Silva Lusitana, nº especial: 51 - 63, 2010
© UISPF, L-INIA, Oeiras. Portugal

Avaliação das Potencialidades da Utilização de Dendrocronologia no Estudo dos Impactes Climáticos sobre a Fixação de Carbono no Estrato Arbóreo de Ecossistemas de Pinheiro-bravo no Nordeste de Portugal

[(1),(2)]Margarida Liberato*, [(2),(3)]Célia Gouveia e [(4)]Domingos Lopes***
*Professor Auxiliar
[(1)]Departamento de Física. Escola de Ciências e Tecnologia e [(4)]Departamento de Ciências Florestais e Arquitectura Paisagista, Escola das Ciências Agrárias e Veterinárias. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Quinta de Prados, 5001-801 VILA REAL
** Professor Adjunto Equiparado
[(2)]Centro de Geofísica da Universidade de Lisboa (CGUL). IDL. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, 1749-016 LISBOA
[(3)] Escola Superior de Tecnologia de Setúbal. Instituto Politécnico de Setúbal. Estefanilha, 2914-508 SETÚBAL

Sumário. O interesse pela Produção Primária Líquida (NPP) tem vindo a aumentar, devido à crescente preocupação com as alterações climáticas e os seus impactes no ambiente. Este estudo pretende avaliar as potencialidades da utilização de dendrocronologia no estudo dos impactes climáticos sobre a fixação de carbono no estrato arbóreo de ecossistemas de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster Ait.*) no Nordeste de Portugal. Para tal, utilizam-se as séries dendrocronológicas de *Pinus pinaster Ait.*, que permitam obter uma série temporal de NPP, a partir da qual foi obtida uma série temporal de acréscimos de fixação anual de carbono de uma árvore média. De seguida, procede-se à Análise de Componentes Principais (PCA) dos campos das anomalias mensais da temperatura de superfície e da precipitação total sobre o sector Euro-Atlântico com o objectivo de identificar os parâmetros e os meses que poderão condicionar o ritmo de crescimento da árvore e, consequentemente, da fixação de carbono no estrato arbóreo, ao longo de um ano fisiológico. O estudo sugere que a temperatura e a precipitação do Verão anterior são os parâmetros mais relevantes para a fixação de carbono da *Pinus pinaster Ait.* no ecossistema estudado no Nordeste de Portugal.
Palavras-chave: Fixação de carbono; impactes climáticos; *Pinus pinaster*; dendrocronologia; Portugal

Evaluation of the Use of Dendrochronology on the Study of Climate Impacts on Carbon Sequestration by *Pinus pinaster* Ecosystems in Northeastern Portugal

Abstract. Interest in Net Primary Production (NPP) has recently increased owing to the growing awareness of climate change and to the need to understand its impacts on the

1º Autor E-mail: mlr@utad.pt

environment. The aim of this study is to evaluate how dendrochronology may be used on the study of climate impacts on carbon sequestration by *Pinus pinaster Ait.* ecosystems in Northeastern Portugal. The central focus of this research has been on the role of meteorological parameters on NPP, previously determined through the use of dendrochronological *Pinus pinaster Ait.* series. A Principal Component Analysis (PCA) is then performed using surface temperature and total precipitation monthly anomaly fields over the Euro-Atlantic sector in order to access the impact of temperature and precipitation in inter-annual variability of NPP and carbon sequestration. This work suggests that surface temperature and total precipitation on previous Summer are the most important parameters for carbon sequestration by *Pinus pinaster Ait.* on ecosystems in Northeastern Portugal.
Key words: Carbon sequestration; climate impacts; *Pinus pinaster*; dendrochronology; Portugal

Évaluation de l'Utilisation de la Dendrochronologie pour l'Étude des Impacts Climatiques sur la Séquestration du Carbone dans les Écosystèmes de *Pin maritime* au Nord Est du Portugal

Résumé. L'intérêt pour la production primaire nette (NPP) a récemment augmenté en raison de la prise de conscience croissante du changement climatique et de la nécessité de comprendre ses impacts sur l'environnement. L'objectif de cette étude est d'évaluer l'utilisation de la dendrochronologie dans l'étude des impacts climatiques sur la séquestration du carbone dans les écosystèmes de Pin maritime (*Pinus pinaster Ait.*) au Nord Est du Portugal. L'objectif de cette recherche a été mis sur le rôle des paramètres météorologiques sur la NPP, préalablement déterminée par l'utilisation de séries temporelles obtenues de dendrochronologie de *Pinus pinaster Ait.* Une Analyse en Composantes Principales (PCA) est alors effectuée en utilisant des champs d'anomalies de la température de surface et des précipitations mensuelles totales sur le secteur euro-atlantique afin d'arriver à l'impact de la température et de la précipitation dans la variabilité interannuelle de la séquestration du carbone. Cette étude suggère que la température de surface et la précipitation totale de l'été précédent sont les paramètres les plus importants pour la séquestration du carbone par *Pinus pinaster Ait.* sur les écosystèmes dans le Nord Est du Portugal.
Mots clés: Séquestration de carbone; impacts climatiques; *Pinus pinaster*; dendrochronologie; Portugal

