, onde os primeiros anos de vida correspondem ao período de maior atividade cambial, e conseqüente produção de lenho.

De modo a realizar uma comparação direta entre classes, calculou-se o incremento anual em área basal, ou seja, a área ocupada por cada anel de crescimento, de modo a perceber as diferenças entre estas a nível do crescimento radial da árvore. Recorreu-se então à função *bai.in* do *dpIR* (pacote do Rstudio), que transforma as séries das larguras dos anéis de crescimento em séries com as respetivas áreas, desde o anel mais próximo à medula em direção à casca (Bunn, 2008). Primeiro calculou-se o incremento em área basal para cada uma das séries de cada classe e, em seguida, a média do conjunto de séries de cada classe, acrescentando a cada ano o total do ano anterior.

Foi também feita uma ANOVA, para perceber se há alguma diferença significativa de variâncias entre as médias das diferentes classes, e confirmada a diferença, fez-se um teste de Tukey para identificar quais as diferenças entre classes. Ambos os testes estatísticos foram feitos no Rstudio.

No *DetrendeR* (pacote do Rstudio) realizou-se a padronização das séries completas de cada classe, obtendo-se então os respetivos índices de crescimento (Campelo et al., 2012). Neste passo, tal como já referido, removem-se as tendências de origem não climática. Escolheu-se a opção “*first-step detrending*” e uma função exponencial negativa que segue a curva de crescimento radial da árvore. As cronologias foram calculadas como uma média robusta das séries individuais dos índices de crescimento obtidos. O modelo autorregressivo de primeira ordem (AR1) foi aplicado a cada série para se obter uma cronologia residual. Isto foi necessário uma vez que os anéis de crescimento são afetados pela tendência de crescimento do ano anterior, e por isso deve-se removê-la. Quanto maior for o valor de AR1, maior a influência do ano anterior no crescimento (Fritts, 1976d).

O *Expressed Population Signal* (EPS) foi calculado para quantificar o grau em que a cronologia obtida representou o sinal de uma cronologia perfeita, isto é, uma cronologia de uma população teoricamente infinita. É recomendado que este indicador esteja acima de 0.85 para ser considerado confiável em termos estatísticos, embora não exista um intervalo específico de valores tido como correto. Quando existe mais do que uma amostra por árvore, o EPS é calculado através da equação (2) (Cook & Kairiukstis, 1990; Wigley et al., 1984).

$$(2) EPS = \frac{r_{eff}}{r_{eff} + \frac{1-r_{eff}}{n}}$$

Onde r_{eff} é o sinal efetivo da cronologia e n o número de árvores. O cálculo de r_{eff} é feito pela equação (3).

$$(4) r_{eff} = \frac{r_{bt}}{r_{wt} + \frac{1-r_{wt}}{c}}$$

Sendo r_{bt} o sinal entre árvores obtido pela média dos coeficientes de correlação calculados para todos os pares possíveis de séries obtidas das diferentes árvores, r_{wt} o sinal dentro da árvore obtido pela média dos coeficientes de correlação entre as séries padronizadas de uma mesma árvore, para todas as árvores, e c o número de amostras por árvore.

Com o cálculo da cronologia foram também gerados outros indicadores estatísticos, como a sensibilidade média e o desvio padrão.

Por fim, foi efetuada uma análise estatística, estimando as correlações entre as temperaturas médias mensais e os valores totais de precipitação dentro do período determinado para cada classe com as cronologias obtidas das respetivas classes. Recorreu-se então ao software SPSS Statistic, com a determinação do coeficiente de correlação de Pearson, a diferentes níveis de significância (95% e 99%). Para além das correlações a nível mensal, foram também feitas correlações para as quatro estações do ano.

Os valores mensais de precipitação, de temperatura mínima e de temperatura máxima foram obtidos no *Climate Explorer* (<http://climexp.knmi.nl/>, consultado em julho de 2023), uma página web gerida pelo *Royal Netherlands Meteorological Institute* (KNMI). Para se obter as temperaturas médias mensais, fez-se a média entre a temperatura média mínima e a máxima de cada um dos meses.

4. Resultados e Discussão

Foram medidas no *MtreeRing* 341 amostras de um total de 102 árvores. A partir dos ficheiros gerados, para além da largura dos anéis, é possível aferir sobre o ano de formação de cada amostra. Desta forma, verificou-se que o período abrangido por todas as amostras vai de 1885 até 2021.

A seguir, foi feita a datação cruzada, sobrepondo as séries de crescimento e depois confirmando a correlação no COFECHA, de cada conjunto de amostras de uma mesma árvore. Neste passo foram descartadas todas as amostras que não apresentaram uma boa sincronia. Com base nas séries que apresentam o ano de início do crescimento em comum foram criadas 5 classes.

Das 102 árvores iniciais, após a fase de medição e datação cruzada, só foram utilizados dados de 38 exemplares, sendo os principais motivos a baixa sincronia entre árvores de uma mesma classe de idade e o caso do ano de crescimento de uma dada árvore não permitir que se insira numa determinada classe definida.

Grande parte das séries que apresentaram uma baixa sincronia têm menos de 50 anos, o que pode estar relacionado com o princípio dos fatores limitantes, sendo que árvores de menor idade, têm mais anéis largos (anéis formados ao início de vida) do que estreitos. No entanto, durante os anos em que os anéis são geralmente largos, os fatores ambientais poderão tornar-se limitantes em diferentes graus em cada árvore, dependendo da sua localização, dentre outros fatores não climáticos. Como resultado, pode ocorrer uma variação considerável nos padrões de crescimento de árvore para árvore. Se o crescimento de uma árvore nunca for limitado por alguma condição climática ou ambiental, não haverá informação sobre o clima nas larguras dos anéis e não será possível fazer a datação cruzada (Fritts, 1976a; Speer, 2010). Uma vez que o intervalo de tempo contemplado neste estudo corresponde aos anos mais vulneráveis a fatores externos ao clima e com maior taxa de divisão celular, a análise das amostras deve ser efetuada com um certo cuidado (Speer, 2010; Vieira et al., 2018).

Na Tabela 2 estão destacadas as classes definidas, o número de árvores e o período em análise de cada classe e na Figura 16 é possível observar o intervalo de tempo que as séries de crescimento abrangem. Constata-se que o período de análise vai desde 1885 até a atualidade.

Tabela 2: Número de árvores e período em análise de cada classe

Classes	N.º de árvores	Ano de início	Ano do fim
A	2	1887	1906
B	18	1943	1962
C	6	1988	2007
D	8	1995	2014
E	4	2005	2021

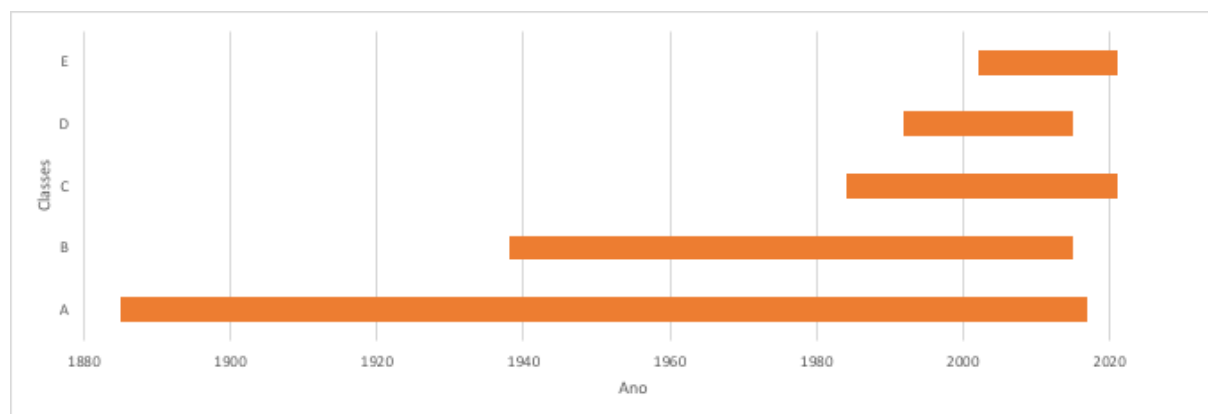


Figura 16: Intervalo de tempo que cada classe abrange

Na classe A encontram-se as séries de crescimento de maior dimensão, uma com 127 anos e outra com 128 anos. Na Figura 17 apresentam-se as séries de crescimento da classe A. Observa-se que neste caso as séries apresentam um padrão de crescimento expectável da espécie, com uma tendência de redução das larguras dos anéis conforme a árvore envelhece.

