

Estimação, zoneamento e análise de sensibilidade da produtividade florestal de *Eucalyptus* no Nordeste do Estado de São Paulo através do modelo 3-PGEstimation, zoning and sensitive analyses of forest productivity of *Eucalyptus* in northeast São Paulo using the 3-PG modelCristiane Camargo Zani Lemos<sup>1</sup>, Rodrigo Eiji Hakamada<sup>2</sup>, Omar Carrero<sup>3</sup>, Clayton Alcarde Alvares<sup>4</sup> e José Luiz Stape<sup>5</sup>

---

**Resumo**

O zoneamento da produtividade auxilia no processo de planejamento do uso da terra, através da seleção de locais adequados a cultura. O objetivo deste estudo foi estimar e zonear a produtividade do eucalipto no nordeste do estado do São Paulo e determinar os principais fatores limitantes da produtividade segundo o modelo (temperatura, geadas, déficit de pressão de vapor, água no solo, e fertilidade do solo). A estimativa da produtividade foi feita utilizando-se o modelo 3-PG tendo como entradas os mapas de estimativa de precipitação, temperatura máxima e mínima (normais climáticas) e mapa pedológico. Para a validação do modelo, comparou-se a estimativa do incremento médio anual aos sete anos (IMA7-3-PG) com a projeção do IMA7 (IMA7inv) em parcelas de inventário comercial com idade superior a 5 anos e inferior a 8, utilizando-se 1.884 parcelas de inventário, que representam uma área 58.000 hectares de plantio de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*. O IMA7-3-PG médio de toda a área de plantio considerada neste estudo foi (44.1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) similar ao IMA7inv (41.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>). No entanto, ao comparar a produtividade estratificada por tipo de solo e fazenda, verificou-se elevada dispersão entre os valores estimados e projetados (-14.7% para solos arenosos, e +7.46% em solos argilosos), que pode ser reflexo do baixo nível de detalhamento do tipo de solo, do uso de dados climáticos de apenas quatro estações meteorológicas, da diferente adaptação dos materiais genéticos e tratamentos silviculturais distintos em cada talhão. Os resultados nos permitiram identificar que as áreas mais ao sul dessa região tendem a ser as mais produtivas, e que os fatores hídricos foram os que mais restringiram o crescimento (déficit de pressão de vapor e água no solo).

**Palavras-chave:** Sistema de informação geográfica; Incremento médio anual; fatores limitantes ao crescimento.

**Abstract**

The productivity zoning at the landscape level can help forest managers on land use decision making, based on correct area selection for the crop. The goal of this research was to estimate and generate a *Eucalyptus* productivity zoning of Sao Paulo state northeast and to determine the main limiting factors to growth based on model (temperature, frost, vapor deficit pressure, available soil water, and soil fertility). Productivity estimation was done using the model 3-PG, using as inputs estimated rainfall, maximum a minimum temperatures and soil maps. To validate the model, were compared the mean annual increment at 7 years (MAI 7) estimated by 3-PG with the inventory projection (forest with 5 to 8 years), corresponding around 58,000 ha. The average of all validated area was similar between the 3-PG estimation (41.9 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>) and inventory projection, (44.1 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>). However, when the comparison of the IMA7 between measured and predicted, stratified by soil type and farm was done, we found high data dispersion, probably because of the average climatic data used as model input, soil type detailing reflecting the soil water content, genetic material adaptation and silviculture management, or interaction of those factors. The results suggested that increase the analytical scale reduce the precision of the estimates. It was possible to make the zoning of the real productivity of *Eucalyptus* in the northeastern state of São Paulo. The most productivity areas were located at south. The main growth constraints were vapor pressure deficit and soil water content.

**Keywords:** Geographic Information System; 3-PG model; Mean annual increment; Limiting growth factors.

---

<sup>1</sup>International Paper do Brasil. Caixa-postal: 9 – 138450-901 - Mogi Guaçu, SP, Brasil. E-mail: [cristiane.lemos@ipaper.com](mailto:cristiane.lemos@ipaper.com).

<sup>2</sup>Professor Adjunto do Departamento de Ciências Florestais. UFRPE - Universidade Federal Rural de Pernambuco - 52171900 - Recife, PE, Brasil. E-mail: [rodrigo\\_hakamada@yahoo.com.br](mailto:rodrigo_hakamada@yahoo.com.br).

<sup>3</sup>PhD Professor. Universidad de Los Andes - Escuela de Ingenieria Forestal. Mérida, Venezuela. E-mail: [ocarrero@gmail.com](mailto:ocarrero@gmail.com).

<sup>4</sup>Pesquisador Doutor. IPEF – Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais. Via Comendador Pedro Morganti, 3500 – 13415-000 – Piracicaba, SP, Brasil. E-mail: [caalvares@yahoo.com.br](mailto:caalvares@yahoo.com.br).

<sup>5</sup>Professor Permanente do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. Unesp - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" / FCA - Faculdade de Ciências Agrônomicas de Botucatu. Av. Universitária, 3780 – 18640-034 – Botucatu, SP, Brasil. E-mail: [jolstape@yahoo.com.br](mailto:jolstape@yahoo.com.br).

## INTRODUÇÃO

A produtividade de uma floresta é altamente influenciada pelo ambiente. Elementos como a irradiância solar, que atua como fonte principal de energia para a fotossíntese, e a temperatura, que regula os processos de transpiração e respiração, afetam o desenvolvimento das árvores agindo no seus processos fisiológicos e bioquímicos (SOUZA et al. 2006). Porém, a disponibilidade hídrica e a fertilidade são os fatores abióticos de maior influência sob o crescimento de povoamentos florestais (GONÇALVES et al. 1990) junto com a capacidade de adaptação de cada espécie para capturar e usar os recursos disponíveis de cada sítio (STAPE et al. 2004a), a idade, densidade de plantio (BINKLEY et al., 1997), e os padrões de alocação (BINKLEY et al., 2004).

No Brasil, os ciclos de corte de eucalipto tendem a ser entre 6 e 8 anos (GONÇALVES et al., 2008), conseguindo na última década, atingir uma produtividade média de  $38,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (IBA, 2014). Contudo, a avaliação dos fatores que limitam o crescimento das plantações florestais é essencial identificar e delimitar de zonas que possuam potencial de uso florestal (GOLFARI et al., 1978).

O zoneamento florestal surge nas últimas décadas da preocupação em utilizar a terra de forma racional (GARCIA et al., 2014). Os primeiros trabalhos de zoneamento tinham como objetivo avaliar a terra por aptidão de espécie, tais como os de Golfari et al. (1978) e Ab'Saber et al. (1990). Este tipo de zoneamento mapeava as espécies florestais aptas para cada região levando em consideração apenas os fatores climáticos. Golfari et al. (1978) desenvolveram o "Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil", os quais dividiram o Brasil em 26 regiões bioclimáticas de acordo a vários parâmetros como: altitude, tipo de clima, vegetação, temperatura média anual, precipitações médias anuais, regime de distribuição da precipitação, entre outros, com a finalidade de prover uma base informativa sobre as espécies de eucalipto e coníferas a serem utilizadas nos planos de florestamento e reflorestamento no país, com maior aptidão e rendimento por região. Do mesmo modo, Ab'Saber et al. (1990) propuseram um plano nacional de reflorestamento com o objetivo principal de fomentar a fixação de carbono a traves do estabelecimento de povoamentos, diferenciados regionalmente, e inseridos em áreas sem comprometer a agricultura e as florestas nativas.

