

JARBAS SILVA BORGES

**MODULADOR EDÁFICO PARA USO EM MODELO ECOFISIOLÓGICO E
PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B732m
2012

Borges, Jarbas Silva, 1984-

Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e
produtividade potencial de povoamentos de eucalipto / Jarbas
Silva Borges. – Viçosa, MG, 2012.
x, 70f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Plantas - Nutrição. 2. Eucalipto - Crescimento - Modelos
matemáticos. 3. Modelo 3-PG. 4. Nutrição - Avaliação.
5. Solos - Produtividade. 6. Eucalipto - Rendimento.

I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 631.811

JARBAS SILVA BORGES

**MODULADOR EDÁFICO PARA USO EM MODELO ECOFISIOLÓGICO E
PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE POVOAMENTOS DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para a obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 02 de julho de 2012.

Helio Garcia Leite
(Coorientador)

Víctor Hugo Alvarez V.

Lafayette Gonçalves C. Martins

Haroldo Nogueira de Paiva

Júlio César Lima Neves
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização do curso.

A CAPES e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

A minha amada Monise, pelo amor, carinho, compreensão, paciência, pela companhia nas horas difíceis e pela ajuda na elaboração deste trabalho.

A Dona Eloisa e seu Edson pelos conselhos, pelo carinho, amizade e por ter me acolhido como verdadeiro filho em sua casa durante a fase conclusiva deste trabalho.

A minha querida mãe, por todo seu carinho, apoio, incentivo, e o seu sacrifício para que eu pudesse chegar até aqui hoje.

Aos meus avós, José e Maria (Divina), e meu irmão Jocimar, pelos sábios conselhos, pelo carinho e grande amizade.

Ao amigo professor Júlio César Lima Neves, pela compreensão, paciência e amizade com quais sempre me atendeu ao longo destes anos. Por ser um profissional exemplar, dedicado, íntegro e com visão além de sua época, meu muito obrigado.

Aos grandes amigos Fernando (Gaúcho), David e Daniel, pelos agradáveis bate-papos desde o curso de Agronomia.

Aos amigos do Departamento de Solos, Helton, André, Guilherme e tantos outros que aqui não cito, mas que nem por isso foram esquecidos. Fica aqui meu muito obrigado, um grande abraço e nos encontramos por aí.

Aos amigos de Viçosa, amigos de república, minha segunda família, companheiros dos momentos de dificuldades, das horas de aperto, jamais me esquecerei de vocês e de sua importância para a concretização de mais esta etapa, meus queridos amigos.

Aos professores Roberto de Aquino Leite e Helio Garcia Leite, pela orientação e pelas contribuições de grande importância para a concretização deste trabalho.

Aos professores do Departamento de Solos da UFV, pelos ensinamentos, e em especial ao professor Victor Hugo Alvarez V., pela simplicidade, atenção, dedicação e conhecimento, que o tornam um grande mestre, meu sincero agradecimento.

Ao professor Elpídio e a Raiza pela ajuda na elaboração dos mapas presentes neste trabalho.

Ao Raul Chaves, pela compreensão que teve durante a fase conclusiva deste trabalho, me liberando das atividades na DURATEX, meu sincero agradecimento.

A todos os amigos da DURATEX.

Às pessoas não citadas, que bem sei tão importante para a concretização de mais esta etapa de minha vida.

BIOGRAFIA

JARBAS SILVA BORGES, filho de Jeronimo Borges Neto (in memorian) e Maria Aparecida Silva Borges, natural de Campina Verde, Minas Gerais, nasceu no dia 08 de Março de 1984.

Em maio de 2002, iniciou o curso de Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa, o qual concluiu em março de 2007.

Em março de 2007, ingressou no Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela Universidade Federal de Viçosa, finalizando com a defesa da dissertação em fevereiro de 2009.

Em março de 2009 iniciou o curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese em julho de 2012.

CONTEÚDO

	Página
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	4
CAPÍTULO I.....	5
MODULADOR EDÁFICO PARA USO EM MODELO ECOFISIOLÓGICO PARA DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE EUCALIPTO.....	5
RESUMO	5
ABSTRACT	6
INTRODUÇÃO	8
MATERIAL E MÉTODOS	13
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	18
CONCLUSÃO.....	36
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
CAPÍTULO II.....	40
PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE EUCALIPTO NO BRASIL	40
RESUMO	40
ABSTRACT	41
INTRODUÇÃO	43
MATERIAL E MÉTODOS	46
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
CONCLUSÃO GERAL	70

RESUMO

BORGES, Jarbas Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2012. **Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potencial de povoamentos de eucalipto.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientadores: Helio Garcia Leite e Roberto de Aquino Leite.

A velocidade de expansão dos plantios de eucalipto no Brasil tem gerado preocupação sobre os seus efeitos nos recursos do meio físico, especialmente solo e água, e a sustentabilidade desses sistemas, quando intensivamente manejados. Nesse sentido, modelos processuais como o 3-PG têm obtido destaque já que são responsivos a mudanças ambientais e nas condições do sítio e têm alta capacidade preditiva e de explicação, o que permite o aumento da nossa capacidade de entender e prever o crescimento florestal. No entanto, apesar dos bons resultados obtidos, o 3-PG possui baixa sensibilidade às diferentes unidades de manejo e, ou, classes de solo, sendo, contudo, bastante responsivo à fertilidade do solo. Assim, é necessário e oportuno o desenvolvimento de um modulador edáfico que reflita os efeitos do solo sobre os fluxos de água e nutrientes para uso no 3-PG. Tal modulador pode ser baseado em resultados de análise foliar, pois os teores de nutrientes na folha, além de refletirem os fluxos de água e nutrientes no solo, apresentam correlação com o crescimento e a produção das plantas. Dessa forma, este trabalho teve por objetivo: avaliar o grau de universalidade das parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil; determinar a produtividade potencial do eucalipto em diferentes regiões do Brasil; e desenvolver modulador baseado na análise foliar, que incorpore os efeitos do solo sobre a produtividade, para uso em modelos ecofisiológicos. Conclui-se que: a) o uso dos Índices Balanceados de Kenworthy e do método da linha de fronteira aplicado aos resultados de análises foliares em populações de plantios jovens de eucalipto permite determinar o grau de limitação à produtividade em função do grau de balanço de cada nutriente, isolando os efeitos de fatores não nutricionais, e embasando a determinação de modulador edáfico para uso em modelos ecofisiológicos de crescimento florestal; b) a estratégia de obtenção da parametrização do modelo 3-PG influencia no grau de universalidade da

parametrização do modelo. Parametrizações obtidas em parcelas de experimentos irrigação/fertirrigação apresentam baixa universalidade ao passo que parametrização obtida em plantios comerciais tem alta universalidade e assim alto grau de extrapolação; c) a produtividade potencial de madeira (tronco sem casca) de eucalipto aos seis anos, para o Brasil, sob efeito do clima, considerando a faixa abrangida pela média ± 1 desvio padrão (69 % dos sítios simulados), varia de 42,3 a 73,4 m³/ha/ano; d) a precipitação pluviométrica, a radiação solar, a distribuição de chuvas e a temperatura máxima influenciam, nessa ordem, a produtividade potencial de eucalipto no Brasil sob efeito do clima; e e) quanto à demanda nutricional para produção de eucalipto (tronco com casca) tem-se a seguinte ordem: Ca > N > K > Mg > P. Considerando a faixa que abrange cerca de 69 % dos sítios simulados (média ± 1 desvio-padrão), têm-se as seguintes faixas para as quantidades de macronutrientes acumuladas no tronco: 227 a 393, 17 a 30, 136 a 236, 340 a 590 e 62 a 107 kg/ha para N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

ABSTRACT

BORGES, Jarbas Silva, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2012. **Edaphic modulator for use in ecophysiological model and potential productivity of eucalypt stands.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-advisers: Helio Garcia Leite and Roberto de Aquino Leite.

The rate of expansion of eucalyptus plantations in Brazil has generated concern about its effects on the physical resources, especially soil and water, and the sustainability of these systems, when intensively managed. In this sense, process-based growth models such as 3-PG has obtained prominence since they are responsive to the environmental and site conditions changes and have high predictive and explanation power, which allows increasing our ability to understand and predict forest growth. However, despite good results, the 3-PG model has low sensitivity to the different management units and or soil classes, but it is very responsive to soil fertility. Thus, it is necessary and desirable to develop an edaphic modulator that reflects the effects of soil on the flow of water and nutrients for use in the 3-PG. Such modulator can be based on leaf analysis results, since the nutrient content in the leaf besides reflect the flow of water and nutrients in the soil, correlate with the growth and production of the plants. Therefore, the objectives of the present research were: assess the degree of universality of the parameterization of 3-PG available for Brazil; determine the eucalyptus potential productivity in different regions of Brazil; and develop modulator based on leaf analysis that incorporates the soil effects on productivity, for use in ecophysiological models. It was concluded that: a) the use of the Kenworthy balanced index and of boundary line approach applied to the leaf analysis results in young eucalyptus stands allow to determine the degree of limitation to productivity due to degree of balance of each nutrient, isolating the effects of factors non-nutritional, and basing the determination of edaphic modulator for use in ecophysiological forest growth models; b) the strategy for obtaining the parameterization of the 3-PG model influences the degree of universality of the model parameterization. Parameterizations obtained in plots of trials irrigated / fertirrigated have low universality while the parameterization obtained in commercial plantations has high universality and

thus a high degree of extrapolation; c) the potential productivity of eucalyptus wood (stem without bark) to the six years, to Brazil, under the influence of climate, considering the range covered by mean \pm 1 standard deviation (69 % of simulated sites) ranges from 42.3 to 73.4 m³/ha/year; d) the rainfall, the solar radiation, the rainfall distribution and the maximum temperature influence, in that order, eucalyptus potential productivity in the Brazil under the effect of climate; e) about the nutritional demand for eucalyptus production (stem) it has the following order: Ca > N > K > Mg > P. Considering the range covering about 69 % of simulated sites (mean \pm 1 standard deviation), it has the following ranges to the quantities of nutrients accumulated in the stem: 227 - 393, 17 - 30, 136 - 236, 340 - 590, and 62 - 107 kg/ha for N, P, K, Ca and Mg, respectively.

INTRODUÇÃO GERAL

Os plantios de eucalipto no Brasil frequentemente ocupam áreas cujos solos, de baixa fertilidade natural e com histórico de uso agrícola e ou pastagens, apresentam elevado grau de degradação física, química e biológica. Nessas áreas, o manejo adequado, com a correção dessas limitações, tem proporcionado condições para que o eucalipto possa expressar suas características de rápido crescimento e elevada produtividade, nos mais diferentes tipos de solo e condições de clima. Como resultado, os plantios de eucalipto têm se espalhado pelas mais diversas regiões do Brasil, visando aumentar a oferta de madeira para acompanhar o crescimento da demanda, já elevada e que tende a se acentuar nos próximos anos.

As altas taxas de crescimento e as elevadas produtividades dos plantios de eucalipto, aliadas à grande e rápida expansão desses plantios, tem gerado preocupação sobre os seus efeitos em recursos do meio físico, especialmente solo e água (ALMEIDA *et al.*, 2010), havendo indagações quanto à sustentabilidade desses sistemas, quando intensivamente manejados. Nesse contexto, fica realçada a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que permitam quantificar e, por conseguinte, planejar o impacto destes plantios.

Nesse sentido, a adoção de modelos de crescimento baseados em processos parece ser uma alternativa promissora ao uso de modelos empíricos, já que os primeiros são mais responsivos a mudanças ambientais e nas condições do sitio e têm alta capacidade preditiva e maior capacidade de extrapolação, permitindo, também, a investigação e avaliação dos fatores que influem no crescimento e produtividade florestal (KORZUKHIN *et al.*, 1996). Os modelos baseados em processos baseiam-se nos processos físicos e biológicos envolvidos no crescimento e quando devidamente parametrizados, calibrados e validados, podem fornecer estimativas seguras e confiáveis.

Dentre os modelos baseados em processos idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais, o modelo 3-PG, acrônimo de *Physiological Principles in Predicting Growth* (LANDSBERG e WARING, 1997), tem obtido destaque. Esse modelo, desenvolvido para estimar a produtividade de povoamentos florestais monoespecíficos e equiâneos (DUURSMA, 2004), baseia-se em processos fisiológicos utilizados em modelos de balanço de

carbono, mas incorpora, também, relacionamentos obtidos a partir de medições experimentais, o que diminui a quantidade de variáveis de entrada, por simplificar o tratamento de processos fisiológicos complexos.

O 3-PG tem sido amplamente adotado por cientistas florestais e silvicultores na Europa, Ásia, África, América do Norte, América do Sul, Austrália e Nova Zelândia, (LANDSBERG *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2010) devido à relativamente baixa demanda por dados de entrada, à estrutura simples e transparente, e à sua facilidade de operação (ESPREY *et al.*, 2004).

Essencialmente, o modelo 3-PG estima a quantidade de energia radiante que será absorvida pelo dossel e convertida em carboidratos. O valor dessa eficiência de conversão é calculado a partir de um valor de eficiência quântica máxima do dossel (α_{CX}) que considera as limitações impostas à produtividade pelo déficit de pressão de vapor (f_{VPD}), pela temperatura (f_T), pela ocorrência de geadas (f_F), pela disponibilidade hídrica (f_W), pela fertilidade do solo (f_N) e pela idade do povoamento (f_{age}), todos na forma de moduladores. Posteriormente, o carbono produzido pelo dossel é alocado para os diferentes compartimentos das plantas, considerando relacionamentos alométricos entre o diâmetro à altura do peito (dap) e as respectivas biomassas de folhas, de lenho e de raízes.

O 3-PG possibilita a predição do impacto dos fatores ambientais determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes) e de práticas de manejo, sobre o potencial produtivo da espécie florestal e, conseqüentemente, sobre a sustentabilidade das florestas plantadas (ALMEIDA *et al.*, 2004a). Ele pode também ser empregado para simular a produção florestal potencial e, ou, aquela a ser obtida em uma determinada região que ainda não possui florestas plantadas (ALMEIDA *et al.*, 2004b).

Apesar dos bons resultados obtidos com o 3-PG na simulação da produtividade de povoamentos de eucalipto, este modelo hoje é fortemente influenciado por variáveis climáticas, mas possui baixa sensibilidade às diferentes unidades de manejo e, ou, classes de solo, sendo, no entanto, bastante responsivo à fertilidade do solo, e, assim, indiretamente, pode-se propor, à nutrição.

No 3-PG, a fertilidade do solo, representada em essência pela variável FR, além de influenciar a eficiência quântica máxima do dossel, também influencia o padrão de alocação de carbono na planta.

Têm sido propostas na literatura diferentes formas para obtenção do valor de FR para uso no 3PG. No entanto, tendo em vista a subjetividade e a dificuldade de aplicação dos métodos apresentados, alguns trabalhos têm considerado FR como variável ajustável (SANDS e LANDSBERG, 2002; LANDSBERG *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2004a; WARING *et al.*, 2011), ou seja, dependendo das condições locais, seu valor pode ser alterado para possibilitar melhor relacionamento entre os valores de produtividade observados e aqueles estimados pelo 3-PG, mantendo-se constantes os valores das demais variáveis de entrada requeridas pelo modelo.

Nesse contexto, fica clara a importância do desenvolvimento de um modulador edáfico, capaz de refletir os efeitos de limitações devido a condições de solo não ótimas, para impor penalização às estimativas de produtividade potencial da floresta. Esse modulador poderia se basear na análise foliar, já que os teores de nutrientes no tecido refletem, em essência, os fluxos de água e nutrientes no solo, e são influenciados por todos os fatores e condições do ambiente físico que determinam as taxas de crescimento e de absorção dos nutrientes.

Assim, este trabalho teve por objetivo: avaliar o grau de universalidade das parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil; determinar a produtividade potencial do eucalipto em diferentes regiões do Brasil; e desenvolver modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico de crescimento florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004a. ISSN 0378-1127.

ALMEIDA, A. C. et al. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 167-177, 2004b. ISSN 0378-1127.

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 [S.l.]*, v. 259, n. 9, p. 1730-1740, 2010.

DUURSMA, R. A. A simple process-based model of forest growth, and a test for the Priest River Experimental Forest. 2004. 169p. Thesis (PhD) – University of Idaho, [S.l.], 2004.

ESPREY, L. J.; SANDS, P. J.; SMITH, C. W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 235-250, 2004. ISSN 0378-1127.

KORZUKHIN, M. D.; TER-MIKAELIAN, M. T.; WAGNER, R. G. Process versus empirical models: which approach for forest ecosystem management? *Canadian Journal of Forest Research*. V. 26, p. 879–887. 1996.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management [S.l.]*, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J. J. et al. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management [S.l.]*, v. 172, n. 2-3, p. 199-214, 2003.

SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, v. 163, n. 1-3, p. 273-292, 2002. ISSN 0378-1127.

CAPÍTULO I

MODULADOR EDÁFICO PARA USO EM MODELO ECOFISIOLÓGICO PARA DETERMINAÇÃO DA PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE EUCALIPTO

RESUMO: O modelo 3-PG tem apresentado bons resultados na determinação da produtividade potencial de florestas plantadas em diferentes regiões do Brasil e do Mundo. No entanto, apesar dos bons resultados obtidos, este modelo possui baixa sensibilidade às diferentes unidades de manejo e, ou, classes de solo, sendo, no entanto, bastante responsivo à fertilidade do solo. Contudo, as estratégias para obtenção de FR, que é a variável que representa a fertilidade do solo no 3-PG, ou são de difícil operacionalização para uso no 3-PG ou tratam FR como uma variável que incorpora efeitos outros além da fertilidade do solo, com base inclusive na experiência do manejador florestal. Dessa forma, é necessário e oportuno o desenvolvimento de um modulador edáfico que reflita os efeitos do solo sobre os fluxos de água e nutrientes para uso no 3-PG. Tal modulador pode ser baseado em resultados de análise foliar, pois os teores de nutrientes na folha, além de refletirem os fluxos de água e nutrientes no solo, apresentam correlação com o crescimento e a produção das plantas. Assim, este trabalho teve por objetivo desenvolver um modulador baseado na análise foliar, que incorpore os efeitos do solo sobre a produtividade, para uso em modelos ecofisiológicos. Para realização deste trabalho foi confeccionado um banco de dados contendo informações sobre teores foliares de macro e micronutrientes, produtividade e época de plantio e de amostragem, referentes a plantios jovens de eucalipto (idade inferior a 2,5 anos) localizados em três regiões: Centro-Leste de Minas Gerais – (Vale do Rio Doce); Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia; e Cerrado de Minas Gerais. A diagnose do estado nutricional destes talhões foi realizada com o auxílio do software Nutreelyptus parametrizado com normas para plantios jovens específicas para cada sub-região dentro de cada região estudada, utilizando o método dos Índices Balanceados de Kenworthy. O crescimento e os índices nutricionais padronizados (z) obtidos para cada nutriente e talhão, foram relacionados por meio da abordagem da linha de fronteira, para

obtenção do modulador edáfico. Conclui-se que: O uso dos Índices Balanceados de Kenworthy e do método da linha de fronteira aplicados aos resultados de análises foliares em populações de plantios jovens de eucalipto permite determinar o grau de limitação à produtividade em função do grau de balanço de cada nutriente, isolando os efeitos de fatores não nutricionais, e embasando a determinação do modulador edáfico para uso em modelos ecofisiológicos de crescimento florestal.

Palavras chave: Modelo 3-PG, análise foliar, produtividade potencial.

EDAPHIC MODULATOR FOR USE IN ECOPHYSIOLOGICAL MODEL FOR EUCALYPTUS POTENTIAL PRODUCTIVITY DETERMINATION

ABSTRACT: The 3-PG model has shown good results in determining the potential productivity of planted forests in different regions of Brazil and the World. However, despite good results, the 3-PG has low sensitivity to the different management units and or soil classes, but it is very responsive to soil fertility. Nevertheless, the strategies to obtain the FR (fertility rate), which is the variable representing the soil fertility in the 3-PG, are difficult to implement in the 3-PG or they deal FR as a variable which incorporates effects other than soil fertility, based on including in experience the forest manager. Thus, it is necessary and desirable to develop an edaphic modulator that reflects the effects of soil on the flow of water and nutrients for use in the 3-PG. Such modulator can be based on leaf analysis results, since the nutrient content in the leaf besides reflect the flow of water and nutrients in the soil, correlate with the growth and production of the plants. Therefore, the goal of the present research was develop modulator based on leaf analysis that incorporates the soil effects on productivity, for use in ecophysiological models. For this study, we prepared a database containing information on foliar concentrations of macro and micronutrients, productivity, and planting date and sampling date, referring to young eucalyptus plantations (less than 2.5 years old) located in three regions: East Central of Minas Gerais - (Rio Doce Valley), the Northern

coast of Espírito Santo and Southern Bahia, and Cerrado of Minas Gerais state. The diagnosis of nutritional status of these stands was carried out with the help of the software Nutreelyptus parameterized with norms for young plantations specific to each sub-region within each region studied, using the method of the Kenworthy Balanced Index. The growth and the nutritional indices standardized (z) - obtained for each nutrient and plot - were related by the boundary line approach to obtain the edaphic modulator. It was concluded: The use of the Kenworthy balanced index and of boundary line approach applied to the leaf analysis results in young eucalyptus stands allow to determine the degree of limitation to productivity due to degree of balance of each nutrient, isolating the effects of factors non-nutritional, and basing the determination of edaphic modulator for use in ecophysiological forest growth models.

Keywords: 3-PG model; Leaf analysis; Potential Productivity

INTRODUÇÃO

A produtividade de povoamentos florestais é, de modo geral, primariamente dependente dos fatores que afetam o crescimento e alocação de carbono das plantas (FONTES *et al.*, 2006), tais como: clima (radiação solar, temperatura, umidade relativa, e precipitação pluvial), fisiografia do terreno (posição na paisagem, inclinação e exposição da área), solo (propriedades físicas, químicas e biológicas) e material genético (MEAD, 2005). A combinação desses fatores, adotado um dado nível de manejo, implica em produtividades diferenciadas de acordo com a restrição imposta por essas variáveis.

Em regiões de clima tropical, como no Brasil, os fluxos de água e de nutrientes são os fatores abióticos que mais influenciam a produção florestal (BARROS e COMERFORD, 2002; STAPE, 2002). Dessa forma, pode-se dizer que nessas regiões, a produtividade florestal potencial, definida pelo clima e pela qualidade do material genético, se dará quando os fatores água e nutrientes e as características físicas do solo não forem limitantes. Assim, conhecendo a demanda hídrica e nutricional da planta pode-se projetar a produção a ser obtida em uma determinada região. E, portanto, propor que a diferença entre a estimativa de produtividade potencial e a produtividade real de povoamentos de eucalipto, para um nível de manejo considerado como adequado, seja reflexo de características do solo que possam estar limitando a aquisição dos recursos água e nutrientes.

Uma alternativa para a quantificação da produção florestal potencial é o emprego de modelos baseados em processos (MBP), os quais consideram os mecanismos físicos, químicos e biológicos responsáveis pelo ganho e a alocação de carbono, o uso dos recursos do meio, e como esses processos são influenciados por fatores ambientais (SIMIONI *et al.*, 2008). Estes modelos são tipicamente sensíveis a dados climáticos e modulados por propriedades do solo que afetam o armazenamento e a disponibilidade de água e nutrientes (MAKELA *et al.*, 2000).

Os MBP são importantes ferramentas empregadas na silvicultura (MAKELA *et al.*, 2000), com aplicações que incluem desde a predição do

sequestro de carbono ao auxílio no processo de tomada de decisão no manejo florestal. Eles são o principal meio através do qual o conhecimento dos processos biológicos envolvidos no crescimento florestal pode ser incluído em sistemas de manejo florestal (BATTAGLIA e SANDS, 1998). Estes modelos proporcionam um melhor entendimento dos fatores envolvidos na produção florestal, possuem capacidade preditiva espacial e temporal (WATERWORTH *et al.*, 2007), e fornecem a predição da produtividade potencial florestal.

Dentre os MBP desenvolvidos para estimar a produtividade de povoamentos florestais, o modelo 3-PG, acrônimo de *Physiological Principles in Predicting Growth* (LANDSBERG e WARING, 1997), tem obtido destaque. Este modelo combina uma abordagem processual (conceitos simplificados de eficiência de uso da radiação solar e água, e de balanço e partição de carbono) com relacionamentos empíricos (obtidos em experimentos e, ou, em plantios comerciais). Esta abordagem resulta em um modelo operacional robusto, útil para os silvicultores e retém base ecofisiológica.

Neste modelo, as limitações do sítio impostas pelo solo ao crescimento da floresta e, conseqüentemente, sobre a produtividade potencial florestal são incorporadas por meio de um modulador da fertilidade do solo (f_N). Este modulador influencia a eficiência quântica do dossel e os padrões de alocação de carbono nas plantas, e sua obtenção está intimamente relacionada ao nível de fertilidade do solo (FR) que no 3-PG varia de 0 (baixa fertilidade) até 1 (sem limitação nutricional). O relacionamento entre f_N e FR é expresso pela equação:

$$f_N = 1 - (1 - f_{N0})(1 - FR)^{n_{fN}}$$

em que, f_{N0} é o valor de f_N quando $FR = 0$ e n_{fN} é a potência da equação.

Têm-se proposto na literatura diferentes formas para obtenção do valor de FR para o modelo 3-PG. White *et al.*(2000), por exemplo, definiram os valores de FR a partir de um fator qualitativo que descreve a disponibilidade relativa de nutrientes a partir de um mapa digital de solos. No mapa, os solos foram agrupados em classes, às quais foram atribuídos valores de FR entre 0,25 e 1,0, baseando-se em informações de especialistas que relacionaram a classe taxonômica do solo com a disponibilidade de nutrientes. Nightingale *et al.* (2007) também pautaram a obtenção do FR a mapas de fertilidade do solo, no entanto, no trabalho, os mapas de fertilidade foram elaborados em base à

determinação dos teores de N no solo até 50 cm de profundidade utilizando o método Kjeldahl, apesar de o teor de N total no solo não ser uma medida direta de N disponível.

Stape *et al.* (2004) propuseram uma estimativa mais objetiva para o FR, baseada na resposta à fertilização (REF) (t/ha/ano), obtida a partir de experimentos com parcelas fertilizadas e não fertilizadas:

$$REF = \left(\frac{PPLM_F}{P_I M_F} - \frac{PPLM_C}{P_I M_C} \right) \times \left(\frac{P_I M_F + P_I M_C}{2} \right)$$

em que, PPLM é o incremento de madeira (lenho + casca + galhos) durante o período de um ano, P_IM é a biomassa inicial de madeira e as letras subscritas C e F referem-se aos tratamentos controle (não fertilizado) e fertilizado, respectivamente. A partir dos dados de REF foram estimados os valores de FR variando entre 0,6 (escolhido baseado nas estimativas de produtividades obtidas pelo 3-PG para a parcela de maior resposta a fertilização, tendo o FR como variável de ajuste) e 1,0 (parcelas sem resposta a adubação), pela equação: $FR = \{[0,4 (29 - REF)/29] + 0,6\}$, onde 29 t ha⁻¹ ano⁻¹ foi a maior resposta a adubação (REF) observada. No entanto, apesar de objetiva, o alto custo associado à instalação e manutenção desses experimentos e o tempo relativamente longo entre a instalação e a obtenção dos resultados, tornam este método de pouca aplicabilidade prática na obtenção de estimativas de FR para uso no 3-PG.

Já Almeida *et al.* (2010) ponderaram a obtenção do FR a partir da determinação dos principais fatores que limitam a disponibilidade de nutrientes. Para esses autores, estes fatores são a fertilidade natural e potencial do solo, água, oxigênio, manejo e topografia. Para cada um desses fatores, a limitação pode ser nula (1,0), leve (0,8), moderada (0,6), forte (0,4) e muito forte (0,2). Neste método, o valor de FR continua variando entre 0 (alta limitação) e 1 (sem limitação) com, no entanto, a inclusão de pesos para cada um dos efeitos dos fatores limitantes citados. O peso relativo de cada fator limitante na equação para obtenção do FR foi: fertilidade (FL)= 0,4; água (WL)= 0,2; oxigênio (OL)= 0,1; manejo (ML)= 0,2; topografia (TL)= 0,1. Assim,

$$FR = 0,4 FL + 0,2 WL + 0,1 OL + 0,2 ML + 0,1 TL$$

Adicionalmente, os autores propuseram que o valor de FR é gradualmente reduzido ao longo do tempo, para uma rotação de sete anos, em 20 % do valor inicialmente estabelecido. Neste método, apesar do estabelecimento de uma equação para definição dos valores de FR, os pesos dos coeficientes fixos e a subjetividade implícita na definição dos valores de cada fator limitante imprimem ao método baixa capacidade de extrapolação e, portanto, o torna de difícil aplicação na definição do FR para uso no 3-PG.

Por último, para contornar a dificuldade na determinação do FR, alguns trabalhos consideram-no como variável ajustável (SANDS e LANDSBERG, 2002; LANDSBERG *et al.*, 2003; ALMEIDA *et al.*, 2004; WARING *et al.*, 2011), ou seja, dependendo das condições locais, seu valor pode ser alterado para possibilitar melhor relacionamento entre os valores de produtividade observados e aqueles estimados pelo 3-PG, mantendo-se as demais variáveis de entrada do modelo constantes.

Segundo Waring *et al.* (2011) a maioria dos mapas de solo, independente da escala, são incapazes de levar em consideração mudanças na fertilidade do solo associados ao manejo. Dessa forma, esses autores propõem a determinação da fertilidade do solo, mediante o ajuste entre as estimativas do índice de área foliar (IAF) obtidas pelo modelo 3-PG e as estimativas de IAF derivadas de medições por satélite, tendo o fator de fertilidade (FR) do 3-PG como variável de ajuste.

Nota-se, dessa forma, que as estratégias para obtenção de FR ou são de difícil operacionalização para uso no 3-PG ou tratam FR como uma variável que incorpora efeitos outros além da fertilidade do solo, com base inclusive na experiência do manejador florestal. FR, na verdade, tem sido usado no modelo 3-PG para conferir resolução ao modelo em nível de sítio florestal.

Assim, é necessário e oportuno o desenvolvimento de um modulador edáfico que reflita os efeitos do solo sobre os fluxos de água e nutrientes para uso no 3-PG. Os valores desse modulador devem ser definidos objetivamente e serem de fácil e rápida obtenção.

Tal modulador poderia ser baseado em resultados de análises de tecido, por exemplo, na análise foliar, pois os teores de nutrientes na folha, além de refletirem os fluxos de água e nutrientes no solo, apresentam correlação com o

crescimento e a produção das plantas. A concentração foliar de um nutriente demonstra o relacionamento existente entre o incremento adicional no nutriente absorvido e o correspondente aumento no crescimento da planta, refletindo assim a relação entre taxa de absorção do nutriente e taxa de crescimento da planta. Quando um nutriente está deficiente na planta, sua adição resulta em um aumento na produção e usualmente um aumento no teor deste nutriente na planta. Quando o teor do nutriente limitante aumenta, a produção aumenta até um máximo quando o nutriente deixa de ser o fator limitante do crescimento que permanece constante. Quantidades adicionais absorvidas do nutriente aumentam sua concentração no tecido aos níveis de “consumo de luxo”.

Dentre os métodos disponíveis para interpretação dos resultados da análise foliar pode-se destacar o método dos Índices Balanceados de Kenworthy (KENWORTHY, 1961). O Índice Balanceado de Kenworthy é um método de diagnose nutricional que permite avaliar o estado nutricional da planta por meio da determinação da porcentagem de desvio do teor de um dado nutriente em relação à sua norma (teor do nutriente na população de referência), considerando a variabilidade do teor do nutriente na população geradora da norma. O método indica a situação de balanço de cada nutriente em análise na amostra em relação à sua norma, tendo assim aceção quantitativa, e gerando índices que podem ser relacionados com a produtividade pela abordagem da linha de fronteira.

O princípio da linha de fronteira foi proposto inicialmente por Webb (1972) e foi originalmente empregado para determinação de níveis críticos ou balanço de nutrientes em métodos de diagnóstico nutricional (SCHMIDT *et al.*, 2000). Nesse contexto, Walworth *et al.* (1986) em trabalho com banco de dados proveniente de 8.000 lavouras de milho de todo o mundo, concluíram que a linha de fronteira pode ser usada para determinar o nível ótimo ou a relação ótima entre nutrientes no tecido vegetal. Os autores afirmam que o ótimo determinado pelo método da linha de fronteira e os estimados a partir da população de alta produtividade são muito próximos, o que coloca a linha de fronteira como um método aceitável para estimar estes valores. Resultado semelhante foi obtido por Vizcayno-Soto e Côté (2004) no emprego deste método para espécies florestais na região de Quebec no Canadá.

As empresas florestais no Brasil têm, nos últimos anos, realizado monitoramentos sistemáticos do estado nutricional de suas florestas jovens de eucalipto. Como consequência já se dispõe de bancos de dados com resultados de análises foliares e do crescimento inicial dessas florestas.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver um modulador baseado na análise foliar, que incorpore os efeitos do solo sobre a produtividade, para uso em modelos ecofisiológicos.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização do banco de dados

Para realização do trabalho foi confeccionado banco de dados contendo informações sobre teores foliares de nutrientes e produtividade de plantios jovens de eucalipto (de 0,5 a 2,5 anos) localizados em três regiões: Região 1 - Centro-Leste de Minas Gerais (Vale do Rio Doce); Região 2 - Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia; Região 3 - Cerrado de Minas Gerais, num total de 3.265 talhões. Os dados foram obtidos de campanhas de monitoramento nutricional e avaliação do crescimento inicial dos povoamentos, no contexto de inventários precoces realizados pelas empresas. Os teores foliares foram determinados em amostras de folhas coletadas do terço médio da planta e terço médio dos galhos. Os talhões amostrados em cada região seguiram manejo adotado nos plantios comerciais pertencentes a cada empresa.

Na região do Vale do Rio Doce os plantios de eucalipto estavam localizados entre 18° e 20° de latitude sul e 42° e 44° de longitude oeste. Segundo a classificação climática de Köppen, a região apresenta os climas Aw (clima tropical, com inverno seco e verão úmido) e Cwa (clima subtropical de inverno seco e verão quente com temperaturas maiores ou iguais a 22 °C). O relevo da região é predominantemente forte ondulado, caracterizado por encostas longas do tipo convexo ou convexo-côncavas com declividade menor do que 45 ° e interflúvios estreitos e planos.

Os dados compreendendo as regiões do litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia foram coletados em 1.099 talhões distribuídos em três sub-regiões: Aracruz e São Mateus (ES) e Posto da Mata distrito de Nova Viçosa

(BA). O município de Aracruz localiza-se nas coordenadas 19° 45' S e 40° 16' W, com altitude de 10 a 50 m; São Mateus localiza-se a 18° 42' S e 39° 51' W, com altitude média de 25 m; e Posto da Mata, Sul da Bahia, a 17° 65' S e 39° 52' W, com altitude média de 30 m. A classificação climática das duas regiões do Espírito Santo, segundo Köppen, é do tipo Aw (clima tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno). No Sul da Bahia, o tipo climático é Am (clima tropical úmido, sem estação seca pronunciada) com chuvas de verão e invernos com uma estação seca pouco pronunciada.

Quanto aos dados referentes à região denominada de Cerrado de Minas Gerais, foram coletados dados de 1.336 talhões em uma ampla faixa deste bioma, com maior concentração de talhões amostrados (792) no município de Três Marias. O clima da região é classificado como Aw (clima tropical com inverno seco e verão úmido).

Análise dos dados

Primeiramente procedeu-se análise de consistência dos dados, sendo considerados para o trabalho os teores dos nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B) compreendidos entre média \pm 5 desvios padrão. Após esta etapa, a quantidade total de talhões remanescentes no banco de dados em cada região foi de 830 na região 1, 1.099 na região 2 e 1.336 na região 3.

Na sequência, como em cada região havia talhões localizados em diferentes sub-regiões optou-se por trabalhar com a variável de crescimento em escala relativa, de forma semelhante ao procedimento adotado em ensaios de calibração visando à avaliação da fertilidade do solo. Para tanto, em cada sub-região das três regiões descritas anteriormente, ao talhão com maior valor da variável de crescimento (Altura média), estratificado por idade do talhão, ou seja, Altura/idade em m/ano, atribuiu-se o valor 100 %, sendo o crescimento relativo (%) dos demais talhões calculado proporcionalmente.

A diagnose do estado nutricional dos talhões que compõem o banco de dados foi realizada com o auxílio do software Nutreelyptus, parametrizado com normas para plantios jovens específicas para cada sub-região dentro de cada região estudada, utilizando o método dos Índices Balanceados de Kenworthy, conforme descrito na sequência.

Índices Balanceados de Kenworthy

Para a determinação dos Índices Balanceados de Kenworthy, de cada nutriente e talhão analisado, foram calculados os índices P, I e B (todos expressos em porcentagem), independentemente do teor do nutriente na amostra (Y_i) ser maior ou menor do que o teor médio da população de referência, considerado padrão (\bar{Y}), de acordo com método proposto por ¹Alvarez V., adaptado do método original estabelecido por Kenworthy (1961) e apresentado por Kurihara (2004):

$$P = 100 \frac{Y_i}{\bar{Y}}$$

$$I = \frac{(Y_i - \bar{Y}) CV}{\bar{Y}}$$

$$B = P - I$$

em que,

P = Proporção entre o teor do nutriente na amostra (y_i) e o teor padrão (\bar{y});

I = Influência da variação;

B = Índice Balanceado de Kenworthy;

CV = Coeficiente de variação do teor do nutriente na população de referência;

Na sequência, os Índices Balanceados de Kenworthy para cada nutriente e talhão, obtidos no passo anterior, foram transformados em variáveis normais reduzidas (z) de acordo com dedução proposta por ¹Alvarez V. e apresentada por Kurihara (2004):

$$z = \frac{B - 100}{CV - \frac{CV^2}{100}}$$

em que:

B = índice balanceado de Kenworthy

CV = coeficiente de variação do teor do nutriente na população de referência;

A soma dos valores absolutos dos Índices Balanceados de Kenworthy padronizados obtidos para cada nutriente dividido pelo número de nutrientes fornece o “índice de balanço nutricional médio” (zIBKWm), que permite comparar o balanço nutricional global de diversos plantios entre si.

¹ Prof. Victor Hugo Alvarez V. – Departamento de Solos – Universidade Federal de Viçosa.

Na Tabela 1 é apresentada breve análise descritiva dos valores dos Índices Balanceados de Kenworthy padronizados e do crescimento relativo (%) encontrados nas diferentes regiões abrangidas pelo estudo.

Tabela 1. Análise descritiva dos Índices Balanceados de Kenworthy padronizados (z) e do crescimento relativo (CR) (%) nas diferentes regiões abrangidas pelo trabalho.

Variável	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	n
Vale do Rio Doce					
z(iBKW_N)	4,09	-2,58	0,12	1,06	830
z(iBKW_P)	2,36	-2,13	-0,20	0,93	830
z(iBKW_K)	2,42	-3,21	-0,22	0,97	830
z(iBKW_Ca)	3,40	-2,72	-0,11	0,92	830
z(iBKW_Mg)	3,46	-2,61	-0,09	1,03	830
z(iBKW_S)	2,86	-2,62	-0,07	0,84	830
z(iBKW_Cu)	3,10	-2,01	-0,06	0,86	830
z(iBKW_Fe)	1,66	-1,27	-0,34	0,60	830
z(iBKW_Zn)	3,11	-1,96	-0,18	0,86	830
z(iBKW_Mn)	3,08	-1,40	-0,13	0,81	830
z(iBKW_B)	2,64	-2,50	-0,30	0,88	830
Crescimento Relativo (%)	100,00	29,54	74,10	14,30	830
Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia					
z(iBKW_N)	3,04	-2,61	0,06	0,97	1099
z(iBKW_P)	3,88	-1,86	0,27	0,97	1099
z(iBKW_K)	2,89	-2,50	-0,04	1,01	1099
z(iBKW_Ca)	3,32	-2,19	-0,05	1,02	1099
z(iBKW_Mg)	3,04	-2,46	0,00	1,04	1099
z(iBKW_S)	3,18	-2,21	0,05	0,82	1099
z(iBKW_Cu)	3,28	-1,80	-0,14	0,91	1099
z(iBKW_Fe)	4,87	-1,81	0,29	1,06	1099
z(iBKW_Zn)	3,23	-1,80	-0,07	0,73	1099
z(iBKW_Mn)	3,11	-1,91	-0,05	0,83	1099
z(iBKW_B)	4,01	-1,97	0,00	0,96	1099
Crescimento Relativo (%)	100,00	28,36	59,80	13,26	1099
Cerrado de Minas Gerais					
z(iBKW_N)	4,73	-3,67	-0,02	1,12	1336
z(iBKW_P)	3,98	-2,41	-0,09	0,97	1336
z(iBKW_K)	3,30	-2,29	0,03	1,07	1336
z(iBKW_Ca)	2,98	-2,26	-0,06	0,95	1336
z(iBKW_Mg)	5,89	-2,43	0,28	1,14	1336
z(iBKW_S)	3,68	-3,98	-0,09	1,14	1336
z(iBKW_Cu)	4,48	-2,69	0,02	1,13	1336
z(iBKW_Fe)	4,29	-2,28	0,10	0,99	1336
z(iBKW_Zn)	3,83	-2,06	-0,03	0,97	1336
z(iBKW_Mn)	3,30	-2,05	0,01	0,98	1336
z(iBKW_B)	4,02	-2,29	-0,05	1,09	1336
Crescimento Relativo (%)	100,00	32,26	65,51	12,75	1336

n: número de talhões.

Obtidos os índices, que refletem o grau de balanço de cada nutriente e o grau de balanço nutricional global nas florestas avaliadas, os valores de crescimento relativo (%) (Y), por talhão dentro de cada região, foram relacionados por meio de gráficos de dispersão em função do respectivo índice zIBKW (X) obtido para cada nutriente. Na nuvem de pontos obtida foram selecionados os pares XY correspondentes à fronteira superior e a fronteira inferior do relacionamento (populações de fronteira). Esses procedimentos foram realizados com o auxílio do aplicativo computacional “Boundary fit”, em desenvolvimento na UFV. Na sequência, com o auxílio do aplicativo “Curve Expert 1.4” foram ajustadas regressões relacionando o crescimento relativo e os valores de zIBKW de cada nutriente, considerando a fronteira superior, sendo selecionada a equação que melhor se ajustava aos dados. As curvas assim obtidas são indicativas da resposta do crescimento relativo (CR) ao grau de balanço nutricional somente do nutriente considerado em cada relacionamento, não sendo influenciada pelo balanço dos demais nutrientes nem por outros fatores de produção.

Para cada nutriente, em cada região, estimou-se a faixa de zIBKW para a classe suficiente ($90 \leq CR \leq 100$, à esquerda do máximo) e a faixa de zIBKW para a classe alta ($100 > CR \geq 90$, à direita do máximo).

A seguir, em cada região, os valores de zIBKW de cada nutriente obtidos no diagnóstico do estado nutricional das florestas foram substituídos nas equações ajustadas pelo método da linha de fronteira anteriormente descrito, sendo assim obtidos os valores de CR estimado limitado por cada nutriente. A média dos valores de CR assim estimados, foram relacionados aos valores de zIBKW_m, mediante equações de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Relacionamento Produtividade - nutrição

Nas Figuras de 1 a 6 são apresentados gráficos de dispersão relacionando os índices zIBKW de cada nutriente com a produtividade (crescimento relativo - CR) alcançada nos respectivos talhões, em cada uma das regiões abrangidas pelo estudo. Nestes gráficos, os pontos destacados em azul representam a população de fronteira superior de cada relacionamento.

Conforme pode ser observado nas Figuras 1 a 6, a linha de fronteira superior (LFS) é formada quando os valores para duas variáveis são graficados e uma linha envolvendo estes pontos pode ser estabelecida (Vizcayno-Soto e Côté, 2004). Esta linha representa o efeito limitante da variável independente analisada (zIBKW) sobre a variável dependente (CR) e, dessa forma, pode-se assumir que todos os valores abaixo desta região de fronteira resultam da influência de outras variáveis ou da combinação de variáveis que possam estar limitando a variável dependente (CR). Portanto, considerando que suficiente número de medições foram disponibilizadas de forma a cobrir todo espaço de variação da variável independente analisada, a linha de fronteira indica a resposta da produtividade (CR) à variável independente (zIBKW) quando outras variáveis não são limitantes. Segundo Blanco-Macías *et al.* (2009) o trabalho com grandes bases de dados, conforme feito neste trabalho, viabiliza o emprego do método da linha de fronteira.

A observação das Figuras de 1 a 6 revela também a existência de uma linha de fronteira inferior (LFI) indicada pelos pontos em vermelho, linha esta definida pelas menores produtividades encontradas para o nível de manejo adotado pela empresa. Os valores de CR, dessas populações, variaram pouco entre as regiões, sendo da ordem de 37,2, 34,5 e 38,8 % para as regiões 1, 2 e 3, respectivamente, independentemente do nutriente considerado. Pode-se propor que na população definida pela LFI não há resposta à nutrição em razão de limitação por outros fatores, de ordem não nutricional.

Na Tabela 2 são apresentadas as equações ajustadas para a população de fronteira superior, relacionando CR em função do índice zIBKW de cada nutriente, em cada região. O CR estimado por estas equações, na forma de

curvas, para florestas jovens de eucalipto, nas três regiões abrangidas pelo estudo, é apresentado nas Figuras 7 e 8.

A partir dos talhões que constituem a população de fronteira superior foi possível avaliar o efeito de cada nutriente, isoladamente, sobre a produtividade. Ou seja, foi possível obter a curva de resposta da produtividade ao nutriente avaliado. Para Poovarodom e Chatupote (2002), o uso da linha de fronteira permite o estabelecimento de relações de causa e efeito entre a concentração de nutrientes na planta e sua produtividade. Segundo os autores, na maioria das vezes, o relacionamento fraco ou simplesmente não significativo quando da simples correlação das concentrações do nutriente estudado e a produtividade, em toda a população, é devido à presença de outros fatores que limitam a produção mesmo quando a nutrição é ótima.

De modo geral, o relacionamento observado entre os índices zIBKW para cada nutriente e o CR foi curvilíneo, com predomínio de modelos polinomiais de 2º grau na região 1 (Vale do Rio Doce), e uma variação de modelos, desde polinomiais de 2º, 3º e 4º grau a modelos gaussianos, para as outras duas regiões. Para Blanco-Macías *et al.* (2009), nas situações onde não é possível o ajuste de modelos polinomiais de 2º grau e a distribuição dos dados assume forma próxima a triangular, poderia ser ajustado um conjunto de duas funções lineares (funções descontínuas). Neste trabalho, em tais situações optou-se pelo ajuste de modelos gaussianos e racionais, os quais se ajustaram bem aos dados medidos. Cabe destacar que na região 2 (litoral norte do Espírito Santo e sul da Bahia) devido a forte assimetria do relacionamento do CR em função dos índices zIBKW para Fe e B, o modelo polinomial de 4º grau foi o que melhor se ajustou aos dados. Para Schnug *et al.* (1996), a principal exigência para os modelos a serem ajustados neste tipo de abordagem é que eles sejam função de X e a segunda derivada da equação ajustada com relação ao índice nutricional em análise deve existir e ser contínua para o intervalo analisado. Nesse sentido, esses autores consideram os modelos polinomiais uma boa alternativa de ajuste, dentre estes, consideram que o modelo polinomial de 4º tem uma aproximação mais significativa da linha de fronteira.

Com base nas equações apresentadas na Tabela 2, foram obtidos, para todos os nutrientes e regiões estudadas, os limites das classes suficiente e alta para os índices zIBKW (Tabela 3). Na determinação destas faixas foi considerado que na classe suficiente os valores de CR estimados pelas equações da Tabela 2, estão no intervalo de $90\% \leq CR \leq 100\%$ (a esquerda da curva do relacionamento) e na classe alta no intervalo de $100\% > CR \geq 90\%$ (a direita da curva do relacionamento). Conforme, observado nesta Tabela, o limite inferior da classe suficiente e o superior da classe alta variou entre nutrientes e entre as regiões. Isso demonstra que a estratégia discreta utilizada para interpretação dos índices IBKW, baseada em classes simétricas cuja amplitude não faz distinção entre os nutrientes, é inadequada, conforme já discutido por Fernandes (2010).

A partir das equações ajustadas para a população de fronteira, foi possível estimar para todos os talhões de cada região o crescimento relativo quando apenas o nutriente em análise era o fator limitante. Esta abordagem permitiu determinar o nível de limitação imposta à produtividade pelo nutriente em análise e, portanto, qual o nutriente mais limitante ao crescimento em cada situação. Disso resultou, por exemplo, que na região do Vale do Rio Doce e Cerrado de Minas Gerais os três macronutrientes mais limitantes ao crescimento foram em ordem decrescente $Ca > K > Mg$ e na região norte do Espírito Santo e sul da Bahia a sequência foi $Mg > S > Ca$.

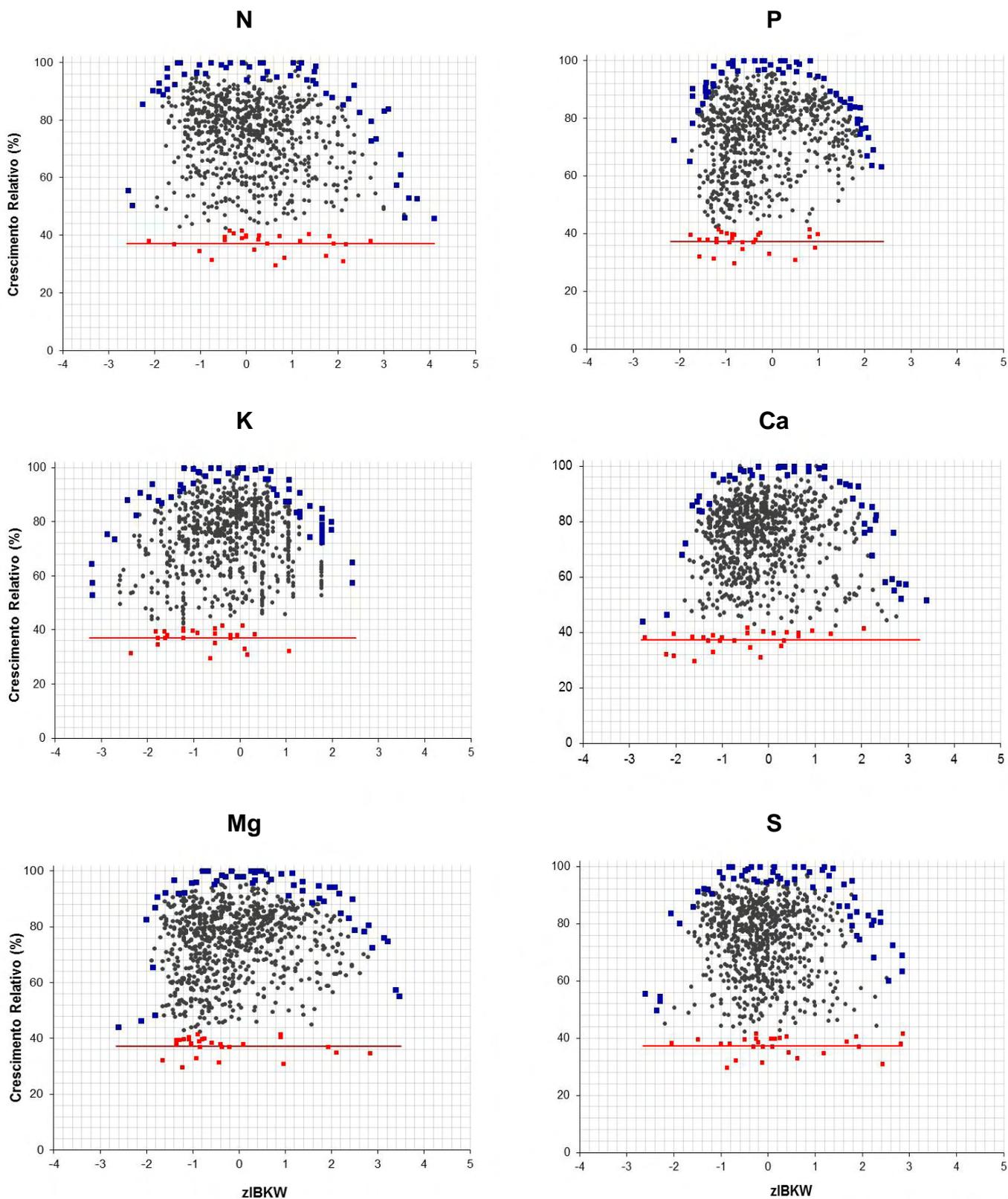


Figura 1. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de macronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Vale do Rio Doce. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

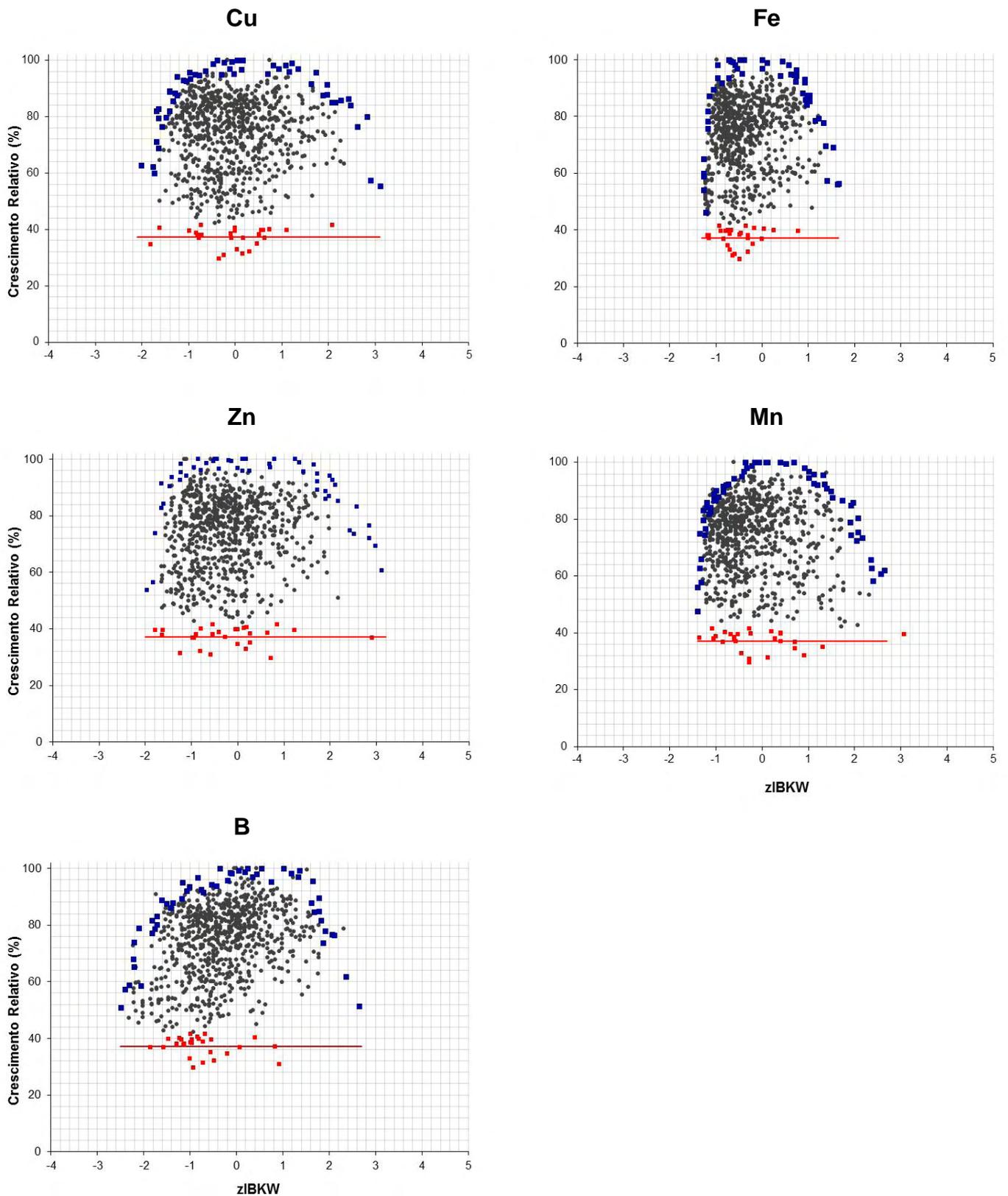


Figura 2. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de micronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Vale do Rio Doce. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

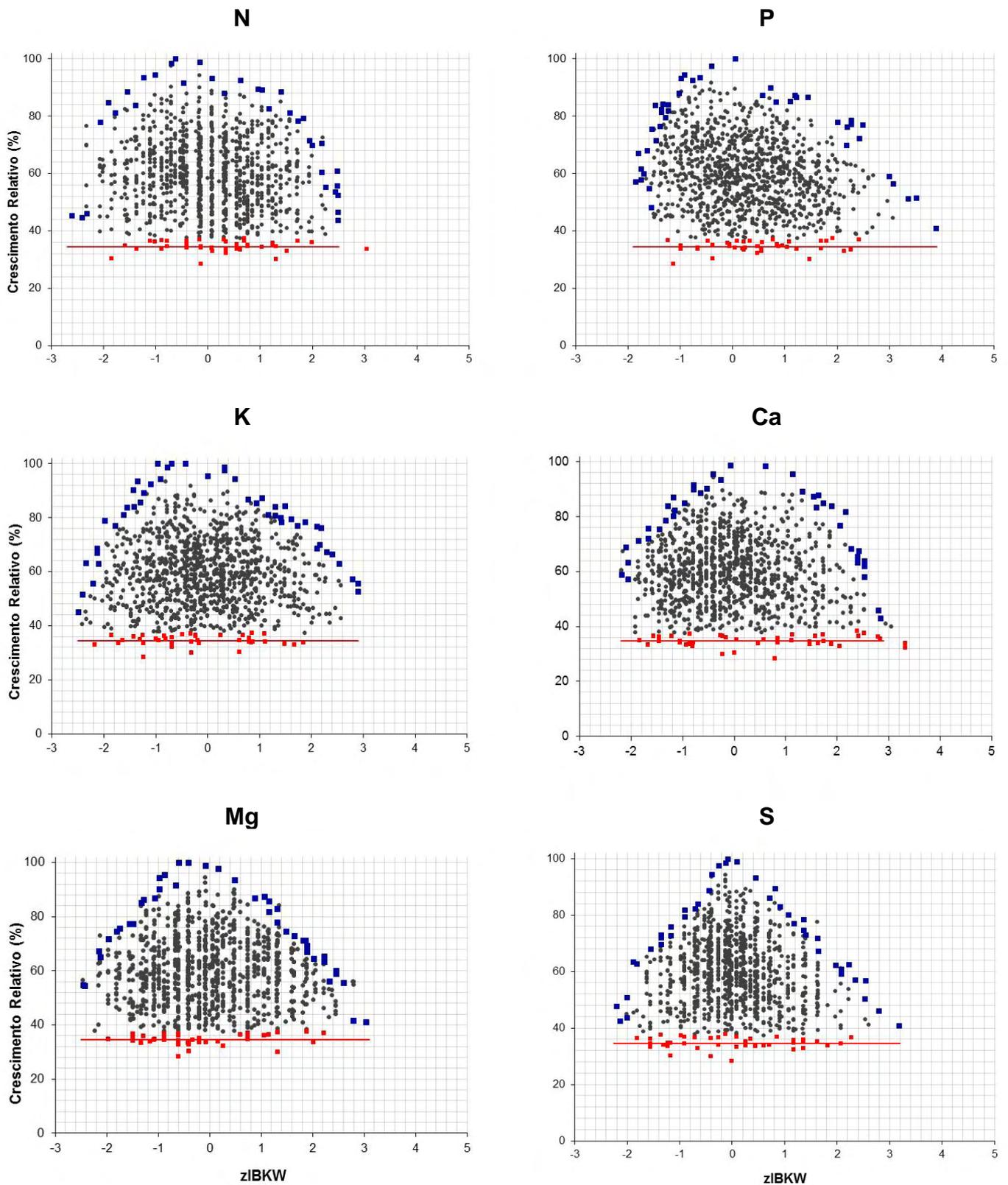


Figura 3. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de macronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

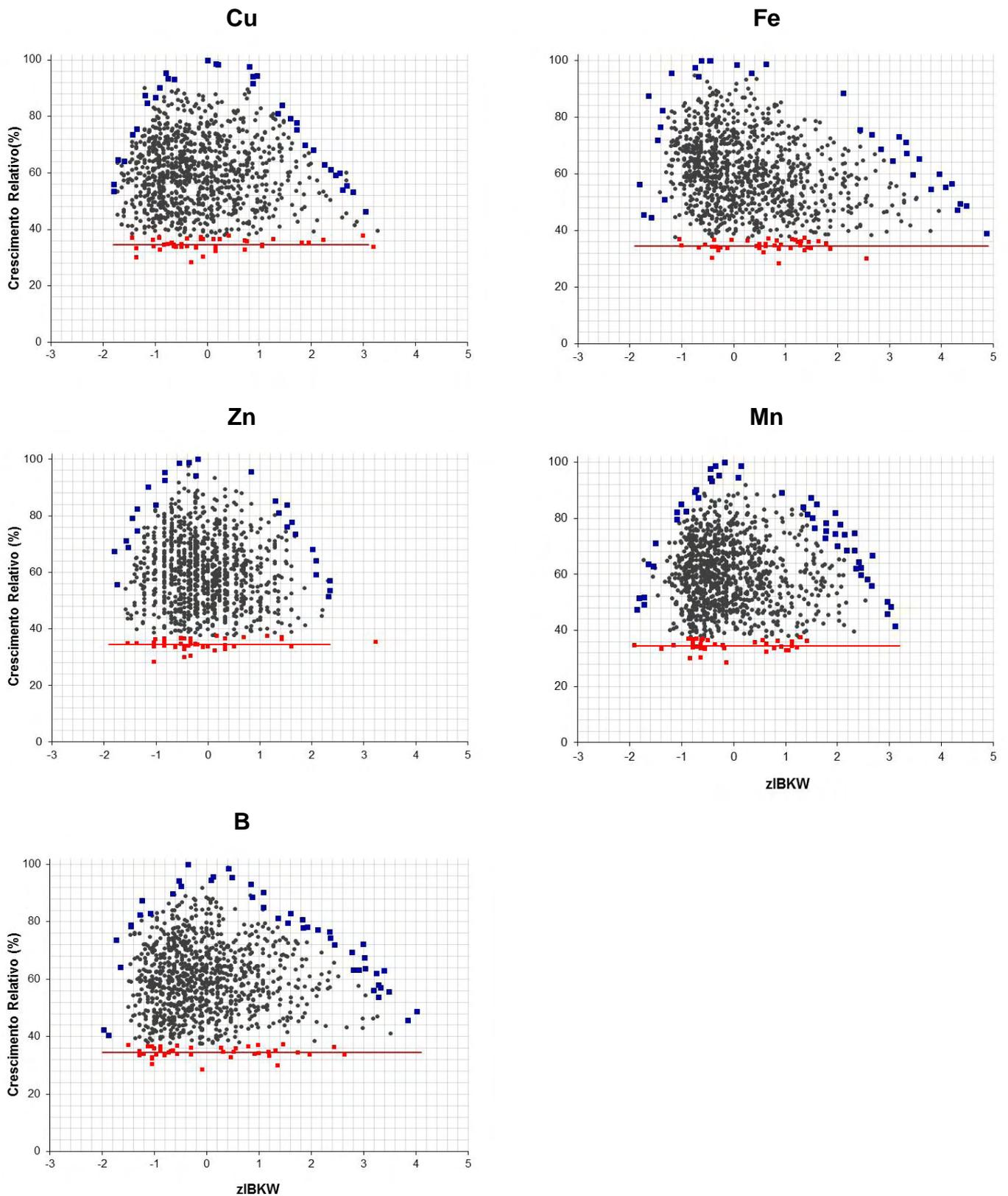


Figura 4. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de micronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

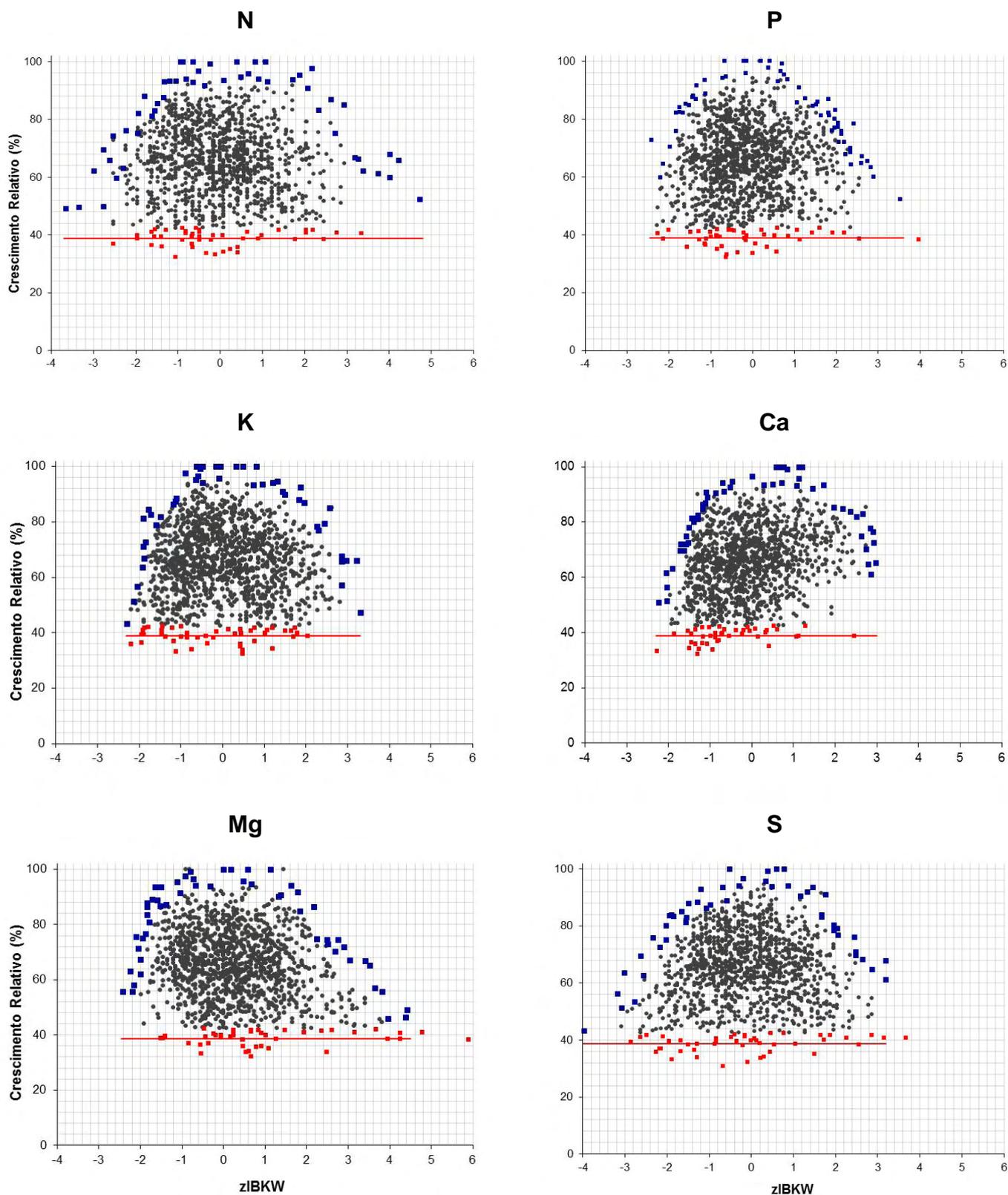


Figura 5. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de macronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Cerrado de Minas Gerais. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

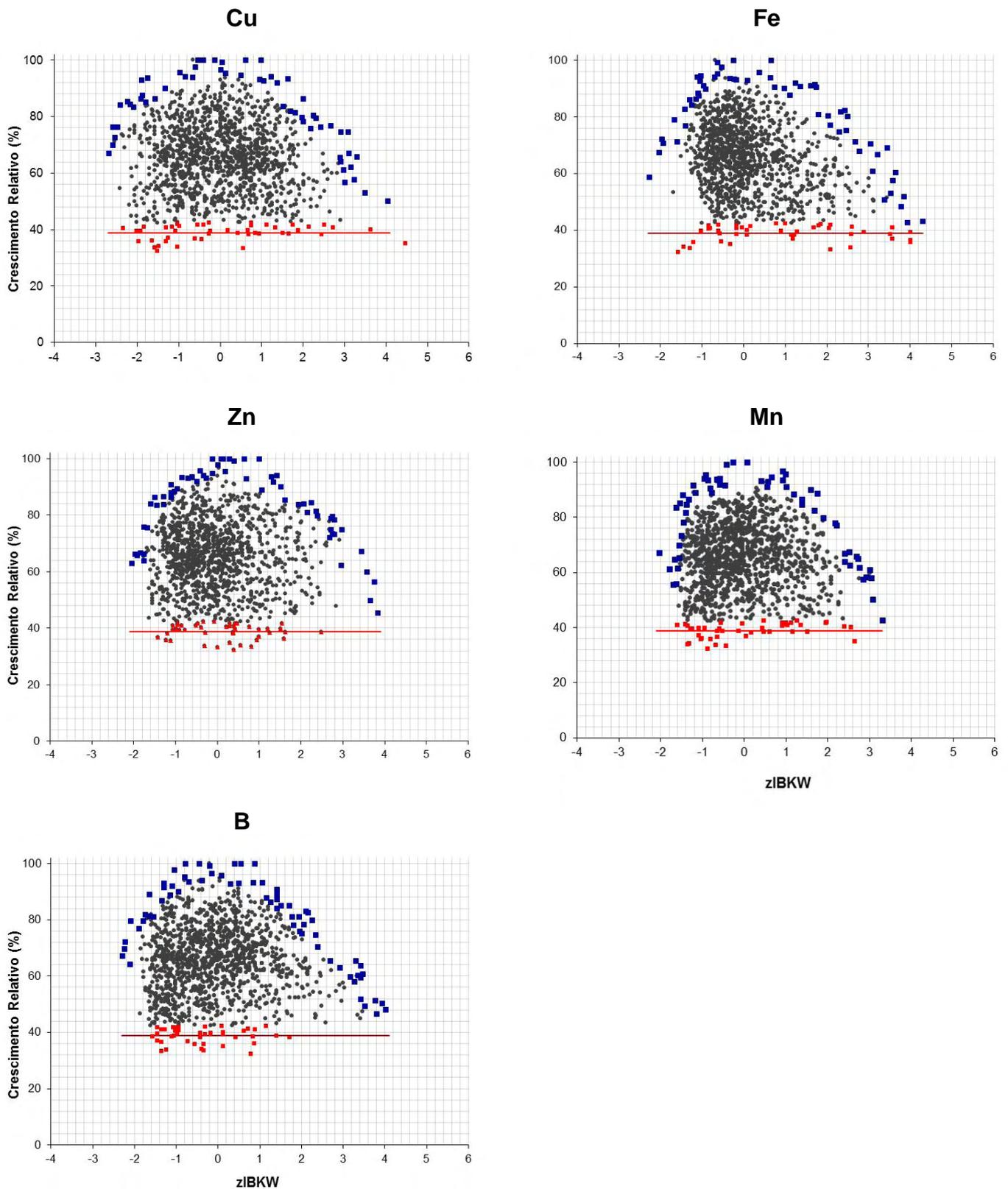


Figura 6. Gráfico de dispersão entre o crescimento relativo de eucalipto e os valores de zIBKW de micronutrientes na folha para a população de talhões estudados na região do Cerrado de Minas Gerais. Os pontos sólidos destacados em azul representam a população de fronteira superior e os em vermelho a população de fronteira inferior.

Tabela 2. Relacionamento entre o índice zIBKW de cada nutriente e o crescimento relativo da população de fronteira.

Nutriente	Modelo	Intervalo	n	r _{gy}
Região 1 - Vale do Rio Doce				
N	$\hat{y} = 101,7175 + 1,1738 zIBKW - 3,3180 zIBKW^2$	$\nabla -2,58 \leq zIBKW \leq 4,09$	57	0,908
P	$\hat{y} = 100,9677 - 0,5732 zIBKW - 6,2660 zIBKW^2$	$\nabla -2,13 \leq zIBKW \leq 2,36$	63	0,936
K	$\hat{y} = 98,5051 - 3,4406 zIBKW - 4,6261 zIBKW^2$	$\nabla -3,21 \leq zIBKW \leq 2,42$	64	0,945
Ca	$\hat{y} = 101,6667 + 3,5739 zIBKW - 6,4179 zIBKW^2$	$\nabla -2,72 \leq zIBKW \leq 3,40$	52	0,940
Mg	$\hat{y} = 99,8024 + 4,7923 zIBKW - 4,7419 zIBKW^2$	$\nabla -2,61 \leq zIBKW \leq 3,46$	54	0,859
S	$\hat{y} = 100,0899 + 2,4845 zIBKW - 5,5863 zIBKW^2$	$\nabla -2,62 \leq zIBKW \leq 2,86$	60	0,907
Cu	$\hat{y} = 100,5952 + 5,0621 zIBKW - 5,7085 zIBKW^2$	$\nabla -2,01 \leq zIBKW \leq 3,10$	55	0,905
Fe	$\hat{y} = 103,9033 + 2,2078 zIBKW - 19,8268 zIBKW^2$	$\nabla -1,27 \leq zIBKW \leq 1,66$	49	0,885
Zn	$\hat{y} = 101,5234 + 4,1427 zIBKW - 5,2469 zIBKW^2$	$\nabla -1,96 \leq zIBKW \leq 3,11$	52	0,868
Mn	$\hat{y} = 100,6940 + 7,8130 zIBKW - 9,3502 zIBKW^2$	$\nabla -1,40 \leq zIBKW \leq 3,08$	64	0,907
B	$\hat{y} = 101,0968 + 1,3230 zIBKW - 6,5373 zIBKW^2$	$\nabla -2,50 \leq zIBKW \leq 2,64$	53	0,942
Região 2 - Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia				
N	$\hat{y} = 99,1867 - 0,3266 zIBKW - 7,5541 zIBKW^2$	$\nabla -2,61 \leq zIBKW \leq 3,04$	35	0,942
P	$\hat{y} = 97,5968 + 1,3459 zIBKW - 8,2442 zIBKW^2 + 1,1562 zIBKW^3$	$\nabla -1,86 \leq zIBKW \leq 3,88$	47	0,903
K	$\hat{y} = 98,6475 \exp\left(\frac{-0,0078 - zIBKW}{2 \cdot 0,0028}\right)$	$\nabla -2,50 \leq zIBKW \leq 2,89$	48	0,932
Ca	$\hat{y} = 97,9728 + 3,1344 zIBKW - 6,9623 zIBKW^2$	$\nabla -2,19 \leq zIBKW \leq 3,32$	40	0,967
Mg	$\hat{y} = 97,5693 \exp\left(\frac{-0,0060 - zIBKW}{2 \cdot 0,0021}\right)$	$\nabla -2,46 \leq zIBKW \leq 3,04$	43	0,983
S	$\hat{y} = \frac{95,5929 + 9,6643 zIBKW}{1 + 0,0956 zIBKW + 0,1646 zIBKW^2}$	$\nabla -2,21 \leq zIBKW \leq 3,18$	42	0,979
Cu	$\hat{y} = 99,7324 \exp\left(\frac{-0,0212 - zIBKW}{2 \cdot 0,0077}\right)$	$\nabla -1,80 \leq zIBKW \leq 3,28$	35	0,973
Fe	$\hat{y} = 101,24 + 0,7250 zIBKW - 9,0966 zIBKW^2 + 2,6227 zIBKW^3 - 0,2732 zIBKW^4$	$\nabla -1,81 \leq zIBKW \leq 4,87$	35	0,902
Zn	$\hat{y} = 102,0174 \exp\left(\frac{-0,0071 - zIBKW}{2 \cdot 0,0021}\right)$	$\nabla -1,80 \leq zIBKW \leq 3,23$	28	0,966
Mn	$\hat{y} = 97,7115 + 3,2034 zIBKW - 10,1903 zIBKW^2 + 1,2429 zIBKW^3$	$\nabla -1,91 \leq zIBKW \leq 3,11$	51	0,973
B	$\hat{y} = 97,1392 - 3,3343 zIBKW - 7,6209 zIBKW^2 + 2,9525 zIBKW^3 - 0,4160 zIBKW^4$	$\nabla -1,97 \leq zIBKW \leq 4,01$	46	0,965
Região 3 - Cerrado de Minas Gerais				
N	$\hat{y} = 99,9083 \exp\left(\frac{-0,0498 - zIBKW}{2 \cdot 0,0022}\right)$	$\nabla -3,67 \leq zIBKW \leq 4,73$	52	0,939
P	$\hat{y} = 98,5128 - 1,7462 zIBKW - 5,6977 zIBKW^2 + 0,6519 zIBKW^3$	$\nabla -2,41 \leq zIBKW \leq 3,98$	62	0,956
K	$\hat{y} = 100,0368 + 4,9631 zIBKW - 5,3894 zIBKW^2$	$\nabla -2,29 \leq zIBKW \leq 3,30$	47	0,931
Ca	$\hat{y} = 97,9703 + 6,4765 zIBKW - 5,6538 zIBKW^2$	$\nabla -2,26 \leq zIBKW \leq 2,98$	55	0,954
Mg	$\hat{y} = 101,8952 - 0,2360 zIBKW - 5,8581 zIBKW^2 + 0,7139 zIBKW^3$	$\nabla -2,43 \leq zIBKW \leq 5,89$	53	0,949
S	$\hat{y} = 97,6264 \exp\left(\frac{-0,0147 - zIBKW}{2 \cdot 0,0022}\right)$	$\nabla -3,98 \leq zIBKW \leq 3,68$	51	0,963
Cu	$\hat{y} = 98,8931 \exp\left(\frac{-0,0214 - zIBKW}{2 \cdot 0,0021}\right)$	$\nabla -2,69 \leq zIBKW \leq 4,48$	60	0,954
Fe	$\hat{y} = 97,0234 + 1,6349 zIBKW - 5,2786 zIBKW^2 + 0,4535 zIBKW^3$	$\nabla -2,28 \leq zIBKW \leq 4,29$	61	0,940
Zn	$\hat{y} = 96,4071 + 4,6605 zIBKW - 4,5224 zIBKW^2$	$\nabla -2,06 \leq zIBKW \leq 3,83$	63	0,952
Mn	$\hat{y} = 99,4015 + 1,4037 zIBKW - 7,7861 zIBKW^2 + 0,8208 zIBKW^3$	$\nabla -2,05 \leq zIBKW \leq 3,30$	68	0,926
B	$\hat{y} = 97,7482 - 1,3244 zIBKW - 5,0163 zIBKW^2 + 0,5636 zIBKW^3$	$\nabla -2,29 \leq zIBKW \leq 4,02$	67	0,972

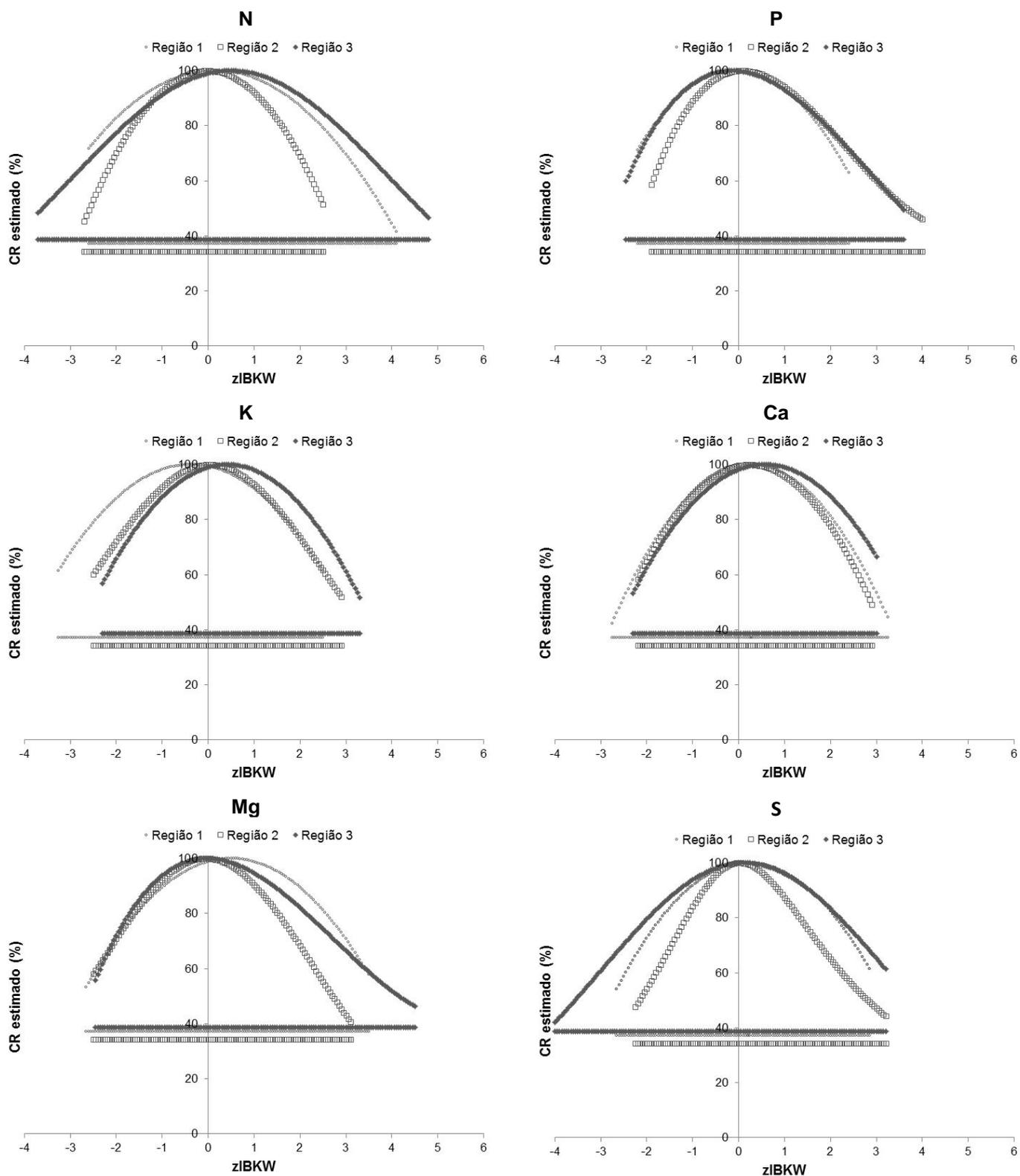


Figura 7. Crescimento relativo estimado para florestas jovens de eucalipto em três regiões, em função do zIBKW de macronutrientes para população de fronteira superior (curva) e para a população de fronteira inferior (linha de base). Região 1: Vale do Rio Doce; Região 2: Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia; Região 3: Cerrado de Minas Gerais.

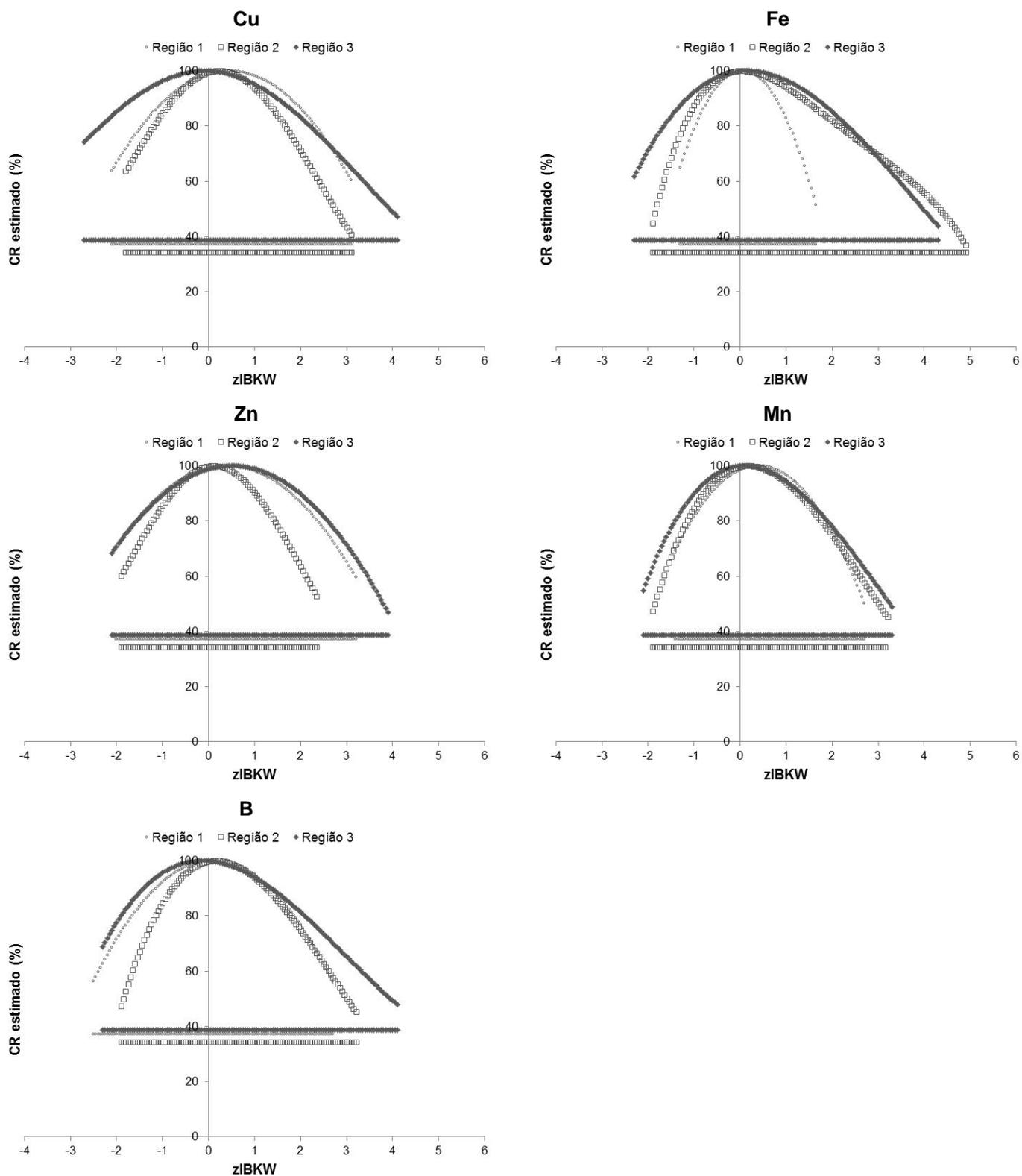


Figura 8. Crescimento relativo estimado para florestas jovens de eucalipto em três regiões, em função do zIBKW de micronutrientes para população de fronteira superior (curva) e para a população de fronteira inferior (linha de base). Região 1: Vale do Rio Doce; Região 2: Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia; Região 3: Cerrado de Minas Gerais.

Tabela 3. Limites das classes suficiente e alta, para os Índices Balanceados de Kenworthy padronizados (zIBKW) de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B, derivados das equações ajustadas entre o crescimento relativo(CR) da população de fronteira superior e zIBKW.

Nutriente	Suficiente 90 % ≤ CR ≤ 100 %	Alta 100 % > CR ≥ 90 %
Vale do Rio Doce		
N	-1,48 a 0,15	0,15 a 1,78
P	-1,30 a -0,05	-0,05 a 1,23
K	-1,83 a -0,37	-0,37 a 1,1
Ca	-1,00 a 0,28	0,28 a 1,5
Mg	-0,95 a 0,5	0,50 a 1,98
S	-1,13 a 0,22	0,22 a 1,55
Cu	-0,90 a 0,45	0,45 a 1,78
Fe	-0,70 a 0,05	0,05 a 0,8
Zn	-1,00 a 0,40	0,40 a 1,8
Mn	-0,60 a 0,40	0,40 a 1,45
B	-1,15 a 0,10	0,10 a 1,35
Litoral Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia		
N	-1,15 a 0,00	0,00 a 1,13
P	-0,95 a 0,10	0,10 a 1,3
K	-1,13 a 0,00	0,00 a 1,18
Ca	-0,95 a 0,20	0,20 a 1,4
Mg	-1,15 a -0,05	-0,05 a 1,03
S	-0,80 a 0,00	0,00 a 0,9
Cu	-0,75 a 0,25	0,25 a 1,2
Fe	-0,90 a 0,05	0,05 a 1,35
Zn	-0,80 a 0,10	0,10 a 0,90
Mn	-0,80 a 0,15	0,15 a 1,25
B	-1,10 a -0,20	-0,20 a 1,13
Cerrado de Minas Gerais		
N	-1,10 a 0,50	0,50 a 2,10
P	-1,35 a -0,15	-0,15 a 1,25
K	-0,90 a 0,40	0,40 a 1,73
Ca	-0,75 a 0,55	0,55 a 1,9
Mg	-1,25 a 0,00	0,00 a 1,43
S	-1,33 a 0,10	0,10 a 1,55
Cu	-1,63 a -0,05	-0,05 a 1,5
Fe	-1,15 a 0,15	0,15 a 1,65
Zn	-0,95 a 0,50	0,50 a 1,98
Mn	-1,00 a 0,10	0,10 a 1,30
B	-1,40 a -0,10	-0,10 a 1,35

Para determinação do impacto do estado nutricional global da planta, ou seja, considerando todos os nutrientes diagnosticados, sobre a produtividade relacionou-se o índice de Balanço Nutricional médio (zIBKWm) de cada talhão com a média do crescimento relativo estimado pelas equações ajustadas para cada nutriente. Este procedimento permite estimar a limitação imposta pela nutrição ao crescimento em cada talhão.

O relacionamento do zIBKWm com o crescimento relativo estimado, à princípio, conforme exemplificado para a região norte do Espírito Santo e Sul da Bahia e apresentado nas Figuras 9 e 10, foi realizado separadamente para os talhões cuja limitação era o mesmo nutriente. Posteriormente, ajustou-se um modelo geral para esta região relacionando zIBKWm de cada talhão com o respectivo valor do crescimento relativo estimado limitado pela nutrição. Conforme demonstrando pelo coeficiente de correlação entre as estimativas obtidas pelos modelos específicos para cada nutriente limitante e o modelo geral para a região (Tabela 3), pode-se concluir que não há diferença entre as estimativas obtidas pelos modelos individuais (para cada nutriente limitante) e o modelo geral regional. Em cada uma das demais regiões, foi também obtido modelo geral regional, como também feito para o conjunto das regiões (modelo geral) (Figura 11). Para cada uma das três regiões estudadas, e para o conjunto dessas regiões, o CR decresceu com o aumento do grau de desbalanço nutricional global da floresta (zIBKWm), refletindo a importância de se ter a nutrição em adequado grau de balanço.

Tabela 3. Correlação entre as estimativas obtidas pelos modelos obtidos para os talhões com mesma limitação nutricional e pelo modelo obtido com os dados de todos os talhões.

Nutriente	r	N	p
N	0,9994	76	< 0,05
P	0,9986	76	< 0,05
K	0,9995	70	< 0,05
Ca	0,9998	123	< 0,05
Mg	0,9966	155	< 0,05
S	0,9985	127	< 0,05
Cu	1,0000	150	< 0,05
Fe	0,9854	83	< 0,05
Zn	1,0000	89	< 0,05
Mn	0,9998	82	< 0,05
B	1,0000	68	< 0,05

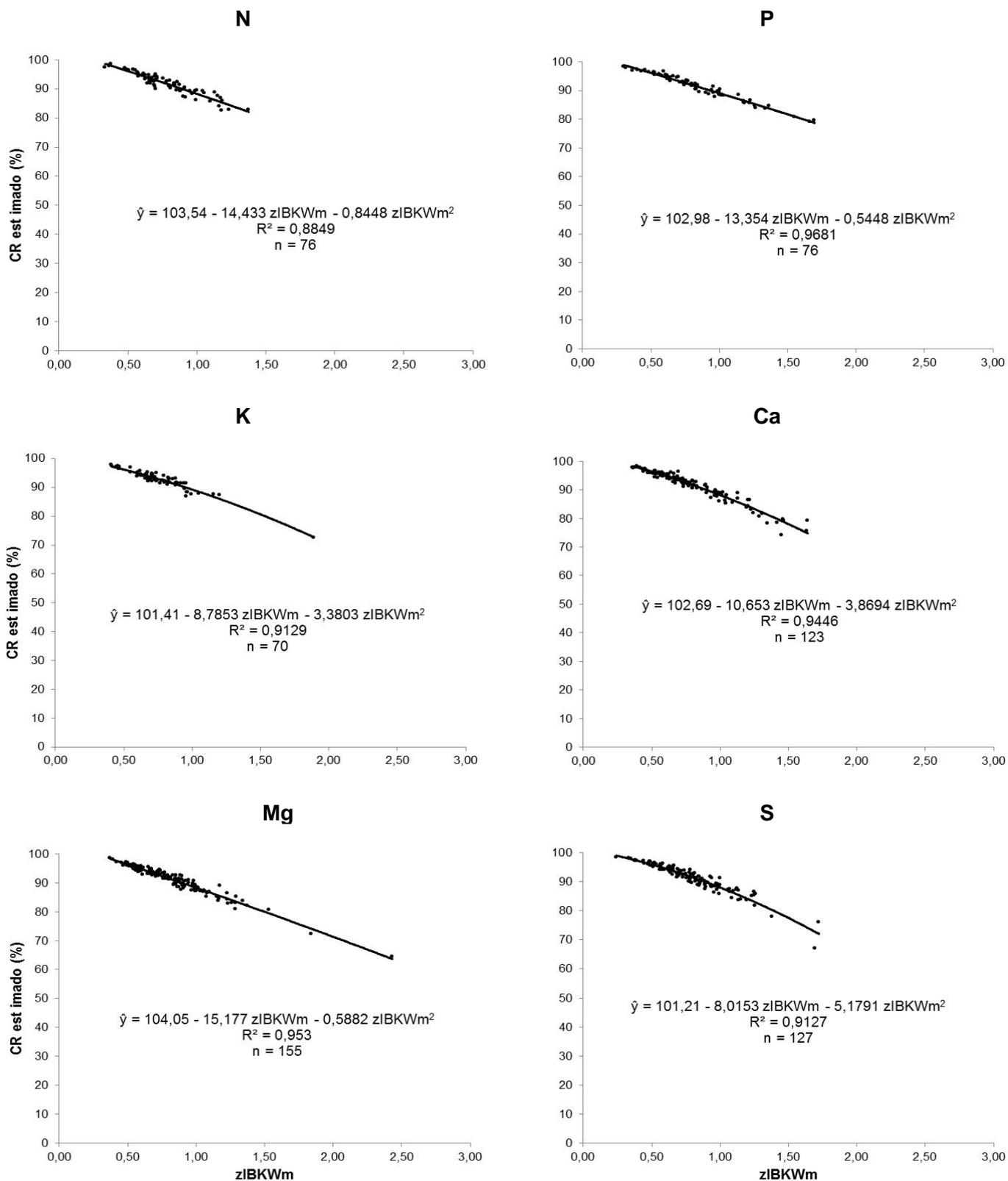


Figura 9. Relacionamento entre zIBKWm e o crescimento relativo estimado médio obtido para os talhões de mesma limitação nutricional para a região norte do Espírito Santo e sul da Bahia. Talhões limitados por: N, P, K, Ca, Mg e S.

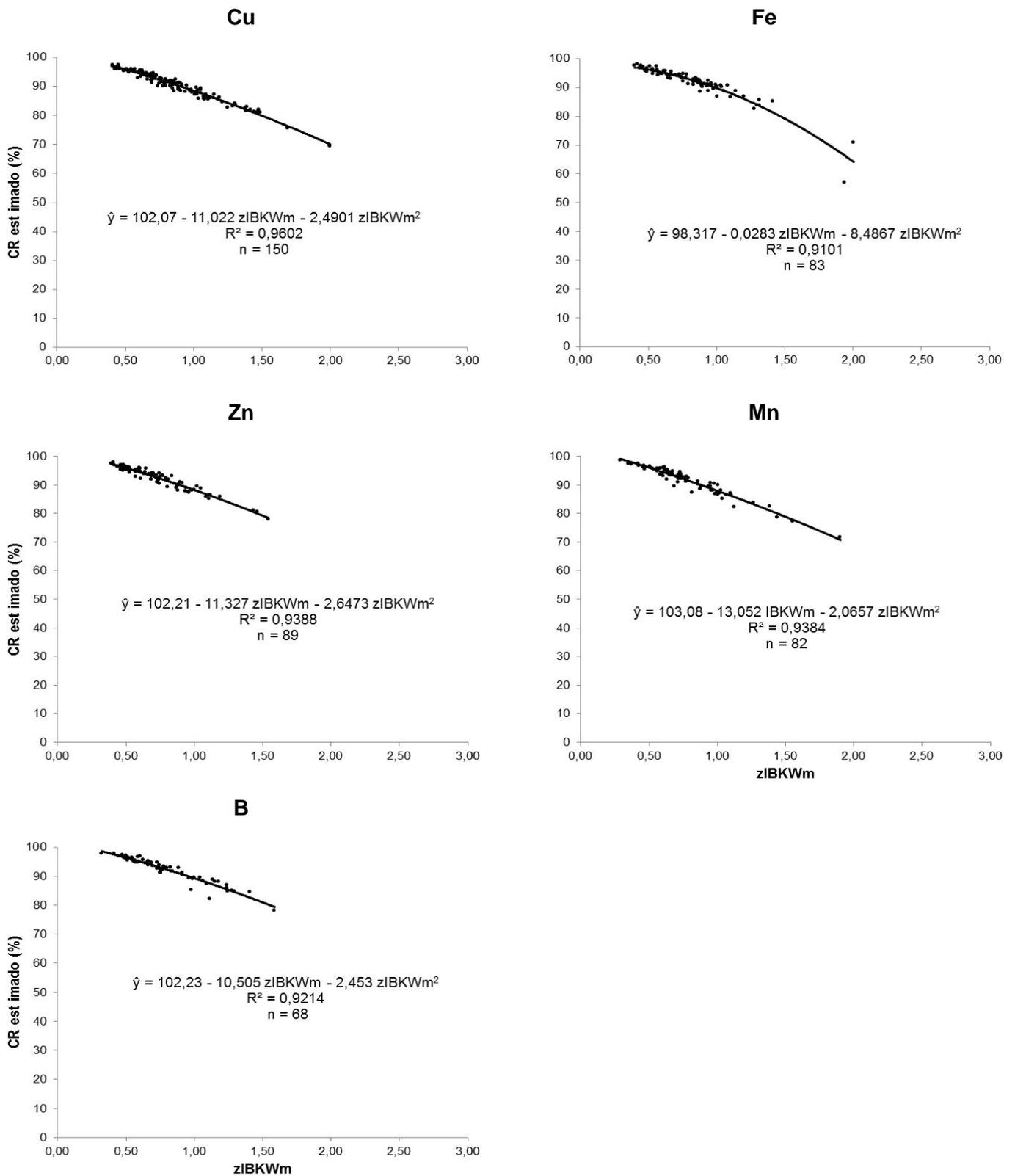


Figura 10. Relacionamento entre zIBKWm e o crescimento relativo estimado médio obtido para os talhões de mesma limitação nutricional para a região do norte do Espírito Santo e sul da Bahia. Talhões limitados por: Cu, Fe, Zn, Mn e B.

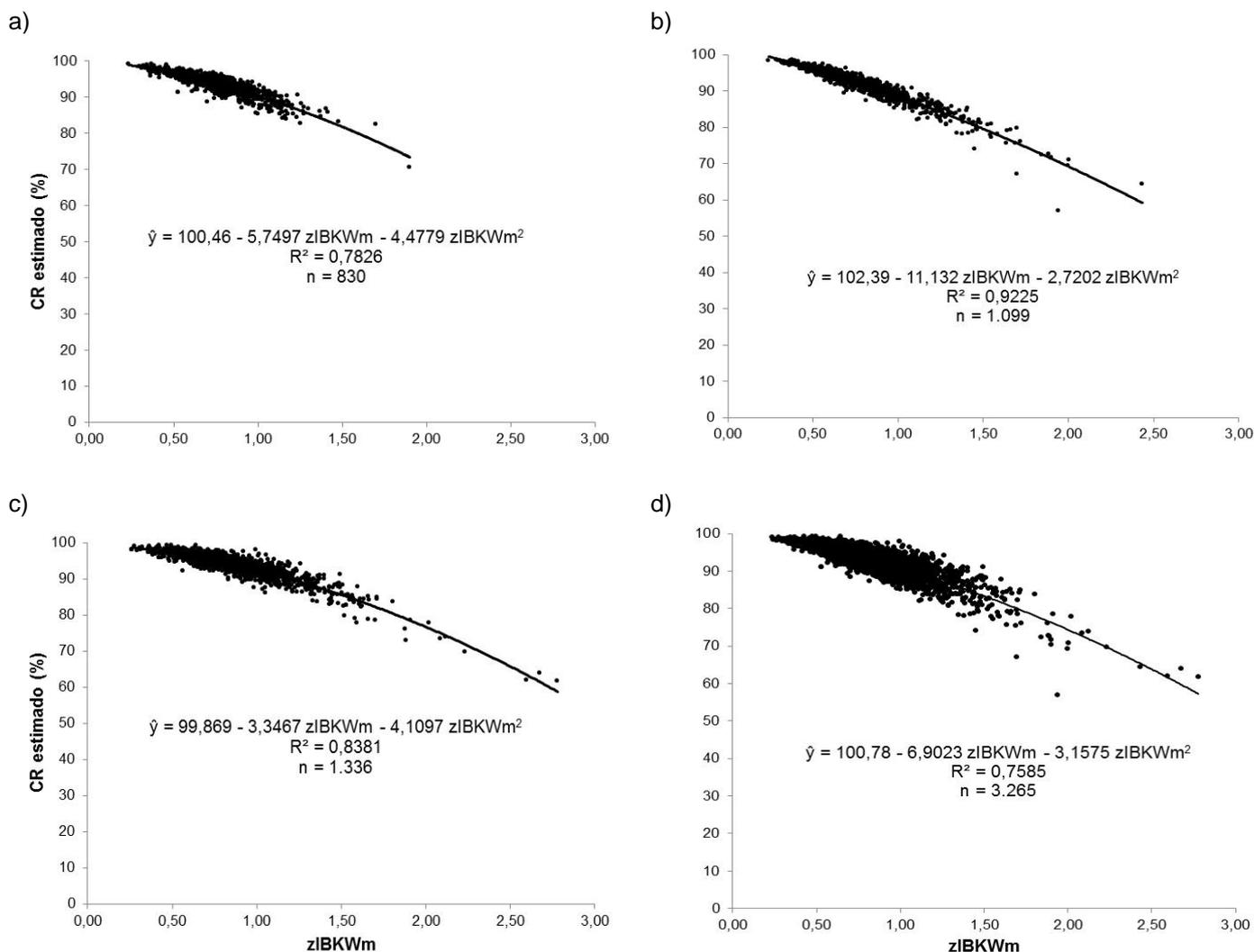


Figura 11. Relacionamento entre zIBKWm e o crescimento relativo estimado para todos os talhões independente do nutriente limitante para as regiões (a) Vale do Rio Doce, (b) Norte do Espírito Santo e Sul da Bahia, (c) Cerrado de Minas Gerais, (d) modelo geral obtido com os dados de todas as regiões.

Cálculo do modulador edáfico para uso no 3-PG

O uso da variável FR do 3-PG como ferramenta de ajuste para melhoria do relacionamento entre a produtividade estimada por este modelo e a produtividade real, conforme proposto por alguns autores, atribui à nutrição uma penalização à produtividade que pode estar associada a outros fatores de ordem não nutricional. E, dessa forma, não parece ser boa alternativa para determinação do efeito da fertilidade do solo sobre a produtividade.

A estratégia desenvolvida neste trabalho para a obtenção de FR consiste no uso da análise foliar, por intermédio dos índices de balanço nutricional (método Kenworthy) e na obtenção, com base no método da linha de fronteira, da curva de resposta, na forma de equação, da produtividade (crescimento relativo, CR) ao grau de balanço de cada nutriente (índices zIBKW), aqui denominadas curvas de resposta potencial nutriente específica (CRPNE). A seguir, para cada nutriente, os valores de zIBKW obtidos dos resultados das análises foliares dos talhões amostrados devem ser substituídos nas CRPNE resultando nos valores de CR limitados por cada nutriente (CRLN). O nutriente associado ao menor CRLN é então o nutriente mais limitante à produtividade no talhão, e o valor do modulador edáfico no talhão é o de CR/100, sendo CR e 100 ambos em porcentagem. Abaixo é apresentado de forma detalhada o cálculo do modulador edáfico para um dos talhões estudados no trabalho.

N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
g/kg						mg/kg				
22,78	1,11	9,18	4,96	1,40	1,47	9,95	137,25	12,50	941,00	28,63
zIBKW										
0,75	-0,41	-0,16	-1,44	0,06	0,61	0,07	1,05	-0,05	0,26	-0,80

↓
CRPNE
↓

Crescimento Relativo Estimado (%)										
99,73	99,58	98,03	77,06	99,96	98,74	99,92	96,19	98,52	99,79	97,42

↓
Nutriente Limitante: Ca

$$\text{Modulador edáfico (FR)} = \frac{77,06}{100} = 0,77$$

A obtenção proposta neste trabalho, do modulador edáfico, na opinião deste autor, constitui um avanço em relação às alternativas para obtenção de FR apresentadas na literatura.

A estratégia aqui proposta para obtenção do modulador edáfico permite avaliar a produtividade da cultura em resposta ao seu estado nutricional, separando a influência de outros fatores de ordem não nutricional. Além disso, é de baixo custo e de fácil implementação, dada a disponibilidade de resultados de análises foliares do monitoramento do estado nutricional realizado pelas empresas, e de sistemas informatizados para o cálculo dos índices que refletem o balanço nutricional.

CONCLUSÃO

O uso dos Índices Balanceados de Kenworthy e do método da linha de fronteira aplicado aos resultados de análises foliares em populações de plantios jovens de eucalipto permite determinar o grau de limitação à produtividade em função do grau de balanço de cada nutriente, isolando os efeitos de fatores não nutricionais, e embasando a determinação de modulador edáfico para uso em modelos ecofisiológicos de crescimento florestal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management* [S.l.], v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 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* [S.l.], v. 259, n. 9, p. 1730-1740, 2010.

BLANCO-MACÍAS, F.; MAGALLANES-QUINTANAR, R.; VALDEZ-CEPEDA, R. D.; VÁZQUEZ-ALVARADO, R.; OLIVARES-SÁENZ, E.; GUTIÉRREZ-ORNELAS, E.; VIDALES-CONTRERAS, J. A. Comparasion between CND Norms and boundary-line approach nutrientes standards (*Opuntia ficus-indica* L. Case). *Revista Chapingo, Serie Horticultura*, v.15(2), p.217-223, 2009.

BORGES, J. S.; LOURENÇO, H. M.; NEVES, J. C. L.; KER, J. C.; SILVA, G. G. C.; BARROS, N. R.; FARIA, M. M. A cultura do eucalipto, seus potenciais e riscos para a conservação dos solos no Meio-Norte brasileiro. XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água – Novos Caminhos para a agricultura conservacionista no Brasil. Teresina – PI, agosto 2010. CD-ROM

BARROS, N. F.; COMERFORD, N. B. Sustentabilidade da Produção de Florestas Plantadas na Região Tropical. p. 487-592. In: Tópicos em Ciência do Solo (Topics in Soil Science) - Vol. II. Sociedade Brasileira Ciência Solo, Viçosa, Minas Gerais, Brazil. 2002.

BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J. Process-based forest productivity models and their application in forest management. *Forest Ecology and Management* [S.l.], v. 102, n. 1, p. 13-32, Mar 1998.

FERNANDES, L. V. Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto. 2010. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição e Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2010.

FONTES, L.; LANDSBERG, J. J.; TOMÉ, J.; TOMÉ, M.; PACHECO, C. A.; SOARES, P.; ARAUJO, C. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*[S.l.], v. 36, n. 12, p. 3209-3221, 2006.

KENWORTHY, A.L. Interpreting the balance of nutrients-elements in leaves of fruit trees. In: REUTHER, W. *Planta analysis and fertilizers problems*. Washington, American Institute of Biological Science, 1961.p.28-43.

KURIHARA, C. H. Demanda de nutrientes pela soja e diagnose do seu estado nutricional. 2004. 101 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2004.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H.; COOPS, N. C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 172, n. 2-3, p. 199-214, 2003.

MAKELA, A.; LANDSBERG, J. J.; EK, A. R.; BURK, T. E.; TER-MIKAELIAN, M.; AGREN, G. I.; OLIVER, C. D.; PUTTONEN, P. Process-based models for forest ecosystem management: current state of the art and challenges for practical implementation. *Tree Physiology* [S.I.], v. 20, n. 5-6, p. 289-298, Mar 2000.

MEAD, D. J. Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy* [S.I.], v. 28, n. 2, p. 249-266, 2005.

NIGHTINGALE, J. M.; COOPS, N. C.; WARING, R. H.; HARGROVE, W. W. Comparison of MODIS gross primary production estimates for forests across the USA with those generated by a simple process model, 3-PGS. *Remote Sensing of Environment* [S.I.], v. 109, n. 4, p. 500-509, Aug 2007.

POOVARODOM, S. CHATUPOTE, W. Boundary line in specifying durian nutrient standards. Annals of the 17th World Congress of Soil Science, Thailand, August 2002.

SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 163, n. 1-3, p. 273-292, 2002.

SIMIONI, G.; RITSON, P.; McGRATH, J.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; COPELAND, B.; DUMBRELL, I. Predicting wood production and net ecosystem carbon exchange of *Pinus radiata* plantations in south-western Australia: Application of a process-based model. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 255, n. 3-4, p. 901-912, Mar 2008.

SCHMIDT, U.; THÖNI, H.; KAUPENJOHANN, M. Using boundary line approach to analyze N₂O flux data from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. V.57 p. 119-129, 2000.

SCHNUG, E.; HEYM, J.; ACHWAN, F. