ISSN 2764-3808
V. 25, Nº 47 | DEZEMBRO 2022

SÉRIE TÉCNICA IPEF

Duas décadas de cooperação científica CIRAD-ESALQ-IPEF

Anais de comemoração

Contribuição para a compreensão do funcionamento das plantações florestais tropicais de rápido crescimento

Jean-Paul Laclau
José Leonardo de Moraes Gonçalves
José Otávio Brito

IPEF
INSTITUTO DE PESQUISAS E ESTUDOS FLORESTAIS

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 1 04/05/2023 17:18:49

Série Técnica IPEF
n. 47, p. 29-35, Dezembro de 2022

Capítulo 6
Modelando o balanço de radiação e os ciclos de carbono e água nas plantações de eucalipto

le Maire Guerric, Attia Ahmed, Bouillet Jean-Pierre, Campoe Camargo Otávio, Christina Mathias, Cornut Ivan, Cuadra Santiago, Laclau Jean-Paul, Guillemot Joannès, Marsden Claire, Nouvellon Yann, de Oliveira Ivanka Rosada, Stape José Luiz, Vezy Rémi

INTRODUÇÃO

O balanço de carbono, água e energia de um ecossistema florestal, ou seja, a quantificação de todos os estoques e fluxos entre os compartimentos constituintes do sistema, é o resultado de uma série de processos que envolvem diferentes domínios científicos, em diferentes escalas de espaço e tempo (Bohn et al. 2014; Landsberg and Sands 2010). Uma floresta é um sistema complexo, onde ocorre e interage um grande número de processos físicos, biológicos e bioquímicos, eles próprios possivelmente modificados por intervenções externas. Os modelos mecanicistas são ferramentas de pesquisa muito úteis e complementares à experimentação em muitos aspectos: **1) Compreensão:** ajudar a compreender observações por vezes incompletas ou difíceis de interpretar directamente; procurar e apresentar uma base mecanicista para as relações empíricas; orientar a experimentação e a investigação; integrar dados por vezes muito numerosos e que interagem; **2) Descrição:** O modelo permite sintetizar o conhecimento, dar prioridade a diferentes processos, criar ligações entre variáveis e ter em conta interacções e feedbacks, por vezes em diferentes campos de estudo; permite conceptualizar e partilhar conhecimento; quantificar variáveis que nem sempre são mensuráveis, mantendo os princípios físicos e as leis subjacentes. **3) Explorar:** Finalmente, quando o modelo tiver sido devidamente parametrizado e validado, pode ser usado para explorar quais parâmetros ou processos são os mais sensíveis; pode ser usado para realizar *em* experiências silicas, para testar hipóteses, ou para fazer previsões; pode ser uma ferramenta para ajudar na tomada de decisões. A previsão no sentido mais amplo é um importante propósito dos modelos mecanicistas, “compreender para prever”.

Nesse artigo, daremos alguns exemplos de trabalhos que têm sido realizados nas plantações de eucalipto no Brasil, graças à cooperação científica entre o IPEF e o CIRAD, com parceiros acadêmicos ou privados do setor florestal. Os três tópicos tratam da simulação da intercepção de radiação, o ciclo da água e o ciclo do carbono

MODELAGEM DA INTERCEPÇÃO DE RADIAÇÃO

AZUL entre clones

A produtividade do tronco nos ecossistemas florestais depende da quantidade de luz absorvida pelas árvores (APAR) e da eficienca do uso da luz (LUE), ou seja, da quantidade de madeira do tronco produzida por quantidade de luz absorvida. Nas plantações de eucalipto fertilizado do Brasil, espera-se que o crescimento seja fortemente limitado pela absorção de luz nos primeiros anos após o plantio, quando as árvores podem beneficiar de altos estoques de água do solo, recarregados após o corte do talhão anterior. Outros factores limitantes, tais como a falta de água ou de nutrientes são considerados de importância crescente após o encerramento do dossel, e são esperadas mudanças

nos padrões de alocação, mudando o LUE. O estudo das mudanças em APAR e LUE ao longo de uma rotação completa é fundamental para se obter uma visão dos mecanismos que impulsionam as variações inter e intra-genótipos da produtividade e da biomassa do caule no momento da colheita. Em le Maire et al. (2019), apresentamos um levantamento de produtividade de 6 anos, juntamente com modelagem de APAR e LUE de 16 genótipos de eucalipto de diversas espécies utilizadas em plantações comerciais e plantadas em 10 replicações aleatórias na Região de São Paulo, Brasil. MAESPA é um modelo tridimensional. Foi parametrizado em escala de árvores para cada árvore em cada parcela (um total de 16.000 árvores) usando medidas locais de propriedades foliares e dossel. Os resultados na escala da parcela mostraram que:

- LUE aumentou com a idade do suporte para todos os genótipos, de 0,15, na idade de 1 ano para 1,70 g MJ-1, aos 6 anos de idade em média;
- A absorção da luz foi um fator limitante importante durante o primeiro ano de crescimento (R2 entre APAR e biomassa do povoamento variando de 0,5 a 0,95), explicando a maior parte da variabilidade de crescimento inter e intra-genótipo;
- Na escala de rotação, a variabilidade da biomassa do tronco final entre genótipos foi, em geral, atribuível a outros factores que APAR;
- Differences em produções de madeira entre genótipos permaneceu durante toda a rotação;
- Os LUEs durante a segunda metade da rotação, em vez do crescimento inicial ou APAR, foi o principal fator explicando a biomassa do tronco na data da colheita.

LUE de uma plantação mista Eucalipto - Acacia

O modelo MAESTRA também foi utilizado para analisar o crescimento de uma plantação mista entre *Eucalyptus grandis* e *Acacia mangium* (le Maire et al. 2013). A idéia desta experiência é testar a complementaridade e/ou efeitos de facilitação entre espécies, já que a acácia é uma planta fixadora de nitrogênio. Um dos factores críticos nas plantações mistas é a partilha da luz. De facto, esta partilha de luz resulta numa diferença na fotossíntese, o que pode eventualmente levar a uma diferença no crescimento. A absorção de radiação depende de muitas características estruturais e ópticas das árvores: posição das árvores em relação aos seus vizinhos, índices foliares, ângulos foliares, propriedades ópticas das folhas, ramos e troncos, etc. Também é frequentemente impossível medir esta absorção ao nível da espécie e muito menos ao nível da árvore. Em um ensaio experimental, há também a questão dos efeitos de vizinhança entre tratamentos. A modelagem tridimensional pode ajudar a estimar a absorção de cada árvore e espécie dentro de uma experiência, e depois analisá-la como uma função do crescimento. O modelo MAESPA foi parametrizado utilizando numerosas medidas experimentais ao nível da folha ou da árvore em diferentes tratamentos. A radiação APAR de cada árvore do ensaio foi, portanto, calculada por MAESPA, para cada ano. Isto foi então relacionado com o crescimento anual medido das árvores, dando uma eficiência de uso leve para a produção de madeira do tronco (LUE). Nas plantações mistas, o LUE tanto do eucalipto como da acácia diminuiu no final da rotação, enquanto nas plantações puras era bastante estável. Este decréscimo é especialmente forte para as acácias mistas, com o LUE quase reduzida pela metade. Nas plantações mistas, esta diminuição do LUE explica a diminuição da produtividade enquanto o LAI total aumenta. Assim, embora o dossel absorva mais radiação, a produção é menor, já que outros fatores entram em jogo, como escassez de água ou mudanças de alocação, como mostrado nos papéis por Nouvellon et al. (2012) e Laclau et al. (2012).

MODELAGEM DO CICLO DA ÁGUA

Simulação na parcela do projeto Eucflux

O balanço hídrico de um povoamento de eucalipto no Brasil (sítio Eucflux) foi modelado com o modelo MAESPA. As medições da umidade do solo e da evapotranspiração por

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 30 04/05/2023 17:19:11

correlação não são suficientes para compreender o funcionamento do ecossistema como um todo, a evolução das medições da altura dos lençóis freáticos, o papel das raízes profundas, nem permitem um balanço hídrico completo. O trabalho de modelagem tem dado muitas respostas e levado a uma melhor compreensão do funcionamento da água nas plantações de eucaliptos. Em Christina et al. (2017) o modelo é primeiro testado nos fluxos de evapotranspiração medidos pela torre, no teor de água do solo até 10 metros e na altura do lençol freático. As simulações para os primeiros 5 anos após o plantio são apresentadas na Figura 1 abaixo. As conclusões são as seguintes foram obtidas a partir do modelo (Figura 1):