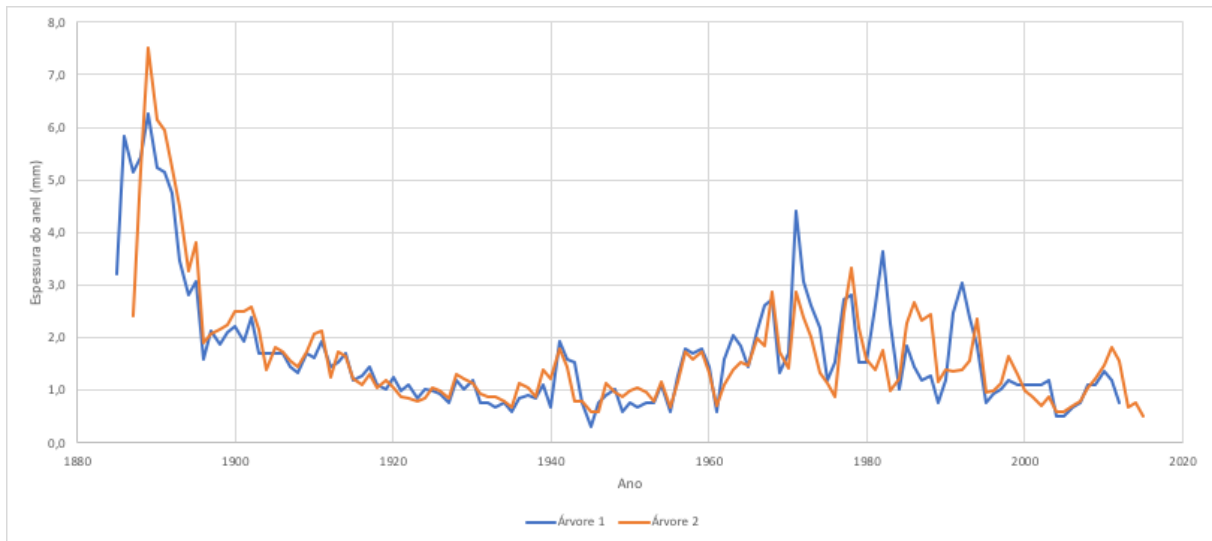


Figura 17: Séries de crescimento radial da classe A

A classe B tem 18 árvores que abrangem um intervalo de 77 anos. Na série de crescimento (Figura 18) é visível um período (1965 - 1975) em que se deu um pico no crescimento radial da árvore. Isto ocasionou-se muito provavelmente devido aos desbastes que fazem parte da prática de gestão da MNL e, com a remoção das árvores vizinhas, houve um estímulo no crescimento das árvores que não foram abatidas pela redução na competição. Dado o objetivo do estudo, foi apenas utilizado o período de 1938 até 1965 para gerar a cronologia da classe, de modo a evitar que este crescimento associado à ação humana tenha alguma interferência na análise.

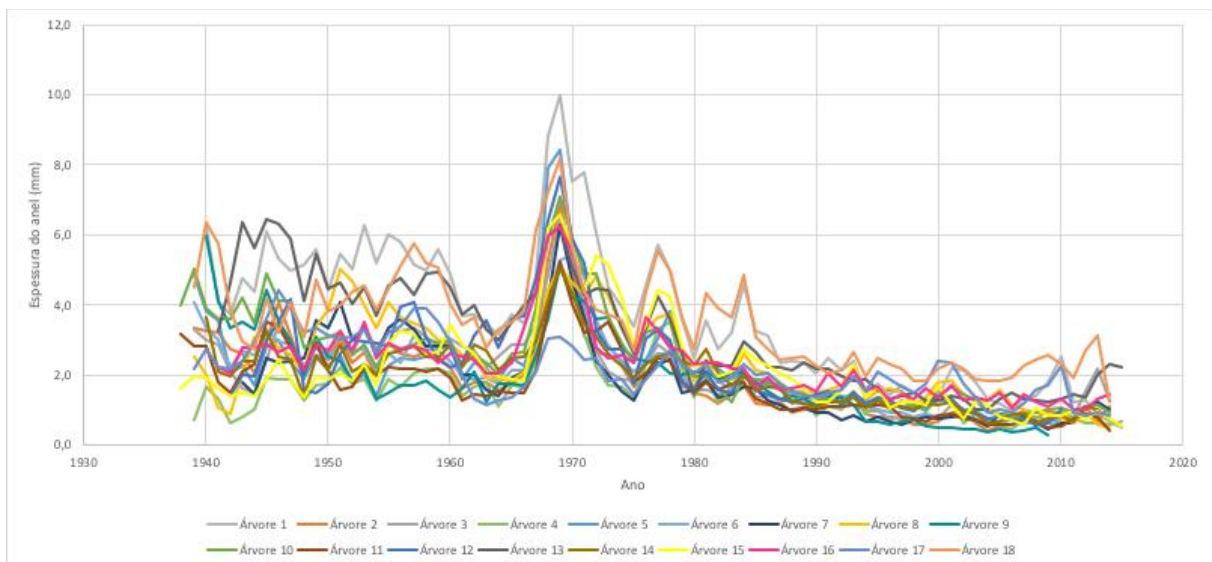


Figura 18: Séries de crescimento radial da classe B

Na Figura 19 observam-se as séries de crescimento da classe C, com 6 árvores e abrangem um período de 37 anos. Neste gráfico verificaram-se também alguns pontos com um aumento abrupto nas larguras dos anéis.

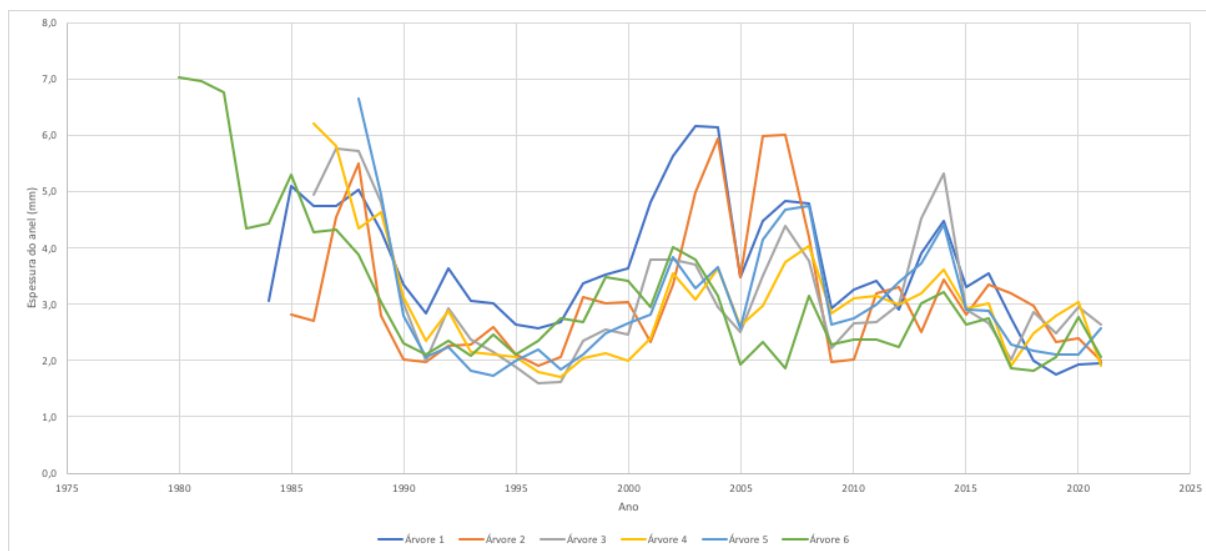


Figura 19: Séries de crescimento radial da classe C

A classe D tem 8 árvores que abrangem um período de 23 anos. Assim como na classe A, também apresenta uma tendência natural de diminuição nas espessuras dos anéis a medida que a árvore envelhece (Figura 20).

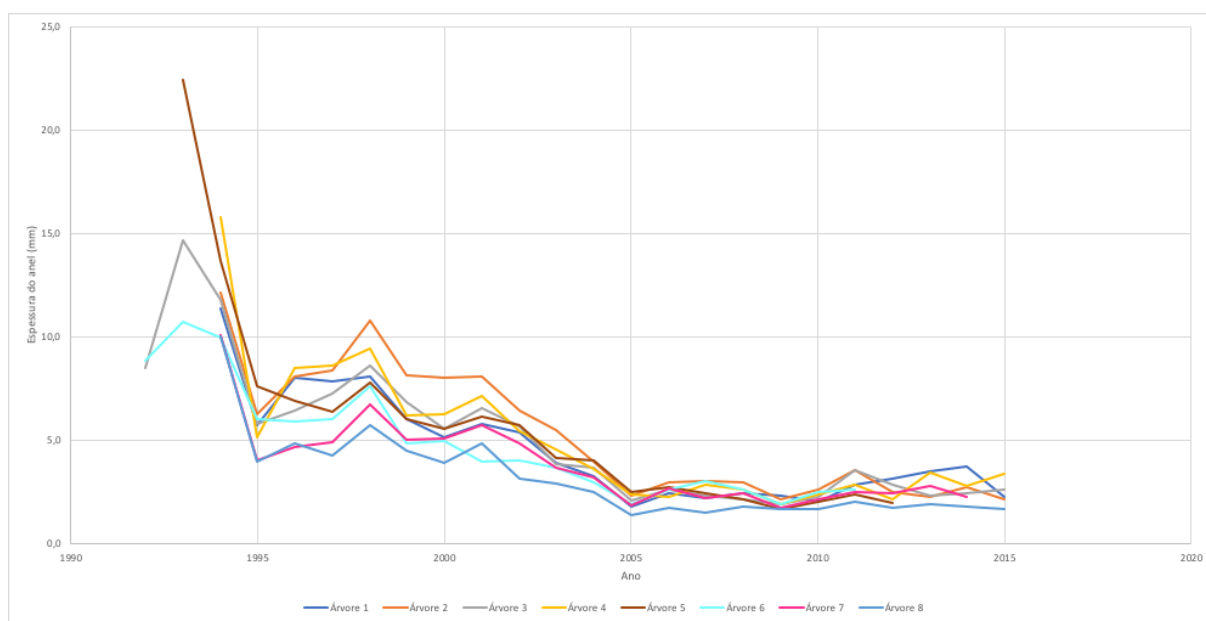


Figura 20: Séries de crescimento radial da classe D

A classe E tem 4 árvores e é a classe com as árvores mais novas, que abrangem um período de apenas 19 anos. Visualmente não há muita sincronia entre amostras, o que pode dever-se ao facto de amostras muito jovens serem mais suscetíveis a fenómenos ambientais, pelo que não apresentam um padrão de crescimento uniforme (Figura 21).



Figura 21: Séries de crescimento radial da classe E

Os resultados das correlações obtidas no COFECHA nos diferentes segmentos definidos em cada uma das classes estão apresentados no ANEXO.

