

CAPÍTULO IV

As Plantações de Eucalipto como Sumidouro de Carbono em Portugal

As plantações de eucalipto como sumidouro de carbono em Portugal

Daniela Ferreira¹, Sérgio Fabres¹, André Simões Carvalho², Paula Guimarães², Ana Cláudia Dias³

¹ RAIZ – Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Quinta de S. Francisco, 3800-783 Aveiro, Portugal; *daniela.ferreira@thenavigatorcompany.com

² Navigator Forest Portugal, Zona Industrial da Mitrena, 2910-738 Setúbal, Portugal

³ CESAM – Centro de Estudos do Ambiente e do Mar, Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro, Portugal

Resumo. As emissões de dióxido de carbono para a atmosfera continuam a aumentar. Os ecossistemas florestais (sistema solo-planta-camada orgânica) são os sistemas terrestres com maior capacidade de sequestro e armazenamento de carbono, contribuindo como agentes de mitigação das alterações climáticas. Embora as florestas de eucalipto em Portugal tenham um objetivo específico, principalmente de produção de madeira para a indústria de pasta e papel, podem ter um papel complementar às florestas de conservação, os principais sumidouros de carbono. A capacidade de adaptação às principais condições de solo e de clima no nosso país, e taxas crescimento do eucalipto, aliadas a boas práticas silvícolas na gestão dos povoamentos, podem contribuir para um papel positivo destas florestas plantadas no stock global de carbono, no curto e no longo prazo. Há ainda necessidade de aprofundar conhecimento sobre a dinâmica de carbono nos ecossistemas florestais, principalmente no que respeita ao efeito das operações florestais com maior impacto no solo e relativamente aos processos de decomposição da folhada de eucalipto.

Palavras-chave: sumidouro de carbono, plantações de eucalipto, Portugal.

Eucalypt plantations as carbon sinks

Summary. Carbon dioxide emissions to the atmosphere continue to increase. Forest ecosystems (soil-plant-organic layer system) are the terrestrial systems with greater carbon sequestration and storage capacity and, therefore, acting as climate change mitigation agents. Although eucalypt forests in Portugal have a specific objective, mainly of wood production for the pulp and paper industry, they can have a complementary role to conservation forests, the main carbon sinks. The ability to adapt to the main soil and climate conditions in our country, and growth rates of eucalyptus, combined with good silviculture practices in stand management, can contribute to a positive role of these planted forests in the global carbon stock, in the short and long term. There are still gaps in knowledge about carbon dynamics in forest ecosystems, especially concerning the effect of forest operations that have the greatest impact on soil and regarding the eucalypts leaf's decomposition process.

Keywords: carbon sink, eucalyptus plantations, Portugal.

Les plantations d'eucalyptus comme puits de carbone

Résumé. Les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère continuent d'augmenter. Les écosystèmes forestiers (système sol-plante-couche organique) sont les systèmes terrestres ayant la plus grande capacité de séquestration et de stockage du carbone et, par conséquent, des agents d'atténuation du changement climatique. Si les forêts d'eucalyptus du Portugal ont un objectif spécifique, principalement la production de bois pour l'industrie de la pâte et du papier, elles peuvent avoir un rôle complémentaire aux forêts de conservation, principaux puits de carbone. La capacité à s'adapter aux principales conditions pédologiques et climatiques de notre pays, et les taux de croissance de l'eucalyptus, combinés à de bonnes pratiques sylvicoles dans la gestion des peuplements, peuvent contribuer à un rôle positif de ces forêts plantées dans le stock mondial de carbone, à court et long terme. Il existe encore des lacunes dans les connaissances sur la dynamique du carbone dans les écosystèmes forestiers, en particulier en ce qui concerne l'impact des opérations forestières qui ont le plus grand impact sur le sol et en relation avec le processus de décomposition de la feuille d'eucalyptus.

Mots clés: puits de carbone, plantations d'eucalyptus, Portugal.

Criação dos mercados de valorização de carbono

O efeito de estufa no planeta é um fenómeno natural em que alguns gases na atmosfera absorvem parte da radiação infravermelha emitida essencialmente pela superfície terrestre. Esses gases designam-se de Gases com Efeito de Estufa (GEE) e desempenham um papel importante na retenção de calor do sol necessário à manutenção da temperatura para a vida na Terra. Todavia, a concentração desses gases na atmosfera tem aumentado significativamente, contribuindo para o aquecimento. A revolução industrial é apontada como um marco no processo de aumento dos GEE na atmosfera, provocando maior retenção de calor e, consequentemente, degradação do meio ambiente e alterações climáticas mais abruptas no planeta. Maior uso de petróleo, gasolina e carvão, desflorestação, queimadas e cultivo agrícola intensivo são exemplos de atividades que têm contribuído para a aceleração deste fenómeno, principalmente para o aumento da concentração de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso na atmosfera.

A partir dos anos 1960-1970 começaram a registar-se maiores preocupações com o ambiente e os níveis crescentes de poluição no planeta, tendo a comunidade científica começado a dedicar-se mais a esta temática. Em particular, o conceito de sustentabilidade dos recursos naturais começou a ser difundido na sociedade (Pott e Estrela 2017). Várias conferências internacionais foram realizadas nas décadas seguintes promovendo a preservação ambiental e a mitigação das alterações do clima, apesar da industrialização e do crescimento económico dos países terem dificultado tais objetivos. Um dos eventos de maior destaque é conhecido como a conferência “Rio-92”, tendo sido promovida pelas Nações Unidas em 1992 na cidade do Rio de Janeiro (Brasil) e dedicada ao Meio Ambiente e Desenvolvimento. Foram publicados vários documentos e assinada a Agenda 21, com o objetivo de definir estratégias e ações para um futuro sustentável. Para a preservação das florestas, com um papel preponderante na mitigação do aumento das emissões de GEE, não foi assinado um tratado, mas apenas

estabelecida uma Declaração de Princípios sobre Florestas. A conferência Rio+10, realizada na sequência da Rio-92 em Joanesburgo, na África do Sul, em 2002, mostrou quão longe estava a viabilidade de alcançar os objetivos traçados 10 anos antes.

A crescente preocupação mundial com as emissões dos GEE levou à celebração do tratado internacional conhecido como Protocolo de Quioto, no Japão, em 1997, com o objetivo de as reduzir, principalmente no que respeita ao dióxido de carbono, o mais emitido e principal responsável pelo aquecimento global. O acordo só entrou em vigor em 2005, considerando diferentes períodos de compromisso e obrigações entre países em função do seu nível de desenvolvimento e contribuição para a emissão de GEE. Procurando não comprometer a economia dos países signatários, foram estabelecidos mecanismos de flexibilização para que estes pudessem negociar parte da redução desses gases. Deste modo, foi criado o mercado regulado de carbono, que consiste na comercialização de créditos de redução da emissão dos GEE, conhecidos como créditos de carbono. Foram gerados vários mecanismos que permitem a venda de créditos a países com excedentes de emissão, bem como promovidos projetos de redução de emissões em países que não aqueles para os quais os créditos irão contribuir para fazer face ao cumprimento das metas estabelecidas no Protocolo de Quioto. Existem ainda mercados voluntários, paralelos, que não contribuem para as metas de redução das emissões dos países regulados pelo Protocolo Quioto, mas permitem reduzir as emissões de qualquer organização ou pessoa de forma voluntária, sendo regulados por entidades independentes. Silva (2012) diferencia estes mercados em natureza preventiva e curativa. Os primeiros reduzem as emissões de GEE, como por exemplo através de projetos de melhoria de eficiência energética, e os segundos sequestram carbono como compensação de uma emissão, como é o caso dos projetos florestais.