Introdução

A concentração de dióxido de carbono na atmosfera tem vindo a aumentar, com um incremento de 80 ppmv, nos dois últimos séculos, como resultado da queima de combustíveis fosseis e das alterações na utilização do solo (SCHIMEL *et al*., 1995). Sabe-se que o aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera provoca um aumento da fotossíntese nas plantas (DeLUCIA *et al*., 1999). Prevê-se também que com o aquecimento futuro se intensifique a produtividade (CHURKINA e RUNNING, 2000) em ecossistemas temperados e que assim aumente o sequestro de carbono (COX *et al*., 2000; DUFRESNE *et al*., 2002). Por outro lado, crê-se que, com as alterações climáticas futuras, se reduza a captação de carbono pelos solos (CRAMER *et al*., 2001). Estas reduções poderão constituir um processo de retro-alimentação positivo que foi estimado em diversos estudos baseados em simulações, nomeadamente simulações que consideram o acoplamento clima-carbono obtidas com o modelo climático HadCM3 do Hadley Center, acoplado com um modelo de ciclo de

carbono (COX *et al*., 2000) e simulações com modelos de circulação geral acoplados oceano-atmosfera a modelos de carbono em terra e no oceano (DUFRESNE *et al*., 2002).

Por outro lado, com o aumento da temperatura, será de esperar um aumento da evaporação, conducente a um balanço negativo da água, que será mitigado pela diminuição da perda da água dos estomas das plantas (característica de um mundo com excesso de CO_2). Desta forma, o resultado líquido dependerá essencialmente da capacidade de armazenamento de água pelo solo, da distribuição vertical do carbono, das raízes no solo e da sensibilidade geral da vegetação às condições de stress hídrico (HEIMANN e REICHSTEIN, 2008); tendo-se que as limitações em água podem até suprimir a resposta da respiração à temperatura (REICHSTEIN *et al*., 2007). Sob condições de seca severa, alguns cenários climáticos apontam para um aumento do sequestro do carbono através da supressão da respiração, bem como da redução da perda de carbono devido à diminuição da actividade fotossintética (SALESKA *et al*., 2003; CIAIS *et al*., 2005). CIAIS *et al*. (2005) mostraram que durante a onda de calor que assolou a Europa no verão de 2003 a acumulação de carbono durante os cinco anos precedentes, foi anulada em apenas alguns dias de condições atmosféricas extremas. Estes autores mostraram que a respiração, em vez de aumentar com a temperatura, diminuiu juntamente com a produtividade; tendo destacado ainda que as secas e as ondas de calor podem modificar a produtividade da vegetação e transformar, por curtos períodos, sumidouros em fontes, conduzindo, desta forma, a um mecanismo de retro-alimentação positivo do sistema climático. Os efeitos prejudiciais de tais eventos extremos podem mesmo ser amplificados por meio de impactes retardados, tais como aqueles associados à morte das árvores e à recuperação lenta da vegetação em caso de incêndios florestais (HEIMANN e REICHSTEIN, 2008; LE PAGE *et al*., 2008).

Neste contexto, o interesse pela Produção Primária Líquida (NPP, mantendo o acrónimo anglo-saxónico) aumentou recentemente devido à consciencialização crescente pelas alterações climáticas e pela necessidade de compreender os seus impactes no ambiente. CAO e WOODWARD (1998) sustentam que a duplicação da concentração de dióxido de carbono na atmosfera sem que ocorram alterações climáticas iria aumentar a NPP, embora estes autores afirmem que esta resposta varia largamente consoante as zonas climáticas e de vegetação consideradas. Por outro lado, os mesmos autores mostram que uma alteração no clima sem aumento da concentração de dióxido de carbono na atmosfera provocaria uma redução geral global da NPP, com um aumento nos ecossistemas a Norte, e uma redução nos ecossistemas temperados e tropicais. Inversamente, NEMANI *et al*. (2003) referem que as alterações climáticas globais irão provavelmente aumentar a NPP. PIAO *et al*. (2009) mostram que a NPP aumentou 14% no último século, sendo este aumento mais notório depois de 1970. De 1980 até 2002, a NPP global aumentou com uma taxa de 0,4%/ano. À escala global, este incremento parece ser atribuído principalmente ao aumento da concentração de CO_2, e consequentemente às alterações da precipitação. Nas últimas duas décadas as alterações climáticas e o aumento de CO_2

provocaram um aumento dos reservatórios de carbono superior às emissões de carbono resultantes das alterações do uso do solo, originando um aumento líquido dos reservatórios no solo. No entanto, o aquecimento global já começou a acelerar as perdas de carbono pelos ecossistemas terrestres, aumentando a decomposição do carbono orgânico do solo. Assim, torna-se evidente a necessidade de encontrar metodologias que permitam a monitorização da NPP de forma prática e precisa. Neste contexto, também a avaliação da produtividade da floresta em climas temperados e do correspondente sequestro de carbono se mostram prementes, bem como da sua relação com os parâmetros climáticos.

Em Portugal, a floresta é muito importante sob os pontos de vista ambiental, económico e social, constituindo em Portugal continental cerca de 36% da utilização do território, de acordo com o mais recente inventário nacional de floresta. Por outro lado, o pinheiro-bravo (*Pinus pinaster* Ait.) constitui um dos mais importantes ecossistemas em Portugal, visto que os povoamentos puros desta espécie representam cerca de 29% do total da área de floresta nacional (DGF, 2007). A floresta portuguesa de pinheiro-bravo é muito heterogénea, tem sido sujeita a intervenção humana muito limitada e abrange uma larga diversidade de estruturas, desde uma grande variedade no que respeita o número de árvores por hectare, dimensões médias e grupos etários. Existem poucos ecossistemas com um padrão de estabilidade semelhante e taxas de produção análogas na Europa (LOPES, 2005).