- A evaporação do solo contribui muito pouco para a evapotranspiração da parcela, exceto no início da rotação, quando os eucaliptos ainda são pequenos e a copa não está fechada
- As amostras de raízes são colhidas principalmente nos primeiros 2 metros: o sistema radicular "duplo", com uma alta densidade de raízes laterais superficiais usando água na estação chuvosa, e um número limitado, mas funcionalmente importante de raízes explorando o solo em profundidade e útil durante a estação seca (Canadell and Zedler 1995).
- No final da estação seca, quando o solo de superfície é seco, as raízes vão-se aprofundando progressivamente e permitem manter a produção bruta durante as estações secas, como se pode ver em outros trabalhos sobre ecossistemas tropicais (Alton 2014; Jackson et al. 1999; Oliveira et al. 2005)

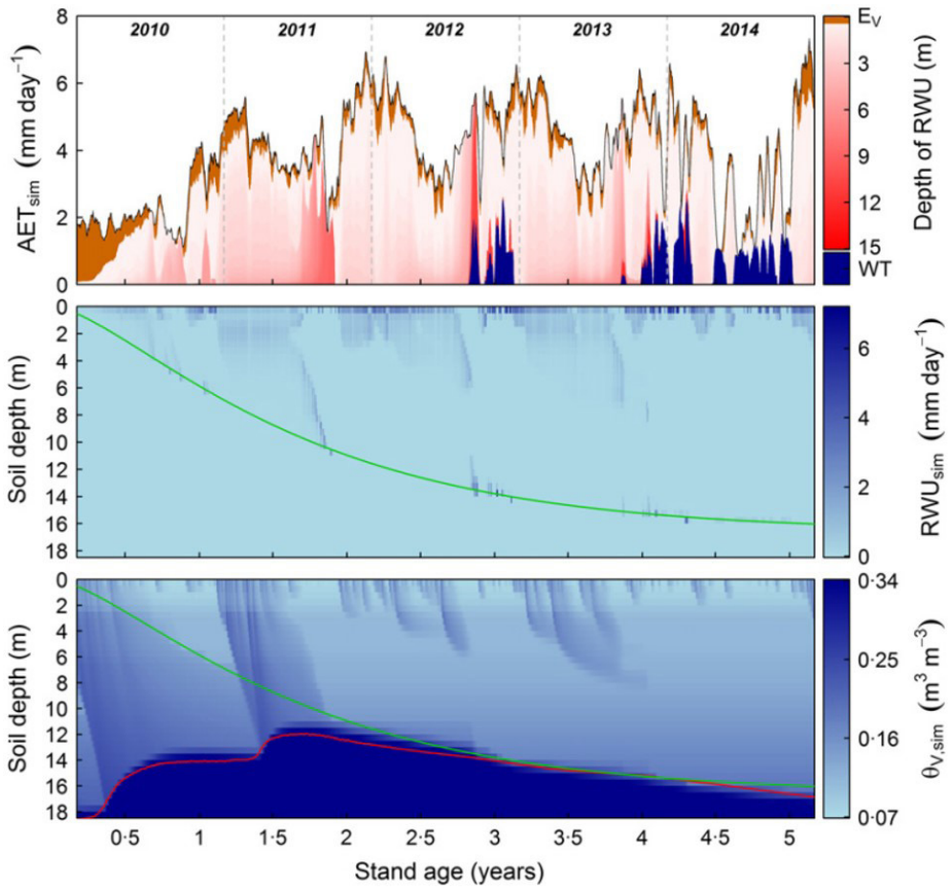

Figura 1. Resultado das simulações do balanço hídrico do MAESPA em Eucflux. AETsim é a evapotranspiração diária simulada (topo), RWUsim é a captação de água da raiz (meio), e θv, sim é o conteúdo de água do solo simulado (fundo). WT: lençol freático. Ev: evaporação do solo e da água na folhagem. A profundidade medida do lençol freático está em vermelho. A frente da raiz está em verde (extraido de Christina et al. 2017).

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 31 04/05/2023 17:19:11

- No ano 2, as raízes atingiram o lençol freático (12 m) e podem eventualmente extrair-se dele ou das suas proximidades
- Após 2 anos, as chuvas que se infiltram no solo são gradualmente absorvidas pelas raízes e nunca chegam a mais de 6 metros.
- A água da chuva já não chega ao lençol freático, que por isso diminui tanto sob o efeito da retirada das raízes como sob a sua própria dinâmica à escala da bacia hidrográfica (fluxo subsuperficial). A remoção de raízes garante o acesso à água na estação seca, mas não constitui uma grande quantidade de água transpirada.
- O lençol freático sobe 6 metros durante 1.5 anos após o plantio, pois neste momento os eucaliptos ocupam menos água (menos área foliar, menos área radicular e perfil do solo mais raso), o que já foi observado em vários outros trabalhos (Adelana et al. 2015; Dean et al. 2015; Manzione et al. 2014; Smethurst et al. 2015)
- O rápido crescimento do sistema radicular em profundidade permite uma tripla vantagem adaptativa do ponto de vista hídrico (Reich 2014): 1) poder alcançar progressivamente um estoque de água acumulada no solo durante o corte e durante a primeira estação chuvosa; 2) ter tempo para absorver o fluxo de água gravitacional ao longo do perfil neste solo arenoso com regime de chuvas fortes; 3) poder eventualmente alcançar o lençol freático
- O crescimento profundo das raízes precede em grande parte a escassez de água, sendo uma característica comum das espécies pioneiras ou precoces sucessionais (*E. Grandis* tem as características destas espécies (Tng et al. 2014)).
- Os balanços anuais de transpiração são altamente variáveis, dependendo principalmente da idade da parcela e da variabilidade da pluviosidade. Após 2 anos, a evapotranspiração é igual ou até superior à precipitação.

Simulação na parcela de exclusão da chuva, cruzada com uma omissão de K

Modelagem do ciclo da água foi feito em um estudo silvicultural sobre um clone de eucalipto no Brasil cruzando dois tratamentos, exclusão da chuva (30%) e fertilização com potássio (Battie-Laclau et al. 2014). Essa experiência foi criada, entre outras coisas, para ver até que ponto a fertilização com potássio poderia influenciar o funcionamento dos eucaliptos com stress hídrico. Neste estudo, os índices foliares foram medidos durante a rotação, e pareceu que as grandes diferenças de produtividade entre os tratamentos estavam estatisticamente correlacionadas com esses índices foliares. No entanto, a relação causal não é óbvia, pois muitos outros traços funcionais mudam entre os tratamentos: parâmetros fotossintéticos das folhas, ângulos das folhas, perfis radiculares, etc. O modelo MAESPA foi utilizado para descobrir quais parâmetros, e, portanto, quais funções, explicam as maiores diferenças de produtividade (Christina et al. 2015). Uma vez parametrizada com precisão para cada tratamento, MAESPA permite estimar variáveis como a radiação absorvida no gráfico (aPAR), a eficiência do uso da luz (LUE) e a fotossíntese bruta (GPP) para cada tratamento, e assim verificar se as diferenças na produção vêm apenas das diferenças na radiação absorvida (como se poderia pensar com as análises indiretas do LAI). Os resultados mostram que a exclusão da chuva e a fertilização modificam significativamente tanto aPAR como LUE. Com o modelo, foi possivel explicar com mais detalhes as diferenças entre tratamento: para cada variável aPAR, LUE e GPP, é possível ver qual o parâmetro (ou traço funcional) que mais explica as mudanças nestas variáveis em função dos tratamentos.

MODELAGEM DO CICLO DE CARBONO

Simulação do ciclo do carbono e crescimento da plantação

O modelo G'Day foi utilizado para simular espacialmente a produtividade da trama (Marsden et al. 2013). Esse trabalho consistiu em primeiro lugar na integração de novos processos no modelo G'Day, alguns dos quais são específicos dos eucaliptos (por exemplo, enraizamento profundo). Em seguida, o modelo foi parametrizado para simular o crescimento

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 32 04/05/2023 17:19:11

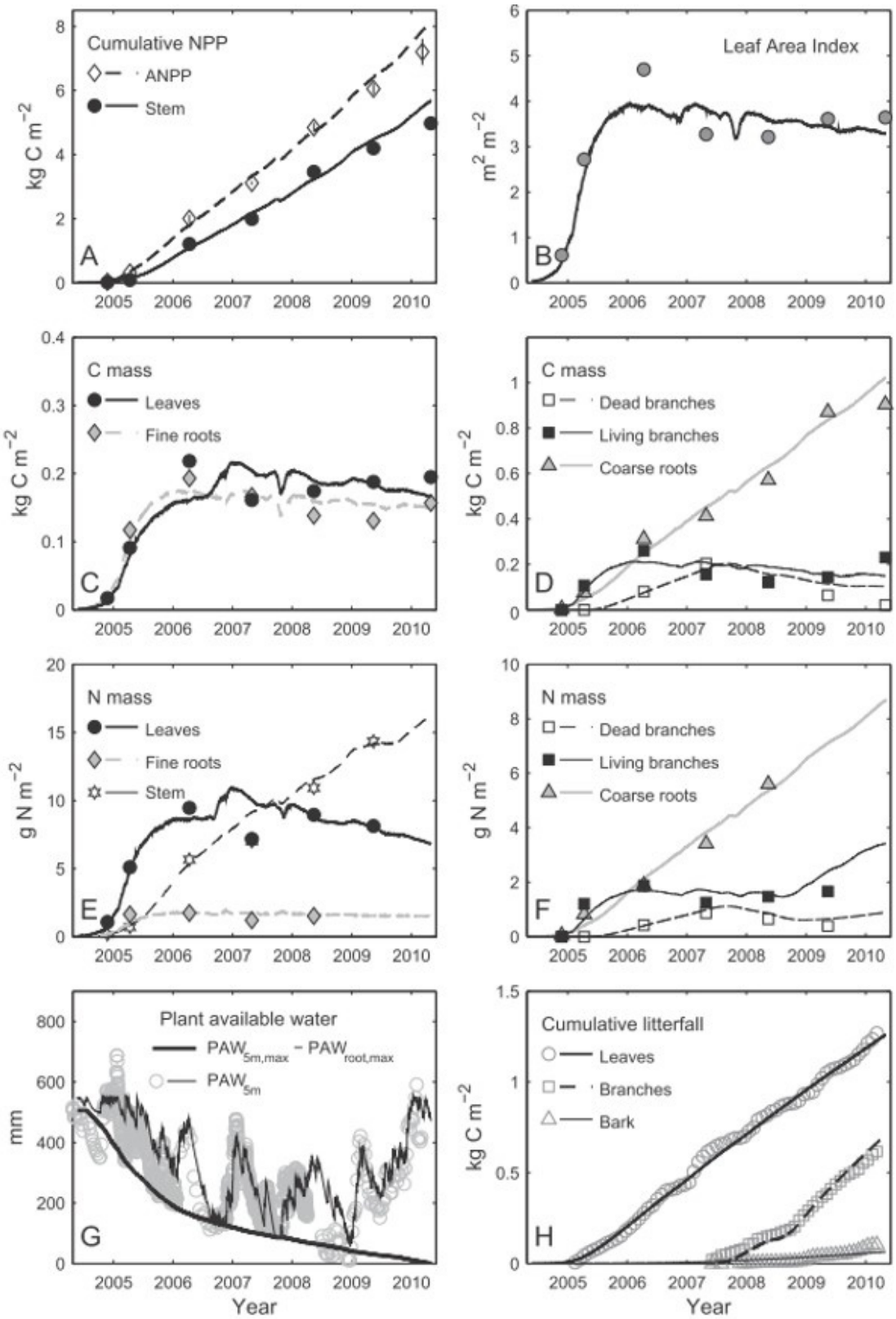

Figura 2. Comparação de simulações do modelo G'Day (linhas) e medidas (símbolos) em um terreno de eucalipto na estação Itatinga (São Paulo, Brasil). Adaptado de Marsden et al (2013)

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 33 04/05/2023 17:19:11

destas parcelas desde a sua data de plantio (Figura 2). Neste caso, o número de variáveis espaciais foi menor. Neste sistema, a idade da parcela é o primeiro critério que determina a variabilidade espacial do funcionamento do carbono e da água da plantação. Além disso, a simples consideração das propriedades locais do solo no ciclo da água explica mais de 85% da variabilidade espacial do crescimento do tronco com o modelo. Os resultados iniciais obtidos com G'Day mostraram que foi possivel forçar o índice de área foliar com medições via satélite para obter resultados satisfatórios (le Maire et al. 2010b). Após extenso trabalho no módulo de simulação do índice de área foliar, o modelo foi finalmente capaz de simular o índice de área foliar de forma mais eficiente, e assim não foi mais necessário forçar o índice de área foliar, aumentando assim sua genericidade.

Espacialização do modelo

A 'espacialização' dos fluxos e equilíbrios de carbono e água (e nutrientes) é uma demanda de aplicação importante, e um desafio científico. Em termos de aplicação, por exemplo na silvicultura, a integração do funcionamento específico de cada unidade de manejo para definir práticas adequadas está atualmente baseada principalmente na história da parcela e na experiência do silvicultor. A modelagem poderia permitir uma adaptação mais local das florestas. Outro exemplo é que as estimativas de emissões de gases de efeito estufa são altamente variáveis espacial e temporalmente na escala local, por exemplo, na escala de uma região administrativa. A estimativa dos potenciais de mitigação das emissões de gases de efeito estufa é necessária para a implementação de reformas e programas nacionais (por exemplo, o Brasil e o programa de "agricultura de baixo carbono"). A espacialização do modelo foi realizada no trabalho de Marsden et al. (2013), que mais tarde foi ampliada para uma escala muito maior (Attia et al. 2019). Neste último trabalho, foi realizada uma abordagem de calibração em várias escalas, com uma calibração fina num local instrumentado com numerosas medições (Eucflux), depois em dois locais intermediários onde são medidas algumas variáveis. Finalmente, foi feita uma calibração de alguns parâmetros associados aos genótipos em milhares de parcelas (27.500 ha). A conclusão foi que a calibração para cada genótipo, ou grupo de genótipos, é essencial. A consideração da variabilidade espacial do clima e dos solos também é importante.

CONCLUSÕES

O trabalho realizado na modelação de balanços energéticos, de carbono e de água cobriu diferentes domínios, em escalas espaciais que vão desde a árvore até à região e em escalas temporais que vão desde o dia até à rotação completa. Em geral, estes modelos foram baseados em numerosas experiências realizadas em vários programas conjuntos entre o CIRAD e o IPEF, com outras instituições de investigação e com empresas parceiras. A quantidade e qualidade dos dados adquiridos ou disponíveis através das empresas permitiu parametrizar, calibrar e testar os modelos em muitos processos, e em saídas mais integradas como a biomassa na colheita. É de salientar aqui que o facto de ter alguns locais altamente instrumentados com medições contínuas, combinados com redes de parcelas que permitem ter em conta a variabilidade espacial das plantações e que têm certas medições (menos numerosas), foi essencial no trabalho de espacialização dos modelos. Os modelos permitiram-nos compreender melhor o funcionamento hídrico e carbónico das plantações e complementar as medições. As perspectivas em termos de desenvolvimento de modelos dizem agora respeito à integração dos ciclos de nutrientes (Cornut et al. 2021). Em termos de utilização, o foco no sequestro de carbono e as possíveis alavancas para melhorá-lo são essenciais, especialmente no contexto das desejáveis perspectivas de neutralidade de carbono.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Adelana, S.M., Dresel, P.E., Hekmeijer, P., Zydor, H., Webb, J.A., Reynolds, M., & Ryan, M. (2015). A comparison of streamflow, salt and water balances in adjacent farmland and forest catchments in south-western Victoria, Australia. Hydrological Processes, 29, 1630-1643

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 34 04/05/2023 17:19:11

Alton, P.B. (2014). Reconciling simulations of seasonal carbon flux and soil water with observations using tap roots and hydraulic redistribution: A multi-biome FLUXNET study. Agricultural and Forest Meteorology, 198-199, 309-319

Attia, A., Nouvellon, Y., Cuadra, S., Cabral, O., Laclau, J.-P., Guillemot, J., Campoe, O., Stape, J.-L., Galdos, M., Lamparelli, R., & le Maire, G. (2019). Modelling carbon and water balance of Eucalyptus plantations at regional scale: Effect of climate, soil and genotypes. Forest Ecology and Management, 449, 117460

Battie-Laclau, P., Laclau, J.P., Domec, J.C., Christina, M., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., de Moraes Goncalves, J.L., e Moreira, R.M., Krusche, A.V., Bouvet, J.M., & Nouvellon, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in Eucalyptus grandis plantations. New Phytologist, 203, 401-413

Bohn, F.J., Frank, K., & Huth, A. (2014). Of climate and its resulting tree growth: Simulating the productivity of temperate forests. Ecological Modelling, 278, 9-17

Canadell, J., & Zedler, P.H. (1995). Underground Structures of Woody Plants in Mediterranean Ecosystems of Australia, California, and Chile. In M.T.K. Arroyo, P.H. Zedler, & M.D. Fox (Eds.), Ecology and Biogeography of Mediterranean Ecosystems in Chile, California, and Australia (pp. 177-210). New York, NY: Springer New York

Christina, M., Le Maire, G., Battie-Laclau, P., Nouvellon, Y., Bouillet, J.-P., Jourdan, C., de Moraes Gonçalves, José L., & Laclau, J.-P. (2015). Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations. Global Change Biology, 21, 2022-2039

Christina, M., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Lambais, G.R., & le Maire, G. (2017). Importance of deep water uptake in tropical eucalypt forest. Functional Ecology, 31, 509-519

Cornut, I., Le Maire, G., Laclau, J.-P., Guillemot, J., Mareschal, L., Nouvellon, Y., & Delpierre, N. (2021). Potassium limitation of wood productivity: A review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by Eucalyptus plantations. Forest Ecology and Management, 494, 119275

Dean, J.F., Webb, J.A., Jacobsen, G.E., Chisari, R., & Dresel, P.E. (2015). A groundwater recharge perspective on locating tree plantations within low-rainfall catchments to limit water resource losses. Hydrol. Earth Syst. Sci., 19, 1107-1123

Jackson, P.C., Meinzer, F.C., Bustamante, M., Goldstein, G., Franco, A., Rundel, P.W., Caldas, L., Igler, E., & Causin, F. (1999). Partitioning of soil water among tree species in a Brazilian Cerrado ecosystem. Tree Physiology, 19, 717-724

Laclau, J.-P., Nouvellon, Y., Reine, C., Gonçalves, J.d., Krushe, A., Jourdan, C., le Maire, G., & Bouillet, J.-P. (2012). Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. Oecologia, 1-11

Landsberg, J.J., & Sands, P. (2010). Physiological ecology of forest production: principles, processes and models. Academic Press

le Maire, G., Guillemot, J., Campoe, O.C., Stape, J.-L., Laclau, J.-P., & Nouvellon, Y. (2019). Light absorption, light use efficiency and productivity of 16 contrasted genotypes of several Eucalyptus species along a 6-year rotation in Brazil. Forest Ecology and Management, 449, 117443

le Maire, G., Nouvellon, Y., Christina, M., Ponzoni, F.J., Gonçalves, J.L.M., Bouillet, J.P., & Laclau, J.P. (2013). Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species Eucalyptus grandis and Acacia mangium plantations. Forest Ecology and Management, 288, 31-42

Manzione, R.L., Tanikawa, D.H., & Soldera, B.C. (2014). RELAÇÃO ENTRE A RESPOSTA ESPECTRAL DA VEGETAÇÃO EM DIFERENTES CULTIVOS AGRICOLAS E NÍVEIS FREÁTICOS EM ÁREA DE RECARGA DO SISTEMA AQUÍFERO GUARANI. Águas Subterrâneas, 28, 1-13

Marsden, C., Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Corbeels, M., McMurtrie, R.E., Stape, J.L., Epron, D., & le Maire, G. (2013). Modifying the G'DAY process-based model to simulate the spatial variability of Eucalyptus plantation growth on deep tropical soils. Forest Ecology and Management, 301, 112-128

Nouvellon, Y., Laclau, J.-P., Epron, D., Le Maire, G., Bonnefond, J.-M., Gonçalves, J.L.M., & Bouillet, J.-P. (2012). Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of Eucalyptus grandis and Acacia mangium in Brazil. Tree Physiology, 32, 680-695

Oliveira, R.S., Bezerra, L., Davidson, E.A., Pinto, F., Klink, C.A., Nepstad, D.C., & Moreira, A. (2005). Deep root function in soil water dynamics in cerrado savannas of central Brazil. Functional Ecology, 19, 574-581

Reich, P.B. (2014). The world-wide 'fast–slow' plant economics spectrum: a traits manifesto. Journal of Ecology, 102, 275-301

Smethurst, P.J., Almeida, A.C., & Loos, R.A. (2015). Stream flow unaffected by Eucalyptus plantation harvesting implicates water use by the native forest streamside reserve. Journal of Hydrology: Regional Studies, 3, 187-198

Tng, D.Y.P., Goosem, S., Jordan, G.J., Bowman, D.M.J.S., & Sheppard, A. (2014). Letting giants be - rethinking active fire management of old-growth eucalypt forest in the Australian tropics. Journal of Applied Ecology, 51, 555-559

IPEF_SERIE_TECNICA_v25n47.indb 35 04/05/2023 17:19:11