Na Figura 22 é possível observar o aumento de área basal de cada uma das classes. Em todas as classes, nota-se que um aumento constante da área dos anéis durante os primeiros anos de cada uma. No entanto, as árvores das classes D e E destacam-se visualmente por apresentar em média um crescimento maior em diâmetro.

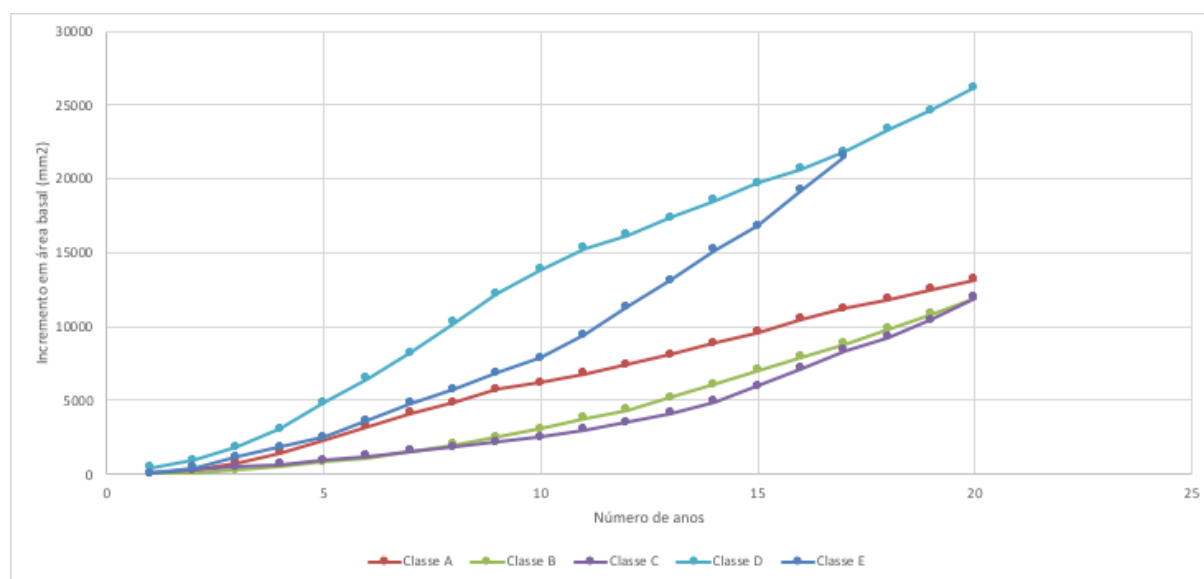


Figura 22: Incremento em área basal durante o período de 20 anos definido em cada classe

Verificou-se também que em relação às larguras médias dos anéis de crescimento, as classes D e E apresentam anéis mais largos, podendo indicar um clima mais favorável ao crescimento (Tabela 3). Em adição, quanto maior o valor do desvio padrão, maior a sensibilidade da árvore para as variações do clima (Oberhuber et al., 1998), destacando-se novamente as classes D e E (Tabela 3).

Tabela 3: Largura média dos anéis e respetivo desvio padrão de cada classe durante o período de 20 anos definido

Classes	Largura média dos anéis (mm)	Desvio Padrão (mm)
A	3,24	1,66
B	2,96	1,08
C	3,15	1,18
D	4,55	2,71
E	4,76	1,74

Desta forma, foi importante fazer uma Análise de Variâncias (ANOVA) para determinar se esta diferença entre médias é significativa a nível estatístico. Segundo os resultados apresentados na Tabela 4, pelo *p-value* abaixo de 0,05, conclui-se que existem diferenças significativas nas larguras médias de pelo menos duas classes.

Tabela 4: Resultados da ANOVA

	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F value	p-value (>F)
Classes	4	397,8	99,44	36,13	<2e-16 ***
Resíduos	735	2022,8	2,75		

Com a conclusão de que o resultado da ANOVA é estatisticamente significativo, aplicou-se um teste de Tukey para comparações múltiplas entre médias. Este teste permitiu identificar quais as classes diferentes entre si e quais são essas diferenças. No caso, as larguras dos anéis das classes D e E são em média maiores que as larguras médias de todas as outras classes. No entanto, não existem diferenças significativas entre as classes D e E, nem entre as classes A, B e C (Tabela 5).

Tabela 5: Resultados do teste de Tukey

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
B - A == 0	-0,28033	0,27649	-1,014	0,84
C - A == 0	-0,08992	0,30288	-0,297	0,998
D - A == 0	1,31153	0,29382	4,464	<1e-04 ***
E - A == 0	1,53033	0,33539	4,563	<1e-04 ***
C - B == 0	0,19042	0,17487	1,089	0,801
D - B == 0	1,59186	0,15866	10,033	<1e-04 ***
E - B == 0	1,81066	0,22656	7,992	<1e-04 ***
D - C == 0	1,40144	0,20116	6,967	<1e-04 ***
E - C == 0	1,62024	0,25811	6,277	<1e-04 ***
E - D == 0	0,2188	0,24741	0,884	0,896

Relativamente aos dados de clima, para os anos anteriores a 1901 só existiam os valores tanto da temperatura média como da precipitação total das estações do ano. A temperatura média entre 1887 a 2021 foi de 14,3 °C durante a primavera (março, abril e maio), 21 °C, durante o verão (junho, julho e agosto), 16,9 °C do outono (setembro, outubro e novembro) e 10,4 °C durante o inverno (dezembro, janeiro e fevereiro). Relativamente à precipitação total durante o mesmo intervalo de tempo, na primavera foi de 193 mm, no verão de 69 mm, no outono de 357 mm, e no inverno de 338 mm, onde mais de 70% da precipitação total anual ocorre durante os meses de outono e de inverno.

Desta forma, a análise mensal de qualquer um dos fatores climáticos só foi feita a partir de 1901. Pelo gráfico apresentado na Figura 23, percebe-se um aumento acentuado da temperatura média anual do local ao longo dos anos, sendo esta uma das consequências das alterações climáticas citadas anteriormente.

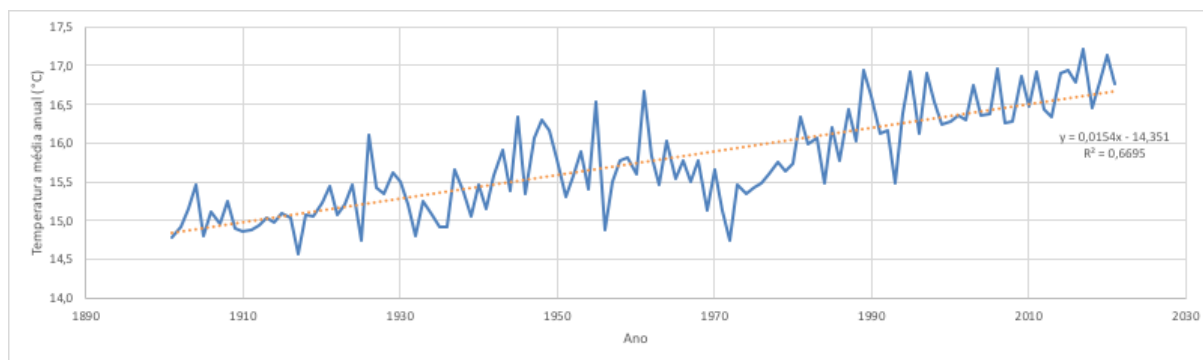


Figura 23: Temperatura média anual (°C) do local em estudo no período de 1901 a 2021 e respetiva linha de tendência (a laranja)

No caso da precipitação, pela equação da reta apresentada no gráfico da Figura 24, verifica-se uma tendência quase constante, com um ligeiro aumento ao longo do tempo. No entanto, dado o aumento da temperatura, poderá ocorrer uma redução na disponibilidade hídrica pelas perdas de água por evapotranspiração (IPCC, 2013).

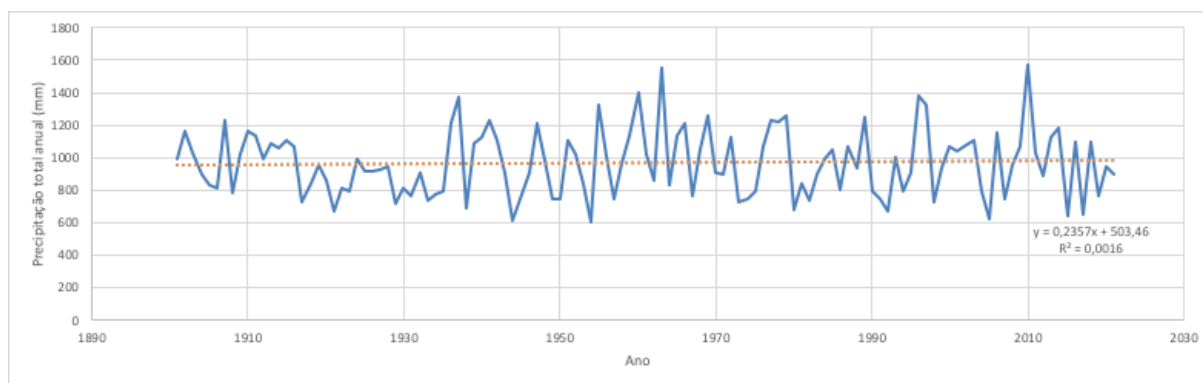


Figura 24: Precipitação total anual (mm) do local em estudo no período de 1901 a 2021 e respetiva linha de tendência (a laranja).

A seguir fez-se a padronização de cada série para a obtenção dos índices de crescimento, com a divisão de cada valor das espessuras dos anéis observadas pelos valores ajustados da função exponencial negativa para cada ano. As cronologias finais obtidas resultaram da média dos índices de crescimento de cada árvore das diferentes classes. Nas Figuras 25, 26, 27, 28 e 29 é possível observar as curvas indexadas (cronologias) para cada uma das classes (A, B, C, D e E, respetivamente).

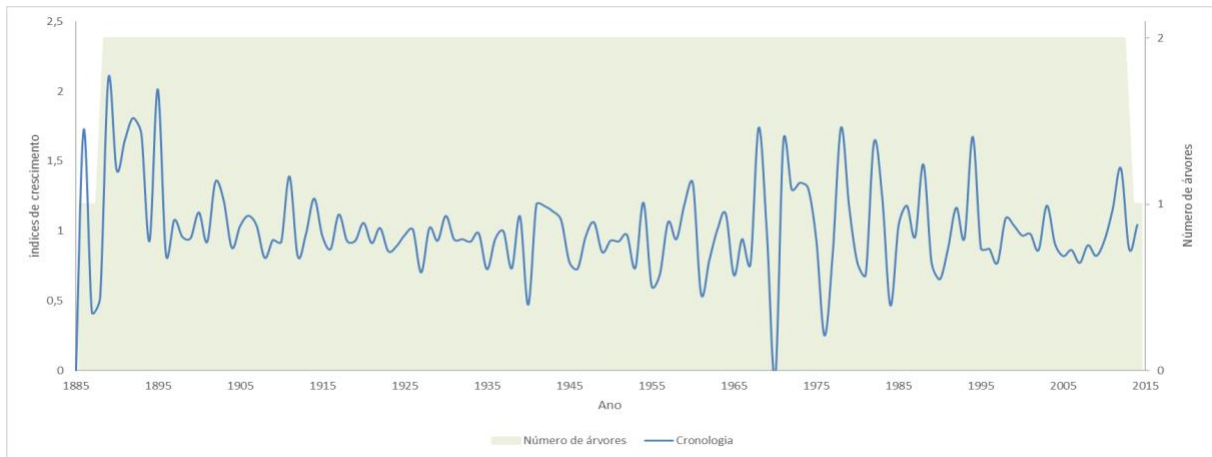


Figura 25: Cronologia final da classe A

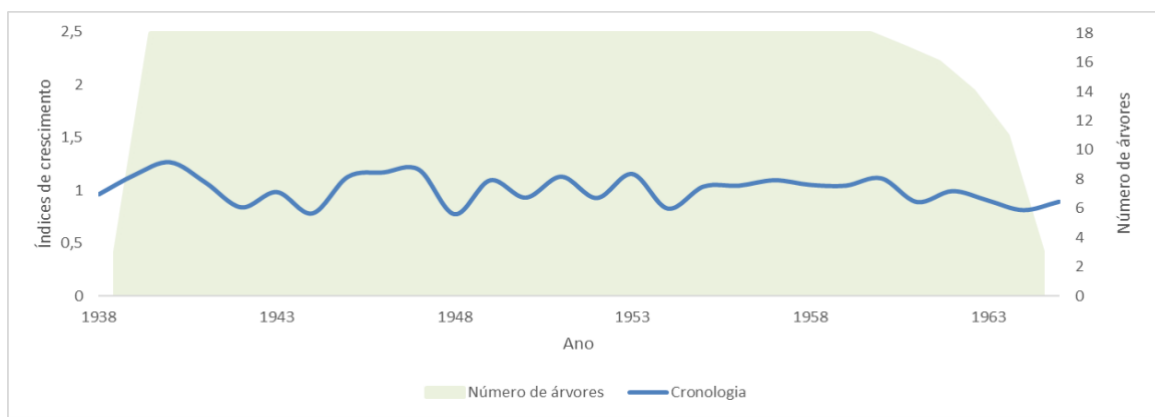


Figura 26: Cronologia final da classe B

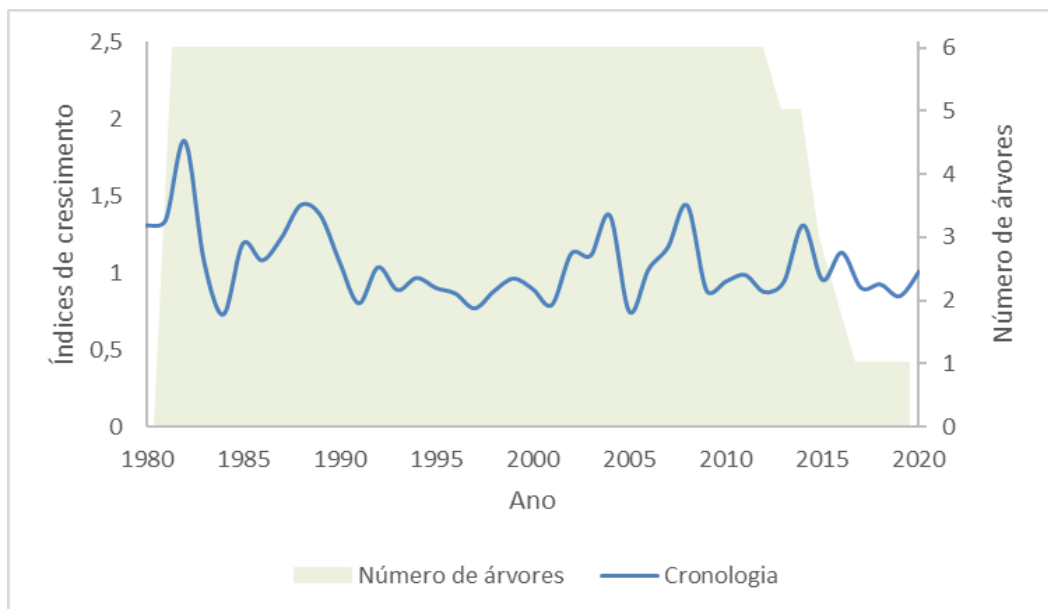


Figura 27: Cronologia final da classe C

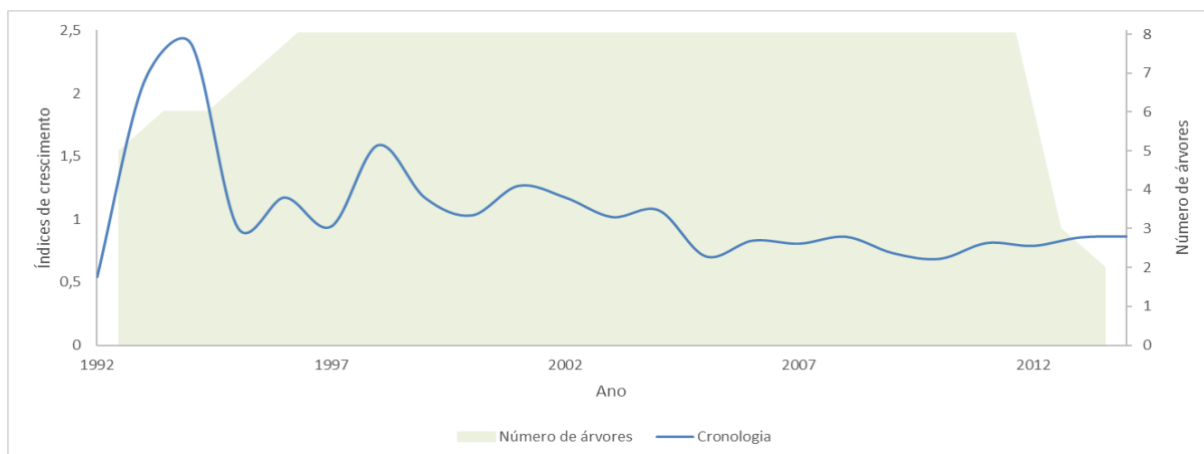


Figura 28: Cronologia final da classe D

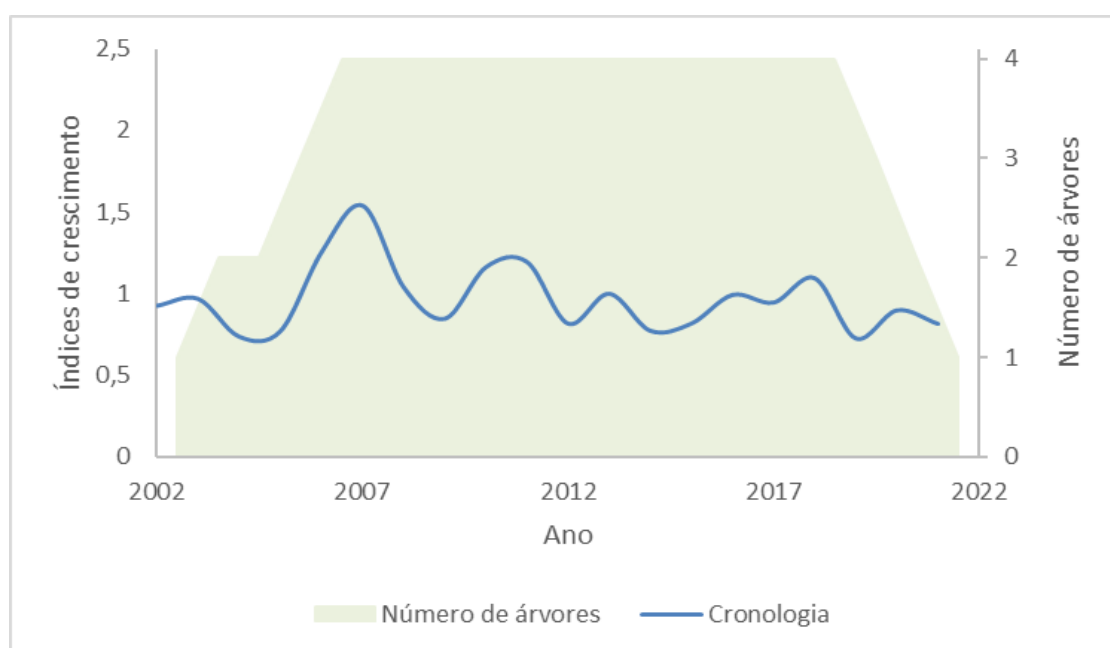


Figura 29: Cronologia final da classe E

Foram também calculados no *DetrendeR* a sensibilidade média, o desvio padrão, o AR1 e o EPS nos primeiros 20 anos dentro do intervalo de tempo definido para cada classe. Estes indicadores estatísticos são importantes para a caracterização das cronologias, quantificando a clareza com que o sinal climático é expresso na cronologia e, conseqüentemente, se há um fator comum para o crescimento das árvores daquele local, nomeadamente o clima.