Na escala espacial, os modelos ecofisiológicos têm se mostrado uma ferramenta importante para estimar a produtividade de culturas florestais (ALMEIDA et al. 2010; STAPE et al. 2004a), pois levam em consideração as variáveis climáticas, edáficas e fisiológicas. A vantagem de um modelo baseado em processo é a capacidade de estimar a produtividade florestal e ao mesmo tempo identificar e quantificar os fatores que podem causar mudanças nela (ALMEIDA et al. 2010), avaliando os riscos da variabilidade climática, estimando a produtividade potencial de uma região e auxiliando no direcionamento do uso da terra e manejo florestal (STAPE et al. 2004a).

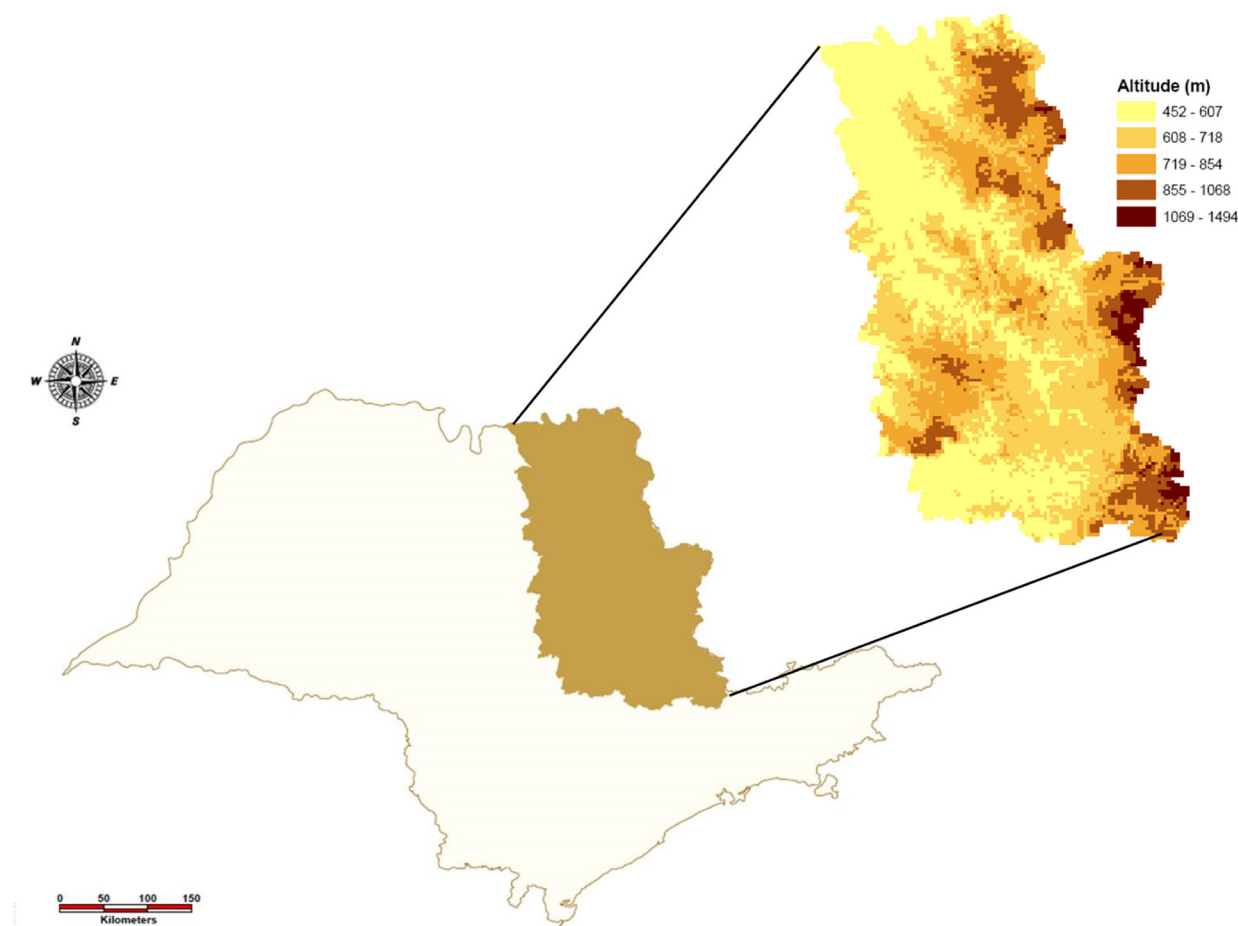
O modelo baseado em processos: 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997) já foi utilizado no Brasil na avaliação de crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla* no nordeste do país (STAPE et al. 2004a), como ferramenta de zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais (GUIMARÃES et al. 2007), e para estimar o crescimento em função de variações climáticas, e mudanças no índice de área foliar (ALMEIDA et al. 2010).

O objetivo deste trabalho foi realizar o zoneamento da produtividade do eucalipto na região nordeste do estado de São Paulo, e determinar os fatores limitantes do crescimento florestal nessa região com base nas restrições ao crescimento proporcionadas pelos modificadores do 3-PG.

## MATERIAL E MÉTODOS

### Área de estudo

O estudo foi conduzido no Nordeste do Estado de São Paulo (Figura 1) localizado entre as latitudes  $23^{\circ}03'S$  a  $18^{\circ}58'S$  e longitudes  $48^{\circ}38'O$  a  $46^{\circ}21'O$ , abrangendo uma área de cerca de 5 milhões de ha. A área de estudo situa-se numa região de elevada variabilidade climática, composta pelos tipos climáticos Aw, Cwa, Cwb, Cfa e Cfb (ALVARES et al., 2013a). Está inserida nas formações geomorfológicas Serra Geral, Pirambóia, Botucatu, Tubarão, Passa Dois e Paraná (ROSS; MOROZ, 1997). O relevo predominante é de plano a suave-ondulado (IBGE, 1959).



**Figura 1.** Representação da área de estudo no Nordeste do Estado de São Paulo e a altitude (m).  
**Figure 1.** Location of the study area in Northeast of the State of São Paulo and altitude variation (m).

A área de estudo foi dividida em células quadradas (*grid*) de 400 ha, totalizando 12.702 células. A cada célula associou-se um ponto localizado no centro geométrico do polígono (ponto centróide). Nestes pontos centróides foram ligadas às coordenadas UTM e aos dados de entrada e saída do modelo 3-PG.

Mapas digitais mensais de temperatura mínima e máxima mensal estimada pela normal climática (ALVARES et al., 2013b) e de precipitação total mensal (ALVARES et al., 2013a) do Brasil foram utilizados como dados de entrada do modelo 3-PG. Estes mapas foram recortados na área de estudo e posteriormente dividido em células de 400 ha, e em cada célula associaram-se as informações climáticas ao ponto centróide padrão.

A radiação solar global foi estimada utilizando a equação descrita por Pereira et al. (2002), a qual utiliza para o cálculo a latitude, declinação solar, fotoperíodo e época do ano, com estimativa corrigida para a declividade e orientação das vertentes da área. A radiação foi calculada no 15º dia de cada mês, representando a média do mês. A radiação fotossinteticamente ativa foi considerada como 50% da radiação global.

O número de dias de geada por mês foi determinado segundo a metodologia de Coops aplicada por Alvares (2011) na região de Capão Bonito, calculada com base na temperatura média mínima mensal local (equação 1).

$$Ng = 21,16 - (1,74 T_{\min}) \quad n=22; \quad R^2=0,81 \quad (1)$$

Em que Ng é o número de dias de geada no mês e  $T_{\min}$  é a temperatura mínima média mensal (°C).

O datum de referência foi atualizado para o SIRGAS 2.000 (Sistema de Referência Geocêntrico para a América do Sul) com elipsoide GRS 1.980 (Geodetic Reference System).

Os parâmetros ajustados na calibração do 3-PG por tipo de solo (Tabela 1) foram utilizados para alimentação do modelo e os detalhes encontram-se em Lemos (2011). Na calibração do modelo foram usados três tipos de solos: Neossolo Quartzarênico (RQ), Latossolo Vermelho (LV) e

Argissolo Vermelho Amarelo (LVA), para estimar a produtividade florestal do nordeste do estado de São Paulo. Foi utilizado o mapa pedológico do estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999) para a determinação dos tipos de solo, classes texturais por horizonte, classes de profundidade, fertilidade e retenção máxima de água no solo.

A profundidade do solo foi classificada por Oliveira et al. 1999 como: raso, pouco profundo, profundo, muito profundo. Para o cálculo da retenção máxima de água no solo as profundidades foram transformadas em valores numéricos segundo a classificação descrita no Sistema brasileiro de classificação do solo (EMBRAPA, 2006) em 0,5; 1,0; 2,0 e 5,0 m. A retenção máxima de água no solo ( $ASW_{max}$ ) foi determinada pela multiplicação da profundidade do solo pela retenção máxima de água no solo.

A textura do horizonte A foi utilizada para classificar o solo em: arenoso, areno-argiloso, argilo-areno e argiloso, conforme a necessidade do modelo 3-PG (LANDSBERG; WARING, 1997). Reconhecemos que a textura do horizonte B seria a ideal para diagnosticar a textura do solo, no entanto, essa era a análise disponível para a área de estudo.

A fertilidade do solo no mapa pedológico foi classificada como alta, média e baixa, as quais foram associadas ao modificador de fertilidade do solo (FR) do modelo 3-PG, com valores de 1, 0,85 e 0,75, respectivamente (Lemos (2011).

O modelo foi implementado avaliando o ciclo do eucalipto desde o primeiro ao sétimo ano, usando os dados iniciais de biomassa de tronco, folha e raiz coletados num estudo prévio (RYAN et al., 2010; STAPE et al., 2010) aos 12 meses e densidade de 1212 árvores por hectare, que é a densidade mais comum nos plantios da região. Avaliou-se como variável de saída a produtividade do eucalipto aos 7 anos em  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$  e o índice de área foliar (IAF) no sétimo ano em janeiro.

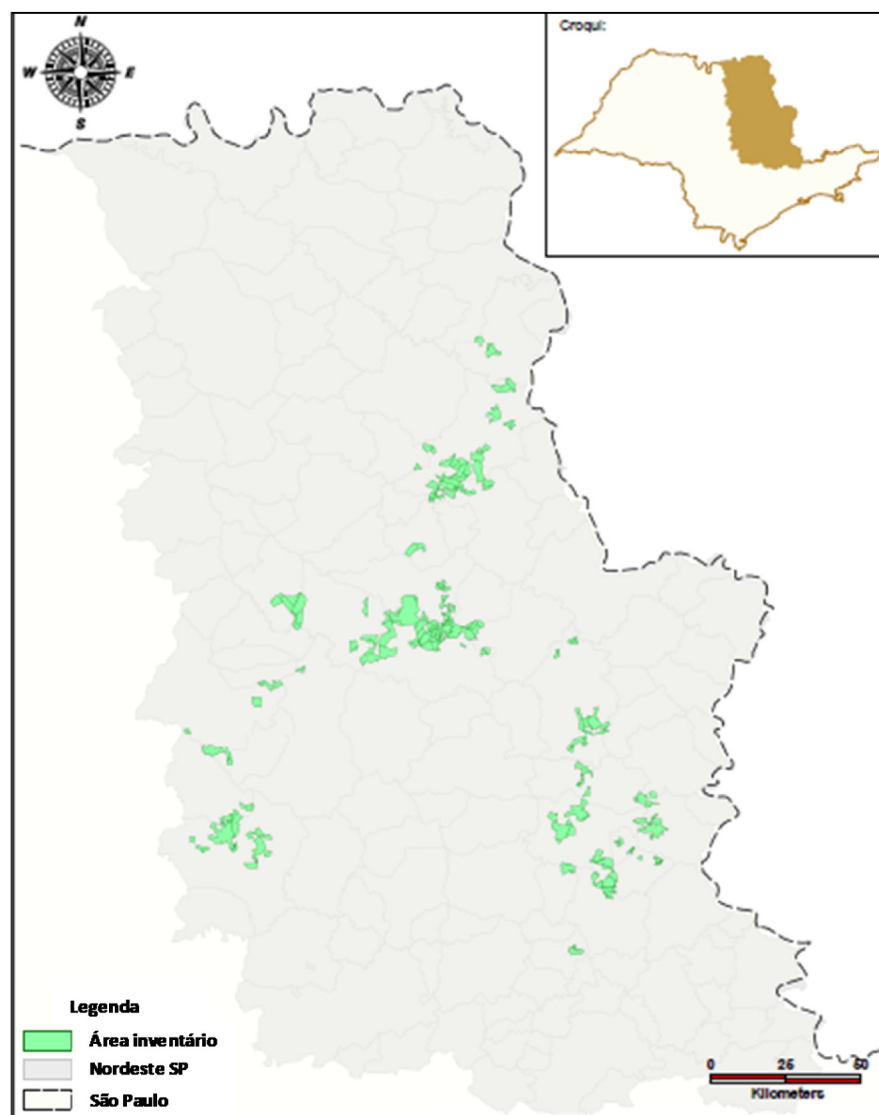
### Validação do modelo 3-PG

A produtividade estimada pelo modelo 3-PG foi validada utilizando-se de 1.884 parcelas de inventário com idade superior a 5 anos até 8 anos, representando uma área 58.000 hectares no nordeste do Estado de São Paulo (Figura 2). O volume de madeira das parcelas foi projetado, pela equação de Clutter (1963), para os 7 anos para calcular o IMA7 (incremento médio anual aos 7 anos), clone e sítio específico.