O crédito de carbono é um mecanismo comercial e representa 1 tonelada de CO₂, ou outro GEE convertido em equivalente de CO₂ com base no seu potencial de

aquecimento global, que deixou de ser emitido ou foi absorvido por um sumidouro (1 tCO₂e). Frequentemente os estudos reportam os valores de absorção em carbono e não CO₂. A conversão molecular é feita através da multiplicação do elemento carbono por 3,67 para obtenção da molécula CO₂. Neste âmbito, os termos pegada de carbono, *offset* de carbono e neutralidade carbónica são muito utilizados. A pegada de carbono, ou *carbon footprint*, corresponde ao total de emissões de GEE associadas a um indivíduo, atividade/evento, entidade ou produto. Constitui uma das componentes da avaliação do ciclo de vida dos produtos, ferramenta importante para a gestão ambiental (Ramachandra & Mahapatra, 2016). O *offset* de carbono refere-se à redução das emissões de CO₂, ou outros GEE, para compensar as emissões feitas noutro local, sendo também designado genericamente de compensação de carbono (Gossling, 2009). Já a *neutralidade carbónica* corresponde a um balanço de carbono neutro por parte de uma pessoa, atividade/evento ou entidade através da eliminação direta de emissões na atividade (designada de economia de baixo carbono) ou redução de emissões e/ou compensação pelo sumidouro de carbono noutro local, atingindo um equilíbrio entre as emissões e a absorção de carbono (Gossling, 2009).

O conceito de mercado permite estimular a mitigação das mudanças climáticas dando valor económico à redução de emissões através da comercialização dos créditos de carbono. Este mecanismo de compensação é útil para mitigar as emissões produzidas num local, criando um sumidouro de carbono noutro local quando a redução das emissões é dispendiosa, por exemplo através da alteração da eficiência energética ou dos combustíveis utilizados. Contudo, este instrumento torna o conceito de compensação de carbono suscetível a críticas, pois o verdadeiro desafio deverá ser sempre reduzir as emissões, diminuindo o impacte negativo direto das atividades.

Importância dos solos e das florestas como reservatórios de carbono

O carbono é um dos elementos mais abundantes no universo e existe na natureza sob a forma orgânica (nos seres vivos e mortos não decompostos) e inorgânica (rochas). O seu ciclo biogeoquímico no planeta consiste na transformação entre as formas orgânicas e inorgânicas e a circulação entre os oceanos, a atmosfera e a terra. O carbono pode estar armazenado em reservatórios (ou *pools*) mais estáveis, como as formações geológicas ou os oceanos, ou *pools* mais dinâmicos como o solo e a vegetação (plantas). Estes últimos são mais facilmente afetados pela atividade humana e por isso podem ter um papel na diminuição das emissões de CO₂ para a atmosfera. Friedlingstein et al (2020) estimaram para a década de 2010-2019 emissões fósseis médias anuais de $9,6 \pm 0,5$ Gt C/ano e por alteração de uso do solo de $1,6 \pm 0,7$ Gt C/ano, uma acumulação na atmosfera de $5,1 \pm 0,02$ Gt C/ano e sumidouros de $2,5 \pm 0,6$ Gt C/ano nos oceanos e de $3,4 \pm 0,9$ Gt C/ano nos sistemas terrestres. No sumidouro terrestre cerca de 2/3 do carbono encontra-se nos solos e 1/3 nas plantas, dos quais cerca de 60% correspondem a sumidouro em florestas.

No processo de fotossíntese, as plantas absorvem CO₂ e libertam oxigénio, transferindo carbono para a biomassa que produzem. Enquanto a planta cresce, funciona como sumidouro de carbono. Quando ocorre uma perturbação no ecossistema, como por exemplo a exploração florestal (corte e extração da madeira), a reconversão de uma área ou um incêndio florestal, há uma perda parcial ou total do carbono armazenado, podendo a planta passar a ser uma fonte de emissão de CO₂ para a atmosfera. No caso da exploração florestal, parte do carbono presente na madeira fica armazenado em produtos florestais por períodos mais ou menos longos, podendo, assim, retardar o regresso de CO₂ à atmosfera (Jandl et al 2006).

As florestas ocupam atualmente mais de um terço da superfície terrestre (aproximadamente 4.060 milhões de hectares, FAO 2020), e acumulam as maiores

quantidades de biomassa, e carbono, ao longo do seu crescimento (Jandl et al 2006), sendo por isso as que mais contribuem como sumidouro deste elemento. A desflorestação e a alteração do uso do solo são duas das principais causas da perda mundial de floresta, embora a sua taxa esteja a diminuir (FAO 2020). As florestas jovens sequestram mais carbono do que as florestas adultas ou maduras, pois crescem de forma acelerada. As florestas maduras crescem menos mas atuam como um reservatório de carbono, dada a biomassa acumulada ao longo dos anos (Sedjo 2001). A quantidade de carbono nas plantas varia com a espécie e com o tipo de tecido da própria planta (Tomas e Martim 2012), bem como com a taxa de crescimento das plantas. Esses autores, ao estudar as diferenças no conteúdo de carbono dos componentes das plantas entre biomas do mundo, concluíram por exemplo que a percentagem de carbono variou na madeira entre 41,9 a 51,6% (base seca) em espécies tropicais, de 45,7 a 60,7% em espécies subtropicais e mediterrâneas e de 43,4 a 55,6% em espécies boreais e temperadas, sugerindo um valor médio de 48,2%. Referem que a metodologia de determinação analítica, com base no peso seco de amostras, subestima o carbono volátil existente na madeira viva, que ronda entre 1,3 e 2,5%. Outros valores possíveis são por exemplo uma variação de carbono entre 47-59% ou 35-65% da matéria seca da planta (Scharlemann et al 2014, Karsenty et al 2003, respetivamente) ou o valor médio de 47% de acordo com o IPCC (2019). Em vários estudos, tem sido utilizando um valor médio de 50% para conversão de biomassa seca em quantidade de carbono nas plantas (Alves et al 2012).