Na Tabela 6 estão apresentados os valores da sensibilidade média, do desvio padrão, do EPS e dos AR1 da série original e da cronologia residual.

Tabela 6: Indicadores estatísticos de cada classe durante o período de 20 anos definido.

Classes	Sensibilidade média	Desvio padrão	EPS	AR1 da série original	AR1 da cronologia residual
A	0,20	0,19	0,82	0,82	0,09
B	0,18	0,17	0,94	0,37	0,05
C	0,21	0,23	0,89	0,57	0,16
D	0,22	0,22	0,99	0,83	0,17
E	0,27	0,28	0,78	0,43	0,15

No caso da sensibilidade média, assim como para o desvio padrão, quanto maior o valor, maior a sensibilidade ano-a-ano aos fatores climáticos. Em ambos os indicadores, as classes apresentam valores muito semelhantes, identificando-se na classe E, com as árvores mais recentes, valores superiores às demais classes (Tabela 6).

Relativamente ao EPS, na Tabela 6 as classes B, C e D apresentam valores acima dos 0,85 sugeridos por Wigley et al. (1984), confirmando a qualidade estatística da cronologia e indicando que houve um forte sinal comum, isto é, que fatores climáticos em comum influenciaram o desenvolvimento das árvores, durante os respectivos períodos de crescimento. No entanto, as classes A e E apresentam valores abaixo dos 0,85, o que poderá ter sido pelo facto de existirem poucos exemplares amostrados em ambas as classes, gerando um aumento na variabilidade entre árvores. Ainda assim, decidiu-se prosseguir com a análise de todas as classes.

No caso da classe A em particular, não significa que o crescimento radial teve um baixo nível de influência climática, pois se fossem acrescentadas árvores ao conjunto, o resultado seria potencialmente diferente. Infelizmente, por serem árvores muito antigas é, de modo geral, mais difícil encontrar amostras e algumas das poucas disponíveis para este estudo apresentaram erros no *MtreeRing*, pelo que não foi possível medi-las.

Apesar de apresentar valores de sensibilidade média e de desvio padrão superiores, a classe E tem o EPS mais baixo, o que demonstra uma falta de concordância entre os três indicadores. É também importante ressaltar que as árvores da classe E são as que abrangem o menor intervalo de tempo, por isso há uma possibilidade acrescida de outros fatores, como a competição ou pragas, estarem a influenciar o crescimento radial.

Quanto ao modelo autorregressivo de primeira ordem verifica-se, analisando a Tabela 6, que entre os diferentes períodos contemplados nas classes definidas nem sempre a influência das condições anteriores ao crescimento foram as mesmas, e que as séries A e D são as que mais influência têm do crescimento do ano anterior. Ao comparar os valores de AR1 da série original aos da cronologia, os valores encontram-se significativamente mais baixos na cronologia, pelo que o desenvolvimento radial da árvore passou a ser independente do crescimento adquirido no ano anterior.

Através do SPSS foi possível correlacionar as curvas indexadas com a temperatura média e a precipitação acumulada tanto dos meses do ano como das estações, dentro do intervalo de tempo de cada classe. Esta análise estatística baseou-se na determinação do coeficiente de correlação Pearson com a identificação dos respetivos níveis de significância (95% e 99%). Só são aqui comentados os casos onde foram encontradas correlações estatisticamente significativas.

Para as estações do ano, não se verificaram correlações significativas entre nenhuma das variáveis climáticas e as cronologias nas classes A, B, C e D.

Para a análise mensal, observaram-se os resultados desde setembro do ano anterior ao crescimento até outubro do ano de crescimento. Nas Figuras 30, 31, 32, 33 e 34 estão apresentados os coeficientes de correlação entre a temperatura média mensal e a precipitação total mensal e as cronologias de cada classe (A, B, C, D e E, respetivamente).

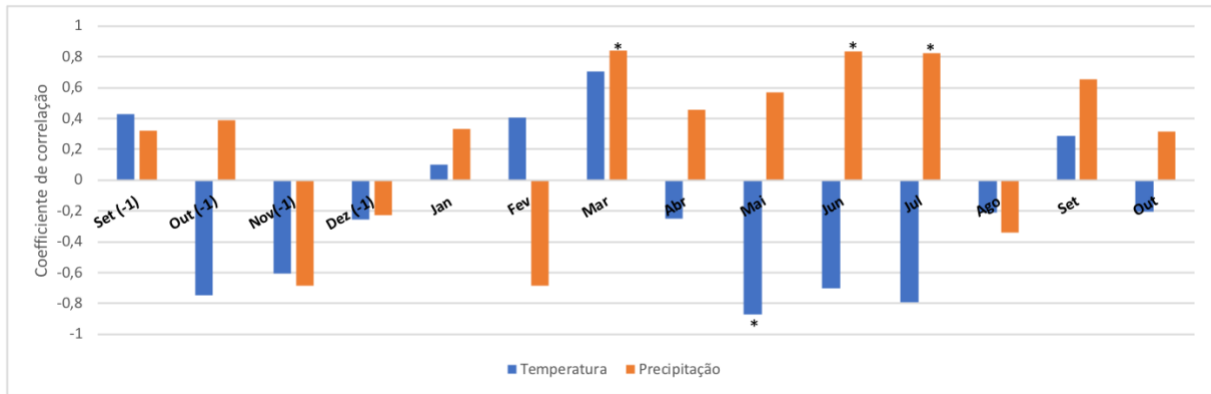


Figura 30: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1901 a 1906 (classe A). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

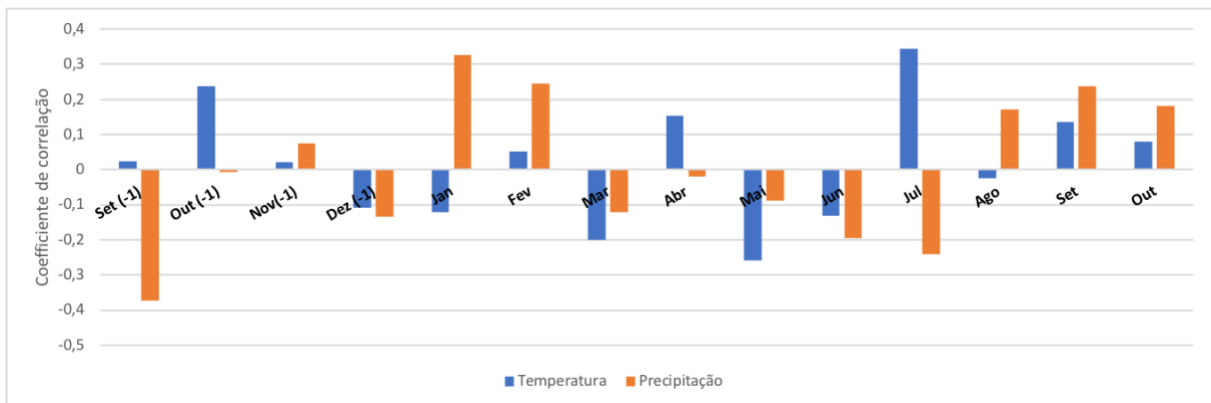


Figura 31: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1943 a 1962 (classe B). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

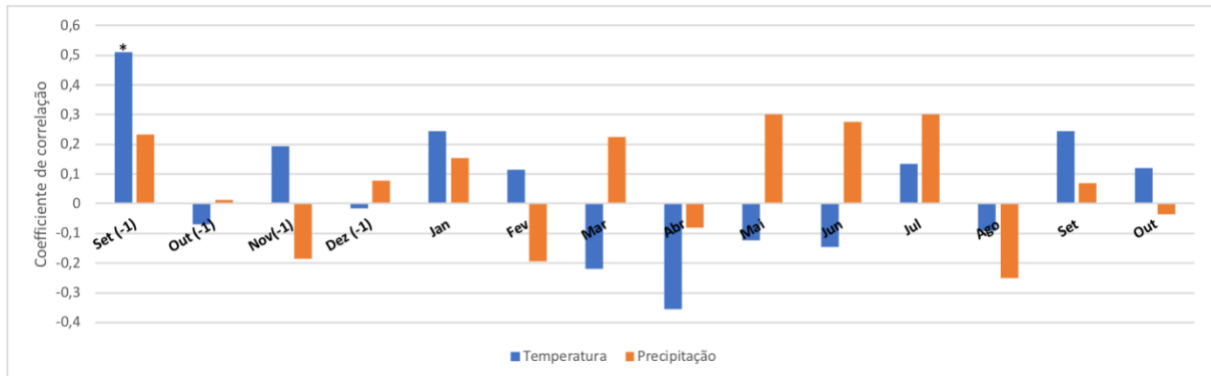


Figura 32: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1988 a 2007 (classe C). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

