

CAPÍTULO I

As Plantações de Eucalipto e o Solo em Portugal

As Plantações de Eucalipto e o Solo em Portugal

Sérgio Fabres^{1*}, Ana Quintela¹, Daniela Ferreira¹, Cláudio Teixeira¹, António Aires², João Coutinho³, Manuel Madeira⁴

¹RAIZ – Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Quinta de S. Francisco, 3800-783 AVEIRO

sergio.fabres@thenavigatorcompany.com

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

³UTAD – Centro de Química, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Quinta de Prados, 5000-801 VILA REAL

⁴CEF – Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda, 1349-017 LISBOA

Resumo. O solo é um recurso natural essencial para a produção vegetal. Tem também um papel importante em funções ecológicas e serviços dos ecossistemas, nomeadamente na regulação hídrica (infiltração, escoamento superficial, distribuição e qualidade da água da chuva), no armazenamento de carbono e na biodiversidade. As áreas florestais representam cerca de 35% do território de Portugal continental e ocupam diferentes tipos de solo na paisagem, constituindo frequentemente mosaicos com explorações agrícolas, pastagens e galerias ribeirinhas entre outros tipos de ocupação e uso do solo. A produtividade florestal, essencial para a sustentabilidade económica destes sistemas, depende da qualidade do local que resulta da interação do clima com o solo e com outros elementos da paisagem, e das práticas de gestão aplicadas. Em Portugal, os solos apresentam elevada variabilidade morfológica, física e química impondo desafios técnicos relevantes para a sua utilização. Particularmente para as plantações de eucalipto, a classificação do solo e a sua cartografia são requisitos importantes para atividades de planeamento e implementação de boas práticas silvícolas. A diversidade e especificidade das condições ecológicas das regiões mediterrâneas requerem atenção especial nas

práticas de preparação do terreno, mobilização do solo, adubação, controlo da vegetação espontânea e exploração florestal no sentido de conciliar a produção florestal com a manutenção ou melhoria da qualidade do solo e restantes funções ecológicas dos ecossistemas. Neste âmbito, existem ainda lacunas de conhecimento científico que poderão contribuir para os modelos de gestão florestal em Portugal, em particular no domínio da biologia do solo e da dinâmica da matéria orgânica, do balanço geoquímico de nutrientes e sua reserva mineral de longo prazo.

Palavras-chave: Solos, *Eucalyptus globulus*, plantações de eucalipto, silvicultura

Eucalypt plantations and soil resources

Abstract. Soils are a non-renewable natural resource, essential for plant growth and production including food, fibers, among other forest products and bioenergy. It also plays an important role in ecological functions and ecosystem services, such as water regulation (infiltration, runoff, distribution and quality of rainwater), carbon storage and biodiversity support. The forest areas represent about 35% of the territory of mainland Portugal and are developed on different types of soil, often constituting mosaics with agricultural holdings, pastures and riparian zones, among other types of occupation and land use. In Portugal, the soils present high morphological and fertility variability, which set restrictions on their use and can be challenging for forest managers. Particularly for eucalypt plantations, the classification of the soil and its cartography are requirements for planning activities. Forest productivity, essential for the economic sustainability of these systems, depends on the quality of the site resulting from the interaction of the climate with the soil and with other elements of the landscape and silviculture practices. The diversity and specificity of the ecological conditions of the Mediterranean regions require special attention in the practices of tillage, stands maintenance management and harvesting procedures in order to boost forest production with the remaining ecological functions of the ecosystems. In this sense, there are still some knowledge gaps that may improve forest management models in Portugal, particularly in the field of soil biology and soil organic matter dynamics, the geochemical balance of nutrients and soil long-term mineral reserve.

Key words: Solos, *Eucalyptus globulus*, eucalypt plantations, silviculture

Plantations d'eucalyptus et les sols

Résumé. Le sol est un compartiment fondamental des écosystèmes terrestres, non seulement pour le support qu'il apporte aux plantes pour la croissance et la production des plantes, mais aussi pour les différentes caractéristiques écologiques qui leur sont associées, à savoir dans la régulation de l'eau (infiltration, ruissellement, distribution et qualité des eaux pluviales), le stockage du carbone et la biodiversité des sols. Les zones forestières représentent environ 35% du territoire du Portugal continental et occupent différents types de sols dans le paysage, constituant souvent des mosaïques avec des exploitations agricoles, des pâturages et des galeries riveraines, entre autres types d'occupation et d'utilisation des terres. Au Portugal, les sols présentent une forte variabilité morphologique et de fertilité, conditionnant leur utilisation pour la plantation et posant des défis aux gestionnaires forestiers. Particulièrement pour les plantations d'eucalyptus, la classification du sol et sa cartographie sont des exigences pour les activités de planification. La productivité forestière, essentielle à la durabilité économique de ces systèmes, dépend de la qualité du site résultant de l'interaction du climat avec le sol et avec d'autres éléments du paysage, à savoir le relief et les pratiques de gestion appliquées. La diversité et la spécificité des conditions écologiques des régions méditerranéennes nécessitent une attention particulière dans les pratiques de préparation des sols, de mobilisation des sols, d'entretien sylvicole et d'exploration forestière afin de concilier la production forestière avec les autres fonctions écologiques de l'écosystème. Dans ce contexte, il existe encore des lacunes dans les connaissances scientifiques qui peuvent contribuer aux modèles de gestion forestière au Portugal, en particulier dans le domaine de la biologie des sols et de la dynamique de la matière organique, de l'équilibre géochimique des nutriments et de leur réserve minérale à long terme.

Mots-clés: Sols, *Eucalyptus globulus*, plantations d'eucalyptus, sylviculture

Solo – o suporte dos ecossistemas florestais

O solo é um compartimento fundamental dos ecossistemas terrestres e o principal suporte utilizado pelas plantas para o seu crescimento, desenvolvimento e disseminação, proporcionando-lhes água, arejamento radicular e nutrientes. Sustenta, ainda, várias funcionalidades ecológicas, como a regulação da distribuição, escoamento, infiltração e qualidade da água da chuva. Do ponto de vista biogeoquímico, o solo é considerado um sistema aberto, ocorrendo fluxos de matéria e de energia com a atmosfera, trocas estas que variam temporal e espacialmente (SPOSITO, 2008). São estes fluxos de matéria e de energia que permitem a formação de diferentes tipos de solo em função dos fatores e processos de formação predominantes em cada situação ecológica (GONÇALVES e STAPE, 2002). Por conseguinte, para avaliar a aptidão do solo para a produção florestal, deverão ser consideradas diferentes características, nomeadamente a profundidade (ou a espessura efetiva), a constituição física (textura, compacidade e pedregosidade) e a composição química dos seus diferentes horizontes, no contexto ecológico em que se insere (GONÇALVES e STAPE, 2002).

Os solos das regiões de clima quente e húmido (como é o caso de muitas regiões tropicais) são em geral evoluídos e profundos, embora frequentemente com limitações de fertilidade (GONÇALVES e STAPE, 2002; SANTOS *et al.*, 2018); nas regiões de clima temperado (como, por exemplo, a mediterrânea), os solos tendem a ser menos desenvolvidos, com características que dependem da fisiografia e da natureza do material originário. Em Portugal continental, estão entre os solos mais comuns os *Leptosols*, *Regosols*, *Cambisols*, *Arenosols* e *Podzols* (IUSS Working Group WRB, 2015), desenvolvidos maioritariamente sobre formações xistosas, graníticas e sedimentares detríticas (FERREIRA, 2000) (Figura 1). Estes solos apresentam elevada variabilidade, sobretudo nas suas características morfológicas, destacando-se a profundidade e cor dos horizontes,

textura, estrutura, compacidade e pedregosidade. A sua fertilidade natural ou alterada por utilizações anteriores pode também ser muito variável. Assim, são frequentes as limitações que condicionam a utilização do solo para a plantação de espécies florestais e que levantam grandes desafios aos gestores florestais.



Figura 1 – Tipos de solos mais comuns que ocorrem em Portugal: a) *Leptosol*, b) *Regosol*, c) *Cambisol*, d) *Arenosol*, e) *Podzol* e f) *Umbrisol* (fonte: RAIZ). Nomes dos solos segundo sistema internacional de classificação de solos (IUSS Working Group WRB, 2015).

As limitações da cartografia de solos em Portugal

A classificação do solo e a sua cartografia são requisitos fundamentais para atividades de planeamento rural, ordenamento do território, produção de cartografias temáticas, e gestão e conservação dos recursos naturais, entre outras aplicações. Embora existam várias fontes de informação cartográfica no país, os diferentes sistemas de classificação e as diferentes metodologias e escalas das cartas de solos, publicadas por diferentes entidades públicas ou privadas, não permitem uma visão unificada nem permitem a comparação e integração cartográfica à escala europeia e global (Figura 2).

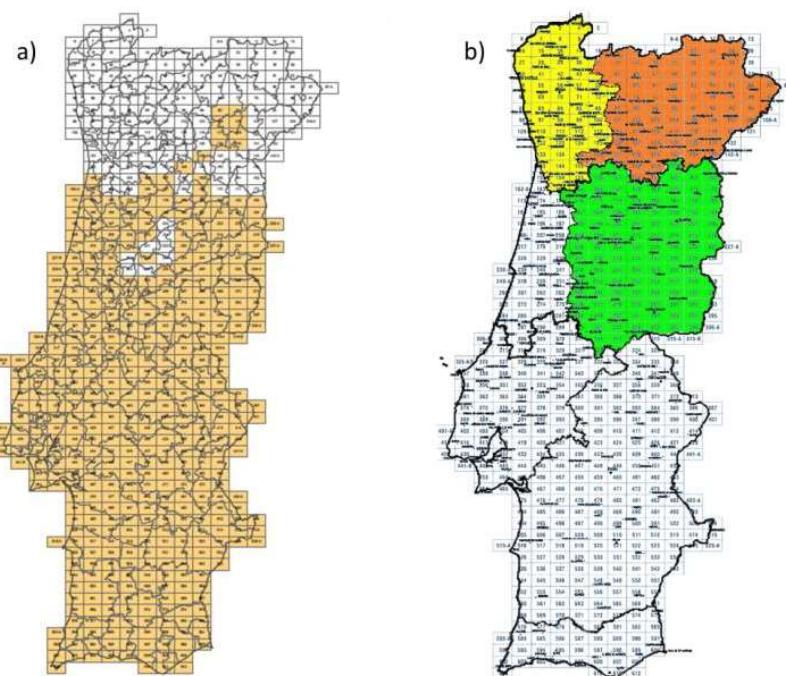


Figura 2 - Informação cartográfica existente para Portugal continental e respetivas escalas de cobertura: a) - Carta de Solos 1:25 000; b) Carta de solos 1:100 000, a amarelo - Entre-Douro e Minho, a laranja - Nordeste de Portugal e a verde - Zona Interior Centro (DGADR, Série SROA/CNROA/IEADR).

Portugal não dispõe, assim, de uma cobertura uniforme de informação cartográfica de solos a uma escala que se possa considerar adequada às

necessidades de planeamento ambiental e de ocupação e uso do solo. Neste sentido, a iniciativa já em curso pela DGADR de atualização e uniformização da informação cartográfica existente e a posterior elaboração de uma Carta Geral dos Solos de Portugal unificada, à escala de 1:500 000, é uma atividade decisiva para colmatar essa lacuna de informação.

A uma escala de planeamento mais fina e dependendo do objetivo do uso de solo, é usual a produção de cartas de solo mais específicas e detalhadas, tendo como base uma carta regional ou nacional de solo. Por exemplo, com o objetivo de apoiar a gestão florestal e a indicação customizada de práticas silvícolas à escala da propriedade, o RAIZ desenvolveu uma metodologia de classificação de solos e climática (*zonagem edafoclimática*) que permite estratificar uma propriedade rural em unidades menores designadas zonas homogéneas para avaliação da sua aptidão florestal. Estas zonas homogéneas, por sua vez, quando cruzadas com manuais de boas práticas silvícolas, permitem identificar as opções técnicas mais adequadas para cada caso. Essa metodologia tem vindo a ser aplicada e melhorada ao longo dos anos pelo RAIZ e *The Navigator Company* na gestão dos povoamentos de eucalipto.

A floresta de eucalipto e as propriedades físicas do solo

As florestas têm influência decisiva na contenção de possíveis processos erosivos e na regulação do regime hidrológico (MADEIRA *et al.*, 2007). As florestas representam menor risco de erosão e degradação física do solo face a outras tipologias de cobertura vegetal e uso do solo (CERDAN *et al.*, 2010; PANAGOS *et al.*, 2015). Os efeitos das florestas plantadas sobre a escorrência superficial da água dependem mais das condições de clima, dos índices pluviométricos (quantidade, distribuição e intensidade), da topografia do terreno e da existência de coberto vegetal do que da espécie florestal considerada (DAVIDSON, 1996; GRIGAL, 2000; NADAL-ROMERO *et al.*, 2015).

Embora as florestas naturais ou com ciclos de exploração mais longos protejam mais o solo contra processos de degradação, as florestas plantadas de ciclos mais curtos, se bem geridas, podem exercer um papel semelhante, desde que as práticas de gestão sejam compatíveis com cada condição de solo e de clima. Adicionalmente, a possibilidade de conduzir povoamentos de eucalipto em várias rotações em regime de talhadia, sem necessidade de grandes intervenções ao nível do solo, contribui para o reequilíbrio de processos ecológicos relevantes, uma vez que (i) reduz a exposição direta do solo a gotas de chuva, que provocam a sua desagregação (primeira etapa do processo de erosão) e aos raios solares que podem elevar a temperatura do solo com consequente aumento da evaporação, principalmente nos períodos mais quentes do ano, (ii) diminui também os riscos de erosão pela proteção física que é conferida ao solo pela biomassa florestal residual que permanece no terreno (*mulching*) e sistema radicular desenvolvido em ciclo anterior, (iii) contribui para o aumento dos níveis de matéria orgânica do solo e (iv) melhora a eficiência de controlo da vegetação espontânea, ao mesmo tempo que contribui para uma maior diversidade de espécies no sub-bosque. Considerações sobre diferentes espécies conduzidas em talhadia na Europa, nomeadamente para povoamentos de *E. globulus* em Portugal, são apresentadas por UNRAU *et al.* (2018). Também FERRAZ-FILHO *et al.* (2014) apresentaram uma revisão sobre esta prática em plantações de eucalipto no Brasil.

O solo estará mais sujeito a alterações nas fases de instalação do povoamento e exploração florestal em virtude da influência direta das diferentes intervenções operacionais no terreno, principalmente aquelas relacionadas com a movimentação de máquinas (MADEIRA e ARAÚJO, 2015; VENANZI *et al.*, 2019). As propriedades físicas do solo poderão ser as mais afetadas, nomeadamente a massa volúmica, a porosidade, a estrutura e a compactação. Nessas fases, há um maior risco de escoamento superficial da água da chuva e menor taxa de evapotranspiração (GRIGAL, 2000; MADEIRA e ARAÚJO, 2015). No entanto, a

magnitude desses impactes dependerá da topografia do terreno, das características morfológicas e físicas do solo e das práticas silvícolas ou de exploração florestal adotadas. É, por isso, fundamental um bom planeamento da calendarização e ajuste dessas práticas, tentando que sejam desfasadas da época mais pluviosa (MADEIRA e ARAÚJO, 2015). Alguns estudos referem a eficácia da adoção de práticas silvícolas mitigadoras desses efeitos, nomeadamente a manutenção no solo de sobrantes florestais provenientes do corte e o uso de práticas de cultivo mínimo na reflorestação (FERNÁNDEZ *et al.*, 2004).

Aspetos da fertilidade do solo e requisitos nutricionais do eucalipto

Num ecossistema florestal, a dinâmica de fornecimento de nutrientes para as plantas envolve processos de transferência interna e externa ao ecossistema, constituindo fatores primordiais para a produção vegetal. Os processos de transferência interna são representados pelos fluxos entre os vários componentes da biomassa (folhas, ramos, madeira, casca e raízes), a camada orgânica (resíduos orgânicos acumulados na superfície do solo), a matéria orgânica, a fração mineral e a solução do solo. Os processos de transferência externa são representados pela entrada de elementos químicos via precipitação atmosférica (deposição seca ou húmida), aplicação de adubos e alteração de minerais primários do solo, e pelas saídas via exploração florestal (remoção da biomassa), volatilização, perdas eólicas de elementos minerais (principalmente como consequência de queimadas e fogos) e perdas por erosão e lixiviação (RANGER e TURPAULT, 1999; AKSELSSON *et al.*, 2007; ALI *et al.*, 2017). A este propósito, DAMBRINE *et al.* (2000) quantificaram o contributo da precipitação e da alteração da reserva mineral numa bacia experimental florestada com *E. globulus* na Galiza revelando valores de entrada no ecossistema em potássio, cálcio e magnésio entre os 3 e 9kg/ha/ano para cada um dos processos.

O balanço entre entradas e saídas de nutrientes no ecossistema florestal providencia uma aproximação útil à evolução da fertilidade do solo ao longo dos ciclos de crescimento dos povoamentos e permite estimar o risco de depleção de nutrientes em cada caso (ALI *et al.*, 2017). O resultado do balanço será, por isso, indissociável do requisito nutricional da cultura, da adoção ou não de práticas mitigadoras e do regime de exploração florestal, nomeadamente do ciclo de corte e da intensidade de extração de biomassa (RANGER e TURPAULT, 1999; MADEIRA *et al.*, 2012).

As exigências nutricionais variam com a fase do ciclo de crescimento do eucalipto e, em consequência, diferentes concentrações no solo são requeridas para a manutenção da taxa ótima de crescimento em cada fase (Figura 3). Ao longo de um ciclo de crescimento do eucalipto, o volume de solo explorado pelas raízes aumenta e os mecanismos de reciclagem biogeoquímica tornam-se cada vez mais eficazes (PEREIRA *et al.*, 2007), isto é, os nutrientes móveis (azoto, fósforo, potássio e magnésio) são redistribuídos no interior da planta – reciclagem bioquímica – e começa a ocorrer a queda e a deposição da folhada, com consequente mineralização e reabsorção de nutrientes – reciclagem biogeoquímica (ALI *et al.*, 2017). Assim, em povoamentos adultos, diminui a dependência da fertilidade do solo uma vez que parte dos requisitos nutricionais da planta é suportada pelos mecanismos de ciclagem interna (GONÇALVES e BENEDETTI, 2000). Os estudos de FIFE *et al.* (2008) e SAUR *et al.* (2000) revelaram taxas de retranslocação interna de nutrientes das folhas para as partes de crescimento ativo em *E. globulus* de 30 a 50% de azoto, 54% de fósforo e de 18 a 31% de potássio, sugerindo, ainda, a influência de fatores como a idade e as características dos povoamentos nessas taxas.

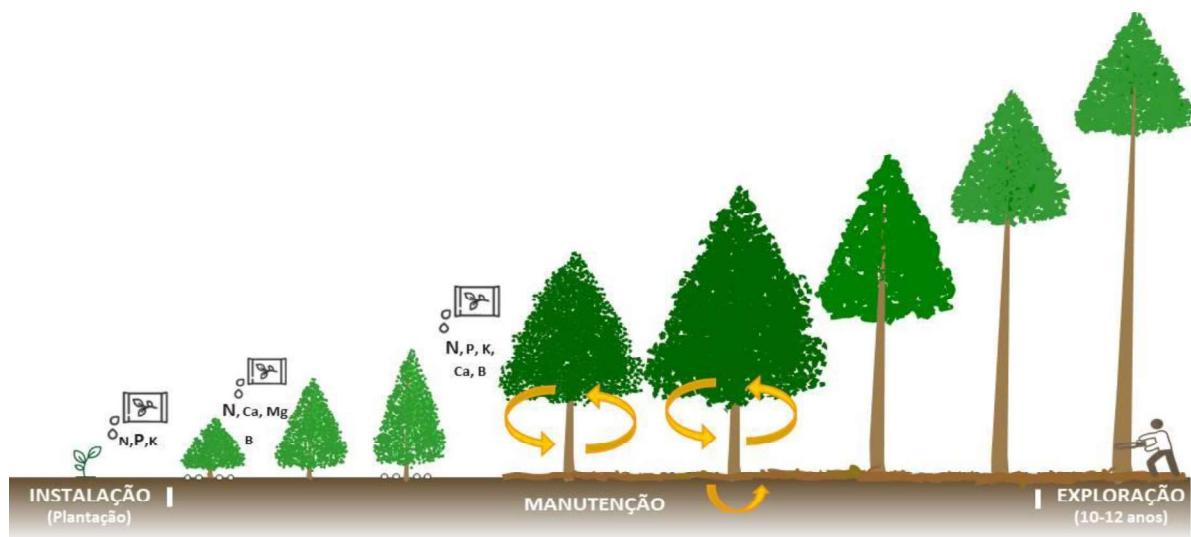


Figura 3 - Ciclo de crescimento de um eucalipto em Portugal (em 1^a rotação) e respetivos momentos de fertilização. As setas ilustram o ciclo biogeoquímico. N – Azoto, P – Fósforo, K – Potássio, Ca – Cálcio, B – Boro.

As folhas estão entre os componentes com maior conteúdo em nutrientes e têm, por isso, um importante papel no influxo de nutrientes no solo, contribuindo periodicamente para a melhoria da sua fertilidade ao longo do ciclo de desenvolvimento da floresta (DAVIDSON, 1996; O'CONNELL *et al.*, 2003; SHAMMAS *et al.*, 2003; ALI *et al.*, 2017). A decomposição da folhada de eucalipto ocorre num curto espaço de tempo, havendo um contributo a mais longo prazo das restantes frações de sobrantes do corte (JONES *et al.*, 1999; CORBEELS *et al.*, 2005; MADEIRA *et al.*, 2007). A totalidade ou parte dos sobrantes do corte, dependendo do modelo de exploração florestal adotado em cada caso, e também o sistema radicular de cada árvore que permanece no terreno após a exploração, contribuem para a acumulação de carbono orgânico no solo ao longo das rotações. A este propósito, em plantações de *E. globulus* com 13 a 24 anos no Noroeste de Espanha, foi estimada uma reposição via folhada (*litter*) de até 79% de azoto, 42% de fósforo, 12% de potássio, 27% de cálcio e 29% de magnésio do conteúdo total da biomassa aérea extraída (MERINO *et al.*, 2005).

Também MADEIRA *et al.* (2012) reportam o aumento de matéria orgânica e de nutrientes promovidas pela queda de folhada ao longo do ciclo de desenvolvimento de um povoamento de *E. globulus* na região Centro de Portugal. O estudo avaliou o efeito da prática de gradagem para controlo da vegetação espontânea e da adubação de manutenção e revelou um contributo entre 18 a 20 t de folhada/ha num povoamento com 14 anos de idade, contendo 126 a 147kg de azoto/ha, 5 a 6kg de fósforo/ha, 14 a 16kg de potássio/ha, 237 a 270kg de cálcio/ha e 23 a 25kg de magnésio/ha.

Os requisitos nutricionais médios da biomassa aérea de um povoamento de *E. globulus* em idade de corte (12 anos) são apresentados na Figura 4, em função da sua distribuição nos diferentes componentes, repartidos por 75% de madeira, 10% de ramos, 9% de casca e 6% de folhas (FABRES *et al.*, 2010). Estes são valores comparáveis aos obtidos por SCHUMACHER e CALDEIRA (2001) e MERINO *et al.* (2005) em povoamentos de *E. globulus* no Brasil e em Espanha, respetivamente, havendo ligeiras diferenças impostas pelas características do povoamento e condições edafoclimáticas locais.

As necessidades das espécies florestais em nutrientes são significativamente menores do que as das culturas agrícolas, dada a sua elevada eficiência no uso dos recursos (PEREIRA *et al.*, 2007). Ainda assim, a prática de adubação mineral em plantações florestais tem frequentemente grande relevância porque, em regra, as florestas plantadas ocupam solos com fertilidade natural mais baixa, de modo a não competirem com os terrenos de aptidão eminentemente agrícola. As práticas de adubação, assim, para além de permitirem corrigir o défice nutricional existente em cada caso, função das condições de solo e clima de cada local, melhoram também o balanço geoquímico de nutrientes nos ecossistemas de produção florestal. MERINO *et al.* (2005) analisando a exportação de nutrientes de povoamentos de *E. globulus* no Noroeste de Espanha evidenciaram a importância da adubação principalmente quando se adotam estratégias de exploração mais intensivas. Não obstante, sabe-se que os momentos de

fertilização conduzem a menores respostas de produtividade se forem feitas após os 5 anos de idade dos povoamentos de eucalipto e que o seu sucesso está à partida condicionado pela disponibilidade hídrica, fator limitante nas condições mediterrânicas (MADEIRA *et al.*, 2012).