O solo é o maior compartimento terrestre de armazenamento (*stock*) de carbono e representa um reservatório importante de médio a longo prazo deste elemento (Scharlemann et al 2014). A principal fonte é a matéria orgânica do solo proveniente da produção de biomassa pelas plantas. Assim, através da queda natural de folhada durante o seu ciclo de crescimento e dos sobrantes remanescentes aquando do corte, ou quando a planta morre, inicia-se o processo de decomposição e o carbono retido ou é libertado para a atmosfera ou para o

solo. Na superfície do solo, a matéria vegetal transforma-se em camada orgânica (*litter*, folhada ou manta orgânica) e subsequentemente em matéria orgânica do solo através da atividade metabólica dos organismos. Sem esta fonte de matéria orgânica, a quantidade de carbono num solo diminui ao longo do tempo pois a atividade microbiana é contínua, embora seja mais lenta à medida que a taxa de decomposição e a recalcitrância dos materiais aumentam (Ramesh et al 2019).

Quanto maior a taxa de crescimento das plantas, maiores são as entradas de material orgânico no ecossistema, o que não significa necessariamente maiores teores de matéria orgânica no solo. Os processos de decomposição e taxas de mineralização da matéria orgânica são fortemente influenciados pelo clima, qualidade da matéria orgânica e características do solo, como pH, humidade, textura, compacidade e nível nutricional (Blanco 2018). Os três principais processos responsáveis pela retenção do carbono no solo são a humificação, agregação e sedimentação (Machado 2005). No entanto, durante a decomposição da matéria orgânica, há perdas decorrentes da respiração dos microrganismos e pela necessidade de carbono para produção de energia para viver, para além de perdas potenciais por erosão, lixiviação e volatilização.

Num solo em equilíbrio, com vegetação mantida por longo período, tende a haver acumulação de carbono, pois a queda de folhada deposita no solo novos materiais orgânicos para serem decompostos à medida que os mais antigos vão sofrendo alterações a um ritmo de humificação mais lento. Quando a vegetação é removida (por exemplo na desflorestação ou na exploração florestal), há um aumento imediato de sobrantes do corte que normalmente eleva a quantidade de carbono na superfície do solo, mas a temperatura do solo também sobe, acelerando a atividade microbiana e assim a velocidade de decomposição da matéria orgânica e a depleção do carbono no solo (Jandl 2006). Neste sentido, a gestão dos ecossistemas terrestres assume um papel preponderante no armazenamento de carbono pela vegetação e pelo solo.

A florestação é de modo geral uma oportunidade para aumentar os *stocks* de carbono, mas a forma como as florestas são geridas pode impactar na capacidade dos ecossistemas florestais atuarem como sumidouro. Jandl et al (2006) e Lal (2015) apontam como principais fatores de gestão influenciadores do armazenamento de carbono a espécie, a rotação, o espaçamento, a rega e o tipo de corte. É fundamental o período em que o solo permanece sem perturbações e, quando estas ocorrem, deve-se procurar minimizar o seu impacte na decomposição da matéria orgânica (Lal 2005). Este último autor destaca ainda a importância da preparação do solo para a maximização do crescimento das plantações, embora com um prejuízo imediato no carbono retido no ecossistema. Mayer (2020) destaca que o crescimento das plantas ao longo da rotação pode compensar o carbono perdido na preparação do terreno, mediante as técnicas utilizadas e as taxas de crescimento dos povoamentos. O fogo e as pragas usualmente têm impactes devastadores no *stock* de carbono (Jandl et al 2006).

Os ecossistemas florestais não atuam de forma homogénea como sumidouro de carbono. As florestas que potencialmente mais contribuem são as de regiões tropicais devido às maiores taxas de crescimento, com maior acumulação de biomassa e assim de armazenamento de carbono (Scharlemann 2014). Os solos destas regiões, mais meteorizados, representam *pools* de carbono mais baixos, por haver rápida oxidação dos materiais orgânicos, relativamente aos solos localizados em regiões frias do planeta, em que ocorre maior humificação. Lal (2005) refere que o rácio $C_{\text{solo}}:C_{\text{floresta}}$ aumenta com a latitude e, de acordo com Scharlemann et al (2014), é próximo de 1 nos trópicos e nas regiões temperadas e frias chega a ultrapassar 5. Assim, reabilitar florestas degradadas e preservar as florestas existentes são ações que contribuem para aumentar o sequestro de carbono e mitigar as alterações climáticas, mas não é o suficiente. Projetos de plantação florestal tornam-se interessantes do ponto de vista de sequestro de carbono, pois, além de permitirem uma acumulação de carbono durante o crescimento das plantas, possibilitam o enriquecimento dos solos em matéria

orgânica. Os produtos originários destas florestas plantadas contêm parte do carbono que é removido da floresta quando esta é explorada. Mesmo que o tempo de vida desses produtos seja limitado a algumas dezenas de anos, é ainda assim expressiva a contribuição como sumidouro de carbono (Sanquetta et al 2019), permitindo entretanto o desenvolvimento de outras tecnologias para mitigar as emissões de GEE (Tipper 2000).

Num contexto nacional, o potencial de sumidouro das florestas relativamente a outros usos está patente no relatório de inventário nacional, publicado pela Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2020), onde são indicados valores médios de armazenamento de carbono para diferentes usos de cobertura do solo. As florestas de produção de pinheiro bravo, de sobreiros e eucaliptais destacam-se com capacidades médias de acumulação de carbono na biomassa das plantas (parte aérea e radicular) de cerca de 30 t C/ha, 23 t C/ha e 22 t C/ha, respetivamente, enquanto as de outras folhosas, na sua maioria florestas de conservação, são apontadas com um armazenamento médio de 44 t C/ha. A acumulação de carbono indicada em outras culturas é substancialmente menor, por exemplo culturas anuais regadas de 0,6 t C/ha, pastagens de 1,4 t C/ha e na vinha de 6,2 t C/ha.

Uma perspetiva sobre o papel das plantações de eucalipto como sumidouro de carbono em Portugal

Dada a sua adaptabilidade, boas taxas de crescimento em diversas condições de solo e clima, qualidade da madeira para pasta e papel e capacidade de regeneração de toças, *Eucalyptus globulus* é a principal espécie de eucalipto plantada em Portugal. Após a plantação, os povoamentos são geridos normalmente até aos 10-12 anos (primeira rotação), sendo efetuado o primeiro corte e as varas rebentadas nas toças são conduzidas por pelo menos mais uma rotação (condução em talhadia) com a mesma duração. Tal significa que uma única instalação do povoamento pode perdurar no terreno pelo menos 24 anos.

Este intervalo alargado entre as práticas de preparação do terreno ajuda a minimizar impactes ambientais relacionados com a perturbação do solo.