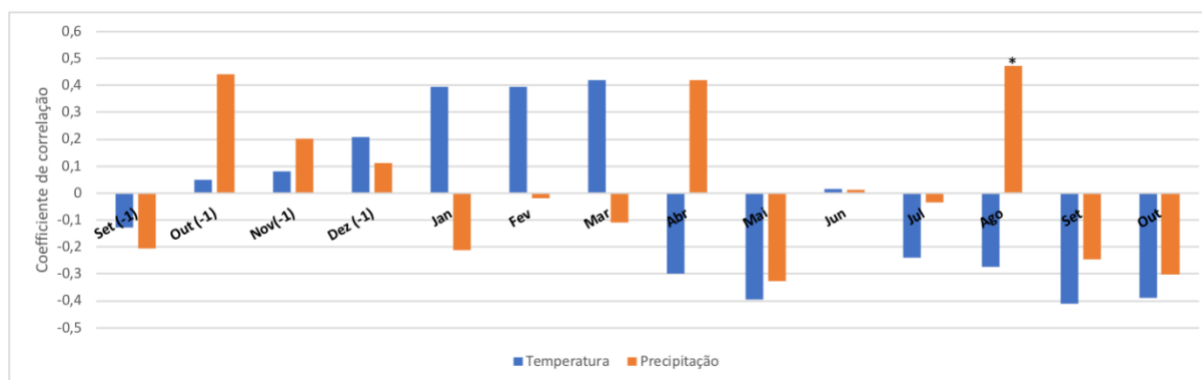


Figura 33: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 1995 a 2014 (classe D). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

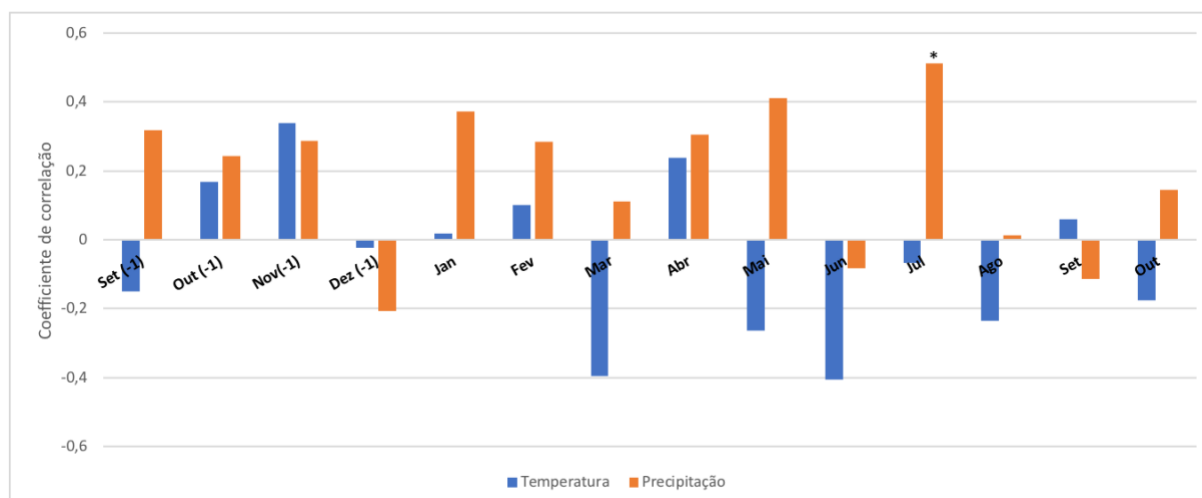


Figura 34: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos mensais durante o período de 2005 a 2021 (classe E). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

Na classe A verificou-se uma correlação negativa significativa entre a cronologia e a temperatura no mês de maio. Esta correlação aponta a temperatura como um forte condicionante ao crescimento radial da árvore neste mês. Durante os meses de primavera, elevadas temperaturas podem desencadear um aumento da evapotranspiração, levando ao *stress* hídrico que gera efeitos negativos no desenvolvimento do pinheiro-bravo, como o fecho dos estomas para evitar a perda de água que, por sua vez, limitará a capacidade fotossintética (Nabais et al., 2014; Vieira et al., 2009).

Para a mesma classe observaram-se correlações positivas significativas com a precipitação nos meses de março, junho e julho. É por volta do mês março (início da primavera) que se dá o recomeço da atividade cambial, depois de um período de dormência no inverno, estando esta atividade diretamente relacionada com a disponibilidade de água (Bogino & Bravo, 2008; Vieira et al., 2014, 2018). No caso de junho e julho, estes são meses em que, por norma, constata-se pouca ou nula atividade cambial, dependendo das condições climáticas. Um coeficiente de correlação positivo da precipitação nestes meses, associado à correlação negativa da temperatura em maio, pode significar que apesar de as temperaturas de maio não terem sido favoráveis no fim da primavera, a precipitação nos meses de verão permitiu que a árvore não cessasse por completo o seu desenvolvimento (Andreu et al., 2007; Camarero et al., 2010; Fritts, 1976c).

No entanto, conclusões relativas a esta classe devem ser feitas com um certo cuidado, pois, para além de só ter duas árvores, existem apenas dados para seis anos, visto que não houve correlações significativas para as estações do ano.

Em relação a classe B, observa-se que não houve correlações significativas com nenhuma das duas variáveis climáticas.

Na classe C, no período de 1988 até 2007, verificou-se apenas uma correlação positiva com a temperatura no mês de setembro do ano anterior ao crescimento. Segundo Camarero et al. (2010), as coníferas na região do Mediterrâneo têm essencialmente dois picos de crescimento, na primavera e no outono, e uma fase cuja taxa de crescimento é muito baixa ou inexistente, no verão. Sendo assim, o facto de se apresentar esta correlação significativa positiva, poderá traduzir-se numa maior atividade fotossintética, permitindo o acúmulo de reservas para usufruto da árvore no ano a seguir, nomeadamente durante a primavera.

Foram também verificadas correlações significativas positivas nos meses de julho e agosto, nas classes E e D, respetivamente, entre precipitação e as cronologias nos períodos de tempo correspondentes a cada uma das classes. Ambos os meses fazem parte do verão e, à semelhança do que se constatou na classe A, a precipitação é crucial para o crescimento dos anéis durante este período do ano, sugerindo que a espécie seja sensível a défices no balanço hídrico. Desta forma, a precipitação poderá ter promovido um ligeiro crescimento durante os meses em causa, ou então, possibilitar um maior crescimento de lenho de fim de estação no outono (Andreu et al., 2007; Camarero et al., 2010; Fritts, 1976c).

Na classe E, foi também existe uma correlação significativa positiva entre a cronologia obtida e a precipitação acumulada nos meses de outono (Figura 35).

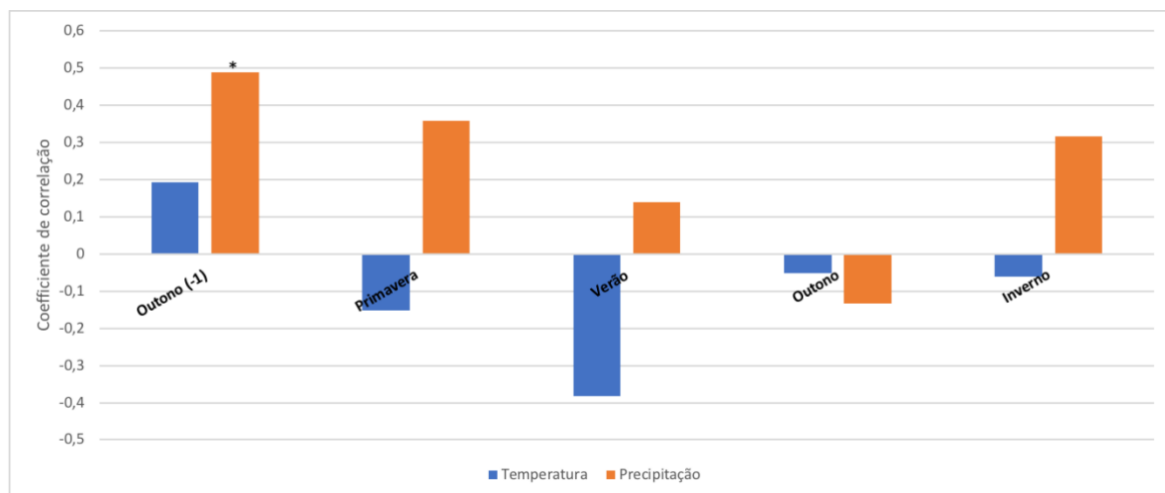


Figura 35: Correlação entre as cronologias e os dados climáticos das estações do ano durante o período de 2005 a 2021 (classe E). Um ou dois asteriscos indicam uma significância de 95% e de 99%, respetivamente. Os meses apresentados com (-1) representam os meses do ano anterior ao crescimento.

Neste caso, a precipitação durante os meses de outono contribui com a recarga dos solos e, por isso, na disponibilidade de água para o desenvolvimento da árvore durante a estação. Em adição, por consequência da atividade fotossintética no final da estação, resulta numa maior quantidade de reservas armazenadas para serem usados na seguinte estação de crescimento (Campelo et al., 2007; Zweifel et al., 2006).

5. Conclusão

Com a presente dissertação pretendeu-se averiguar o impacto que a evolução do clima (temperatura e precipitação) nos últimos 150 anos teve nos 20 primeiros anos de crescimento do *Pinus pinaster* Ait., a partir de amostras recolhidas na Mata Nacional de Leiria, por análise dos anéis de crescimento recorrendo a técnicas dendrocronológicas. Ao datar as árvores com base no número de anéis que apresentam, conseguiu-se chegar a vários conjuntos de árvores que germinaram por volta da mesma altura, obtendo-se classes onde é possível perceber como se deu o crescimento radial em diferentes períodos de tempo.

No contexto das alterações climáticas, os dados de temperatura indicaram uma tendência positiva para os próximos anos, o que também é constado na literatura. Por outro lado, pelo menos na região da MNL, a precipitação não apresenta sinais de declínio, havendo até um ligeiro aumento. Tendo em conta o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera, é expectável que nesta região haja um aumento da produtividade primária líquida e consequentemente de biomassa.