Em simultâneo, a NPP é uma variável cuja avaliação é trabalhosa e demorada. Para a sua estimativa são necessárias duas medições consecutivas, que medeiem entre si pelo menos um ano fisiológico - preferencialmente o período de tempo deve ser o mais longo possível. Como em Portugal a instalação de parcelas permanentes ou semi-permanentes não é muito usual, a utilização de dendrocronologia poderá colmatar estas lacunas. Neste âmbito, o objectivo deste trabalho é a avaliação das potencialidades da utilização de dendrocronologia no estudo dos impactos climáticos sobre a fixação de carbono em ecossistemas de pinheiro-bravo, utilizando dados de povoamentos localizados no Nordeste de Portugal. O objectivo principal deste trabalho é o estudo da contribuição dos parâmetros climáticos, nomeadamente a precipitação e a temperatura, sobre a série temporal de NPP, determinada previamente através da utilização de séries dendrocronológicas de *Pinus pinaster Ait*.

Dados e métodos

Caracterização da região de estudo

Este estudo foi desenvolvido com dados obtidos em povoamentos de *Pinus pinaster Ait.* localizados no Nordeste de Portugal, a Norte de Vila Real, na região do Vale do Tâmega, entre Boticas e Chaves. A área de *Pinus pinaster Ait.* corresponde a um rectângulo de 60 km^2 (10 km x 6 km) de povoamento extensivo desta espécie, e as suas coordenadas limite são (238, 520) no canto inferior esquerdo e (248, 526) no canto superior direito, no sistema de coordenadas Hayford Gauss Militares (km).

A região tem uma topografia muito acidentada com altitudes entre cerca de

300 e 900 m. A área de estudo é caracterizada por dois vales que a atravessam na diagonal, representando os pontos de menor altitude, e geralmente com a orientação nordeste--sudoeste. As áreas de maior altitude localizam-se na região interfluvial. Os pontos mais elevados, correspondentes a 900 m de altitude, localizam-se a sudoeste, na região em estudo. O tipo de solo dominante no Norte de Portugal é do tipo cambisolo. Resultados obtidos em estudos prévios a partir de amostras de solo obtidas para análise mostraram que se tratam de solos ácidos (pH=4,4) (LOPES, 2005). A idade actual média das árvores de pinheiro-bravo é de 43±14 anos.

Identificação da árvore média

Os estudos de dendrocronologia foram efectuados apenas na árvore média. Tendo previamente sido instaladas 31 parcelas de amostragem de 500 m², como descrito em LOPES (2005), na região de Boticas, em todas elas se procedeu à medição de todos os diâmetros à altura do peito. Com base nessa informação foi possível determinar a média quadrática, com base no formulário comummente indicado e identificada a árvore que mais se aproximava desse valor. A arvore média cuja idade mais se aproximava da arvore média de todas as parcelas de amostragem foi a considerada neste estudo.

Estimativa da fixação de carbono pelo estrato arbóreo

A NPP anual corresponde à quantidade líquida de carbono capturado pelas plantas através da fotossíntese durante o período de um ano (MELILLO *et al.*, 1993; CAO e WOODWARD, 1998). Assim, a NPP expressa os fluxos líquidos de carbono entre a atmosfera e a vegetação terrestre, através de fotossíntese, num determinado intervalo de tempo a (GOETZ e PRINCE, 1996). Objectivamente, a NPP pode ser definida e medida tanto mediante (i) a quantificação de acréscimos de biomassa e (ii) as trocas de dióxido de carbono (FIELD *et al.*, 1995). Ambas as aproximações estão relacionadas, sendo que a segunda, (ii), é aproximadamente equivalente a metade da primeira, (i), já que alguns investigadores consideram que, em geral, 50% do total de matéria seca é carbono (ATJAY *et al.*, 1979; GOWER *et al.*, 1997; GOETZ e PRINCE, 1998).

Nesta secção pretende-se primeiramente determinar a NPP, utilizando para o efeito as equações alométricas para estimar variações na biomassa, de modo a estimar de seguida a fixação de carbono, seguindo os resultados de LOPES e ARANHA (2004).

Para obter a NPP, o primeiro passo foi a obtenção de medições dendrométricas e posterior determinação do diâmetro à altura do peito da árvore média (d) com base nas verrumadas obtidas com uma verruma de Pressler de cada lado da árvore média. De seguida, através de uma digitalização de uma fotografia das verrumadas e de técnicas e aplicativos de tratamento de imagem, obtiveram-se medições precisas para a estimativa da evolução, ao longo do tempo, do diâmetro à altura do peito da árvore média.

Posteriormente, foi calculada a biomassa parcial e total desta árvore média com base nas equações alométricas de LOPES (2005):

$$\begin{aligned} Log(B_{tronco}) &= 3{,}769 + 2{,}706 \times Log(d);\ R^2=98{,}6\% \\ Log(B_{copa}) &= 2{,}911 + 2{,}130 \times Log(d);\ R^2=76{,}5\% \\ Log(B_{raízes}) &= 1{,}972 + 1{,}221 \times Log(d)\ ;\ R^2=93{,}7\% \end{aligned} \quad (1)$$

$$B_{total} = B_{tronco} + B_{copa} + B_{raízes} \quad (2)$$

Finalmente, esta metodologia permite obter a série temporal de carbono fixado anualmente pela árvore média. De acordo com LOPES e ARANHA (2006), foi utilizado um valor ponderado para o teor de carbono médio do estrato arbóreo do pinheiro-bravo, obtido considerando que 49,3% da biomassa da copa é carbono (valor ponderado considerando ramos e folhas) e 44,3% da biomassa do tronco é carbono. No caso do teor de carbono por quilograma de matéria seca da raiz, assumiu-se o valor de 48,1% (RITSON e SOCHACKI, 2003). Com base nestas aproximações foi estimado o teor de carbono fixado por cada uma destas componentes, que contribuem para a determinação do teor de carbono total.