A avaliação do sequestro de carbono na floresta pode ser efetuada com vários métodos, sendo os mais comuns os baseados em inventários florestais, modelos de crescimento ou medição dos fluxos de carbono. No primeiro caso, é feita uma medição das plantas e por relações alométricas calculado o carbono associado, ou, em estudos mais específicos, quantificada diretamente a biomassa e a respetiva acumulação de carbono por componente da parte aérea e/ou radicular. Este cálculo pode ser realizado entre momentos diferentes ou de forma acumulada para o povoamento pela diferença entre o crescimento e as perdas de biomassa. A utilização de modelos, por sua vez, permite quantificar o carbono de forma estática ou ao longo do tempo mediante os dados que o compõem, podendo incluir ou não fatores de influência, como as práticas de gestão, impacto do fogo, entre outras. Já a medição direta do sequestro do carbono do ecossistema recorre ao método da covariância de fluxo turbulento (*eddy-covariance method*) e corresponde à medição direta do carbono atmosférico. Envolve a monitorização de variáveis meteorológicas, bem como vários aspectos relacionados com a planta, como a produtividade primária bruta e a respiração por exemplo. Esta metodologia é mais complexa, embora mais abrangente do ecossistema como um todo, permitindo obter maior detalhe nos resultados e análise do sequestro do carbono. Tal é possível verificar no estudo de Rodrigues et al (2011), realizado em eucalipto em Portugal, na região sul do país.

As florestas de eucalipto são particularmente eficientes na fotossíntese na medida em que os povoamentos acumulam rapidamente biomassa, que é armazenada nas diferentes componentes da parte aérea (folhas, ramos, madeira e casca) e nas raízes da árvore. A produção de biomassa de povoamentos de eucalipto varia com a idade de corte e sua taxa de crescimento. De acordo com a estimativa do programa de recomendação de adubação *Nutriglobulus*, desenvolvido pelo RAIZ, em 2002, a distribuição de biomassa entre as diferentes componentes da árvore é

em média, em povoamentos adultos (12 anos), de 59% de madeira, 8% de casca, 10% de ramos, 7% de folhas e 16% de raízes (Figura 1). Em povoamentos menos produtivos, a proporção de ramos e folhas aumenta podendo chegar a 15-20%, enquanto a proporção de madeira pode diminuir até os 45% da biomassa total (Figura 1). Este modelo assenta em dados de acumulação de biomassa e de nutrientes provenientes de povoamentos de eucalipto comerciais e de ensaios. O carbono é retido de forma diretamente proporcional ao armazenamento de biomassa (Figura 1). Em média, corresponde a 50% da biomassa produzida (Alves et al 2012). Assim, considerando o mesmo modelo, o armazenamento total de carbono num povoamento adulto de *E. globulus*, assumindo o corte aos 12 anos e uma densidade de 1200 plantas/ha, varia entre 40 a 160 t C/ha (parte aérea e raízes), para produtividade variável entre 6 e 32 m³ com casca/ha/ano. Se se considerar uma produtividade média de 10 m³/ha/ano (madeira com casca), estima-se que o armazenamento de carbono em povoamentos adultos de eucalipto geridos é de cerca de 65 t C/ha.

O acréscimo anual de carbono nas plantas de eucalipto é mais acelerado nos primeiros anos de crescimento, coincidente com a maior alocação de biomassa na copa das plantas, estabilizando aos 5-6 anos até à fase adulta (Figura 1), quando a alocação de biomassa passa a ser maior no tronco. Para povoamentos de eucalipto com baixa produtividade, por exemplo, de 6 m³ com casca/ha/ano o sequestro de carbono anual estimado com base no modelo *Nutriglobulus* varia de 0,04 t C/ha/ano no primeiro ano de crescimento até 4,8 t C/ha/ano aos 12 anos (Figura 1), sendo a média anual de 3,4 t C/ha/ano (Figura 2). Já em povoamentos de elevada produtividade, por exemplo de 32 m³ com casca/ha/ano, o sequestro anual varia de 1,4 t C/ha/ano no primeiro ano a 16,9 t C/ha/ano, aos 5 anos (pico anual de acumulação de carbono, Figura 1), com uma média anual de 13,3 t C/ha/ano, Figura 2 (RAIZ, 2002).

