

**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

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 estomas 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, conseqüentemente, 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).

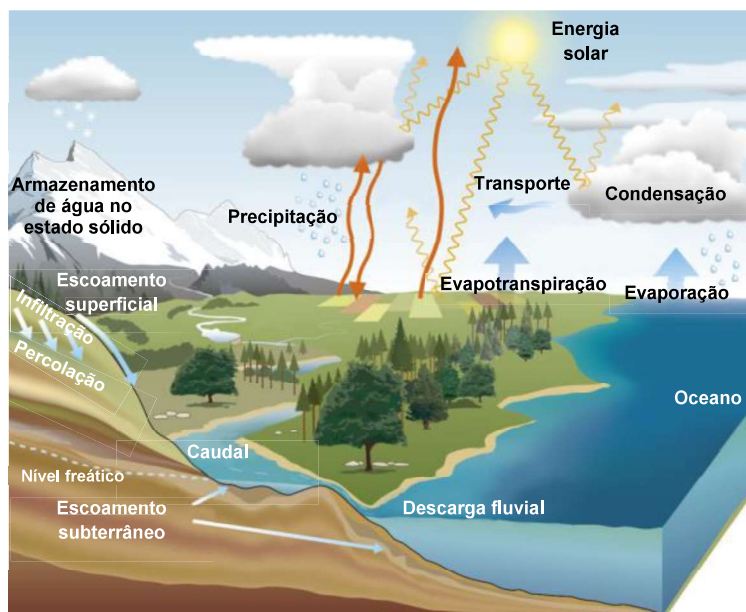


Figura 1 - Esquema simplificado do ciclo da água (adaptado de <https://www.metoffice.gov.uk>).

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, déficit 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 estomas.

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), indiciando por isso que grande parte da precipitação é consumida pela evapotranspiração.

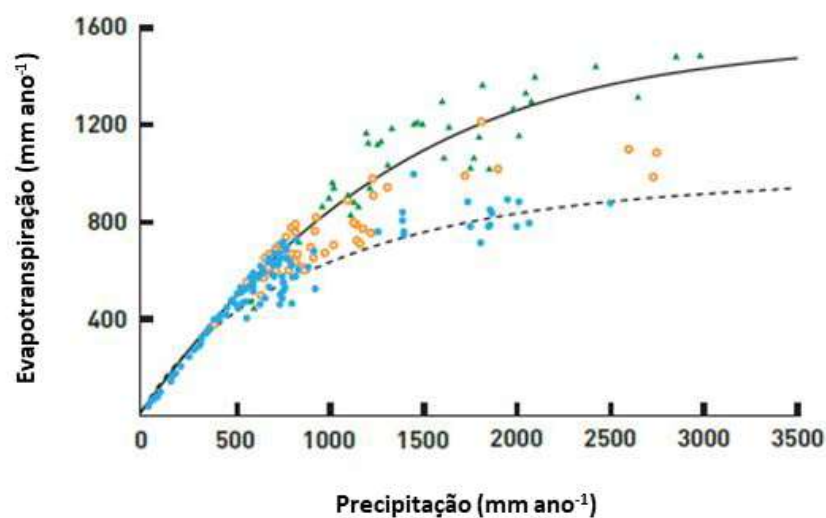


Figura 2 – Relação estabelecida por ZHANG *et al.* (2001) entre evapotranspiração e precipitação: floresta – verde, sistema misto – laranja e pastagem – azul.

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).

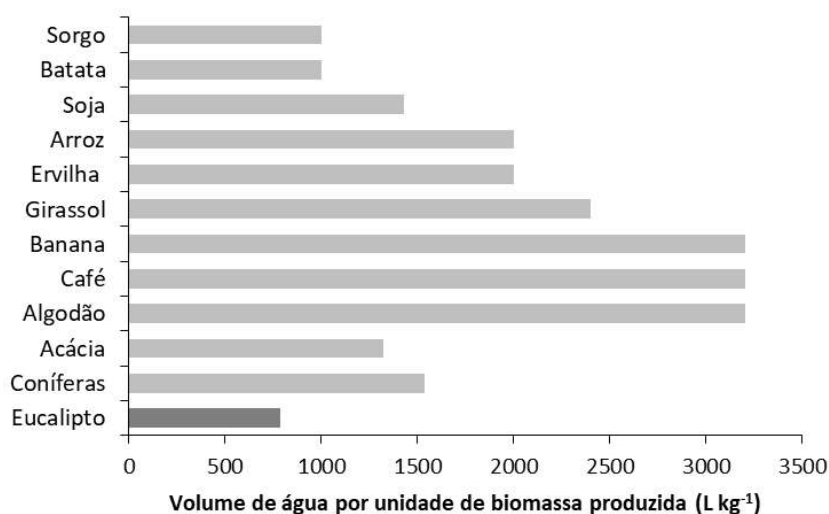


Figura 3 - Quantidade de água utilizada por unidade de biomassa produzida para diferentes culturas (adaptado de DAVIDSON, 1993).