Dados climáticos

Para o estudo da variabilidade climática espacial e temporal da região da Península Ibérica foi utilizada uma Análise em Componentes Principais (PCA) (VON STORCH e ZWIERS, 2002; WILKS, 2005), método estatístico multivariado que permite decompor um determinado campo climatológico, para a sua caracterização espacio-temporal – obtendo-se padrões espaciais (as funções empíricas ortogonais, EOF) e respectivos coeficientes temporais (as componentes principais, PC). De facto, as EOF permitem obter uma regionalização dos campos de forma a obterem-se padrões climáticos, ou seja permitindo a identificação de regiões homogéneas i.e. com padrões de variabilidade espacial similar. Esta técnica permite transformar um campo de dados, caracterizado por um número elevado de variáveis, num outro contendo um número menor, mas que, contudo, mantenha ainda uma fracção apreciável da variabilidade existente no conjunto original. As EOF, por terem correlação nula entre si, podem ser encaradas como componentes independentes de variabilidade.

A PCA foi realizada aos campos de anomalias mensais de temperatura média do ar a 1000 hPa e de precipitação total, de larga escala, obtidos para a região Euro-Atlântica, definida pelos paralelos 33,5°N e 48,75°N e pelos meridianos 13,75°W e 6.25°E. A análise é realizada com base em campos de temperatura obtidos a partir dos dados de re-análise sinóptica disponibilizados pelos National Center for Environmental Prediction – National Center for Atmospheric Research (NCEP–NCAR) (KALNAY *et al*., 1996; KISTLER *et al*., 2001), numa malha regular de 2,5 graus de latitude e longitude. O campo da precipitação utilizado foi disponibilizado pelo Climate Prediction Center (XIE e ARKIN, 1997). Ambos os campos foram utilizados para o período comum disponível (1979 – 2007).

Finalmente foram efectuadas as correlações entre as primeiras componentes principais (PC) obtidas, que representam mais de 65% (95%) da variância explicada de precipitação (temperatura) e a série temporal de carbono fixado anualmente pela árvore média.

Resultados

Série de fixação anual de carbono

Seguindo a metodologia acima descrita, obteve-se a série dos

incrementos anuais do diâmetro à altura do peito da árvore média. A Figura 1 ilustra a série temporal dos incrementos anuais do diâmetro à altura do peito da árvore média, para o período 1964-2008. Cada ano considerado corresponde a um ano fisiológico. Apesar de se verificar grande variabilidade interanual, é nítido o forte crescimento inicial do diâmetro à altura do peito da árvore e a sua posterior diminuição. A linha de tendência (na figura) indica que o acréscimo do diâmetro tende a diminuir cerca de 0,15 mm por ano. É ainda interessante observar que, relativamente à fase adulta da árvore, este acréscimo se torna tendencialmente mais homogéneo, ocorrendo pontualmente momentos em que o acréscimo se destaca acentuadamente. O estudo de correlação com os parâmetros climáticos aqui realizado incide sobre este período final de 1979-2008.

Finalmente, foram estimados os valores anuais de carbono fixado pela árvore média, num ano fisiológico ($kg.ano^{-1}$), como descrito na metodologia e apresentados na Figura 2. Da sua análise verifica-se que a elevada variabilidade interanual dos acréscimos do diâmetro se reflecte nos acréscimos de fixação do carbono, facto que não surpreende uma vez que, com base na metodologia aplicada, os últimos são função dos primeiros. Contudo, verifica-se ainda que a tendência da evolução do acréscimo na fixação do carbono é crescente com a idade da árvore, sendo este comportamento contrário ao do acréscimo do diâmetro, descrito na Figura 1. Este facto pode ser facilmente explicado na medida em que, para árvores adultas, pequenos acréscimos em diâmetro se traduzem em acréscimos significativos na biomassa total da árvore e, consequentemente, do carbono fixado.

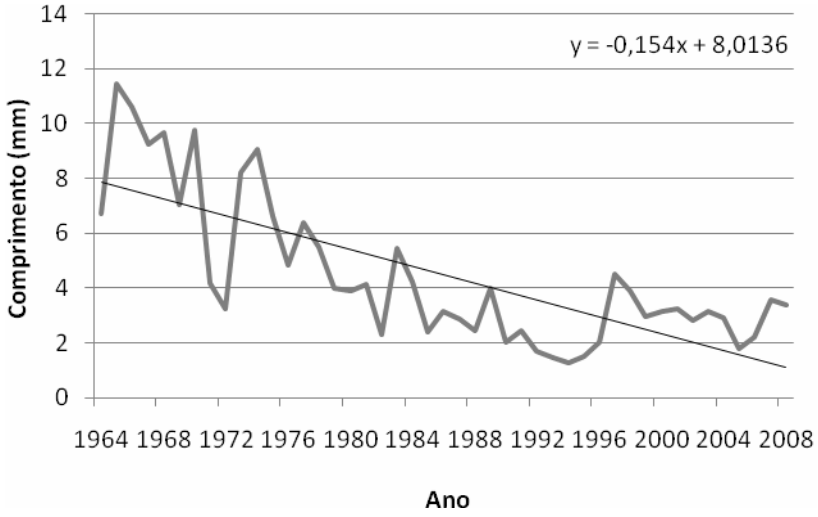


Figura 1 - Série temporal dos incrementos anuais do diâmetro à altura do peito da árvore média, para o período 1964-2008