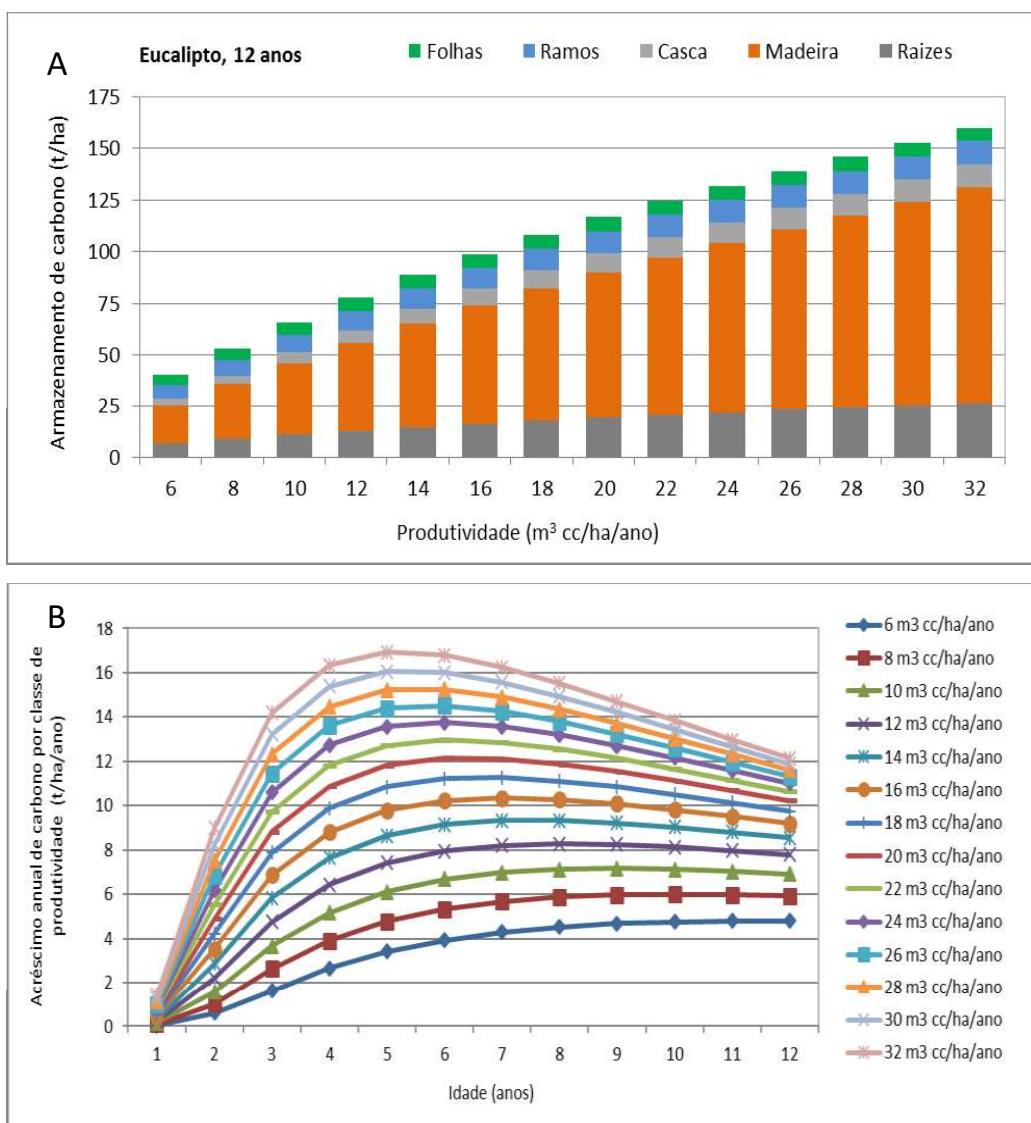


Figura 1 - Armazenamento estimado de carbono, aos 12 anos (A), nos diferentes componentes da parte área e de raízes em função da produtividade florestal (expressa em metros cúbicos com casca por hectare e ano), e curvas de acréscimo anual de carbono (B) (parte aérea + sistema radicular) por classe de produtividade florestal para diferentes idades dos povoamentos de *E. globulus* (*Nutriglobulus*, RAIZ 2002).

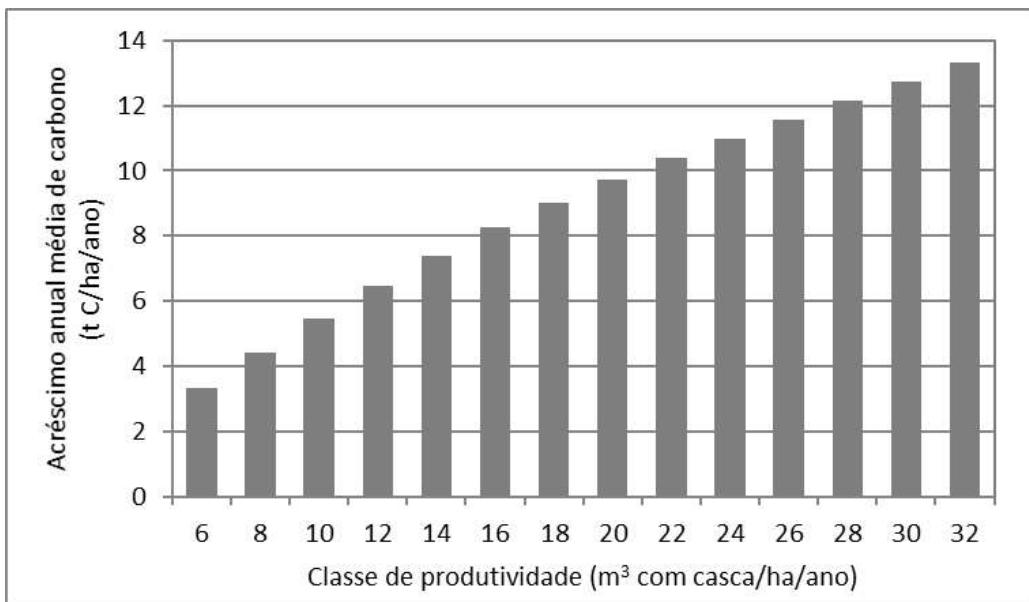


Figura 2 - Acréscimo média anual estimada de carbono por classe de produtividade de *E. globulus* (período 0-12 anos de idade) (*Nutriglobulus*, RAIZ 2002).

Considerando uma produtividade de 10 m³ com casca/ha/ano (madeira com casca) e uma rotação de 12 anos, a acumulação anual de carbono varia de 0,16 t C/ha/ano em povoamentos com 1 ano a 7,2 t C/ha/ano aos 9 anos, com uma média de 5,5 t C/ha/ano. Esta magnitude de valores é similar a outros estudos de eucalipto realizados em Portugal e Espanha, como é o caso de Madeira et al (2002a), com registo de 9 a 16 t C/ha/ano (até seis anos), de Correia et al (2005), com uma média anual obtida de 9,6 t C/ha/ano (até 9 anos), de Pereira et al (2007), com uma magnitude variável entre 4 a 9 t C/ha/ano (até 12 anos), e de Pérez-Cruzado et al (2012), com uma taxa anual de 12,4 t C/ha/ano (até 10 anos).

Embora os solos de ecossistemas florestais em Portugal sejam muito variáveis em termos de desenvolvimento pedogenético e de características físicas e químicas, pode dizer-se que a maioria dos solos são pouco desenvolvidos e delgados, apresentam pedregosidade elevada e fertilidade natural baixa a moderada. Os teores de matéria orgânica variam desde valores muito baixos, em solos de

origem sedimentar, típicos das zonas Litoral e Vale do Tejo, até teores elevados em solos profundos de origem granítica, situados no Norte do país. Os solos derivados de xisto, que representam grande parte dos solos utilizados para plantações de eucalipto, são usualmente delgados e possuem teores de matéria orgânica medianos. Com base num conjunto de 1788 amostras do RAIZ (recolhidas no período 2000-2018) é possível constatar a variabilidade nos teores de carbono orgânico dos solos sob povoamentos de eucalipto (Figura 3). De modo geral, os teores de carbono orgânico são crescentes de sul para norte e do interior para o litoral, variando entre 2 a 94 g C/kg, na camada de 0-40 cm. Verifica-se assim uma boa relação entre os níveis de carbono orgânico e o clima. Desta compilação de dados, o valor médio de carbono orgânico no solo sob povoamentos de eucalipto é em média de 25 g C/kg, variando em média entre as grandes regiões territoriais (NUTS II) de 7 g C/kg para Lisboa, 14 g C/kg no Alentejo, 22 g C/kg no Algarve, 29 g C/kg no Centro, e 40 g C/kg no Norte. Com base nesta amostragem, o armazenamento de carbono nos solos de ecossistemas florestais com eucalipto representa, em média, 62,8 t C/ha, até 40 cm de profundidade, variando entre 12 t C/ha a 139 t C/ha.

À medida que os eucaliptais se desenvolvem, a formação de uma camada orgânica à superfície do solo intensifica-se, fruto de ciclagem geoquímica correspondente à transferência de nutrientes entre a planta e o solo, principalmente a partir dos 4-6 anos de idade, quando as plantas têm a copa bem formada e começam a investir mais no desenvolvimento do tronco. Para um conjunto de 88 amostras da camada orgânica de povoamentos adultos de *E. globulus* o armazenamento médio de carbono foi de 8,4 t C/ha (Figura 4), sendo 2 t C/ha o menor valor verificado e 18 t C/ha o maior (RAIZ, dados não publicados). De um modo geral, a deposição de material vegetal no solo foi superior em condições climáticas mais favoráveis ao crescimento do eucalipto. Em média foi de 7,0 t C/ha para a região do Alentejo, 8,1 t C/ha no Centro, 9,5 t

C/ha na região de Lisboa e de 11,0 t C/ha na região Norte. Em termos de acumulação anual, a média foi de 0,8 t C/ha/ano, variando de 0,2 a 1,6 t C/ha/ano. Correia et al (2005) reportam um valor 1,7 t C/ha/ano, enquanto Madeira et al (2002a) registaram uma magnitude variável entre 0,9 a 1,8 t C/ha/ano e Perez-Cruzado et al (2012) de 0,85 t C/ha/ano.

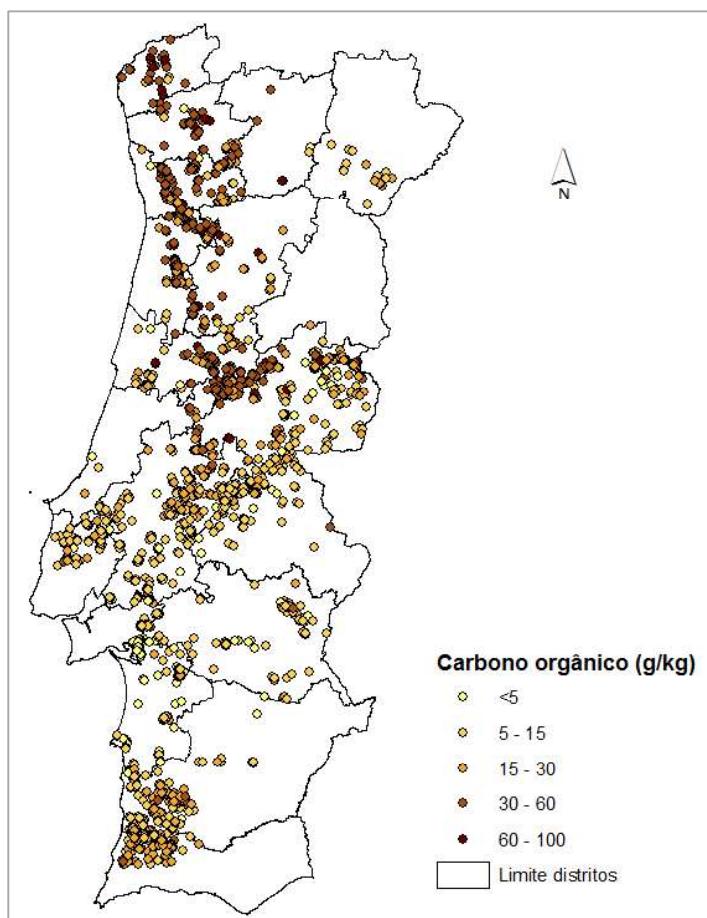


Figura 3 - Concentração de carbono orgânico no solo para um conjunto de 1788 amostras sob floresta de eucalipto, colhidas na profundidade 0-40 cm (ou inferior nos casos em que a profundidade efetiva é menor) Fonte: RAIZ, Base de Dados \approx 2000-2018 (dados não publicados).

Mais do que a deposição de material orgânico na superfície do solo, importa compreender como este se degrada e se transforma em matéria orgânica do solo, fração esta que mais contribui para a retenção de carbono num ecossistema

florestal. Num estudo sobre nutrição do eucalipto realizado pelo RAIZ (não publicado) em 16 povoamentos de diferentes regiões de Portugal, verificou-se um aumento médio de carbono no solo de $9,6 \text{ g kg}^{-1}$, num período de uma rotação, que corresponde a um acréscimo de 45% do valor médio inicial (diferença entre a amostragem após a instalação do povoamento e antes da exploração florestal). Verificou-se uma relação positiva entre o acréscimo de carbono e a taxa de crescimento do povoamento, influenciada pela melhoria climática para o eucalipto, como também observado por Ribeiro et al (2002).

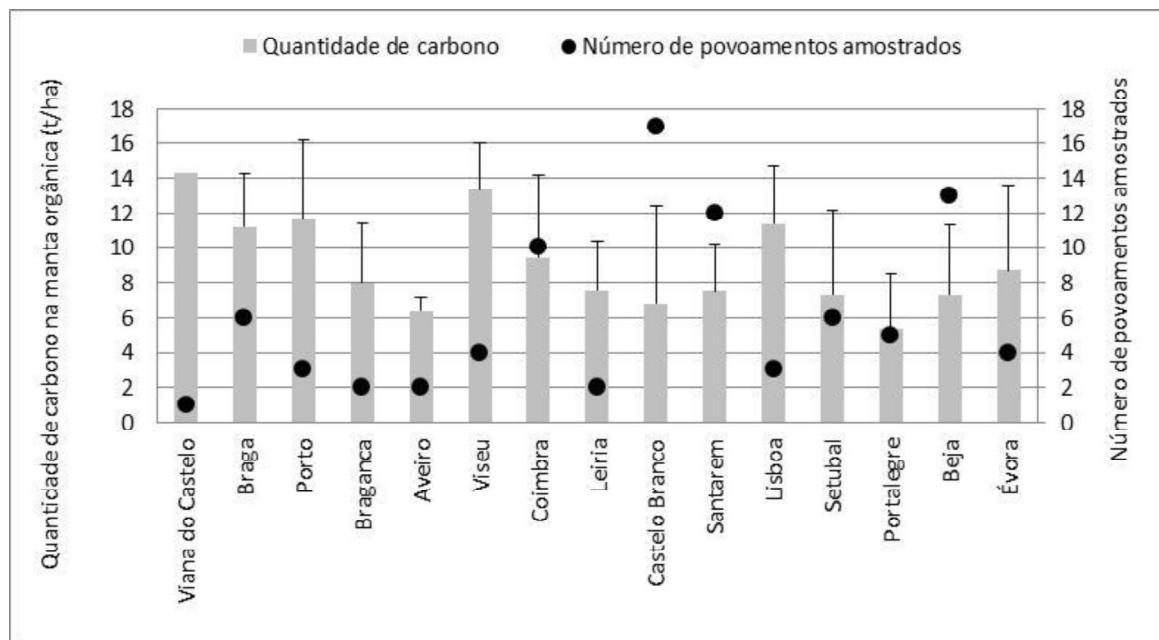


Figura 4 - Armazenamento de carbono na camada orgânica de povoamentos adultos de *E. globulus* em diferentes regiões do país (valor médio por distrito) e número de povoamentos amostrados. Linha vertical referente ao desvio padrão. RAIZ, dados não publicados ($n=88$ amostras).