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.

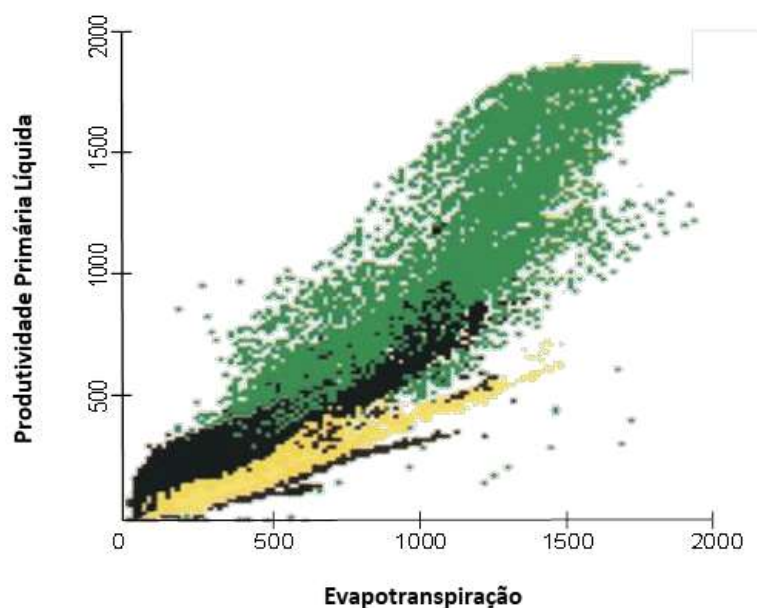


Figura 4 - Relação entre evapotranspiração e produtividade em sistemas florestais (a verde), pastagens (a amarelo) e sistemas mistos (a preto) ($R^2=0,86$) (SCHIMEL *et al.*, 1996).

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 plantação (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 toíça, 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 perspectiva 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 minorizar 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 impacto 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.

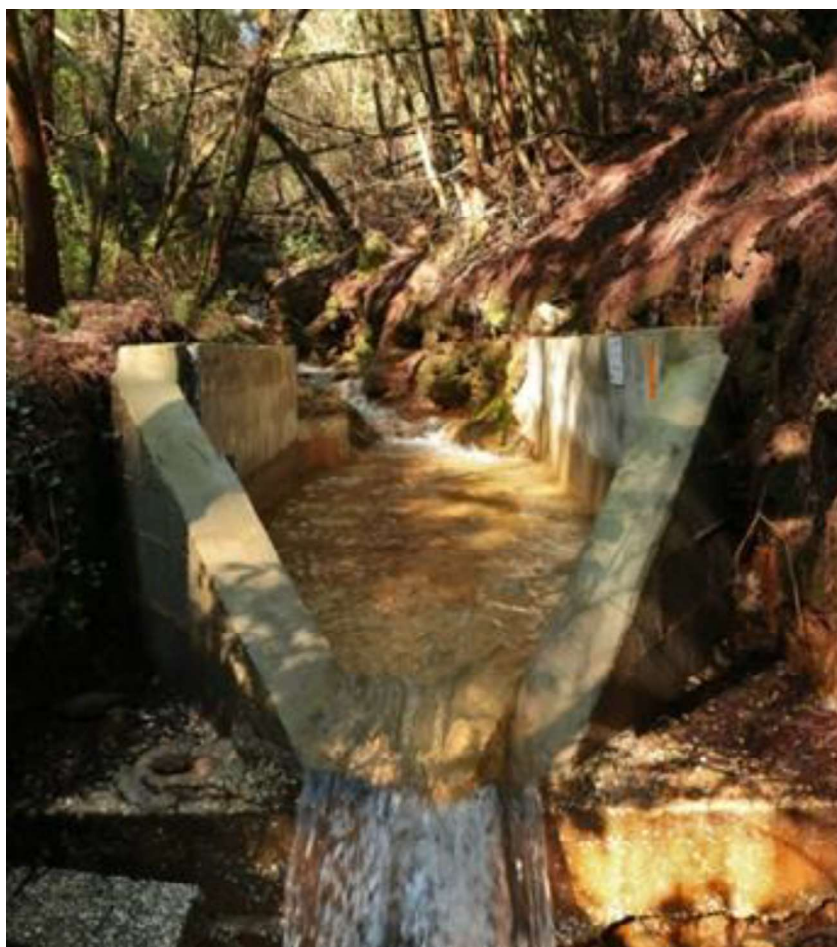


Figura 5 – Infraestrutura hidráulica "H-flume" utilizada para avaliação de caudal e outras respostas hidrológicas ao nível de uma bacia hidrográfica experimental (fonte: RAIZ).

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., LENS, 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., PALAHL, 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., LAKSHMANAN, 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. Impactes 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