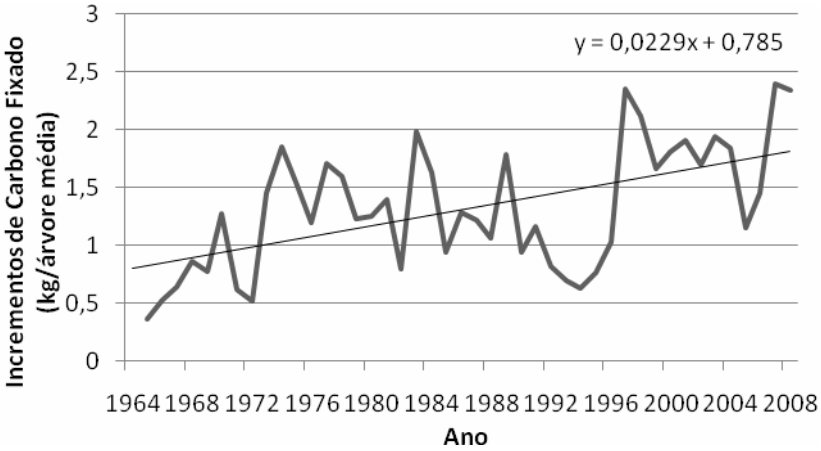


Figura 2 - Série temporal dos incrementos anuais de carbono fixado pela árvore média (kg/ano), para o período 1964-2008

Parâmetros climáticos

Os dados de temperatura média à superfície e de precipitação sobre o sector Euro Atlântico foram utilizados para avaliar a influência de factores climáticos de larga escala sobre o crescimento da árvore e consequente fixação de carbono, mediante uma PCA dos campos das anomalias mensais da temperatura de superfície e da precipitação (Figura 3). Os três primeiros padrões de EOF para a temperatura de superfície (painel esquerdo) e para a precipitação (painel direito) são apresentados, respectivamente. Os erros de amostragem dos valores-próprios foram calculados de acordo com a Regra de North mostrando que as três primeiras EOF se encontram bem separadas em ambos os campos. As EOF 1, 2 e 3 da temperatura explicam, respectivamente, 87,8%, 5,1% e 2,9% da variabilidade total, enquanto que as EOF 1, 2 e 3 da precipitação explicam, respectivamente, 30,5%, 24,9% e 10,0% da variabilidade total.

Por análise da Figura 3 fica evidente o contraste oceânico (gradiente zonal) na Península Ibérica, na EOF1 dos dois campos meteorológicos considerados. No caso da EOF2 da temperatura pode observar-se o contraste Norte-Sul (gradiente meridional de temperatura) e a EOF3 evidencia o aumento de temperatura no interior da Península Ibérica. No caso da precipitação, a EOF2 destaca as zonas de maior precipitação característica das Montanhas Luso-Galaicas, no noroeste da Ibéria, enquanto que a EOF3 torna evidente o efeito da topografia (Pirinéus) no regime de precipitação.