Os resultados dos incrementos anuais de área basal de cada classe mostraram que as árvores que iniciaram o seu crescimento antes de meados do século XX tiveram em média um crescimento radial inferior, indicando que desde a década de 90 tem havido mais estímulos para que as árvores jovens cresçam em diâmetro. Assim sendo, com estes dados pode-se concluir que nos últimos anos houve um aumento na produção de células do xilema, pelo menos durante os primeiros anos de vida da árvore, e, confrontando com os dados de temperatura e de precipitação, deduz-se que este aumento esteja possivelmente relacionado com as alterações no clima. Este crescimento impacta positivamente a árvore dada a melhoria na eficiência do transporte de água.

No entanto, foram constatadas poucas correlações estatisticamente significativas das cronologias de cada classe tanto com a temperatura, como com a precipitação. Com estes resultados não foi verificado um padrão comum em todas as classes na relação clima - crescimento, não se podendo afirmar que existiu um comportamento específico da espécie.

Sendo assim, o crescimento das árvores pode ter sido influenciado por outros motivos como fatores fisiológicos, incêndios florestais ou pragas. Por outro lado, por se estar apenas a considerar os primeiros anos, não se pode garantir que as árvores cresceram sob as mesmas condições de competição ou se sofreram alguma influência microclimática. Possivelmente estendendo a análise para a série de crescimento completa, se obterão resultados mais precisos.

Ainda que não tenha sido possível retirar muitas conclusões relativas à análise dendroclimatológica neste estágio de vida do pinheiro-bravo, os resultados do aumento em área basal devem ser avaliados com uma atenção especial. Este crescimento em diâmetro, e consequente aumento da biomassa, associado às alterações climáticas pôde ter vindo a contribuir no número e intensidade crescente dos incêndios florestais observados nos últimos anos. Outra hipótese seria que este aumento em área basal tenha sido desencadeado por estes mesmos incêndios, uma vez que com a morte das árvores vizinhas e aumento dos nutrientes no solo, caracterizam uma melhoria nas condições de crescimento das árvores sobreviventes.

Sendo a MNL essencialmente uma monocultura, no cenário das alterações climáticas, esta plantação de pinheiro-bravo poderá não ser sustentável. Desta forma, é importante repensar no ordenamento florestal da Mata, procurando mais soluções para a prevenção, de modo a aumentar a resiliência do território e, principalmente desde o incêndio de 2017, recuperar e reabilitar o ecossistema. Para além de algumas soluções já contempladas no Plano de Gestão Florestal da Mata Nacional de Leiria, como reduzir a superfície ocupada por espécies invasoras e diversificar a composição florística, é importante implementar outras técnicas de gestão de combustíveis e prevenção estrutural, como o fogo controlado e a silvopastorícia, contribuindo para a preservação dos recursos naturais e da paisagem, e tornando a área mais estável e resiliente.

6. Referências Bibliográficas

- AFN. (2015). *6.º Inventário florestal nacional*. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas. <https://www.icnf.pt/api/file/doc/c8cc40b3b7ec8541>
- Aguiar, C., Capelo, J., & Catry, F. (2007). Distribuição dos pinhais em Portugal. Em *Pinhais e Eucaliptais: A floresta cultivada* (Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento).
- Aguiar, F. C., Rodrigues, C., Pina, J. P., & Soares, P. (2021). Regeneration of Riparian and Maritime Pine Forests after a Large Wildfire on the Largest Public Forest of Portugal. *Forests*, 12(4), 477. <https://doi.org/10.3390/f12040477>
- Alía, R., & Martín, S. (2003). *EUFORGEN: Technical Guidelines for Genetic Conservation and use for Marine Pine (Pinus pinaster)* (International Plant Genetic Resources Institute).
- Andreu, L., Gutiérrez, E., Macias, M., Ribas, M., Bosch, O., & Camarero, J. J. (2007). Climate increases regional tree-growth variability in Iberian pine forests. *Global Change Biology*, 0(0), 070228013259001-??? <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2007.01322.x>
- Bogino, S. M., & Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. To climatic variables in central Spanish forests. *Annals of Forest Science*, 65(5), 506–506. <https://doi.org/10.1051/forest:2008025>
- Boisvenue, C., & Running, S. W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity - evidence since the middle of the 20th century: CLIMATE CHANGE IMPACTS ON FOREST VEGETATION. *Global Change Biology*, 12(5), 862–882. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01134.x>
- Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>
- Camarero, J. J., Olano, J. M., & Parras, A. (2010). Plastic bimodal xylogenesis in conifers from continental Mediterranean climates. *New Phytologist*, 185(2), 471–480. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03073.x>
- Campelo, F., García-González, I., & Nabais, C. (2012). detrendeR – A Graphical User Interface to process and visualize tree-ring data using R. *Dendrochronologia*, 30(1), 57–60. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2011.01.010>
- Campelo, F., Nabais, C., Freitas, H., & Gutiérrez, E. (2007). Climatic significance of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinea* from a dry Mediterranean area in Portugal. *Annals of Forest Science*, 64(2), 229–238. <https://doi.org/10.1051/forest:2006107>
- Centro Pinus (Ed.). (2020). *A fileira do pinho em 2019. Indicadores da Fileira do Pinho*. <https://www.centropinus.org/files/upload/indicadores/indicadores-centro-pinus-2020-1.pdf>
- Cook, E. R. (2006). Dendrochronology and Dendroclimatology. Em A. H. El-Shaarawi & W. W. Piegorsch (Eds.), *Encyclopedia of Environmetrics* (1.^a ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470057339.vad013>
- Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (Eds.). (1990). *Methods of Dendrochronology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>
- Correia, A. V., & Oliveira, Â. C. (2003). *Principais espécies florestais com interesse para*

- Portugal. *Zonas de influência atlântica*. (Direção-Geral das Florestas).
- Departamento de Gestão de Áreas Públicas e de Proteção Florestal. (2017). *10.º Relatório provisório de incêndios florestais—2017* (RIF10/2017). Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas.
- EEA. (2015). *Living in a changing climate* (European Environment Agency). Publications Office.
- FAO (Ed.). (2022). *The State of the World's Forests 2022. Forest Pathways for Green Recovery and Building Inclusive, Resilient and Sustainable Economies*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fernandes, P., Antunes, C., Pinho, P., Máguas, C., & Correia, O. (2016). Natural regeneration of *Pinus pinaster* and *Eucalyptus globulus* from plantation into adjacent natural habitats. *Forest Ecology and Management*, 378, 91–102. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.027>
- Fernandes, P. M., & Rigolot, E. (2007). The fire ecology and management of maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management*, 241(1–3), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.01.010>
- Figueiral, I. (1995). Charcoal analysis and the history of *Pinus pinaster* (cluster pine) in Portugal. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 89(3–4), 441–454. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(95\)00013-3](https://doi.org/10.1016/0034-6667(95)00013-3)
- Figueiredo, A. C., Pedro, L. G., Barroso, J. G., Trindade, H., Sanches, J., Oliveira, C., & Correia, M. (2014). *Pinus pinaster* Aiton e *Pinus pinea* L. *Agrotec*, 12, 23–27.
- Fritts, H. C. (1971). Dendroclimatology and Dendroecology. *Quaternary Research*, 1(4), 419–449. [https://doi.org/10.1016/0033-5894\(71\)90057-3](https://doi.org/10.1016/0033-5894(71)90057-3)
- Fritts, H. C. (1976a). Dendrochronology and Dendroclimatology. Em *Tree Rings and Climate* (pp. 1–54). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.50006-9>
- Fritts, H. C. (1976b). Growth and Structure. Em *Tree Rings and Climate* (pp. 55–117). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.50007-0>
- Fritts, H. C. (1976c). The Climate—Growth System. Em *Tree Rings and Climate* (pp. 207–245). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.50010-0>
- Fritts, H. C. (1976d). The Statistics of Ring-Width and Climatic Data. Em *Tree Rings and Climate* (pp. 246–311). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-268450-0.50011-2>
- FSC (2021). *Ecosystem Services Procedure: Impact Demonstration and Market Tools*. Forest Stewardship Council.
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*. <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Haines-Young, R., & Potschin, M. B. (2018). *Common international classification of ecosystem services (CICES) V5. 1 and guidance on the application of the revised structure*.
- Hardy, J. T. (2003). *Climate change: Causes, effects, and solutions*. John Wiley & Sons.
- ICNF (2022). *Plano de Gestão Florestal: Mata Nacional de Leiria 2019-2038*. Direção Regional da Conservação da Natureza e Florestas do Centro. Instituto da Conservação da Natureza

e das Florestas.

- IPCC (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge university press.
- IPCC (2018). *Global warming of 1.5° C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5° C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge university press.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). *World map of the Köppen-Geiger climate classification updated*.
- Luis, M. de, Gričar, J., Čufar, K., & Raventós, J. (2007). Seasonal Dynamics of Wood Formation in *Pinus Halepensis* from Dry and Semi-Arid Ecosystems in Spain. *IAWA Journal*, 28(4), 389–404. <https://doi.org/10.1163/22941932-90001651>
- Marques, H., Pinto, G., Pinto, P., & Teixeira, C. (2012). *Regiões de Proveniência. Portugal*. Autoridade Florestal Nacional.
- Mendes, A. C. (2007). Uma história de ascensão e queda. Em *Pinhais e Eucaliptais: A floresta cultivada* (Público, Comunicação Social, SA e Fundação Luso-Americana para o desenvolvimento).
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Wetlands and water*. World Resources Institute.
- Moreira, F., Catry, F. X., Silva, J. S., & Rego, F. C. (2010). Ecologia do fogo e gestão de áreas aridas. *Ecologia do fogo e gestão de áreas aridas*, 1–323.
- Mori, A. S., Lertzman, K. P., & Gustafsson, L. (2017). Biodiversity and ecosystem services in forest ecosystems: A research agenda for applied forest ecology. *Journal of Applied Ecology*, 54(1), 12–27. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12669>
- Nabais, C., Campelo, F., Vieira, J., & Cherubini, P. (2014). Climatic signals of tree-ring width and intra-annual density fluctuations in *Pinus pinaster* and *Pinus pinea* along a latitudinal gradient in Portugal. *Forestry*, 87(4), 598–605. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu021>
- NOAA (2022). *Annual 2021 Global Climate Report*. National Centers for Environmental Information.
- Norby, R. J., DeLucia, E. H., Gielen, B., Calfapietra, C., Giardina, C. P., King, J. S., Ledford, J., McCarthy, H. R., Moore, D. J. P., Ceulemans, R., De Angelis, P., Finzi, A. C., Karnosky, D. F., Kubiske, M. E., Lukac, M., Pregitzer, K. S., Scarascia-Mugnozza, G. E., Schlesinger, W. H., & Oren, R. (2005). Forest response to elevated CO₂ is conserved across a broad range of productivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(50), 18052–18056. <https://doi.org/10.1073/pnas.0509478102>
- Nunes, L. J. R., Meireles, C. I. R., Pinto Gomes, C. J., & Almeida Ribeiro, N. M. C. (2019). Historical Development of the Portuguese Forest: The Introduction of Invasive Species. *Forests*, 10(11), 974. <https://doi.org/10.3390/f10110974>
- Oberhuber, W., Stumböck, M., & Kofler, W. (1998). Climate-tree-growth relationships of Scots pine stands (*Pinus sylvestris* L.) exposed to soil dryness. *Trees*, 13(1), 19–27. <https://doi.org/10.1007/PL00009734>

- Oliveira, Â. C., Pereira, J. S., & Correia, A. V. (2000). *A silvicultura do pinheiro bravo* (Centro Pinus). Associação para a Valorização da Floresta de Pinho. https://www.centropinus.org/files/upload/edicoes_tecnicas/7ca9c5bad087cc24e889debc852ec75fdf1c2143.pdf
- Oliveira, F., Pintassilgo, P., Mendes, I., & Silva, J. (2010). Planning forest recreation: Environmental economic instruments and the public participation. *Sustainable Tourism IV*, 139, 467–476.
- Oliveira, F., Pintassilgo, P., Pinto, P., Mendes, I., & Silva, J. A. (2017). Segmenting visitors based on willingness to pay for recreational benefits: The case of Leiria National Forest. *Tourism Economics*, 23(3), 680–691.
- Pilcher, J. R., Schweingruber, F. H., Kairiukstis, L., Shiyatov, S., Worbes, M., Kolishchuk, V. G., Vaganov, E. A., Jagels, R., & Telewski, F. W. (1990). Primary Data. Em E. R. Cook & L. A. Kairiukstis (Eds.), *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences* (pp. 23–96). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0_2
- Pilli, R., & Pase, A. (2018). Forest functions and space: A geohistorical perspective of European forests. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 11(1), 79.
- Raventós, J., Luís, M. D., Gras, M. J., Čufar, K., González-Hidalgo, J. C., Bonet, A., & Sánchez, J. (2001). Growth of *Pinus pinea* and *Pinus halepensis* as affected by dryness, marine spray and land use changes in a Mediterranean semiarid ecosystem. *Dendrochronologia*, 19, 2.
- Resco de Dios, V., Fischer, C., & Colinas, C. (2007). Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New forests*, 33, 29–40.
- Romano, N., & Ursino, N. (2020). Forest Fire Regime in a Mediterranean Ecosystem: Unraveling the Mutual Interrelations between Rainfall Seasonality, Soil Moisture, Drought Persistence, and Biomass Dynamics. *Fire*, 3(3), 49. <https://doi.org/10.3390/fire3030049>
- Santos, O., Lampreia, C., Rigueira, J., & Nunes, S. (2015). A resinagem no Pinhal de Leiria ea educação ambiental no Pré-Escolar. *AmbientalMente Sustentable: Revista científica galego-lusófona de educación ambiental*, 20, 1203–1211.
- Savva, Y., Schweingruber, F., Milyutin, L., & Vaganov, E. (2002). Genetic and environmental signals in tree rings from different provenances of *Pinus sylvestris* L. planted in the southern taiga, central Siberia. *Trees*, 16(4), 313–324. <https://doi.org/10.1007/s00468-001-0136-4>
- Schweingruber, F. H. (1988). *Tree Rings: Basics and applications of dendrochronology*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-1273-1>
- Schweingruber, F. H. (1993). *Trees and Wood in Dendrochronology*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-77157-6>
- Shi, J., Xiang, W., Liu, Q., & Shah, S. (2019). MtreeRing: An R package with graphical user interface for automatic measurement of tree ring widths using image processing techniques. *Dendrochronologia*, 58, 125644. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125644>
- Speer, J. (2010). *Fundamentals of Tree Ring Research*. University of Arizona Press.
- Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., & Ribeiro, C. (2019). Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a

- 15 de outubro de 2017. *Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF/ADAI/LAETA)*.
- Vieira, J., Campelo, F., & Nabais, C. (2009). Age-dependent responses of tree-ring growth and intra-annual density fluctuations of *Pinus pinaster* to Mediterranean climate. *Trees*, 23(2), 257–265. <https://doi.org/10.1007/s00468-008-0273-0>
- Vieira, J., Carvalho, A., & Campelo, F. (2018). Xylogenesis in the early life stages of maritime pine. *Forest Ecology and Management*, 424, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.037>
- Vieira, J., Rossi, S., Campelo, F., Freitas, H., & Nabais, C. (2014). Xylogenesis of *Pinus pinaster* under a Mediterranean climate. *Annals of Forest Science*, 71(1), 71–80. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0341-5>
- Waters, C. N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A. D., Poirier, C., Gałuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E. C., & Ellis, M. (2016). The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science*, 351(6269), aad2622.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)
- Worbes, M. (2004). MENSURATION | Tree-Ring Analysis. Em J. Burley (Ed.), *Encyclopedia of Forest Sciences* (pp. 586–599). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-145160-7/00059-4>
- Zweifel, R., Zimmermann, L., Zeugin, F., & Newbery, D. M. (2006). Intra-annual radial growth and water relations of trees: Implications towards a growth mechanism. *Journal of Experimental Botany*, 57(6), 1445–1459. <https://doi.org/10.1093/jxb/erj125>

ANEXOS

Correlações obtidas no COFECHA para a classe A onde foram testados segmentos de 60 anos com sobreposições de 30 anos.

	Data Inicial	Data final	1860 1919	1890 1949	1920 1979	1950 2009	1980 2039
Árvore 1	1885	2012	0,58	0,58	0,45	0,37	0,35
Árvore 2	1887	2015	0,58	0,58	0,45	0,35	0,33

Correlações obtidas no COFECHA para a classe B onde foram testados segmentos de 50 anos com sobreposições de 25 anos.

	Data Inicial	Data final	1925 1974	1950 1999	1975 2024
Árvore 1	1940	2015	0,71	0,74	0,63
Árvore 2	1939	2014	0,78	0,72	0,52
Árvore 3	1939	2014	0,79	0,72	0,52
Árvore 4	1939	2014	0,8	0,71	0,6
Árvore 5	1939	2010	0,63	0,62	0,53
Árvore 6	1939	2010	0,8	0,71	0,45
Árvore 7	1943	2014	0,56	0,56	0,36
Árvore 8	1939	2014	0,71	0,64	0,68
Árvore 9	1940	2009	0,67	0,53	0,38
Árvore 10	1938	2014	0,64	0,65	0,52
Árvore 11	1938	2014	0,66	0,61	0,45
Árvore 12	1942	2010	0,66	0,63	0,63
Árvore 13	1941	2015	0,7	0,55	0,28
Árvore 14	1940	2014	0,76	0,74	0,59
Árvore 15	1938	2014	0,83	0,73	0,6
Árvore 16	1941	2014	0,54	0,46	0,34
Árvore 17	1939	2014	0,63	0,69	0,6
Árvore 18	1939	2014	0,68	0,72	0,56

Correlações obtidas no COFECHA para a classe C onde foram testados segmentos de 30 anos com sobreposições de 15 anos.

	Data inicial	Data final	1980 2009	1995 2024
Árvore 1	1984	2021	0,86	0,72
Árvore 2	1985	2021	0,65	0,54
Árvore 3	1986	2021	0,63	0,64
Árvore 4	1986	2021	0,75	0,63
Árvore 5	1988	2021	0,87	0,73
Árvore 6	1980	2021	0,55	0,63

Correlações obtidas no COFECHA para a classe D onde foram testados segmentos de 20 anos com sobreposições de 10 anos.

	Data inicial	Data final	1990 2009	2000 2019
Árvore 1	1994	2015	0,72	0,51
Árvore 2	1994	2015	0,67	0,77
Árvore 3	1992	2015	0,68	0,75
Árvore 4	1994	2015	0,67	0,64
Árvore 5	1993	2012	0,81	
Árvore 6	1992	2011	0,49	
Árvore 7	1994	2014	0,5	0,34
Árvore 8	1994	2015	0,5	0,44

Correlações obtidas no COFECHA para a classe D onde foram testados segmentos de 17 anos com sobreposições de 8 anos.

	Data inicial	Data final	1990 2009	2000 2019
Árvore 1	2005	2018	0,52	
Árvore 2	2004	2019	0,36	
Árvore 3	2002	2021	0,34	0,38
Árvore 4	2003	2021	0,6	0,63