Como as parcelas possuem áreas de 400  $m^2$  e o *grid* de estudo é de 400 ha, trabalhou-se com a produtividade média na escala de talhão. Para cada *grid* associou-se a produtividade média ponderada pelas áreas dos talhões que o compõem. Na avaliação final trabalhou-se ao nível de fazendas para inferir o IMA7, devido à escala da informação e nível de detalhamento do solo.

### Fatores limitantes do crescimento florestal

A determinação dos fatores limitantes do crescimento florestal foi feita com base nas restrições ao crescimento proporcionadas pelos modificadores do 3-PG. Os modificadores atuam na limitação da eficiência quântica do dossel em capturar a radiação fotossinteticamente ativa e transformá-la em carbono assimilado. Para aferir isso, utilizou-se aproximadamente 10% da área de estudo, totalizando 1.200 células (unidade amostral) selecionadas aleatoriamente. Em cada unidade amostral avaliou-se os modificadores: temperatura ( $f_t$ ), geada ( $f_{frost}$ ), água no solo ( $f$ ), déficit de pressão de vapor ( $f_{dpv}$ ) e fertilidade do solo (FR) ao longo de todo o ciclo. Porém, para regiões tropicais com as condições de esta região do Brasil, consideramos de maior importância as variáveis que afetam diretamente o balanço hídrico do sistema (ALMEIDA et al. 2007; STAPE et al 2004 b;c).



**Figura 2.** Área de estudo no nordeste do estado de São Paulo, e áreas com inventário Florestal para a validação do modelo 3-PG.

**Figure 2.** Study area in northeast of São Paulo State and areas covered by inventory plots to the validation process using 3PG.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

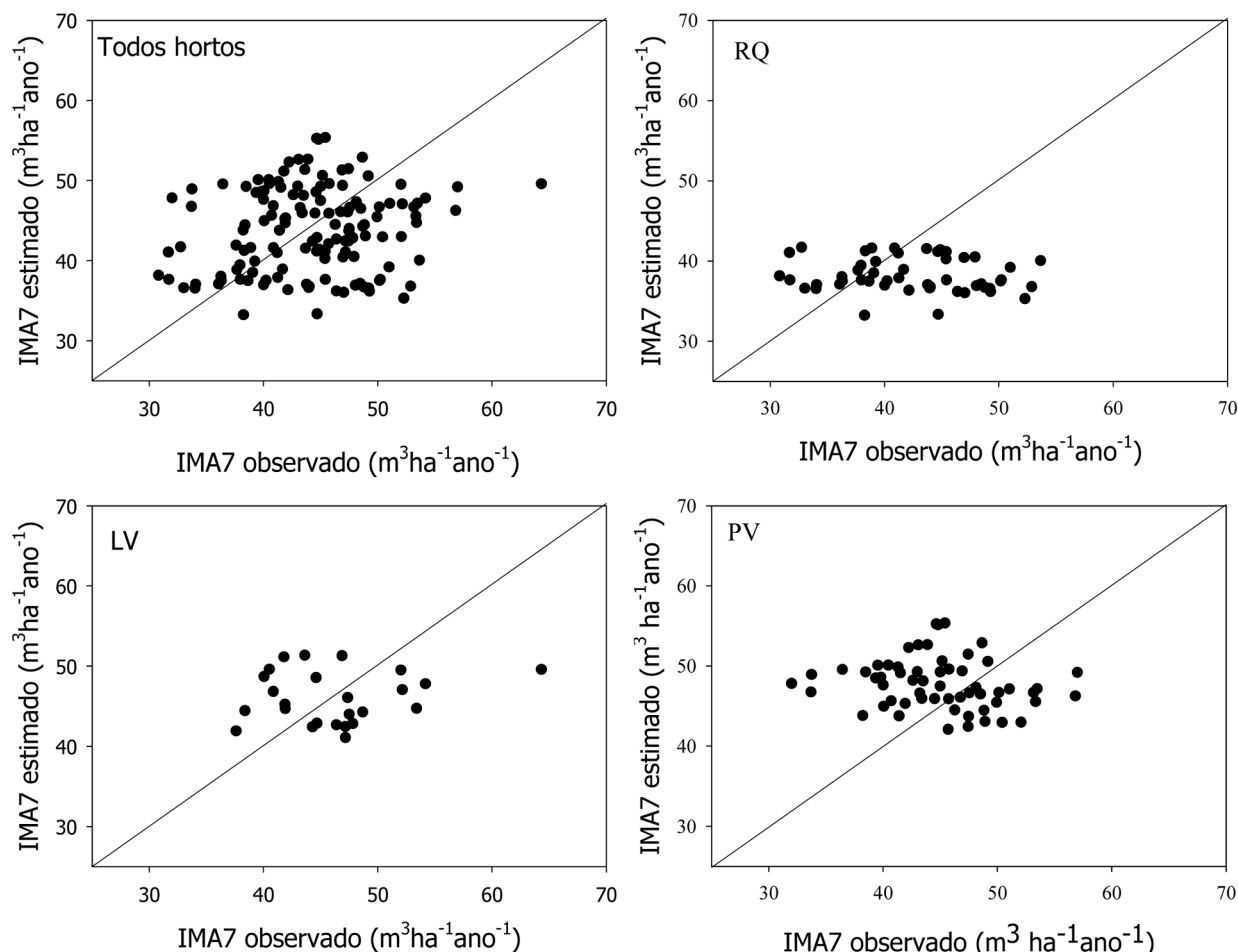
### Validação da produtividade estimada pelo modelo 3-PG

A produtividade média geral estimada pelo modelo 3-PG para os 58.000 hectares foi próxima a produtividade projetada pelo inventário florestal, sendo 41,9 e 44,1  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  respectivamente. No entanto, ao se avaliar a produtividade por tipo de solo, constatou-se que o modelo subestimou em 6,3  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (14.7%) a produtividade média no Neossolo Quartzarênico (RQ) e superestimou em 3,3  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  (7.46%) nas áreas compostas por Argissolo (PV). No Latossolo, a produtividade média estimada e projetada foi similar (1.5% de diferença) (Tabela 1). Ao comparar o IMA7 estimado com o projetado por fazenda (Figura 3), verificou-se que houve muita dispersão entre os pontos.

**Tabela 1.** Síntese do incremento médio anual aos 7 anos (IMA7  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) projetado pelo inventário florestal e o estimado pelo modelo 3-PG no solo Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV) e a proporção de área avaliada por tipo de solo e número de fazendas que compõe.

**Table 1.** Annual average increment at 7 years (IMA7  $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) projected by the forest inventory and estimated by the 3-PG model in the Neossolo (RQ), Latossolo (LV) and Argissolo (PV) soil and evaluated area proportion by type of soil and number of farms that it composes.

Solo	Área	N.	IMA 7	
		Fazendas	Projeção	3-PG
RQ	46%	37	42,9	36,6
LV	41%	40	45,4	46,1
PV	13%	23	44,2	47,5



**Figura 3.** Relação entre o incremento médio anual aos 7 anos projetado pelo inventário florestal (IMA7 observado) e o estimado pelo modelo 3-PG (IMA7 estimado) médio analisado por fazenda, para toda a área analisada e por tipo de solo: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV)

**Figure 3.** Ratio between the average annual increment at 7 years projected by the forest inventory (observed IMA7) and the estimated by the average 3-PG (estimated IMA7) model analyzed by farm, for the entire analyzed area and by soil type: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) and Argissolo (PV).

Estas variações nos valores estimados em relação ao projetado podem ter sido influenciadas por alguns aspectos tais como: i) os dados climáticos usados no modelo são estimativas provenientes da normal climática, não contemplando as variabilidades climáticas entre os anos e condições específicas dos sítios. Almeida et al (2004a) tinha sugerido a necessidade de usar dados históricos em lugar do uso de médias que podem ocultar estas variações; ii) nível de detalhamento do mapa pedológico de solo é baixo, não contempla as especificidades de cada fazenda. Os solos variam muito e numa curta distância, pelo que o 3-PG não pode manejar este nível de detalhe para análise ao nível de paisagem (LANDSBERG et al 2003; TICKLE et al. 2001), como nosso caso ; iii) o modelo não estima a adaptação de diferentes clones à região; e iv) o modelo não contempla os tratos silviculturais específicos por sítio (LANDSBERG; WARING, 1997).

A superestimação do incremento corrente anual pelo modelo foi observada por Almeida et al. (2004b), devido ao uso de dados climáticos médios, onde as flutuações climáticas não são capturadas, especialmente aquelas que ocorrem durante as estações secas.

Ao longo do ciclo de plantio avaliado, ocorreram dois eventos climáticos anormais que não foram capturados pelo modelo devido ao uso de dados médios históricos de clima. Em 2007 houve um excedente hídrico, o qual o modelo não representa bem quando existe um excesso acima da máxima capacidade de retenção de umidade, pois assume que este excedente de água sai do sistema. Em 2010 houve uma seca prolongada. A seca ocorrida em 2010 resultou na redução no crescimento florestal (constatado pelo inventário comercial) e desfolha não natural provocada pelo ataque de pragas em reboleiras de maneira desuniforme em extensas áreas de plantio. A relação entre a produtividade e o déficit hídrico é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior o déficit hídrico, menor a produtividade madeireira (GONÇALVES et al., 2017).

Foi constatada na validação que o detalhamento do mapa pedológico não foi suficiente para classificar corretamente o solo de todas as fazendas estudadas, necessitando corrigir a quantidade máxima de água no solo disponível para as plantas para posterior inferência sobre o crescimento. A correção foi realizada de acordo com metodologia proposta por Lemos (2011), que utilizou a profundidade de raízes aumentando de acordo com a idade, até atingir o máximo de 6 metros aos 18 meses. No modelo anterior, a profundidade das raízes era de 3 metros do início ao final do ciclo. Além disso, adotaram-se valores de retenção máxima de água do solo médio em toda a área trabalhada, variando somente em função do tipo de solo e textura, segundo a descrição do mapa pedológico; o mesmo ocorreu para a determinação da profundidade do solo. A utilização de valores médios resulta na perda da especificidade de cada fazenda, uma vez que as características do solo são muito variáveis na escala espacial.

O crescimento da floresta estimado pelo modelo 3-PG é influenciado pelo tipo de solo de duas maneiras: por meio da partição de carbono assimilado e pela disponibilidade hídrica à planta. Neste estudo, a parametrização foi estratificada por tipo de solo, devido à diferença na partição de carbono para o sistema radicular, tronco e folhas. Considerou-se que em solos arenosos há maior partição de carbono para o sistema radicular do que em solos mais argilosos (GONÇALVES, 1994; GONÇALVES e MELLO, 2000; REIS, 1985; STAPE et al. 2008), resultando assim diminuição no crescimento em biomassa do tronco (STAPE et al. 2008). Esta influência na partição de carbono não é resultado somente da textura do solo, mas também pela disponibilidade de água e nutrientes (ALBAUGH et al. 2004; STAPE et al. 2008). Para os solos analisados, os Neossolos Quartzarênicos em sua maioria adotaram valores inferiores na retenção máxima de água no solo, em relação aos solos Argissolos e Latossolos.

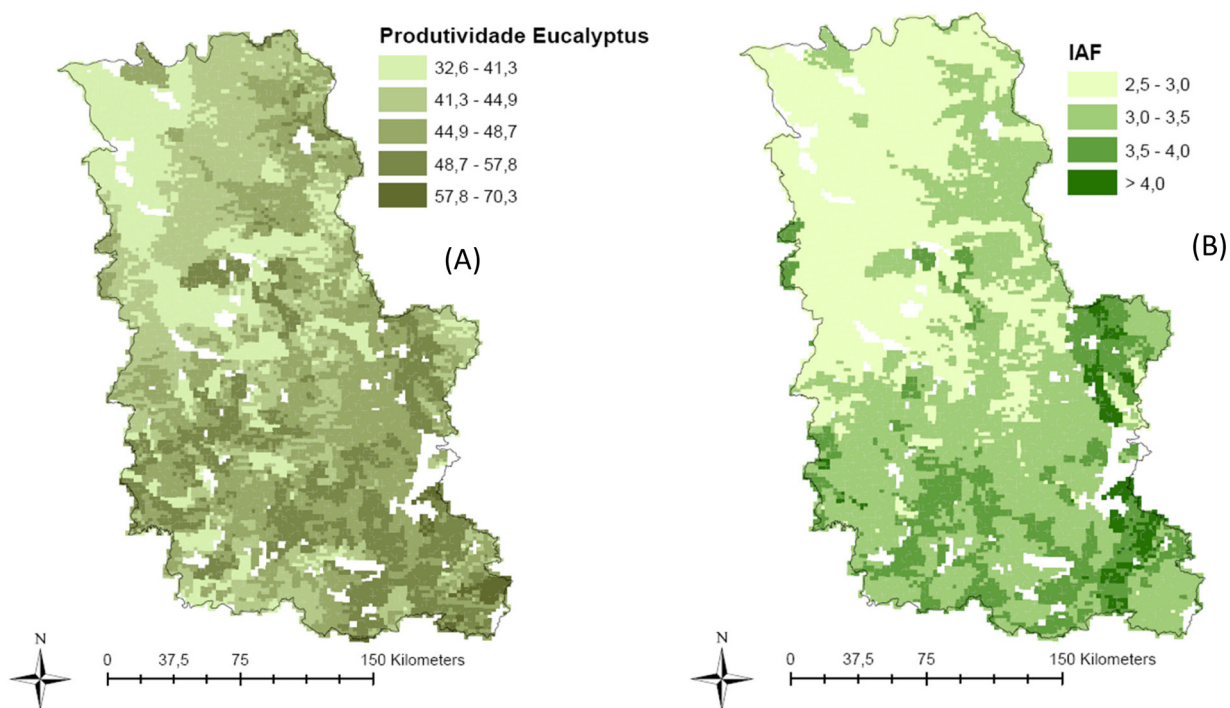
Os resultados evidenciam que para o uso do modelo 3-PG é necessária adequada caracterização da área de estudo como foi sugerido por Coops et al. (2001). Segundo Tickle et al. (2001), o maior desafio para a aplicação do modelo espacialmente é a variabilidade das propriedades do solo.

### **Produtividade e restrições ao crescimento no nordeste do estado de São Paulo**

A produtividade média geral para o nordeste do estado de São Paulo foi de  $45,0 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , variando de  $32$  a  $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , sendo que as áreas mais produtivas se concentraram no solo PV, o qual correspondeu por apenas 10% da área. O PV também foi caracterizado por apresentar a maior variação na produtividade de  $35,9$  a  $70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . Um dos fatores que pode ter influenciado na diferencia entre as estimativas dos modelos comparado com os valores do inventário e o fato que na área estudada se tinham vários materiais genéticos, porém outras causas como variações no sítio produto de falta de homogeneidade operacional poderia explicar esta variabilidade. A maioria da área do nordeste do estado de São Paulo possui tipo de solo LV (71%) com produtividade média de  $44,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . As menores produtividades foram encontradas no solo RQ, média de  $39,9 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  (Figura 4A).

O índice de área foliar (IAF) variou de  $2,5$  a  $4,5 \text{ m}^2 \text{ folha m}^{-2} \text{ solo}$ , estando relacionado com a produtividade florestal (ALBAUGH et al. 2014; ALMEIDA et al. 2007, STAPE et al. 2008). Áreas mais produtivas obtiveram maiores IAF, e se localizam em sua maioria ao sudeste da região, em regiões com altitudes um pouco mais elevadas que a média (Figura 4B).





**Figura 4.** (A) Mapa de produtividade ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ ) e (B) do índice de área foliar (IAF) do *Eucalyptus* aos 7 anos no nordeste do estado de São Paulo estimada pelo modelo 3-PG.

**Figure 4.** (A) Productivity map ( $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{year}^{-1}$ ) and (B) leaf area index (IAF) ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) estimated by the 3-PG model for *Eucalyptus* plantations at 7 years of age in the northeast of the State of São Paulo.

### Fatores limitantes do crescimento florestal

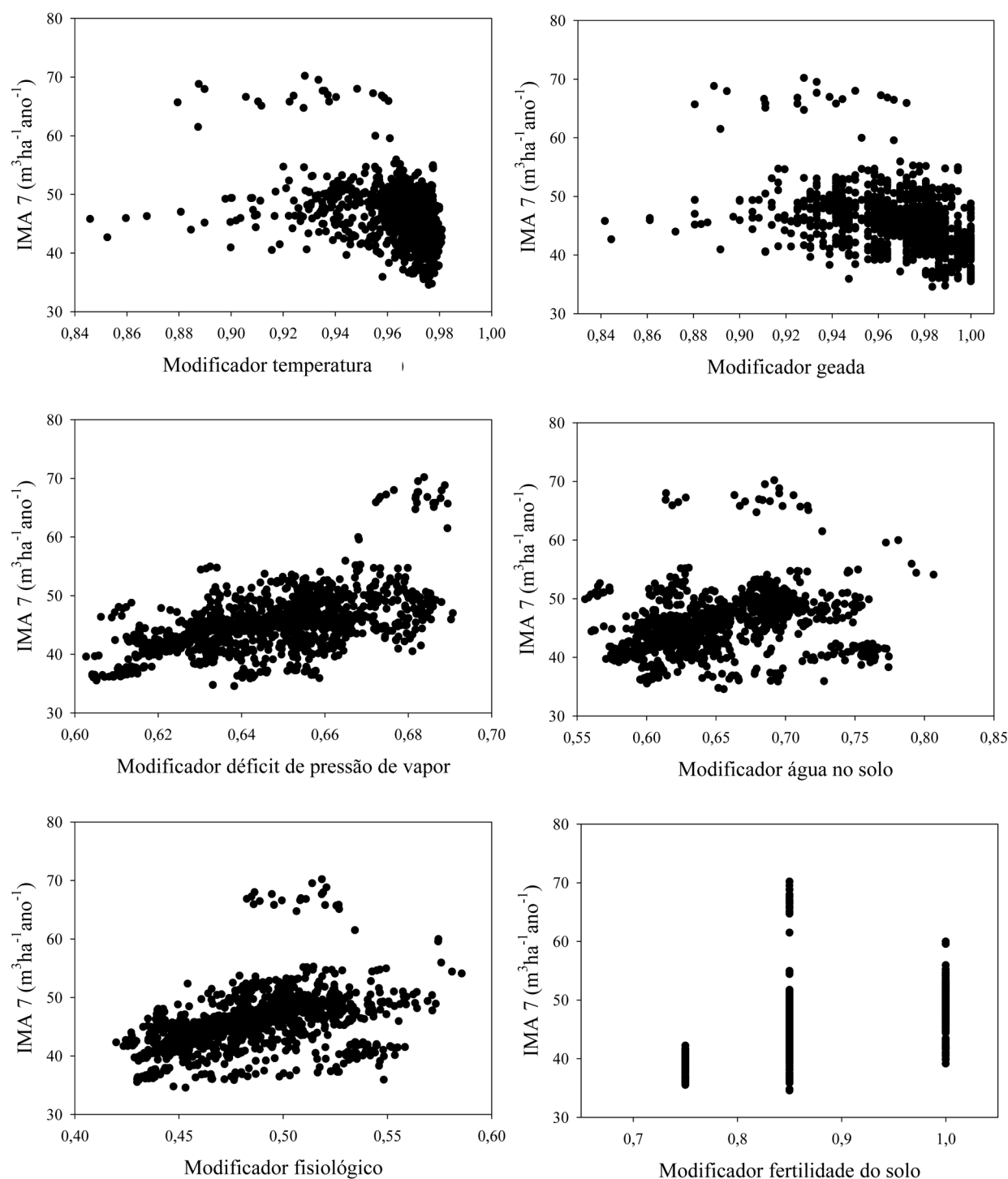
Analisando-se as 1.200 células amostradas, verificou-se que os fatores mais restritivos do crescimento do *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo são: o déficit de pressão de vapor e a água no solo. Os modificadores  $f_{\text{dpv}}$  e  $f$  adotaram valores médios de  $0,65 \pm 0,02$  e  $0,65 \pm 0,05$ , respectivamente; ambos compondo o  $f_{\text{phy}}$  com valores médios de  $0,48 \pm 0,03$ . Fatores similares aos observados por Almeida et al. (2010) em estudo realizado no estado de Espírito Santo em que o  $f_{\text{dpv}}$ ,  $f$  e FR, com valores médios de 0,65, 0,64 e 0,76 foram os maiores limitantes da produtividade. O FR médio neste estudo foi de 0,87, sendo o terceiro fator mais restritivo.

Observou-se uma tendência de aumento em produtividade com a diminuição do  $f_{\text{dpv}}$ ,  $f$  e consequentemente o  $f_{\text{phy}}$  (Figura 5). As áreas mais produtivas concentram-se em locais de altitude mais elevadas e temperatura média máxima menos elevadas, no sul e sudeste da área de estudo, em que o DPV também é menor. Resultados similares foram encontrados por Stape et al. (2004a) num gradiente geográfico no estado da Bahia, e Almeida et al. (2007) em plantios de *Eucalyptus grandis* em Aracruz. Já as áreas menos produtivas concentraram-se no noroeste da área de estudo, onde as temperaturas médias máximas e mínimas são mais elevadas do que o restante da área.

No 3-PG, o DPV é calculado em função da temperatura máxima e mínima (ALLEN et al., 1998) e se encontra diretamente relacionado ao efeito da condutância estomática. O aumento do DPV ocasiona o fechamento do estômato e a diminuição da transpiração e o crescimento. Karasawa (2006) e Stape et al. (2008) estudando experimentos controlados em espécies arbóreas (café e eucalipto), verificaram que mesmo o estresse hídrico sendo nulo, através de inclusão de água no sistema via irrigação, o DPV limita a atividade fisiológica da planta e diminui a produtividade mesmo com a irrigação. A disponibilidade de água é considerada por alguns autores como o fator mais limitante ao crescimento florestal no Brasil (STAPE et al., 2010). Na região nordeste do Brasil, Stape et al. (2004b) constataram ganhos de aproximadamente  $2,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$  em produtividade e  $0,3 \text{ m}^2 \text{folha m}^{-2} \text{solo}$  de IAF a cada 100 mm de acréscimo de chuva. A retenção máxima de água disponível no solo média a apresentou a seguinte ordem  $\text{LV} > \text{PV} > \text{RQ}$ , com valores de 342, 300 e 288 mm respectivamente. Cerca de 66% da área de estudo foi composta por solos profundos (OLIVEIRA et al., 1999), profundidade variando de 100 a 200 cm (EMBRAPA, 2006). A capacidade de armazenamento da água no solo com muita probabilidade influenciou as diferenças encontradas em crescimento dos plantios.



Com relação à produtividade, os valores observados de  $f_t$  e  $f_{frost}$  apresentaram padrões de distribuição semelhantes (Figura 5), com médias elevadas do fator de 0,97 para ambos os casos. Isto se deve ao fato de que a geada é calculada com base na temperatura mínima, e a temperatura máxima da média mensal que foi estimada para a região não ultrapassou da máxima temperatura suportada para o crescimento do eucalipto que é 40°C. Embora a temperatura não é um fator limitante na produtividade, em algumas áreas quando o valor do  $f_t$  é igual a 1, o IMA7 não foi o maior, demonstrando que existem outros fatores que limitam o crescimento do povoamento, tais como o DPV ou a quantidade de água disponível no solo.



**Figura 5.** Valores médios de modificadores da eficiência quântica do dossel em relação a produtividade (IMA7 em  $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ ) estimado pelo modelo 3-PG para 1.200 unidades amostrais.

**Figure 5.** Mean values of canopy quantum efficiency modifiers in relation to productivity (IMA7 in  $m^3 ha^{-1} year^{-1}$ ) estimated by the 3-PG model for 1,200 sample units.

Os fatores limitantes de crescimento analisados por tipo de solo demonstram que apesar da parametrização ser diferenciada, a restrição do crescimento é provocada pelos mesmos fatores nos diferentes tipos de solo: déficit de pressão de vapor e água no solo (Tabela 2). Como estes fatores não são controlados pelos silvicultores, o zoneamento da produtividade dá suporte na orientação de terras mais produtivas ao cultivo de *Eucalyptus*, úteis no plano de expansão florestal. Para os melhoristas genéticos, o zoneamento pode ser utilizado na seleção e recomendação de clones de acordo as áreas com alto DPV e/ou baixa retenção de água, evitando assim perdas em produtividade e taxas de mortalidade elevadas como resultado do déficit hídrico.

**Tabela 2.** Valores médios de modificadores da eficiência quântica do dossel: temperatura ( $f_t$ ), déficit de pressão de vapor ( $f_{dpv}$ ), água no solo ( $f_{asw}$ ), geada ( $f_{frost}$ ), fisiologia ( $f_{phy}$ ) e fertilidade do solo por tipo de solo: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) e Argissolo (PV) para 1.200 unidades amostrais.

**Table 2.** Mean values of canopy quantum efficiency modifiers: temperature ( $f_t$ ), vapor pressure deficit ( $f_{dpv}$ ), water in the soil ( $f_{asw}$ ), frost ( $f_{frost}$ ), physiology ( $f_{phy}$ ) and soil fertility by soil type: Neossolo (RQ), Latossolo (LV) and Argissolo (PV) for 1,200 sample units.

Solo	N.obs	$f_t$	$f_{dpv}$	$f_{asw}$	$f_{frost}$	$f_{phy}$	FR
RQ	108	0,97	0,65	0,70	0,97	0,51	0,89
LV	825	0,97	0,64	0,63	0,97	0,47	0,85
PV	267	0,95	0,67	0,67	0,96	0,51	0,90
Geral	1.200	0,97	0,65	0,65	0,97	0,48	0,87

## CONCLUSÕES

O modelo 3-PG foi capaz de estimar a produtividade florestal para o nordeste do estado de São Paulo com relativa precisão do valor médio, que foi de cerca de  $44 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ . No entanto, ao comparar a produtividade estratificada por tipo de solo e fazenda, verificou-se elevada dispersão entre os valores estimados e projetados, que pode ser reflexo do baixo nível de detalhamento do tipo de solo, do uso de dados climático, da diferente adaptação dos materiais genéticos e tratamentos silviculturais em cada talhão. O modelo também capturou adequadamente a maior produção nos solos mais argilosos e férteis, comparativamente aos mais arenosos e com menor soma de bases. Apesar do ajuste da média, há uma grande dispersão entre os valores reais e os simulados, creditados à perda de sensibilidade do modelo às nuances de variabilidade da produtividade do *Eucalyptus* frente ao clima e o solo. Na escala de paisagem o modelo é bom para estimar produtividades médias e não específicas para cada combinação de solo, manejo, e material genético. O modelo classificou o sul da área do estudo como a mais produtiva, e tem um decréscimo em direção ao norte do estado. Segundo o modelo os fatores que mais restringem o crescimento das plantações de *Eucalyptus* comerciais nesta região do país, rotineiramente fertilizados, são o déficit de pressão de vapor e quantidade de água no solo. Experimentos de campo serão precisos para determinar a magnitude de estes efeitos, assim como a avaliação de outros fatores não considerados aqui que poderiam ter um impacto na produtividade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SABER, A.; GOLDEMBERG, J.; RODES, L. Identificação de áreas para o reflorestamento no espaço total do Brasil. *Estudos Avançados*, v. 4, n. 9, p. 63-119, 1990.
- ALBAUGH, T.J.; ALLEN, H.L.; DOUGHERTY, P.M.; JOHNSON, K.H. Long term growth responses of loblolly pine to optimal nutrient and water resource availability. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 192, p. 3-19. 2004.
- ALMEIDA, A. C.; SIGGINS, A.; BATISTA, T.R.; BEADLE, C.; FONSECA, S.; LOOS, R. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010.

ALMEIDA, A.; SIOARES, J.; LANDSBERG, J.; REZENDE, G. Growth and water balance of *Eucalyptus grandis* hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 251, p. 10-21, 2007.

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 179-195, 2004a.

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J.; AMBROGI, M. S.; FONSECA, S.; BARDDAL, S. M.; BERTOLUCCI, F. L. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 167-177, 2004b.

ALVARES, C. A. **Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de *Eucalyptus* no sul do Estado de São Paulo**. 2011. 279 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M. Modeling monthly mean air temperature for Brazil. **Theoretical Applied Climatology**, v. 113, p. 407–427, 2013a.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen’s climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711–728, 2013b.

BINKLEY, D. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 190, p. 265-271, 2004.

BINKLEY, D.; O’CONNELL, A. M.; SANKARAN, K. V. Stand development and productivity. In: NAMBIAR, E.K.S., BROWN, A.G., (Eds.), **Management of Soil, Water and Nutrients in Tropical Plantation Forests**, Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 1997. p. 297–337. (ACIAR Monograph, 43).

COOPS, N. C.; WARING, R. H.; BROWN, S. R.; RUNNING, S. W. Comparison of predictions of net primary production and seasonal patterns in water use derived with two forest growth models in Southwestern Oregon. **Ecological Modelling**, v. 142, p. 61–81, 2001.

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, Bethesda v. 9, p. 354-371, 1963.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA Produção de informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

GARCIA, L. G.; FERRAZ, S. F. B.; ALVARES, C. A.; FERRAZ, K. M. P. M. B.; HIGA, R. C. V. Modeling suitable climate for *Eucalyptus grandis* under future climates scenarios in Brazil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 503-511, 2014

GOLFARI, L.; CASER, R.L.; MOURA, V.P.G. Zoneamento ecológico esquemático para reflorestamento no Brasil. **Série Técnica PRODEPEF**, n.11, p.1-66, 1978.

GONÇALVES, J. L. M. **Características do sistema radicular de absorção do *Eucalyptus grandis* sob diferentes condições edáficas**. 1994. 84 p. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1994.

GONÇALVES, J.L.M.; MELLO, S.L.M. O sistema radicular das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; MIRANDA, S.M. **Nutrição e Fertilidade Florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000, p. 219-268.

- GONÇALVES, J.L.M.; ALVARES, C.A.; ROCHA, J.H.T.; BRANDANI, C.; HAKAMADA, R.E. Eucalypt plantation in regions with water stress. **Southern Forests**, v.79, p.1-15, 2017
- GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.L.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests**, v.70, p.105-118, 2008.
- GONÇALVES, J. L. M.; DEMATTÊ, J. L. I.; COUTO, H. T. Z. Relações entre a produtividade de sítios florestais de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna* com as propriedades de alguns solos de textura arenosa e média no Estado de São Paulo. **IPEF**, Piracicaba, v. 43/44, p. 24-39, 1990.
- GUIMARÃES, D. P. G.; SILVA, G. G. C.; SANS, L. M. A.; LEITE, F. P. Uso do modelo de crescimento 3-PG para o zoneamento do potencial produtivo do eucalipto no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Serra Talhada, v. 15, n. 2, p. 192-197, 2007.
- IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório 2014** – ano base 2013. Brasília: IBA, 2014.
- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Atlas do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1959.
- KARASAWA S. **Evapotranspiração de cafezal semi-adensado irrigado por gotejamento e sua relação com a evapotranspiração de referência**. 2006. 96 p. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luis de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- LANDSBERG, J. J; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 95, p. 209-228, 1997.
- LANDSBERG, J.; WARING, R.; COOPS, N. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 172, p 199-214, 2003.
- LEMOS, C. C. Z. **Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de Eucalyptus no nordeste do estado de São Paulo**. 2011, 171 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.
- MIELKE, M. S.; OLIVA, M. A.; BARROS, N. F.; PENCHEL, R. M.; MARTINEZ, C. A.; ALMEIDA, A. C. Stomatal control of transpiration in the canopy of a clonal *Eucalyptus grandis* plantation. **Trees**, v. 13, n .3, p. 152-160, 1999.
- OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: Legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo/Embrapa Solos. 1999. 64 p.
- PEREIRA, A. R.; ANGELLOCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia**: fundamentos e aplicações práticas. Guaíba: 2002. 478 p.
- RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; 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. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1695-1703, 2010.
- REIS, M. G. F.; KIMMINS, J. P.; REZENDE, G. C. DE; BARROS, N. F. Acúmulo de biomassa em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* plantado no cerrado em duas áreas com diferentes produtividades. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, p. 149-162, 1985.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: FFLCH/USP e IPT/ FAPESP, 1997.

- SANDS, P.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown Eucalyptus globules. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.163, p.273-292, 2002.
- SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G. L.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n. 3, p. 399-410, 2006.
- STAPE, J.L. **Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil**. 2002. 265 p. Thesis (Ph.D in Forestry) - Colorado State University, Fort Collins, 2002.
- 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. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.259, p.1684-1694, 2010.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G. Production and carbon allocation in a clonal Eucalyptus plantation with water and nutrient manipulations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 920-930, 2008.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; GOMES, A. Water use, water limitation, and water use efficiency in a Eucalyptus plantation. **Bosque**, Valdivia, v. 25, n. 2., p. 35-41, 2004a.
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.193, p.17-31, 2004ab
- STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; RYAN, M. G.; Testing the utility of the 3-PG model for growth of Eucalyptus grandis x urophylla with natural and manipulated supplies of water and nutrients. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 219 - 234, 2004c.
- TICKLE, P. K.; COOPS, S. D. ;HAFNER,S. D. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 152, p. 275-291, 2001.

Recebido em 04/07/2016

Aceito em 19/02/2018