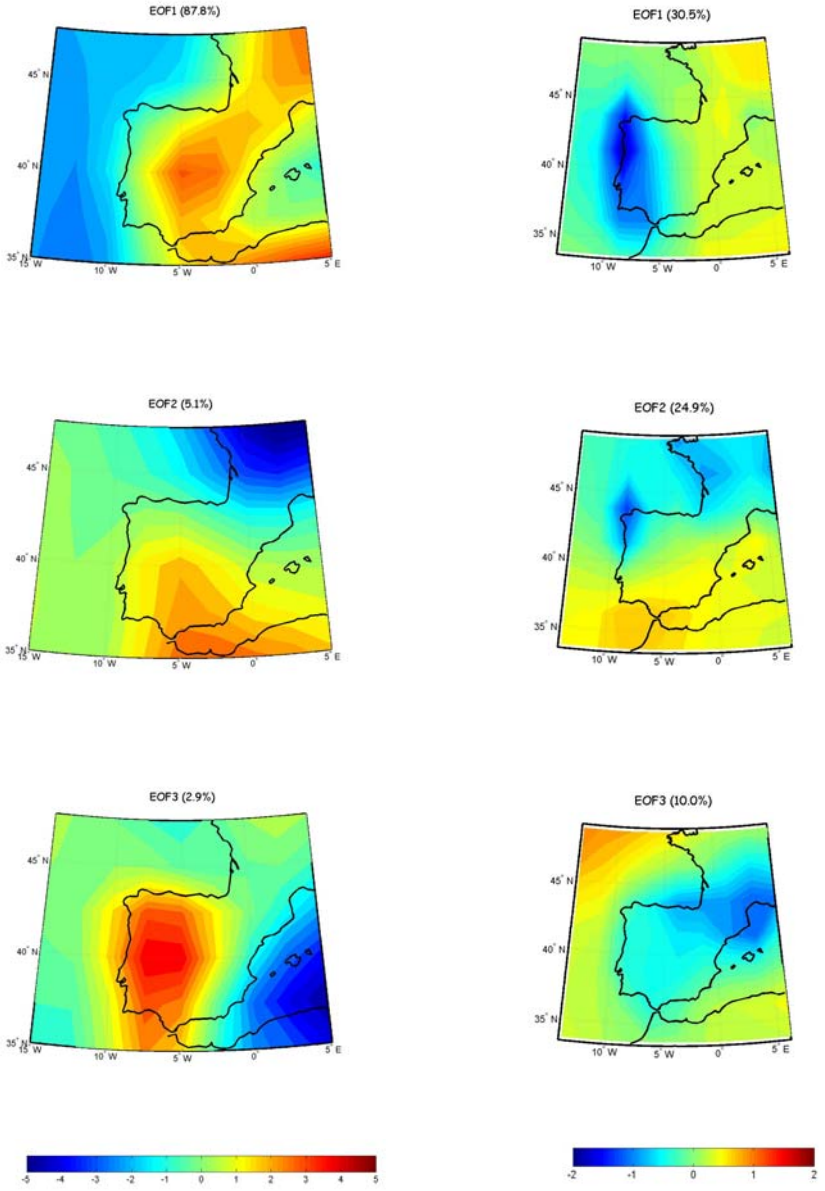


Figura 3 - Três primeiros padrões de EOF, no sector Euro Atlântico, para a temperatura média de superfície (painel esquerdo) e a precipitação (painel direito), para o período 1979-2007

A análise de correlação entre as séries temporais dos incrementos anuais de carbono fixado pela árvore média e dos coeficientes das PC do ano precedente apresenta valores significativos para as primeira e terceira PC (PC1 e PC3; Quadro 1). Deste modo foram seleccionadas as correlações com significância estatística a 5% que consistem na PC3 da temperatura (Julho e Dezembro), na PC1 da precipitação (Agosto) e na PC3 da precipitação (Novembro). No que concerne a temperatura, embora o padrão da EOF3 explique apenas cerca de 3% da variabilidade total, parece descrever as condições meteorológicas decorrentes da característica baixa térmica que domina as condições atmosféricas na Península Ibérica durante o Verão. Embora a depressão térmica na Península Ibérica seja mais frequente no Verão, também tem sido detectada no início do Outono e até mesmo durante os últimos dias de Inverno e início da Primavera (FONT, 1983). Contudo estes casos raros parecem estar associados a condições sinópticas pouco intensas, a longos períodos de seca e fortes fluxos de calor à superfície. As correlações negativas obtidas para os meses de Julho (-0,47) e de Dezembro (-0,37) do ano precedente sugerem que em anos em que estas condições ocorrem a árvore ficará sujeita a stress térmico, correspondendo a uma diminuição dos valores de carbono fixado pela árvore. A correlação positiva obtida com a PC1 da precipitação para o mês de Agosto (0,39) sugere que a precipitação do Verão precedente poderá ter um impacte relevante no aumento da fixação de carbono no ano fisiológico seguinte. Por outro lado, a EOF3 da precipitação evidencia a influência da topografia na precipitação, de modo que a correlação negativa obtida com a PC3 para o mês de Novembro (-0,40) sugere que um excesso (diminuição) de precipitação durante o mês de Novembro poderá contribuir para a diminuição (incremento) da fixação de carbono.

Quadro 1 - Valores de correlação entre incrementos anuais de carbono fixado pela árvore média e: PC3 da Temperatura (Julho e Dezembro do ano n-1), PC3 da Temperatura (Fevereiro do ano n), PC1 da Precipitação (Agosto do ano n-1), PC3 da Precipitação (Novembro do ano n-1), PC2 da Precipitação (Setembro do ano n). Os valores têm significância estatística a 5%

	Coeficiente de Correlação
TEMP (PC3) - JUL (ano n-1)	- 0,47
TEMP (PC3) - DEZ (ano n-1)	- 0,37
PREC (PC1) - AGO (ano n-1)	0,39
PREC (PC3) - NOV (ano n-1)	- 0,40

Discussão e conclusões

Este estudo pretende avaliar as potencialidades da utilização de dendrocronologia no estudo dos impactos climáticos sobre a fixação de carbono no estrato arbóreo de ecossistemas de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster Ait.*) no nordeste de Portugal. Para tal são utilizadas séries dendrocronológicas de *Pinus pinaster Ait.*, que permitiram obter uma série temporal de NPP, a partir da qual foi obtida uma série temporal de acréscimos de fixação anual de carbono de uma árvore média. De seguida procedeu-se à PCA dos campos das anomalias mensais da temperatura de superfície e da precipitação total sobre o sector Euro-Atlântico, sendo finalmente calculados os valores de correlação entre o carbono fixado pela árvore e as primeiras 3 PC

com maior variância explicada.

Pode dizer-se que foi possível, com uma técnica não-destrutiva, reconstruir a evolução do diâmetro à altura do peito da árvore média, que corresponde à única variável de medição exigida pelos modelos alométricos de cada espécie. Contornou-se assim o facto de, no sector florestal em Portugal, a instalação de parcelas permanentes não ser habitual, o que não está por certo dissociado de, num contexto de mediterraneidade, os incêndios florestais serem um grave impeditivo para a manutenção, por longos períodos temporais, de parcelas de amostragem. Este trabalho comprova que é possível desenvolver estudos com séries temporais longas, ultrapassando as referidas dificuldades.

No que respeita o estudo dos impactos climáticos sobre a fixação de carbono no estrato arbóreo, os resultados vêm confirmar que os parâmetros climáticos influenciam fortemente o ritmo de crescimento desta espécie, no ecossistema em estudo, identificando-se os parâmetros e meses que poderão ser mais condicionantes desse ritmo de crescimento e, consequentemente, da fixação de carbono no estrato arbóreo, ao longo de um ano fisiológico. O estudo sugere que a temperatura e a precipitação do verão anterior são os parâmetros mais relevantes para a fixação de carbono da *Pinus pinaster Ait.* no ecossistema estudado no nordeste de Portugal.

Finalmente, é importante referir que este estudo resulta de um trabalho ainda preliminar, sendo desejável a confirmação e sistematização dos resultados mediante a utilização de outras séries dendrocronológicas.

Agradecimentos

Este estudo foi realizado no âmbito do projecto "Florestas Mistas. Modelação, Dinâmica e Distribuição Geográfica da Produtividade e da Fixação do Carbono nos Ecossistemas Florestais Mistos em Portugal" (PTDC/AGR-CFL/68186/2006), financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia. Um agradecimento especial é devido ao Técnico Superior do Departamento de Ciências Florestais e Arquitectura Paisagista, da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, César Augusto da Maia Gomes, pela execução da análise do tronco e obtenção das séries dendrocronológicas; ao Assistente Operacional Armindo Gonçalves Teixeira, pela preparação das amostras; e finalmente ao Técnico Superior Carlos Pinto de Brito e ao Assistente Técnico Carlos Guerra Fernandes, pela recolha das amostras em campo, todos do mesmo Departamento.

Os autores desejam agradecer ainda ao Prof. Doutor João Bento pelos seus comentários e pertinentes sugestões ao longo do processo de revisão do artigo.

Os dados de precipitação CMAP (Climate Prediction Center Merged Analysis of Precipitation) foram fornecidos pela NOAA / OAR / ESRL PSD, Boulder, Colorado, E.U.A., a partir de seu site http://www.esrl.noaa.gov/psd/.

Referências

ATJAY, G.L., KETNER, O., DUVIGNEAUD, O., 1979. *Terrestrial primary production and phytomass*: 129-182 in B. Bolin, E.T. Degens, S. Kempe, and P. Ketner, editors. The Global Carbon Cycle. John Wiley and Sons, New York, USA.

CAO, M., WOODWARD, F.I., 1998. Net primary and ecosystem production and carbon stocks of terrestrial ecosystems and their responses to climate change. *Global Change Biology* **4**: 185-198.

CHURKINA, G., RUNNING, S.W., 2000. Investigating the balance between timber harvest and productivity of global coniferous forest under global change. *Climate Change* **47**: 167-191.

CIAIS, PH, REICHSTEIN, M., VIOVY, N., GRANIER, A., OGÉE, J., ALLARD, V., AUBINET, M., BUCHMANN, N., BERNHOFER, CHR., CARRARA, A., CHEVALLIER, F., DE NOBLET, N., FRIEND, A.D., FRIEDLINGSTEIN, P., GRÜNWALD, T., HEINESCH, B., KERONEN, P., KNOHL, A., KRINNER, G., LOUSTAU, D., MANCA, G., MATTEUCCI, G., MIGLIETTA, F., OURCIVAL, J.M., PAPALE, D., PILEGAARD, K., RAMBAL, S., SEUFERT, G., SOUSSANA, J.F., SANZ, M.J., SCHULZE, E.D., VESALA, T., VALENTINI, R., 2005, Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* **437**: 529–533.

COX, P.M., BETTS, R.A., JONES, C.D., SPAL, A.S., TOTTERDELL, I.J., 2000. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature* **408**: 184–187.

CRAMER, W., A. BONDEAU, F. WOODWARD, I. PRENTICE, R. BETTS, V. BROVKIN, P. COX, V. FISHER, J. FOLEY, A. FRIEND, C. KUCHARIK, M. LOMAS, N. RAMANKUTTY, S. SITCH, B. SMITH, A. WHITE, C. YOUNG-MOLLING, 2001, Global response of terrestrial ecosystem structure and function to CO_2 and climate change: Results from six dynamic global vegetation models. *Glob. Change Biol.* **7**: 357–373.

DeLUCIA, E.H., J.G. HAMILTON, S.L. NAIDU, R.B. THOMAS, J.A. ANDREWS, A. FINZI, M. LAVINE, R. MATAMALA, J.E. MOHAN, G.R. HENDREY, W.H. SCHLESINGER, 1999. Net primary production of a forest ecosystem with experimental CO_2 enrichment. *Science* **284**: 1177–1179.

DGF, 2007. Inventário Florestal 2005/2006. DGRF, 18pp. (IFN relatório da 3ª revisão na internet).

DUFRESNE, J.L., FRIEDLINGSTEIN, P., BERTHELOT, M., BOPP, L., CIAIS, P., FAIRHEAD, L., Le TREUT, H., MONFRAY, P., 2002. On the magnitude of positive feedback between future climate change and the carbon cycle. *Geophys. Res. Lett.* **29**(10), doi:10.1029/2001GL013777.

FIELD, C.B., RANDERSON, J.T., MALMSTROM, C.M., 1995. Global net primary production: combining ecology and remote sensing. *Remote Sensing of Environment* **51**: 74-88.

FONT, I., 1983. *Climatología de España y Portugal*. Inst. Nacional de Meteorología. Ministerio de Transportes y Comunicaciones de Madrid, 296 pp.

GOETZ, S.J., PRINCE, S.D., 1996. Remote sensing of net primary production in boreal forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **78**: 149-179.

GOETZ, S.J., PRINCE, S., 1998. Variability in carbon exchange and light utilization among boreal forest stands: Implications for remote sensing of net primary production. *Canadian Journal of Forest Research* **28**: 375-389.