Esta retenção de carbono orgânico correspondeu em média a um acréscimo de 38 t C/ha no solo, variável de 8 a 122 t C/ha em função do ensaio (Figura 5), que equivale a uma taxa de acréscimo de 3 t C/ha/ano (variável entre 0,7 a 10 t C/ha/ano). Madeira et al (2002a) registaram uma taxa variável de 0,4 a 2 t

C/ha/ano (aos 6 anos) e Correia (2005) de 0,3 t C/ha/ano (aos 9 anos). No estudo do RAIZ verificou-se uma taxa inferior a 3 t C/ha/ano em cerca de 70% dos 16 povoamentos avaliados e menor que 1,5 t C/ha/ano nos restantes. É provável que este acréscimo de carbono no solo seja um contributo conjunto da decomposição dos sobrantes de corte da rotação anterior e da folhada formada durante a rotação de 12 anos. Considerando que uma plantação de eucalipto tem em média um ciclo de crescimento de 36 anos (três rotações de 12 anos), poder-se-ia esperar um acréscimo de carbono no solo três vezes superior nesse período. É preciso ter em conta, também, que o modelo silvícola adotado durante as rotações poderá influenciar o balanço emissão-armazenamento.

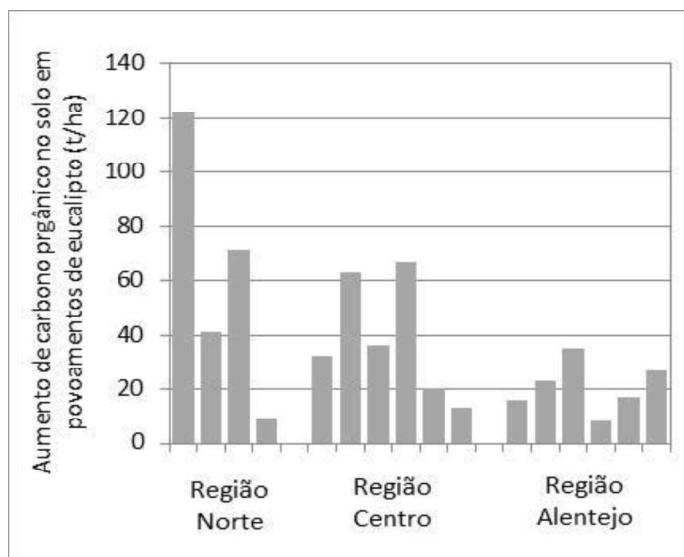


Figura 5 - Acréscimo de carbono orgânico no solo (na profundidade 0-40 cm) no final da rotação de 16 povoamentos de *E. globulus*, em primeira rotação e talhadia, distribuídos nas NUTS II Norte, Centro e Alentejo. O acréscimo de carbono tem um horizonte temporal de pelo menos 8 anos (intervalo mínimo entre amostragens de solo nos povoamentos de eucalipto). RAIZ, dados não publicados.

Contudo, não se conhece a magnitude das perdas de carbono do solo causadas pela preparação do terreno prévia à instalação desses povoamentos nem as decorrentes da sua exploração. Quanto mais intensivas as práticas de preparação

do terreno e a fragmentação das camadas orgânicas, maior a aceleração da atividade microbiana e, assim, a depleção de carbono no ecossistema. Madeira et al (2002b) constataram um impacte sobretudo nos 10 cm superficiais, sendo que seis anos não foram suficientes para recuperar os teores iniciais de carbono no solo. Na profundidade de 0-40 cm, as perdas de carbono variaram entre 16 e 41% em função da intensidade de mobilização do solo.

Há poucos estudos em Portugal sobre o contributo dos sobrantes de corte de povoamentos de eucalipto no aumento de carbono no solo. Azevedo (2000) verificou um acréscimo entre 10 a 30% nos teores de carbono total do solo num estudo na região de Óbidos (até 5 anos de idade do povoamento), destacando que a decomposição e libertação de nutrientes das folhas é mais rápida (50% em 2 anos) do que a dos ramos e cascas (50% entre 5 a 17 anos).

Desafios de investigação

O benefício da retenção de carbono de longo prazo nas plantações de eucalipto depende essencialmente da sua capacidade em enriquecer o solo pela queda de folhada durante o seu crescimento e manter biomassa remanescente nos ecossistemas florestais ao longo dos sucessivos ciclos de corte. As principais lacunas de conhecimento neste contexto estão relacionadas com a dinâmica de carbono no solo, que depende diretamente da gestão silvícola e das condições de solo e clima. As operações florestais mais frequentemente utilizadas e que podem provocar depleção de carbono são a gradagem, a ripagem, a remoção dos cepos e o uso de fogo controlado. É assim importante aprofundar os estudos que quantifiquem o seu impacte no ecossistema florestal em função da intensidade de atuação no terreno.

Outro aspecto relevante é conhecer a composição química das diferentes componentes da árvore de eucalipto que são depositadas no solo durante o ciclo de crescimento, bem como o seu período de decomposição. Este último depende essencialmente das características do solo que afetam a atividade microbiana e das condições de clima que influenciam a humidade e a temperatura do solo. Além disso, obter maior conhecimento sobre o ciclo geoquímico de nutrientes, formas químicas de carbono no solo e sua dinâmica de transformações é fundamental para melhorar a gestão de carbono nas florestas plantadas de eucalipto em Portugal.

No âmbito das metodologias de avaliação, é importante melhorar o conhecimento sobre as relações alométricas entre o volume de madeira produzido (variável mais facilmente mensurável) e a biomassa/carbono existente nos povoamentos em cada idade, principalmente em termos de raízes, componente para a qual há menos estudos disponíveis, e para o reservatório do solo. Ainda, melhorar a compreensão do impacte das alterações ambientais e práticas silvícolas de gestão florestal no balanço de carbono ao nível do ecossistema, recorrendo ao método do fluxo turbulento. Através deste método é possível obter uma discriminação temporal dos impactes destas alterações no sequestro de carbono do sistema e ainda a identificação dos reservatórios de carbono mais sensíveis.

Agradecimentos

Ana Cláudia Dias agradece à FCT/MCTES o seu contrato de investigação (CEECIND/02174/2017) e o apoio financeiro ao CESAM (UIDB/50017/2020+UIDP/50017/2020) através de fundos nacionais.

Referências bibliográficas

Alves A M, Pereira J S & Correia V 2012. Silvicultura: a gestão dos ecossistemas florestais. fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa.

- APA 2000. National inventory report. Portugal. Submitted under the art.5 and 7 of Regulation (EU) n. 525/2013 of the European Parliament and of the Council on the greenhouse gas monitoring mechanism (MMR). Amadora.
- Azevedo, A P A 2000. Estudo da dinâmica do azoto e do carbono em plantações florestais intensivas. Tese de doutoramento em Engenharia Agronómica. Universidade Técnica de Lisboa, Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, 296pp.
- Blanco J A 2018. Carbon and forest soils. Managing Forest Soils for Carbon Sequestration: Insights From Modeling Forests Around the Globe. Doi: 10.1016/B978-0-12-812128-3.00016-1.
- Correia A P, Pereira J A, Pita G, Carneiro M, Nogueira C, Silva J, Rodrigues A, Fabião A, Madeira A & Banza J 2005. Balanço de Carbono no Eucaliptal – Comparação entre o Fluxo Turbulento de CO₂ e a Estimativa do Modelo CO2FIX V3.1 <https://www.repository.utl.pt/bitstream/10400.5/576/1/REP-Fabiao%20A..pdf>.
- IPCC 2019. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Buendia C E, Tanabe K, Kranjc A, Baasansuren J, Fukuda M, Ngarize S, Osako A, Pyrozenko Y, Shermanau P & Federici S (eds). Published: IPCC, Switzerland. <https://www.ipcc-nccc.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- FAO 2020. Global Forest Resources Assessment 2020 Key findings. <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/2020>
- Friedlingstein P, O'Sullivan M, Jones M W, Andrew R M, Hauck J, Olsen A, Peters G P, Peters W, Pongratz J, Sitch S, Le Quéré C, Bakker D C E, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Alin S, Aragão L E O C, Arneth A, Arora V, Bates N R, Becker M, Benoit-Cattin A, Bitting H C, Bopp L, Bultan S, Chandra N, Chevallier F, Chini L, Evans W, Florentie L, Forster P, Gasser T, Gehlen M, Gilfillan D, Gkritzalis T, Gregor L, Fruber N, Harris I, Hartung K, Haverd V, Houghton R A, Liyina T, Jain A K, Joetzjer E, Jadono K, Kato E, Kitidis V, Korsbakken J I, Landschützer P, Lefèvre N, Lenton A, Lienert S, Liu Z, Lombardozzi D, Marland G, Metzl N, Munro D R, Nabel J E M S, Nakaoka S-I, Niwa Y, O'Brien K, Ono T, Palmer P I, Peirrot D, Poulter B, Resplandy L, Robertson E, Rödenbeck C, Swinger J, Séférian R, Skjelvan I, Smith A J P, Sutton A J, Tanhua T, Tans P P, Tian H, Tilbrook B, van der Werf G R, Vuichard N, Walkers A P, Wanninkhof R, Watson A J, Wllis D, Wiltshire A J, Yuan W, Yue X & Zaehle S 2020. Global Carbon Budget 2020, Earth Syst. Sci. Data, 12, 3269–3340, <https://doi.org/10.5194/essd-12-3269-2020>

- Jandl R, Rasmussen K, Tomé M. & Johnson D W 2006. The role of forest in carbon cycles, sequestration and storage. Issue 4. Forest Management and carbon sequestration. Newsletter N° 4. Natural Resources Canada. IUFRO.
- Lal 2005. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management* 220: 242-258.
- Lal R, Negassa W & Lorenz K 2015. Carbon sequestration in soil. *Environmental Sustainability* 15: 79-86.
- Machado P L A 2005. Carbono do solo e a mitigação climática global. *Química Nova*. Volume 28, n.º 2, 329-334.
- Madeira M V, Fabião A, Pereira J S, Araujo M C & Ribeiro C 2002a. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* 171: 75-85.
- Madeira M, Azevedo A, Soares P, Tomé M & Araujo M C 2002b. Efeitos da lavoura profunda e da gradagem nas características do solo e na produtividade de plantações de *Eucalyptus globulus*. *Revista de Ciências Agrárias*.
- Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, Augusto L, Cécillon L, Ferreira G W D, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J-P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf J A, Vanguelova E I, Vesterdal L 2020. Tamm Review: Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis, *Forest Ecology and Management*, Volume 466, 118127, ISSN 0378-1127, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.
- Pereira J S, Mateus J A, Aires L M, Pita G, Pio C, David J S, andrade V, Banzai J, David T S, Pac T A & Rodrigues A 2007. Net ecosystem carbon Exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems - the effect of drought. *Biogeosciences*, 4, 791-802.
- Pérez-Cruzado, C, Mohren, G M J, Merino, A 2012. Carbon balance for different management practices for fast growing tree species planted on former pastureland in southern Europe: a case study using the CO₂Fix model. *Eur J Forest Res* 131, 1695-1716. <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0609-6>
- Pott C M & Estrela C C 2017. Histórico ambiental: desastres ambientais e o despertar de um novo pensamento. *Estudos Avançados* v.31 n.89 2017. 10.1590/s0103-40142017.31890021
- Karsenty A, Blanco C & Dufoir T 2003. Instruments related to the United Nations framework convention on climate change and their potential for sustainable forest management in Africa. CIRAD-Forêt, Paris, France. *Forest and climate change, Food and agriculture organization of the United Nations*. <http://www.fao.org/3/AC836E/AC836E03.htm>

- Ramachandra T V & Mahapatra D M 2016. The Carbon Footprint Handbook. Section I Methodological aspects of carbon footprint (3-44). Chapter 1: The science of carbon footprint assessment. Edited by Subramanian Senthilkannan Muthu, CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.
- Ramesh T, Bolan N S, Kirkham M B, Wijesekara H, Kanchikerimath M, Rao C S, Sandeep S, Rinklebe J, Ok Y S, Choudhury B U, Wang H, Tang C, Wang X, Song Z, Freeman II O W 2019. Chapter One - Soil organic carbon dynamics: Impact of land use changes and management practices: A review. Editor(s): Donald L. Sparks, Advances in Agronomy, Academic Press, Volume 156, Pages 1-107, ISSN 0065-2113, ISBN 9780128175989, <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.02.001>.
- RAIZ 2002. Programa de recomendação de adubação *Nutriglobus*. The Navigator company.
- Ribeiro C, Madeira M & Araujo, M 2002. Decomposition and nutrient release from leaf litter of *Eucalyptus globulus* grown under different water and nutrient regimes. Forest Ecology and Management. 171. 31-41. 10.1016/S0378-1127(02)00459-0.
- Rodrigues A, Pita G, Mateus J, Kurz-Besson C, Casquilho M, Cerasoli S, Gomes A, Pereira A 2011. Eight years of continuous carbon fluxes measurements in a Portuguese eucalypt stand under two main events: Drought and felling. Agricultural and Forest Meteorology 151, 493-507.
- Sanquetta C R, Tomé M, Dias A C, Maas G C B, Sanquetta F T I & Corte P D 2019. Carbon storage and CO₂ dynamics from wood products harvested in Brazil during 1900–2016, Carbon Management, 10:4, 417-429, DOI: 10.1080/17583004.2019.1630242
- Sedjo R 2001. The Role of Forest Plantations in the World's Future Timber Supply. The Forestry Chronicle. 77. 221-225. 10.5558/tfc77221-2.
- Scharlemann J T, Edmund JV T, Roland H & Kapos V 2014. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. Carbon Management. Doi: 5. 81-91. 10.4155/cmt.13.77.
- Silva C F A 2012. O mercado voluntário de carbono. Mestrado Economia. Universidade Católica Portuguesa. Faculdade de Economia e Gestão. Porto.
- Tipper R 2000. Forestry and the Clean Development Mechanism, *Edinburgh Centre for Carbon Management*, 12thMay 2000. <http://www.fao.org/3/a-ac836e.pdf>