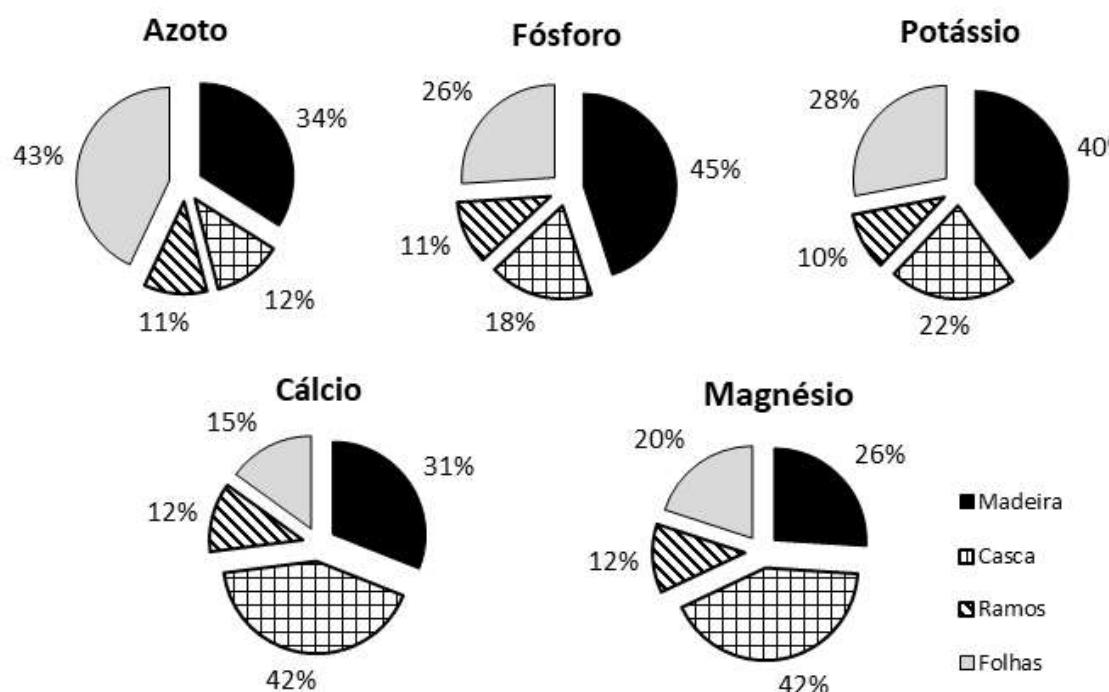


Figura 4 - Proporção média de macronutrientes em diferentes componentes da biomassa em plantações adultas de *Eucalyptus globulus* em Portugal, considerando uma produtividade de 10 m³/ha/ano. A quantidade de nutrientes armazenada na biomassa aérea é em média de 290kg de azoto/ha; 25kg de fósforo/ha; 140kg de potássio/ha; 280kg de cálcio/ha; e 45kg de magnésio/ha.

As respostas positivas de plantações de *E. globulus* à aplicação de azoto, fósforo (Figura 5) e boro têm sido reportadas por vários estudos quer em Portugal quer em Espanha (PEREIRA *et al.*, 1994; RUÍZ *et al.*, 1997, 2008; RAFAEL *et al.*, 2000; COUTINHO *et al.*, 2001; VIERA *et al.*, 2016).

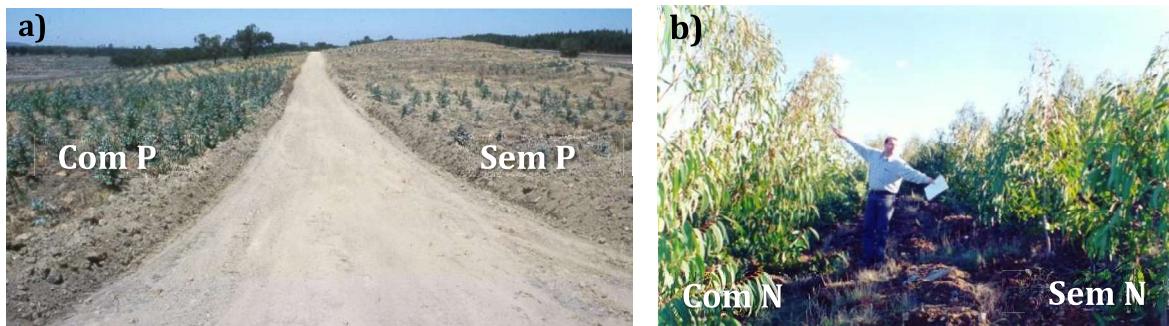


Figura 5 - Efeito da adubação fosfatada à instalação (a) e da adubação de manutenção azotada (b) em povoamentos de *Eucalyptus globulus* em Portugal (fonte: RAIZ).

Em solos de regiões tropicais, frequentemente profundos e desenvolvidos em termos geoquímicos, como alguns *Ferralsols* do Estado de São Paulo, Brasil, as plantas de eucalipto podem explorar um grande volume de solo pela expansão radicular lateral e em profundidade, compensando assim a baixa concentração de nutrientes no solo e favorecendo a absorção de água de camadas profundas, sobretudo em períodos com défice hídrico prolongado (GERMON *et al.*, 2020). Em oposição, grande parte das plantações de eucalipto em Portugal ocorrem em condições de solos pouco desenvolvidos – pouco profundos ou com pequena espessura efetiva, elevada pedregosidade e baixa fertilidade natural –, com exceção dos *Arenosols* dos vales dos rios Tejo e Sado, que são profundos e sem pedregosidade. O desenvolvimento do sistema radicular do eucalipto fica, deste modo, com frequência restrito a uma profundidade de solo até 75 cm, o que justifica a relevância da prática de fertilização e a adoção de práticas silvícolas que favoreçam a conservação da água no solo e, eventualmente, a necessidade de irrigação (MADEIRA *et al.*, 2002; PEREIRA *et al.*, 2007).

A floresta de eucalipto e o armazenamento de carbono no solo

As florestas e os produtos delas derivados constituem uma peça fundamental na mitigação do aquecimento global, já que funcionam como reservatórios e, em alguns casos, também como sumidouro de carbono (ARROJA *et al.*, 2006). A quantidade e a taxa de acumulação de carbono orgânico associadas à florestação dependem de vários fatores como sejam o clima, o relevo, as características do solo, a espécie instalada e o modelo silvícola (de RIGO *et al.*, 2016; MAYER *et al.*, 2020). Em Portugal, algumas estimativas apontam para que cerca de 50% do carbono orgânico total armazenado nas áreas florestais esteja retido no solo (DIAS *et al.*, 2004), embora este valor possa ser muito variável com a espécie em causa. Todavia, outros estudos sugerem uma proporção mais elevada em povoamentos de *E. globulus*, dado que a quantidade acumulada no solo, até um metro de profundidade, pode ultrapassar 20kg C/m² (FABIÃO *et al.*, 1987). Aliás, MADEIRA *et al.* (2002) estimaram, em povoamentos de *E. globulus* com seis anos de idade, cultivados em *Arenosols* da Zona Litoral Centro, um armazenamento de carbono no solo e na camada orgânica de 4,2 a 6,3kg C/m², consoante a disponibilidade hídrica e de nutrientes. Dada a multiplicidade de fatores que envolve esta temática e a variabilidade espacial que lhe está associada, o conhecimento efetivo da quantidade de carbono armazenado em solos sob povoamentos de eucalipto em Portugal é todavia ainda muito limitado.

O papel decisivo das práticas silvícolas

Os solos estão sujeitos, pela sua utilização, a diferentes ameaças, das quais se destacam a perda de solo (erosão), a perda de matéria orgânica, a acidificação, a perda de nutrientes e a compactação. Por isso, os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), adotados pela ONU em 2015, perspetivam o estabelecimento

de sistemas sustentáveis de produção vegetal, o reforço da capacidade de adaptação às alterações climáticas e eventos extremos, a promoção da biodiversidade e o progressivo aumento da qualidade do solo. Para isso, são necessárias estratégias, por exemplo, que procurem implementar práticas eficientes de uso dos recursos solo e água e sua interação, estimulem o uso da biomassa para produção de energia, biocombustíveis e outros bioproductos no contexto económico, ambiental e social em que cada país se insere (PPS, 2019).

Ocorrendo fatores não controláveis em cada local, como por exemplo o clima, a geomorfologia da paisagem, a topografia do terreno e a litologia, é fundamental que as práticas silvícolas a implementar procurem otimizar a produção florestal de forma compatível com as diferentes condições ecológicas do povoamento e que contribuam, também, para manter ou melhorar a qualidade do solo (GONÇALVES e STAPE, 2002; NAMBIAR, 2008; CERASOLI *et al.*, 2016; FABRES *et al.*, 2017).

O efeito das práticas silvícolas no solo, crescimento e produtividade do eucalipto tem sido abordado por inúmeros estudos realizados nomeadamente no Brasil (GONÇALVES *et al.*, 2004, 2008; 2017; NAMBIAR, 2008), Austrália (SHAMMAS *et al.*, 2003), África do Sul (du TOIT, 2008), Espanha (VIERA *et al.*, 2016) e Portugal (PEREIRA *et al.*, 1994; MADEIRA *et al.*, 2012). MADEIRA e ARAÚJO (2015) apresentaram uma revisão sobre a relação entre a silvicultura em Portugal e riscos de degradação do solo assim como medidas preventivas. Acresce ainda que as boas práticas de preparação do solo, técnicas de instalação de povoamentos florestais, planos específicos de intervenção e de gestão florestal têm enquadramento legal segundo a Portaria n.º 15-A/2018. Em súmula e adicionalmente ao que já foi oportunamente referido e detalhado em cada secção do presente trabalho, assumem particular importância as práticas utilizadas desde a instalação até à idade de corte do povoamento, bem como o método de exploração florestal, a escolha da planta e a sua taxa de crescimento e acumulação de nutrientes na biomassa, o período de duração da rotação, as

reservas de nutrientes do solo e a gestão dos sobrantes do corte (GONÇALVES e BENEDETTI, 2000; FERNÁNDEZ *et al.*, 2004; NAMBIAR, 2008).

Desafios de investigação no domínio do solo

Tem-se assistido desde os primeiros estudos de Dokuchev em 1877 e Liebig em 1840 até à atualidade a um enorme avanço do conhecimento no domínio da ciência do solo e da nutrição de plantas, respetivamente, com impacto nas atividades agrícola, florestal, ambiental e áreas afins. *"A gestão dos solos é sustentável quando se mantêm ou melhoram os serviços de suporte, de aprovisionamento, de regulação e culturais que os solos proporcionam, sem comprometer significativamente as funções do solo que tornam possíveis esses mesmos serviços ou a biodiversidade..."* (PPS, 2019; FAO, 2019). A indústria de base florestal tem procurado seguir essas orientações, tentando conciliar a produção de madeira com as restantes funções ecológicas dos ecossistemas florestais.

Não obstante os avanços que têm vindo a ser feitos no domínio da silvicultura, pedologia, química, mineralogia, física e biologia do solo, seria relevante para a melhoria dos modelos de gestão florestal: i) o desenvolvimento de indicadores biológicos da qualidade do solo, em complemento aos indicadores físicos e químicos que já se conhecem; ii) estudos da dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas florestais em condições de clima mediterrânico; iii) a construção de balanços geoquímicos de fósforo, potássio, cálcio e magnésio e quantificação da reserva mineral de longo prazo do solo; iv) o desenvolvimento de novas tecnologias de apoio à tomada de decisão e de equipamentos para suporte à adoção de práticas silvícolas mais conservativas do solo e da água em ecossistemas de produção florestal; e finalmente v) a disponibilização de uma carta de solos consolidada para Portugal, utilizando nomenclatura de um sistema internacional de classificação de solos (IUSS

Working Group WRB, 2015), como sugerido pela Parceria Portuguesa para o Solo.

Bibliografia consultada

- AKSELSSON, C., WESTLING, O., SVERDRUP, H., GUNDERSEN, P., 2007. Nutrient and carbon budgets in forest soils as decision support in sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* **238**(1-3): 167-174. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.10.015>.
- ALI, A., NAEEM, M., DAR, T.A., IDREES, M., KHAN, M.M.A., UDDIN M., DANTU, P.K., SINGH T. B., 2017. *Nutrient Uptake, Removal, and Cycling in Eucalyptus Species*. In: NAEEM M., ANSARI A., GILL S. (eds) Essential Plant Nutrients. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-58841-4_2.
- ARROJA, L., DIAS, A.C., CAPELA, I., 2006. The role of *Eucalyptus globulus* forest and products in carbon sequestration. *Climatic Change* **74**: 123-140. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-3461-1>.
- CERASOLI, S., CALDEIRA, M.C., PEREIRA, J.S., CAUDULLO, G., de RIGO, D., 2016. *Eucalyptus globulus and other eucalypts in Europe: distribution, habitat, usage and threats*. In: SAN-MIGUEL-AYANZ J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., HOUSTON DURRANT, T., MAURI, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- CERDAN, O., GOVERS G., LE BISSONNAIS, Y., VAN OOST, K., POESEN, J., SABY, N., GOBIN, A., VACCA, A., QUINTON, J., AUERSWALD, K., KLIK, A., KWAAD, F.J.P.M., RACLOT, D., IONITA, I., REJMAN, J., ROUSSEVA, S., MUXART, T., ROXO, M.J., DOSTAL, T., 2010. Rates and spatial variations of soil erosion in Europe: A study based on erosion plot data. *Geomorphology* **122**(1-2): 167-177. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.06.011>.
- CORBEELS, M., MCMURTRIE, R.E., PEPPER, D.A., MENDHAM, D.S., GROVE, T.S., O'CONNELL, A.M., 2005. Long-term changes in productivity of eucalypt plantations under different harvest residue and nitrogen management practices: A modelling analysis. *Forest Ecology and Management* **217**(1): 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.057>.
- COUTINHO, J., BENTO, J., VALE, R., 2001. *Efeito da aplicação de Boro em povoamentos de Eucalyptus globulus no Norte e Centro de Portugal - Relatório do triénio 1997-1999*. Projecto de Investigação aplicada do CEDR - UTAD, SOPORCEL e BORAX, Vila Real.
- DAMBRINE, E., VEGA, J.A., TABOADA, T., RODRIGUEZ, L., FERNANDEZ, C., MACIAS, F., GRAS, J.M., 2000. Bilans d'éléments minéraux dans de petits bassins versants forestiers de Galice (NW Espagne). *Annals of Forest Science* **57**: 23-38.

- DAVIDSON, J., 1996. Ecological Aspects of *Eucalyptus* Plantations. In: White, K., Ball, J. and Kashio, M. (Eds.) *Proceedings: Regional Expert Consultation on Eucalyptus*. Rapa Publication, FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok, 202 pp.
- de RIGO, D., BOSCO, C., SAN-MIGUEL-AYANZ, J., HOUSTON DURRANT, T., BARREDO, J.I., STRONA, G., CAUDULLO, G., DI LEO, M., BOCA, R., 2016. *Forest resources in Europe: an integrated perspective on ecosystem services, disturbances and threats*. In: SAN-MIGUEL-AYANZ, J., DE RIGO, D., CAUDULLO, G., HOUSTON DURRANT, T., MAURI, A. (Eds.), European Atlas of Forest Tree Species. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- DGADR - Direção-Geral de Agricultura e Desenvolvimento Rural, *Cartas de Solos e Capacidade de Uso*, Série SROA/CNROA/IEADR.
- DIAS, A.C., MARTINS, M.C., ARROJA, L., CAPELA, I., 2004. *Gestão dos recursos florestais na perspectiva do Protocolo de Quioto*. Universidade de Aveiro.
- du TOIT, B., 2008. Effects of site management on growth, biomass partitioning and light use efficiency in a young stand of *Eucalyptus grandis* in South Africa. *Forest Ecology and Management* **255**(7): 2324-2336. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.12.037>.
- FABIÃO, A., MADEIRA, M., STEEN, E., 1987. Root mass in plantations of *Eucalyptus globulus* in Portugal in relation to soil characteristics. *Arid Soil Research and Rehabilitation* **1**: 185-194. <https://doi.org/10.1080/15324988709381143>.
- FABRES, S., FERREIRA, D., DEHON, G., 2010. Nutrients budgets in *E. globulus* stands in Portugal. XXI TECNICELPA Conference and Exhibition / VI CYADICYP. Lisbon.
- FABRES, S., SANDE SILVA, J., GONÇALVES, C., QUINTELA, A., TEIXEIRA, C., CORTICEIRO, S., VALENTE, C., BRANCO, M., 2017. "Tasmanian Blue Gum (*Eucalyptus globulus* Labill.) Within European Forests", Risks Monographs. Cost Action FP 1403 NNEXT, WG 4, Non Native Tree Species for European Forests: Experiences, Risks and Opportunities, COST - European Cooperation in Science and Technology.
- FAO, 2019. *Diretrizes Voluntárias para a Gestão Sustentável dos Solos*. Roma.
- FERNÁNDEZ, C., VEGA, J.A., GRAS, J.M., FONTURBEL, T., CUIÑAS, P., DAMBRINE, E., ALONSO, M., 2004. Soil erosion after *Eucalyptus globulus* clearcutting: differences between logging slash disposal treatments. *Forest Ecology and Management* **195**: 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.02.052>.
- FERRAZ-FILHO, A.C., SCOLFORO, J.R.S., MOLA-YUDEGO, B., 2014. The coppice-with-standards silvicultural system as applied to *Eucalyptus* plantations - a review. *Journal of Forestry Research* **25**(2): 237-248. <https://doi.org/10.1007/s11676-014-0455-0>.
- FERREIRA, A., 2000. *Dados geoquímicos de base de sedimentos fluviais de amostragem de baixa densidade de Portugal Continental: Estudo de factores de variação regional* (Volume I). Tese de Doutoramento, Universidade de Aveiro, 234 pp.

- FIFE, D.N., NAMBIAR, E.K.S., SAUR, E., 2008. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree Physiology* **28**: 187-196. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.2.187>.
- GERMON, A., LACLAU, J.P., ROBIN, A., JOURDAN, C., 2020. Tamm Review: Deep fine roots in forest ecosystems: Why dig deeper? *Forest Ecology and Management* **466**: 118-135. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118135>.
- GONÇALVES, J.L.M., ALVARES, C.A., ROCHA, J.H.T., BRANDANI, C.B., HAKAMADA R., 2017. Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests* **79**(3): 1-15. <https://doi.org/10.2989/20702620.2016.1255415>.
- GONÇALVES, J.L.M., BENEDETTI, V., 2000. *Nutrição e Fertilização Florestal*. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 427 pp.
- GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., 2002. *Conservação e cultivo de solos para plantações florestais*. Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais, 498 pp.
- GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU J.P., BOUILLET, J.P., RANGER J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests* **70**(2): 105-118. <https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534>.
- GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU, J-P., SMETHURST P., GAVA, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* **193**(1/2): 45-61. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.01.022>.
- GRIGAL, D.F., 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management* **138**: 167-185. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00395-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00395-9).
- IUSS Working Group WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. *World Soil Resources Reports* No. 106. FAO, Rome.
- JONES, H.E., MADEIRA, M., HERRAEZ, L., DIGTON, J., FABIÃO, A., GONZÁLEZ-RIO, F., FERNANDEZ MARCOS, M., GOMEZ, C., TOMÉ, M., FEITH, H., MAGALHÃES, M.C., HOWSON, G., 1999. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. *Forest Ecology and Management* **122** (1-2): 73-86. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00033-X](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00033-X).
- MADEIRA, M., ARAÚJO, C., 2015. *Soil degradation risks and prevention measures in planted forests. The case of eucalyptus plantations in Portugal*. In: GONZÁLEZ, A.A., BENGOETXEA, N.G. (Eds), *Soil degradation risks in planted forests*. Eusko Jaurlaritzaren Argitalpen Zerbitzua/Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco.

- MADEIRA, M., CORTEZ, N., AZEVEDO, A., MAGALHÃES, M.C., RIBEIRO, C., FABIÃO, A., 2007. *As plantações de eucalipto e o solo* (Capítulo 5). In: ALVES, A.M., PEREIRA, J.S., SILVA, J.M.N. (Eds), *O Eucaliptal em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica*. Instituto Superior de Agronomia, ISAPress, Lisboa.
- MADEIRA, M., FABIÃO, A., CARNEIRO, M., 2012. Do harrowing and fertilisation at middle rotation improve tree growth and site quality in *Eucalyptus globulus* Labill. plantations in Mediterranean conditions? *European Journal of Forest Research* **131**: 583-596. <https://doi.org/10.1007/s10342-011-0533-1>.
- MADEIRA, M.V., FABIÃO, A., PEREIRA, J.S., ARAÚJO, M.C., RIBEIRO, C., 2002. Changes in carbon stocks in *Eucalyptus globulus* Labill. Plantations induced by different water and nutrient availability. *Forest Ecology and Management* **171**: 75-85. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00462-0](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00462-0).
- 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* **466**: 118-127. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118127>.
- MERINO, A., BALBOA, M.A., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., GONZÁLES, J.G.A., 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management* **207**: 325-339. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.074>.
- NADAL-ROMERO, E., GONZÁLEZ-HIDALGO, J.C., CORTESI, N., DESIR, G., GÓMEZ, J.A., LASANTA, T., LUCÍA, A., MARÍN, C., MARTÍNEZ-MURILLO, J.F., PACHECO, E., RODRÍGUEZ-BLANCO, M.L., ROMERO DÍAZ, A., RUIZ-SINOGA, J.D., TAGUAS, E.V., TABOADA-CASTRO, M.M., TABOADA-CASTRO, M.T., ÚBEDA, X., ZABAleta, A., 2015. Relationship of runoff, erosion and sediment yield to weather types in the Iberian Peninsula. *Geomorphology* **228**: 372-381. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.011>.
- NAMBIAR, E.K.S., 2008. Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests. *Proceedings of Workshops in Piracicaba* (Brazil) 22-26 November 2004 and Bogor (Indonesia) 6-9 November 2006. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR), 236 pp.
- O'CONNELL, A.M., GROVE, T.S., MENDHAM, D.S., CORBEELS, M., MCMURTRIE, R.F., SHAMMAS, K., RANCE, S.J., 2003. Impacts of Inter-rotation Site Management on Nutrient Stores and Fluxes and growth of Eucalypt Plantations in Southwestern Australia, in NAMBIAR, E.K.S., RANGER, J., TIARKS, A., TOMA, T. (Eds) *Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests: Proceedings of Workshops in Congo July 2001 and China February 2003*, CIFOR 2004.

- PANAGOS, P., BORRELLI, P., MEUSBURGER, K., ALEWELL, C., LUGATO, E., MONTANARELLA, L., 2015. Estimating the soil erosion cover-management factor at the European scale. *Land Use Policy* **48**: 38-50. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.021>.
- PEREIRA, J.S., MADEIRA, M., LINDER, S., ERICSSON, T., TOMÉ, M., ARAÚJO, M.C., 1994. *Biomass production with optimized nutrition in Eucalyptus globulus plantations*. In: Pereira JS, Pereira H (eds) *Eucalyptus for biomass production. The state-of-the-art*. Commission of the European Communities, Brussels, pp. 13-30.
- PEREIRA, J.S., MATEUS, J.A., AIRES, L.M., PITA, G., PIO, C., DAVID, J. S., ANDRADE, V., BANZA, J., DAVID, T. S., PAÇO, T. A., RODRIGUES, A., 2007. Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems - the effect of drought. *Biogeosciences. European Geosciences Union* **4**(5): 791-802.
- PPS-Parceria Portuguesa para o Solo, 2019. Seminário e mesa redonda sobre a "Comemoração do dia mundial do solo. Relevância do recurso solo." INIAV, Lisboa.
- RAFAEL, J., LEMOS, L., RAMALHO, R., 2000. National map of the "Regions of Boron deficiency risk for Eucalyptus sp in Portugal". *International Symposium, Managing Forest Soils for Sustainable Productivity* 18-22 Setembro, Vila Real, Portugal.
- RANGER, J., TURPAULT, M.P., 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management* **122**: 139-154. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(99\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00038-9).
- RUÍZ FERNÁNDEZ, F., SORIA, F., TOVAL, G., 1997. Ensayos de fertilización localizada de masas clonales de *Eucalyptus globulus* en el momento de la plantación en la Provincia de Huelva. In *Sociedad Española de Ciencias Forestales, II Congreso Forestal Español*: Pamplona, Spain, pp. 585-590.
- RUÍZ, F., LÓPEZ, G., TOVAL, G., ALEJANO, R., 2008. *La selvicultura de Eucalyptus globulus Labill.* In: SERRADA, R., MONTERO, G., REQUE, J.A. (Eds), *Compendio de Selvicultura aplicada en España*, INIA Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. Ministerio de Educación y Ciencia. Fundación Conde del Valle de Salazar. pp. 117-154.
- SANTOS, H.G., JACOMINE, P.K.T., ANJOS, L.H.C., OLIVEIRA, V.A., LUMBRERAS, J.F., COELHO, M.R., ALMEIDA, J.A., ARAUJO FILHO, J.C., OLIVEIRA, J.B., CUNHA, T.J.F., 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - 5ª Edição*, Embrapa, Brasília. 356 pp.
- SAUR, E., NAMBIAR, E.K.S., FIFE, D.N., 2000. Foliar nutrient retranslocation in *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiology* **20**: 1105-1112. <https://doi.org/10.1093/treephys/20.16.1105>.
- SCHUMACHER, M.V., CALDEIRA, M.V.W., 2001. Biomass Estimation and Nutrient Content of a *Eucalyptus globulus* (Labillardière) Subspecie *maidenii* Plantation. *Ciência Florestal, Santa Maria* **11**(1): 45-53.

- SHAMMAS, K., O'CONNELL, A.M., GROVE, T.S., MCMURTRIE, R., DAMON, P., RANCE, S.J., 2003. Contribution of decomposing harvest residues to nutrient cycling in a second rotation *Eucalyptus globulus* plantation in south-western Australia. *Biology Fertility of Soils* **38**: 228-235. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0654-x>.
- SPOSITO, G., 2008. *The Chemistry of Soils*, Second Edition. Oxford, University press, 329 pp.
- UNRAU, A., BECKER, G., SPINELLI, R., LAZDINA, D., MAGAGNOTTI, N., NICOLESCU, V.N., BUCKLEY, P., BARTLETT, D., KOFMAN, P.D. (Eds.), 2018. *Coppice Forests in Europe*. Albert Ludwig University of Freiburg: Freiburg, Germany, 392 pp.
- VENANZI, R., PICCHIO R., GRIGOLATO, S., LATTERINI, F., 2019. Soil and forest regeneration after different extraction methods in coppice forests. *Forest Ecology and Management* **454**: 117666. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.117666>.
- VIERA, M., RUÍZ FERNÁNDEZ, F., RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R., 2016. Nutritional Prescriptions for *Eucalyptus* Plantations: Lessons Learned from Spain. *Forests* **7**(4): 84. <https://doi.org/10.3390/f7040084>.

CAPÍTULO III

As Plantações de Eucalipto e a Utilização dos Recursos Hídricos - Desafios em Hidrologia Florestal

As Plantações de Eucalipto e a Utilização dos Recursos Hídricos - Desafios em Hidrologia Florestal

Ana Quintela^{1*}, Sérgio Fabres¹, Cristina Marques¹, Nuno Rico², José L. Carvalho², Jacob Keizer³, Teresa Soares David^{4,5}

¹RAIZ - Instituto de Investigação da Floresta e Papel, Quinta de S. Francisco, 3800-783 AVEIRO

[*ana.quintela@thenavigatorcompany.com](mailto:ana.quintela@thenavigatorcompany.com)

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

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

⁴INIAV - Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, Av. da República, 2780-157 OEIRAS

⁵Centro de Estudos Florestais, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 LISBOA

Resumo. A influência das plantações de eucalipto na disponibilidade de recursos hídricos tem sido objeto de estudo e discussão. Tal passa, particularmente, pela avaliação das taxas de crescimento, evapotranspiração, escoamento e de recarga de aquíferos. Parte da controvérsia em torno desta temática é devida a uma questão de escala. À perspetiva local da utilização de água pelo eucalipto para produção de biomassa, contrapõe-se a perspetiva da floresta enquanto componente ativa do ciclo hidrológico a nível global,

contribuindo para o arrefecimento da superfície terrestre e para a precipitação. Consensual parece ser a constatação de que o efeito das florestas plantadas no balanço hídrico a nível regional depende mais das condições locais, do ordenamento do território, das práticas de gestão e da densidade do que da espécie florestal, *per se*. Neste sentido, é essencial haver planeamento do uso de solo e uma gestão adequada da floresta, visando conciliar a produtividade florestal com o uso dos recursos hídricos para os mais diversos fins. Do ponto de vista da investigação e atendendo a que o número de estudos desenvolvidos em hidrologia florestal em Portugal é ainda limitado, a monitorização e a modelação hidrológica ao nível da bacia hidrográfica experimental e hidrometeorológica à escala regional, assumem especial interesse para uma melhor compreensão da interação das florestas com os recursos hídricos, particularmente num contexto de alterações climáticas.

Palavras-chave: Floresta, eucalipto, água, biomassa, evapotranspiração, escoamento

***Eucalyptus* plantations and water resource use - challenges in forest hydrology**

Abstract. The influence of *Eucalyptus* plantations on water resources availability has been studied and debated. This includes the evaluation of growth, evapotranspiration, run-off and aquifer rate recharge. Part of the discussion is related to the approach scale. If locally, eucalypts use water for biomass production, at the global level, planted forests are an active component of the hydrological cycle, contributing to the cooling of the earth's surface and precipitation. Nevertheless, it is agreed that the effect of planted forests on the water balance at regional level relies more on local conditions, spatial planning, management practices and stocking than on the forest species, *per se*. Thus, a proper land use planning and a customized management are required aiming to combine forest productivity with the use of water resources for the most diverse

purposes. The scientific knowledge in forest hydrology in Portugal is still limited. Therefore, advances in hydrological monitoring and modelling at the hydrographic basin level and hydro-meteorological at the regional scale are of particular interest for better understanding the interaction of forests with water resources, particularly in the context of climate change.

Key-words: Forest, *Eucalyptus*, water, biomass, evapotranspiration, water flow

Plantations d'eucalyptus et utilisation des ressources en eau - défis en hydrologie forestière

Résumé. L'influence des plantations d'eucalyptus sur la disponibilité des ressources en eau a fait l'objet d'études et de débats. Cela comprend l'analyse des taux de croissance, de l'évapotranspiration, du ruissellement et de la recharge des aquifères. Une partie de la discussion porte sur l'échelle d'approche. Si, localement, les eucalyptus utilisent l'eau pour la production de biomasse, au niveau mondial, les forêts plantées sont une composante active du cycle hydrologique, contribuant au refroidissement de la surface de la terre et des précipitations. Néanmoins, il est convenu que l'effet des forêts plantées sur l'équilibre hydrique au niveau régional repose davantage sur les conditions locales, l'aménagement du territoire, les pratiques de gestion et le stockage que sur les espèces forestières, *per se*. Ainsi, il est essentiel de planifier l'utilisation des terres et d'avoir une gestion adéquate des forêts, dans le but de concilier la productivité forestière avec l'utilisation des ressources en eau à diverses fins. La recherche en hydrologie forestière au Portugal est encore limitée. Ainsi, les progrès de la surveillance et de la modélisation hydrologiques au niveau du bassin hydrographique et de l'hydrométéorologique à l'échelle régionale sont particulièrement intéressants pour une meilleure compréhension de l'interaction des forêts avec les ressources en eau, en particulier dans le contexte du changement climatique.

Mots-clés: Forêt, *Eucalyptus*, eau, biomasse, évapotranspiration, ruissellement

As florestas e o ciclo hidrológico

À escala do planeta, o ciclo hidrológico é considerado um sistema fechado, sem entradas nem saídas de água, com transferência contínua de água que alterna em estado físico entre os diferentes subsistemas terrestres – oceanos, superfícies continentais e atmosfera. As florestas ocupam cerca de 31% da superfície continental do planeta (FAO, 2020) e são um interveniente ativo na regulação do ciclo hidrológico (Figura 1), da energia e do carbono a nível global (SHEIL e MURDIYARSO, 2009; ELLISON *et al.*, 2012, 2017). Têm um papel importante no arrefecimento da atmosfera, e contribuem para a humidade do ar, para a melhoria da qualidade da água e para a precipitação (VAN DIJK e KEENAN, 2007; HESSLEROVÁ *et al.*, 2013; NEARY, 2016; ELLISON *et al.*, 2012, 2017). Estima-se que, a evapotranspiração¹ florestal contribua para, pelo menos, 40 % da precipitação da parte continental do planeta (VAN DER ENT *et al.*, 2010; JASECHKO *et al.*, 2013; SCHLESINGER e JASECHKO, 2014). A influência das florestas no clima é, por isso, particularmente importante no contexto das alterações climáticas em que se verificam/preveem desvios nos padrões sazonais da precipitação e no aumento na frequência de eventos meteorológicos extremos (PEÑUELAS *et al.*, 2017).

As plantas utilizam água para a sua sobrevivência e crescimento. A água é absorvida na rizosfera e transportada via sistema vascular para as copas, sendo grande parte (mais de 95%) libertada para a atmosfera através da transpiração (TAIZ e ZEIGER, 2006). A fotossíntese e a transpiração estão estreitamente relacionadas uma vez que, com a abertura dos estomos para entrada de dióxido de carbono necessário à formação de fotoassimilados, há libertação do vapor de água (CHOAT *et al.*, 2012; BUCKLEY e MOTT, 2013; MANZONI *et al.*, 2013). Esta água utilizada pelas plantas na transpiração está, por isso, associada à

¹Perda de água para a atmosfera por transpiração das plantas, perdas por interceção e evaporação do solo.

fotossíntese: maior transpiração permite maior produção de biomassa e, consequentemente, também maior sequestro de carbono (VERTESSY, 2000; JACKSON *et al.*, 2005; PEREIRA *et al.* 2007; DAVID *et al.*, 2016). Além da influência na regulação do clima à macroescala, as florestas são consideradas fontes de "energia renovável" e contribuem também para diversos serviços dos ecossistemas, como a promoção da infiltração da água no solo, a regulação do caudal minimizando risco de pequenas/médias cheias, e a proteção do solo contra a erosão (HEWLETT, 1982; DAVID *et al.*, 2007; PEREIRA *et al.*, 2007; LIMA, 2010; MOREAUX *et al.*, 2013; REICHERT *et al.*, 2017).

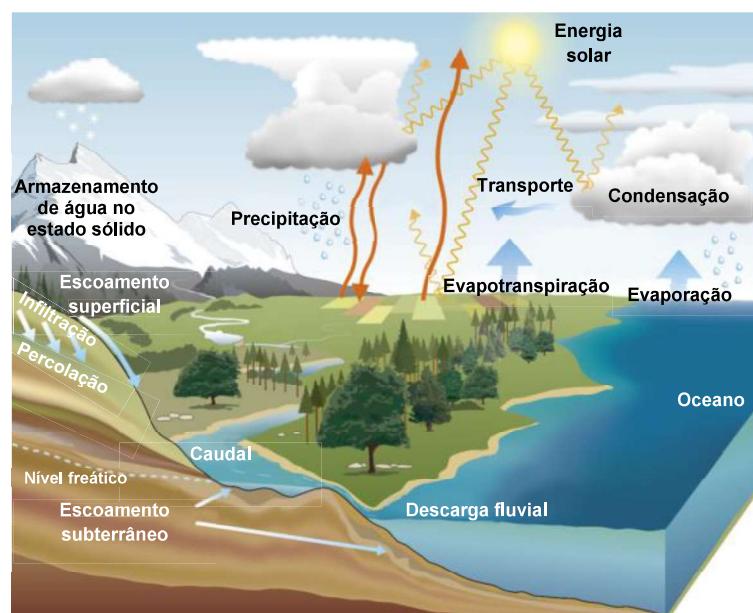


Figura 1 – Esquema simplificado do ciclo da água (adaptado de <https://www.metoffice.gov.uk>).

As florestas e os recursos hídricos ao nível da bacia hidrográfica

Quando se passa da escala global a uma escala de análise menor (continental, regional ou local), passa-se de um sistema fechado para um sistema aberto, e do conceito de ciclo hidrológico para o de balanço hidrológico (WARD e ROBINSON, 2000).

À escala local/regional, a bacia hidrográfica é considerada a unidade estratégica de planeamento florestal e dos recursos hídricos. Entende-se como bacia hidrográfica uma área continental que permite a captação dos fluxos de água originados pela precipitação e a sua confluência para um ponto de drenagem comum. A quantificação do movimento e armazenamento de água a esta escala é regida pelo princípio de conservação de massa que se traduz na equação:

$$P = ET + R + D + \Delta S$$

em que P corresponde à precipitação, ET à evapotranspiração ou "água verde", R ao escoamento fluvial à saída da bacia ou "água azul", D à infiltração profunda e ΔS à variação do armazenamento de água no interior da bacia (HEWLETT, 1982; ZHANG *et al.*, 2001). À escala anual, e se a geologia for relativamente impermeável, os termos ΔS e D são normalmente negligenciáveis e a equação simplifica-se. A precipitação representará a entrada de água para a bacia e a evapotranspiração e o escoamento as saídas. Nestas condições, para um determinado valor de precipitação, quanto maior for a evapotranspiração menor será o escoamento.

Parte da precipitação que cai numa bacia hidrográfica é retida temporariamente nas copas molhadas e devolvida à atmosfera, constituindo a perda por interceção. A precipitação que atinge o solo pode: (1) evaporar-se do solo e superfícies molhadas; (2) infiltrar-se e contribuir para a humidade do solo e abastecimento de lençóis freáticos/aquíferos, sendo depois utilizada (em parte) pelas plantas e devolvida à atmosfera (transpiração); ou (3) integrar o escoamento fluvial, resultante da escorrência superficial (quando a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo), sub-superficial ou subterrânea (componente mais lenta do escoamento).

A evapotranspiração compreende a água libertada por transpiração das plantas, perdas por interceção e a evaporação do solo. A evaporação do solo e a perda por interceção são condicionados por fatores físicos enquanto a

transpiração depende de fatores eco-fisiológicos. Portanto, a evapotranspiração depende de fatores ambientais (radiação, défice de pressão de vapor do ar e disponibilidade de água) e de fatores fisiológicos (condutância estomática², área foliar, extensão e profundidade do sistema radicular).

A proporção relativa entre a transpiração e a perda por interceção depende fundamentalmente do clima. Em climas com precipitação frequente, em que as copas estão molhadas durante muito tempo, a perda por interceção tem maior relevância que a transpiração, podendo chegar a 75% da evapotranspiração (DAVID *et al.*, 2005). Em florestas da região Mediterrânea, com precipitação concentrada em certos meses do ano, a transpiração pode constituir até 75% da evapotranspiração total, a interceção até 25% e o que restar é atribuído à evaporação do solo (DAVID *et al.*, 2011). Contudo, a quantidade de água evapotranspirada pelas florestas depende também do tipo e características do coberto vegetal. ZHANG *et al.* (2001) estabeleceram relações entre valores anuais de evapotranspiração e de precipitação, para diferentes tipos de vegetação, incluindo algumas áreas com eucalipto, com base em dados de mais de 250 bacias hidrográficas experimentais dispersas pelo mundo (Figura 2). Estas relações, embora sem contemplarem todos os cenários de variabilidade de condições locais e de práticas de gestão, tem-se revelado consistentes, mostrando que: (1) a evapotranspiração das florestas é superior à de pastagens, sobretudo em regiões com elevada precipitação; (2) em regiões com precipitação anual inferior a 500 mm, a evapotranspiração das bacias com floresta não difere muito da de pastagens. Isto acontece em climas em que a precipitação é muito inferior à evapotranspiração potencial e portanto, geralmente, com escoamento quase nulo (regiões áridas e semiáridas). Em regiões florestais do Mediterrâneo, grande parte da precipitação é convertida em evapotranspiração, sendo o escoamento anual normalmente inferior a 5% da precipitação (DAVID *et al.*,

² Medida da abertura estomática, relacionada com a taxa de assimilação de CO₂ e libertação de água sob a forma de vapor através dos estomos.

2011). Em Portugal, a normal climatológica mostra valores mais elevados de precipitação no Minho e Douro Litoral e mais baixos no interior do Baixo Alentejo, sendo que grande parte do território nacional regista valores de precipitação anual inferior a 1000 mm (IPMA), indicando por isso que grande parte da precipitação é consumida pela evapotranspiração.

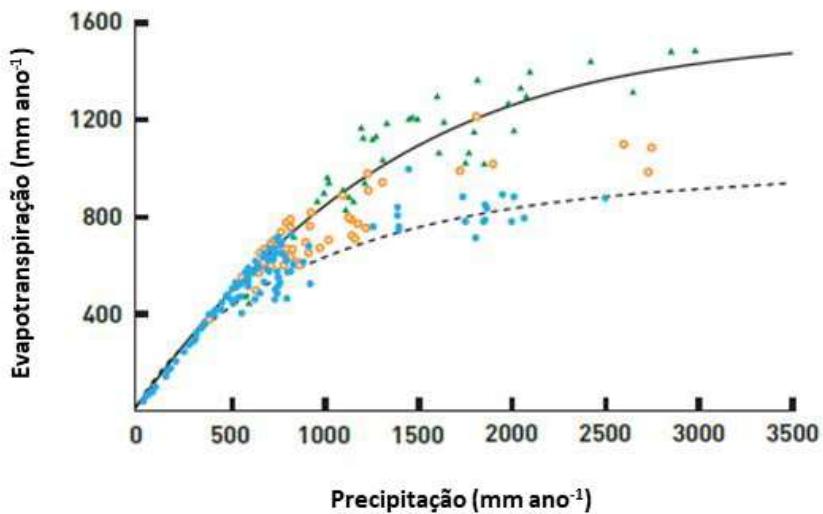


Figura 2 – Relação estabelecida por ZHANG *et al.* (2001) entre evapotranspiração e precipitação: floresta – verde, sistema misto – laranja e pastagem – azul.

O maior valor da evapotranspiração em florestas, face a pastagens ou culturas agrícolas, é explicado pela sua maior rugosidade aerodinâmica (altura e heterogeneidade da superfície) que se reflete em maior perda por interceção, pela sua maior área foliar, persistência da área foliar (maior absorção de radiação solar), e sistemas radiculares mais desenvolvidos que conduzem a maiores taxas de transpiração (VERTESSY, 2000; ANDRÉASSIAN, 2004). Há, no entanto, diferenças de evapotranspiração, e consequentemente de escoamento, entre florestas nas mesmas condições climáticas, dependendo da espécie, idade e densidade.

O eucalipto, as plantações e a utilização dos recursos hídricos

O eucalipto é uma árvore de crescimento rápido mas não requer, de modo geral, mais água por quantidade de biomassa produzida do que outras espécies, o que se traduz numa eficiência superior no uso deste recurso (WHITEHEAD e BEADLE, 2004; DVORAK, 2012). Tal facto é evidenciado quando se compara o uso de água entre o eucalipto, florestas de coníferas e outras culturas (Figura 3).

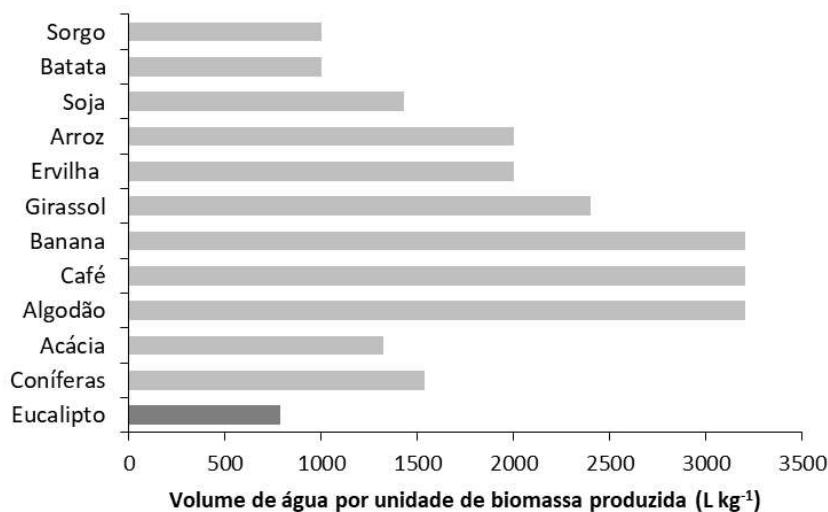


Figura 3 - Quantidade de água utilizada por unidade de biomassa produzida para diferentes culturas (adaptado de DAVIDSON, 1993).

Algumas características morfológicas, anatómicas e fisiológicas do eucalipto contribuem para esta eficiência do uso da água, nomeadamente (i) a capacidade de produzir folhas num curto espaço de tempo (SOARES *et al.*, 2007), (ii) o controlo eficiente da perda de água por transpiração, por fecho progressivo dos estomas nos períodos de maior restrição hídrica (DAVID *et al.*, 1997; CHAVES *et al.*, 2004), (iii) a condutância estomática superior a outras espécies florestais como o *Pinus radiata*, permitindo maior produção de biomassa (WHITE *et al.*, 1999), (iv) a interceção de cerca de 12% da precipitação, valor inferior a outras

espécies florestais como as do género *Pinus* (VALENTE *et al.*, 1997; Llorens e DOMINGO, 2007; PEREIRA *et al.*, 2007), (v) as folhas largas e pendentes que favorecem a oscilação com o movimento do ar e permitem evitar o calor excessivo sem utilizar muita água (PEREIRA *et al.*, 1992; SOARES *et al.*, 2007) e ainda (vi) a cutícula foliar cerosa que possibilita menor interceção da precipitação e menor evaporação de copa (VAN DIJK E KEENAN, 2007; ALVES *et al.*, 2012). Em situação de restrição de água, esta eficiência de água é ainda superior, como observado em plantações de *Eucalyptus globulus* na região Centro de Portugal por PEREIRA *et al.* (1994) e CHAVES *et al.* (2004) e em povoamentos de eucalipto (*E. gunnii x dalrympleana*) em França por MOREAUX *et al.* (2013).

O maior ou menor uso de água pelas plantas está diretamente relacionado com a produção de biomassa e a produtividade (STAPE *et al.*, 2010). Espécies florestais de crescimento rápido exploradas intensivamente requerem, naturalmente, maior quantidade de água. Este facto é evidenciado pela relação entre o aumento da evapotranspiração e a produtividade em sistemas florestais, sistemas mistos e pastagens (SCHIMEL, 1996) (Figura 4). Todavia, da água utilizada pelas árvores apenas 0,3% é extraída com a madeira (FIBRIA, 2016). A restante água é libertada para a atmosfera, por evapotranspiração, retoma o seu papel no ciclo hidrológico a nível global, contribuindo assim para a sua perpetuação (PEREIRA *et al.*, 2007; ELLISON *et al.*, 2012).

Num estudo de pares de bacias, realizado no Rio Grande do Sul (Brasil), uma com pastagem e outra florestada com eucalipto, com precipitação média anual superior a 2300 mm, ALMEIDA *et al.* (2016) observaram menor escoamento na bacia de floresta (7 e 13% da precipitação) relativamente à pastagem (28 a 29% da precipitação), devido à maior evapotranspiração na bacia de floresta. Esta tendência de redução do escoamento foi também registada em bacias com *E. globulus* no Sul da Índia (SHARDA *et al.*, 1998; SIKKA *et al.*, 2003) e no Uruguai (SILVEIRA *et al.*, 2016), ambas com precipitação média anual a rondar os 1300 mm. A evapotranspiração anual em povoamentos de *E. globulus* da região Norte

e Centro de Portugal estudada por DAVID *et al.* (1994) e FERREIRA *et al.* (1998) evidenciam que, tal como preconizado nas "curvas de Zhang" (Figura 2), grande parte da precipitação é utilizada na evapotranspiração, para valores anuais de precipitação inferiores a 1000 mm. Para precipitação anual superior a 1000 mm, a evapotranspiração estabiliza, possibilitando o escoamento ou produção de água na bacia.

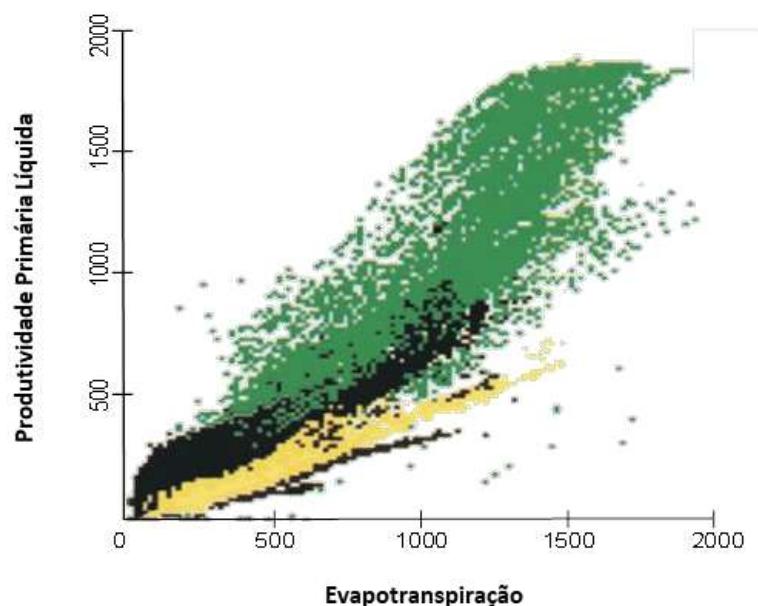


Figura 4 - Relação entre evapotranspiração e produtividade em sistemas florestais (a verde), pastagens (a amarelo) e sistemas mistos (a preto) ($R^2=0,86$) (SCHIMEL *et al.*, 1996).

O papel das práticas silvícolas na gestão dos recursos hídricos

O escoamento a jusante de áreas florestadas depende das condições climáticas locais, do tipo de plantaçāo (espécie florestal e densidade) e das práticas silvícolas (ANDRÉASSIAN, 2004; VAN DIJK e KEENAN, 2007; LIMA, 2010; FERRAZ *et al.*, 2013; JUCKER RIVA *et al.*, 2018).

Em bacias florestadas com eucalipto o escoamento sofre alterações ao longo do seu ciclo de crescimento. Diversos estudos referem aumentos do escoamento no momento do corte de exploração florestal e na rearborização, nomeadamente por diminuição da evapotranspiração local (SHARDA *et al.*, 1998; VERTESSY, 2000; LIMA, 2010; FERRAZ *et al.*, 2013; ALMEIDA *et al.*, 2016). Na região Centro de Portugal, DAVID *et al.* (1994) observaram maiores valores de escoamento nos primeiros 1-2 anos após cortes de exploração de plantações de *E. globulus* em regime de talhadia (aos 10-12 anos de idade do povoamento), à semelhança do observado em bacias do Sul da Índia (SHARDA *et al.*, 1998). Quando as plantações atingem estabilidade hidrológica funcional, 4 a 5 anos após a plantação ou 3 a 4 anos após corte, observa-se uma diminuição do escoamento (SHARDA *et al.*, 1998; FARLEY *et al.*, 2005; ELLISON *et al.*, 2012). Este facto parece estar associado, no caso da talhadia, a um rápido crescimento das varas por toica, aproveitando o sistema radicular já instalado, e ao aumento da taxa de interceção e de transpiração. O efeito dos cortes de exploração no escoamento depende também da área intervencionada. ALMEIDA *et al.* (2016) observaram maiores aumentos de escoamento após corte raso, relativamente ao corte parcial.

Vários autores defendem que é possível reduzir a evapotranspiração e estabilizar o escoamento da bacia florestada, quando se adota uma gestão em mosaico com diferentes ocupações do solo, recorrendo a diferentes espécies ou a povoamentos com diferentes idades (VERTESSY, 2000; FERRAZ *et al.*, 2013; GONÇALVES *et al.*, 2017). Acresce que a localização, o ordenamento da área, a existência de faixas de proteção das galerias ribeirinhas, o recurso a práticas de preparação do terreno mais conservativas, o ajuste da densidade de plantação à capacidade de suporte do local e às necessidades dos utilizadores a jusante, entre outros, permitem reduzir o impacte das florestas no escoamento ("água azul") ao nível da bacia (VAN DIJK e KEENAN, 2007; ALVES, 2012; FERRAZ *et al.*, 2013; LITTLE *et al.*, 2015; GONÇALVES *et al.*, 2017; HAKAMADA *et al.*, 2020).

Bacias florestadas são, geralmente, associadas a água de elevada qualidade face a outras ocupações como pastagens ou atividades agrícolas (BAILLIE e NEARY, 2015; NEARY *et al.*, 2016). Em florestas plantadas poderá haver, contudo, fases do ciclo de desenvolvimento do povoamento que, pela sua natureza, poderão levar a alguma variação nas características da água. Neste âmbito, BAILLIE e NEARY (2015) numa revisão sobre a qualidade da água em florestas plantadas na Nova Zelândia, sustentam a elevada qualidade da água ao longo de grande parte do ciclo de desenvolvimento dos povoamentos havendo possibilidade de alguma perturbação na fase do corte. Também RODRIGUES *et al.* (2019) avaliaram a qualidade da água em quatro bacias experimentais florestadas com eucalipto no sudeste do Brasil no momento do corte e concluíram que a exploração teve um efeito parcial e momentâneo no aumento de sólidos em suspensão da água embora sem comprometer a sua qualidade. Em linha com outros trabalhos, ambos salientam a influência determinante de inúmeros fatores na qualidade da água, tais como as condições locais, histórico de ocupação da área, ordenamento do território e práticas silvícolas adotadas.

As plantações de eucalipto e os desafios em hidrologia florestal

A interação entre florestas e água em particular das plantações florestais varia com a litologia, tipologia de solo, geomorfologia, condições climáticas, existência de gestão florestal e interações entre componentes (DRESEL *et al.*, 2018). Independentemente da espécie considera-se que há maior evapotranspiração e menor escoamento a nível regional nas florestas, face a outras ocupações como pastagens (BOSCH e HEWLETT, 1982; ZHANG *et al.*, 2001; ELLISON *et al.*, 2012), principalmente quando se trata de plantações florestais intensivas. O balanço hídrico deve, no entanto, ser aferido regionalmente, não podendo os resultados de estudos realizados a nível da bacia hidrográfica em países como Brasil e Austrália serem extrapolados para Portugal.

Pensar nas florestas, e em particular nas de produção, apenas sob a perspetiva da utilização de água, excluindo a contribuição na regulação climática e no regime de precipitação à macroescala, além de outros serviços do ecossistema que estas providenciam como o sequestro de carbono, é menorizar o papel das florestas plantadas, como os eucaliptais, nos processos ambientais regionais e globais (ELLISON *et al.*, 2012). É importante que os decisores possam conhecer o valor integral dos serviços gerados por estes ecossistemas (ELLISON *et al.*, 2012, 2017).

A comunidade científica tem vindo a desenvolver conhecimento sobre a relação entre o eucalipto e a água (ex. VAN DIJK e KEENAN, 2007; DVORAK, 2012; ELLISON *et al.*, 2012; ALMEIDA *et al.*, 2016). Em Portugal, o número de estudos de hidrologia em bacias florestadas com eucalipto é ainda limitado (ex. DAVID *et al.*, 1994, 2007; BOULET *et al.*, 2015; BARREIROS, 2018). Seria relevante: (i) desenvolver novos conhecimentos quanto à interação entre os recursos hídricos e plantações florestais, considerando as atuais práticas silvícolas; (ii) contribuir para a visão integrada do papel das florestas plantadas no balanço hídrico e no ciclo hidrológico, considerando as diversas escalas espaciais (local, regional, nacional e continental); (iii) estudar a proveniência e quantificar a água utilizada pelas plantações; e (iv) desenvolver e disponibilizar tecnologia e ferramentas de apoio à decisão, visando compatibilizar a produtividade florestal com a gestão dos recursos hídricos. Acresce que apenas um número reduzido de estudos incluem a monitorização de aquíferos (DRESEL *et al.*, 2018). No entanto, em diversos casos (ex. DAVID *et al.*, 1994; SIKKA *et al.*, 2003) a separação das componentes lentas e rápidas do escoamento permite uma inferência indireta sobre os efeitos da vegetação na recarga subterrânea.

A monitorização hidrológica permite avaliar o impacte da gestão florestal na quantidade e qualidade dos recursos hídricos a nível regional e providencia dados para a melhoria contínua das práticas silvícolas mais impactantes (como a preparação do terreno e da rede de caminhos, a definição da densidade de

plantação e a seleção de varas). A instrumentação de bacias experimentais com estações hidrométricas (para medição do caudal/escoamento - Figura 5) e meteorológicas, complementadas com medições da interceção, humidade do solo e evapotranspiração, permitem quantificar os parâmetros da equação do balanço hídrico e acompanhar a dinâmica do recurso ao longo do desenvolvimento do eucaliptal, numa mesma rotação e em diferentes rotações.

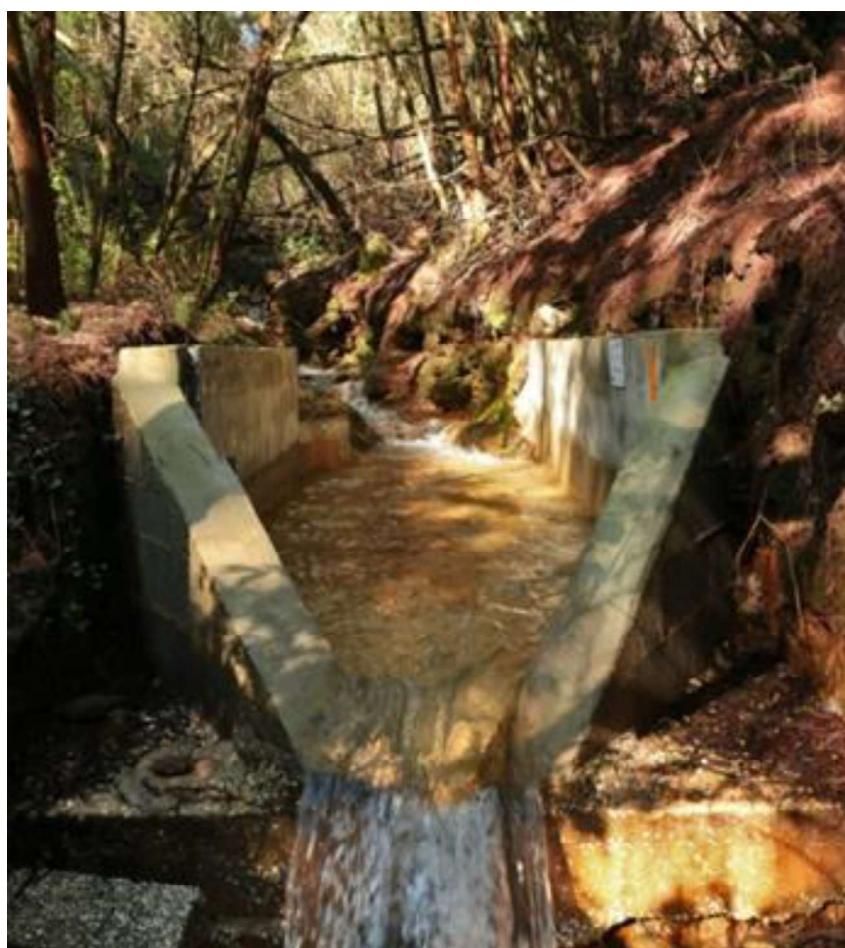


Figura 5 – Infraestrutura hidráulica "H-flume" utilizada para avaliação de caudal e outras respostas hidrológicas ao nível de uma bacia hidrográfica experimental (fonte: RAIZ).

Tal monitorização pode passar por considerar duas bacias similares, exceto no fator de interesse ("método dos pares de bacias") ou considerar uma única

bacia cujas condições relativamente ao fator de interesse difiram ao longo do tempo ("antes-*versus*-depois"). Tendo em conta que os efeitos hidrológicos variam ao longo do tempo, inclusive devido à pronunciada variação interanual nas condições meteorológicas Mediterrânicas, os estudos de bacias experimentais requerem programas de monitorização plurianuais. Os dados que resultam destes programas são fundamentais para a modelação hidrológica e para a inferência sobre os processos e recursos hídricos expetáveis a curto e a médio-longo prazo. Um modelo hidrológico como *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) simula os principais processos hidrológicos a nível da bacia, incluindo a estimativa de caudal, e permite prever os efeitos de diferentes práticas de gestão silvícola e de diferentes cenários climáticos (SERPA et al., 2015). Estes são temas de interesse para a investigação em hidrologia florestal e que estão em linha com a SIRA para 2030 (*Strategic Research and Innovation Agenda of the European Forest-Based Sector*), que complementa esta abordagem com a necessidade de se continuar a desenvolver conhecimento sobre o contributo das florestas nos padrões de precipitação à escala regional e continental.

Agradecimentos

O coautor Jacob Keizer gostaria de agradecer o apoio provido pelo FEDER e/ou o OE, através do Programa Operacional Portugal 2020 (COMPETE2020) e do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e/ou a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT/MCETS), no âmbito dos projetos UID/AMB/50017/2019 (CESAM) e POCI-01-0145-FEDER-031573/PTDC/ASP-SIL/31573 ("WAFLE - Water footprint profile assessment of forests - the case of eucalypt"), bem como do contrato de pós-doutoramento FCT-IF/01465/2015.

Bibliografia consultada

- ALMEIDA, A.C., SMETHURST, P.J., SIGGINS, A., CAVALCANTE, R.B.L., BORGES, N., 2016. Quantifying the effects of Eucalyptus plantations and management on water resources at plot and catchment scales. *Hydrological Processes* **30**: 4687- 4703.
- ALVES, A.M., PEREIRA, J.S., CORREIA, A.V., 2012. "Silvicultura - a gestão dos ecossistemas florestais". Edição Fundação Calouste Gulbenkian.
- ANDRÉASSIAN, V., 2004. Water and forests: from historical controversy to scientific debate. *Journal of Hydrology* **291**: 1-27.
- BAILLIE, B.R., NEARY, D.G., 2015. Water quality in New Zealand's planted forests: A review. *New Zealand Journal of Forestry Science* **45**: 7.
- BARREIROS, M.M.S., 2018. *Florestas e água: Uma revisão crítica da componente "água verde" no conceito Water Footprint Network (WFN) para o papel*. Tese de Mestrado, ISA, Lisboa. 68 pp.
- BOSCH, J.M., HEWLETT, J.D., 1982. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology* **55**: 3-23.
- BOULET, A.K., PRATS S.A., MALVAR, M.C., GONZÁLEZ-PELAYO, O., COELHO, C.O.A., FERREIRA, A.J.D., KEIZER, J.J., 2015. Surface and subsurface flow in eucalyptus plantations in north-central Portugal. *Journal of Hydrology and Hydromechanics* **63**(3): 193-200.
- BUCKLEY, T.N., MOTT, K.A., 2013. Modelling stomatal conductance in response to environmental factors. *Plant Cell Environment* **36**: 1691-1699.
- CHAVES, M.M., PEREIRA, J.S., OSÓRIO, J., 2004. Water use efficiency and photosynthesis in: BACON M. (Ed.) Water Use Efficiency in Plant Biology pp 42-74. London: Blackwell Publishing.
- CHOAT, B., JANSEN, S., BRODRIBB, T.J., COCHARD, H., DELZON, S., BHASKAR, R., BUCCI, S.J., FIELD, T.S., GLEASON, S.M., HACKE, U.G., JACOBSEN, A.L., LENZ, F., MAHERALI, H., MARTÍNEZ-VILALTA, J., MAYR, S., MENCUCCINI, M., MITCHELL, P.J., NARDINI, A., PITTERMANN, J., PRATT, R.B., SPERRY, J.S., WESTOBY, M., WRIGHT, I.J., ZANNE, A.E., 2012. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. *Nature* **491**: 752-755.
- DAVID, J.S., BELLOT, J., BIROT, Y., DAVID, T.S., 2011. Water fluxes in forests in: BIROT, Y., GRACIA, C., PALAHI, M. (Eds.) Water for forests and for people in the Mediterranean region - A challenging balance. What Science Can Tell Us 1. pp. 37-42. Joensuu: European Forest Institute.

- DAVID, J.S., DAVID, T.S., VALENTE, F., 2007. *O eucaliptal e os recursos hídricos* in: ALVES A.M., PEREIRA J.S., SILVA J. M. N. (Eds.), "O Eucaliptal em Portugal. Impactes Ambientais e Investigação Científica". Instituto Superior de Agronomia, ISAPress, Lisboa.
- DAVID, J.S., HENRIQUES, M.O., DAVID, T.S., TOMÉ, J., LEDGER, D.C., 1994. Clearcutting effects on streamflow in coppiced *Eucalyptus globulus* stands in Portugal. *Journal of Hydrology* **162**: 143-154.
- DAVID, J.S., VALENTE, F., GASH, J.H.C., 2005. *Evaporation of intercepted rainfall*. In: Anderson, M.G. (Ed.), Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK, (Chapter 43), pp. 627-634.
- DAVID, T.S., FERREIRA, M.I., DAVID, J.S., PEREIRA, J.S., 1997. Transpiration from a mature *Eucalyptus globulus* plantation in Portugal during a spring-summer period of progressively higher water deficit. *Oecologia* **110**: 153-159.
- DAVID, T.S., PINTO, C.A., NADEZHDINA, N., DAVID, J.S., 2016. Water and forests in the Mediterranean hot climate zone: a review based on a hydraulic interpretation of tree functioning. *Forest Systems* **25**(2): eR02.
- DAVIDSON, J., 1993. Ecological aspects of *Eucalyptus* plantations. *Proceedings of the regional expert consultation on Eucalyptus* **1**: 35-72 <http://www.fao.org/docrep/005/ac777e/ac777e06.htm>.
- DRESEL, P.E., DEAN, J.F., PERVEEN, F., WEBB, J.A., HEKMEIJER, P., ADELANA, S.M., DALY, E., 2018. Effect of *Eucalyptus* plantations, geology, and precipitation variability on water resources in upland intermittent catchments. *Journal of Hydrology* **564**: 723-739.
- DVORAK, W.S., 2012. Water use in plantations of eucalypts and pines: a discussion paper from a tree breeding perspective. *International Forestry Review* **14**(1): 110-119.
- ELLISON, D., FUTTER, M.N., BISHOP, K., 2012. On the forest cover-water yield debate: from demand- to supply-side thinking. *Global Change Biology* **18**: 806-820.
- ELLISON, D., MORRIS, C.E., LOCATELLI, B., SHEIL, D., COHEN, J., MURDIYARSO, D., GUTIERREZ, V., VAN NOORDWIJK, M., CREED, I.F., POKORNY, J., GAVEAU, D., SPRACKLEN, D.V., TOBELLA, A.B., ILSTEDT, U., TEULING, A.J., GEBREHIWOT, S.G., SANDS, D.C., MUYS, B., VERBIST, B., SPRINGGAY, E., SUGANDI, Y., SULLIVAN, C.A., 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change* **43**: 51-61.
- FAO, UNEP, 2020. *The State of the World's Forests 2020*. Forests, biodiversity and people. Rome.
- FARLEY, K.A., JOBBÁGY, E.G., JACKSON, R.B., 2005. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* **11**: 1565-1576.
- FERRAZ, S.F.B., LIMA, W.P., RODRIGUES, C.B., 2013. Managing forest plantation landscapes for water conservation. *Forest Ecology and Management* **301**: 58-66.

- FERREIRA, A.J.D., 1998. Consequências hidrológicas e pedológicas das mudanças em áreas florestais. *Territorium* (5): 63-72.
- FIBRIA, 2016. Produção florestal e uso da água. Brasil.
- GONÇALVES, J.L.M., ALVARES, C.A., ROCHA, J.H.T., BRANDANI, C.B., HAKAMADA, R., 2017. Eucalypt plantation management in regions with water stress. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* pp. 1-15.
- HAKAMADA, R.E., HUBBARD, R.M., MOREIRA, G.G., STAPE, J.L., CAMPOE, O., DE BARROS FERRAZ, S.F., 2020. Influence of stand density on growth and water use efficiency in Eucalyptus clones. *Forest Ecology and Management* **466**: 118-125.
- HESSLEROVÁ, P., POKORNÝ, J., BROM, J., REJŠKOVÁ-PROCHÁZKOVÁ, A., 2013. Daily dynamics of radiation surface temperature of different land cover types in a temperate cultural landscape: consequences for the local climate. *Ecological Engineering* **54**: 145-154.
- HEWLETT, J.D., 1982. *Principles of Forest Hydrology*. Athens: The University of Georgia Press.
- JACKSON, R.B., JOBBÁGY, E.B., AVISSAR, R., ROY, S.B., BARRETT, D.J., COOK, W.C., FARLEY, K.A., LE MAITRE, D.C., MCCARL, B.A., MURRAY, B.C., 2005. Trading water for carbon and with biological carbon sequestration. *Science* **310**: 1944-1947.
- JASECHKO, S., SHARP, Z.D., GIBSON, J.J., BIRKS, S.J., YI, Y., FAWCETT, P.J., 2013. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration. *Nature* **496**: 347-350.
- JUCKER RIVA, M., BAEZA, J., BAUTISTA, S., CHRISTOFOROU, M., DALIAKOPoulos, I.N., HADJIMITSIS, D., KEIZER, J.J., LINIGER, H., QUARANTA, G., RIBEIRO, C., SALVIA, R., TSANIS, I.K., URGEGHE, A.M., VALDECANTOS, A., SCHWILCH, G., 2018. How does land management contribute to the resilience of Mediterranean forests and rangelands? A participatory assessment. *Land Degradation Development* **29**: 3721-3735.
- LIMA, W.P., 2010. A silvicultura e a água: ciência, dogmas, desafios. *Cadernos do Diálogo* - Volume 01. Rio de Janeiro, 64 pp.
- LITTLE, C., CUEVAS, J.G., LARA, A., PINO, M., SCHOENHOLTZ, S., 2015. Buffer effects of streamside native forests on water provision in watersheds dominated by exotic forest plantations. *Ecohydrology* **8**: 1205-1217.
- LLORENS, P., DOMINGO, F., 2007. Rainfall partitioning by vegetation under mediterranean conditions. A review of studies in Europe. *Journal of Hydrology* **335**: 37-54.
- MANZONI, S., VICO, G., KATUL, G., PALMROTH, S., JACKSON, R.B., PORPORATO, A., 2013. Hydraulic limits on maximum plant transpiration and the origin of the safety-efficiency tradeoff. *New Phytologist* **198**: 169-178.

- MOREAUX, V., O'GRADY, A.P., NGUYEN-THE, N., LOUSTAU, D., 2013. Water use of young maritime pine and Eucalyptus stands in response to climatic drying in south-western France. *Plant Ecology & Diversity* **6**: 57-71.
- NEARY, D.G., 2016. Long-Term Forest Paired Catchment Studies: What Do They Tell Us That Landscape-Level Monitoring Does Not? *Forests* **7**: 164.
- PEÑUELAS, J., SARDANS, J., FILELLA, I., ESTIARTE, M., LLUSIÀ, J., OGAYA, R., CARNICER, J., BARTRONS, M., RIVAS-UBACH, A., GRAU, O., PEGUERO, G., MARGALEF, O., PLA-RABÉS, S., STEFANESCU, C., ASENSIO, D., PREECE, C., LIU, L., VERGER, A., BARBETA, A., ACHOTEGUI-CASTELLS, A., GARGALLO-GARRIGA, A., SPERLICH, D., FARRÉ-ARMENGOL, G., FERNÁNDEZ-MARTÍNEZ, M., LIU, D., ZHANG, C., URBINA, I., CAMINO-SERRANO, M., VIVES-INGLA, M., STOCKER, B.D., BALZAROLO, M., GUERRIERI, R., PEAUCELLE, M., MARAÑÓN-JIMÉNEZ, S., BÓRNEZ-MEJÍAS, K., MU, Z., DESCALS, A., CASTELLANOS, A., TERRADAS, J., 2017. Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services. *Forests* **8**: 463.
- PEREIRA, J.S., CHAVES, M.M., CARVALHO, P.O., CALDEIRA, M.C., TOMÉ, J., 1994. *Carbon assimilation, growth and nitrogen supply in Eucalyptus globulus plants* in: ROY, J., GRANIER, E. (Eds.), Whole-Plant Perspectives of Carbon-Nitrogen Interactions. The Netherlands: SPB Publish.
- PEREIRA, J.S., CHAVES, M.M., FONSECA, F., ARAÚJO, M.C., TORRES, F., 1992. Photosynthetic capacity of leaves of *Eucalyptus globulus* (Labill.) growing in the field with different nutrient and water availabilities. *Tree physiology* **11**: 381-389.
- PEREIRA, J.S., MATEUS, J.A., AIRES, L.M., PITA, G., PIO, C., DAVID, J.S., ANDRADE, V., BANZA, J., DAVID, T.S., PAÇO, T.A., RODRIGUES, A., 2007. Net ecosystem carbon exchange in three contrasting Mediterranean ecosystems – the effect of drought. *Biogeosciences* **4**: 791-802.
- REICHERT, J.M., RODRIGUES, M.F., PELÁEZ, J.J.Z., LANZA, R., MINELLA, J.P.G., ARNOLD, J.G., CAVALCANTE, R.B.L., 2017. Water balance in paired watersheds with eucalyptus and degraded grassland in Pampa biome. *Agricultural and Forest Meteorology* **237-238**: 282-295.
- RODRIGUES, C.B., TANIWAKI, R.H., LANE, P., LIMA, W.P., FERRAZ, S.F.B., 2019. Eucalyptus Short-Rotation Management Effects on Nutrient and Sediments in Subtropical Streams. *Forests* **10**: 519.
- SCHIMEL, D.S., BRASWELL, B.H., MCKEOWN, R., OJIMA, D.S., PARTON, W.J., PULLIAM, W., 1996. Climate and nitrogen controls on the geography and timescales of terrestrial biogeochemical cycling. *Global Biogeochemical Cycles* **10**(4): 677-692.
- SCHLESINGER, W.H., JASECHKO, S., 2014. Transpiration in the global water cycle. *Agricultural and Forest Meteorology* **189**(-190): 115-117.

- SERPA, D., NUNES, J.P., SANTOS, J., SAMPAIO, E., JACINTO, R., VEIGA, S., LIMA, J.C., MOREIRA, M., CORTE-REAL, J., KEIZER, J.J., ABRANTES, N., 2015. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. *Science of the Total Environment* **538**: 64-77.
- SHARDA, V.N., SAMRAJ, P., SAMRA, J.S., LAKSHMANAN, V., 1998. Hydrological behaviour of first generation coppiced bluegum plantations in the Nilgiri sub-watersheds. *Journal of Hydrology* **211**(1-4): 50-60.
- SHEIL, D., MURDIYARSO, D., 2009. How forests attract rain: an examination of a new hypothesis. *BioScience* **59**: 341-347.
- SIKKA, A.K., SAMRA, J.S., SHARDA, V.N., SAMRAJ, P., LAKSMANAN, V., 2003. Low flow and high flow responses to converting natural grassland into bluegum (*Eucalyptus globulus*) in Nilgiri watersheds of South India. *Journal of Hydrology* **270**: 12-26.
- SILVEIRA, L., GAMAZO, P., ALONSO, J., MARTÍNEZ, L., 2016. Effects of afforestation on groundwater recharge and water budgets in the western region of Uruguay. *Hydrological Processes* **30**: 3596-3608.
- SOARES, P., TOMÉ, M., PEREIRA, J.S., 2007. *A produtividade do eucalipto* in: ALVES A.M., PEREIRA J.S., SILVA J.M.N. (Eds.), "O Eucalipto em Portugal. Impactos Ambientais e Investigação Científica". Instituto Superior de Agronomia, ISAPress, Lisboa.
- STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G., FONSECA, S., LOOS, R.A., TAKAHASHI, E.N., SILVA, C.R., SILVA, S.R., HAKAMADA, R.E., FERREIRA, J.M.A., LIMA, A.M.N., GAVA, J.L., LEITE, F.P., ANDRADE, H.B., ALVES, J.M., SILVA, G.G.C., AZEVEDO, M.R., 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management* **259**(9): 1684-1694.
- TAIZ, L., ZEIGER, E., 2006. *Plant physiology*. 4 ed. Massachusetts: Sinauer Associates, Inc. Publishers, 764 pp.
- VALENTE, F., DAVID, J., GASH, J., 1997. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology* **190**: 141-162.
- VAN DER ENT, R.J., SAVENIJE, H.H., SCHAEFLI, B., STEELE-DUNNE, S.C., 2010. Origin and fate of atmospheric moisture over continents. *Water Resources Research* **46**.
- VAN DIJK, A.I.J.M., KEENAN, R.J., 2007. Planted forests and water in perspective. *Forest Ecology and Management* **251**: 1-9.
- VERTESSY, R., 2000. *Impacts of Plantation Forestry on Catchment Runoff*. In: SADANANDAN NAMBIAR, E.K., BROWN, A.G. (Eds) *Plantations, Farm Forestry and Water*. Proceedings of a national workshop, Melbourne. RIRDC Publication No. 01/20, pp 9-19.

- WARD, R.C., ROBINSON, M., 2000. *Principles of Hydrology* (4.^a edição). Londres: McGraw-Hill.
- WHITE, D.A., BEADLE, C.L., SANDS, P.J., WORLEDGE, D., HONEYSETT, J.L., 1999. Quantifying the effect of cumulative water stress on stomatal conductance of *Eucalyptus globulus* and *E. nitens*: a phenomenological approach. *Australian Journal of Plant Physiology* **26**: 17-27.
- WHITEHEAD, D., BEADLE, C.L., 2004. Physiological regulation of productivity and water use in Eucalyptus: a review. *Forest Ecology and Management* **193**: 113-140.
- ZHANG, L., DAWES, W.R., WALKER, G.R., 2001. Response of mean annual evapotranspiration to vegetation. *Water Resources Research* **37**(3): 701-70