GOWER, S.T., VOGEL, J.G., NORMAN, J.M., KUCHARIK, C.J., STEELE, S.J., STOW, T.K., 1997. Carbon distribution and aboveground net primary production in aspen, jack pine and black spruce stands in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Journal of Geophysical Research* **102**(D24): 29,029-29,041.

HEIMANN, M., REICHSTEIN, M., 2008. Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* **451**: 289-292.

KALNAY, E., COAUTORES, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77**: 437–471.

KISTLER R., COAUTORES, 2001. The NCEP–-NCAR 50-Year Reanalysis: Monthly means CD-ROM documentation. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **82**: 247–267.

LE PAGE, Y., PEREIRA, J.M.C., TRIGO, R.M., DACAMARA, C.C., OOM, D., MOTA, B., 2008. Global fire activity patterns (1996-2006) and climatic influence: an analysis using the World Fire Atlas. *Atmospheric Chemistry and Physics* **8**: 1911-1924.

LOPES, D., ARANHA, J., 2004. A proposed methodology to estimate the carbon sequestration in a *Pinus pinaster* stand. Poster presented at the *Portuguese-Spanish IGBP Seminar 2004: Global Change and Sustainability*. Évora, Portugal, 15-17 de Abril.

LOPES, D., ARANHA, J., 2006. Avaliação do Conteúdo de Carbono na Matéria Seca de Diferentes Componentes de Árvores de *Eucalyptus globulus* e de *Pinus pinaster*. *Silva Lusitana* **14**(2): 149-154.

LOPES, D., 2005. *Estimating Net Primary Production in* Eucalyptus globulus *and* Pinus pinaster Ecosystems in Portugal. Tese de doutoramento. Kingston University, Londres, 286 pp.

MELILLO, J.M, McGUIRE, A.D., KICKLIGHTER, D.W., MOORE III, B., VOROSMARTY, C.J., SCHLOSS, A.L., 1993. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature* **363**(May): 234-240.

NEMANI, R.R., KEELING, C.D., HASHIMOTO, H., JOLLY, W.M., PIPER, S.C., TUCKER, C.J., MYNENI, R.B., RUNNING, S.W., 2003. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* **300**: 1560-1563.

PEREIRA, J.S., SILVA, T., CORREIA, A.V., 2004. Florestas e alterações climáticas – o futuro das florestas em Portugal. *Ingenium* **84**: 60-62.

PIAO, S., CIAIS, P., FRIEDLINGSTEIN, P., PEYLIN, P., REICHSTEIN, M., LUYSSAERT, S., MARGOLIS, H., FANG, J., BARR, A., CHEN, A,. GRELLE, A., HOLLINGER, D.Y., LAURILA, T., LINDROTH, A., RICHARDSON, A.D., VESALA, T., 2008. Net carbon dioxide losses of northern ecosystems in response to autumn warming. *Nature* **451**: 49-52.

PIAO, S., P. CIAIS, P. FRIEDLINGSTEIN, N. de NOBLET-DUCOUDRE, P. CADULE, N. VIOVY, T. WANG, 2009. Spatiotemporal patterns of terrestrial carbon cycle during the 20th century. *Global Biogeochem. Cycles* **23**: GB4026, doi:10.1029/2008GB003339.

REICHSTEIN, M., PAPALE, D., VALENTINI, R., AUBINET, M., BERNHOFER, C., KNOHL, A., LAURILA, T., LINDROTH, A., MOORS, E., PILEGAARD, K., SEUFERT, G., 2007. Determinants of terrestrial ecosystem carbon balance inferred from European eddy covariance flux sites. *Geophysical Research Letters* **34**: L01402.262.

RITSON, P., SOCHACKI, S., 2003. Measurement and prediction of biomass and carbon content of Pinus pinaster trees in farm forestry plantations, south-western Australia. *Forest Ecology and Management* **175**: 103-117.

SALESKA, S.R., MILLER, S.D., MATROSS, D.M., GOULDEN, M.L., WOFSY, S.C., da ROCHA, H.R., DE CAMARGO, P.B., CRILL, P., DAUBE, B.C., de FREITAS, H.C., HUTYRA, L., KELLER, M., KIRCHHOFF, V., MENTON, M., MUNGER, J.W., PYLE, H.E., RICE, A.H., SILVA, H., 2003, Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance induced losses. *Science* **302**: 1554–1557.

SCHEFFER, M., BROVKIN, V., COX, P., 2006. Positive feedback between global warming and atmospheric CO2 concentration inferred from past climate change. *Geophys. Res. Lett.* **33**: L10702, doi:10.1029/2005GL025044.

SCHIMEL, D., ENTING, I., HEIMANN, M., WIGLEY, T., RAYNAUD, D., ALVES, D., SIEGENTHALER, U., 1995. *CO_2 and the carbon cycle, in Climate Change 1994, Radiative Forcing of Climate Change and Evaluation of the IPCC IS92 Emission Scenarios*, pp. 35–71, Cambridge Univ. Press.

VON STORCH, H., ZWIERS, F.W., 2002. *Statistical Analysis in Climate Research*, 494 pp., Cambridge Univ. Press, New York.

WILKS, D.S., 2005: *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*. *Elsevier* 592 pp.

XIE, P., ARKIN, P.A., 1997. Global precipitation: A 17-year monthly analysis based on gauge observations, satellite estimates, and numerical model outputs. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **78**: 2539-2558.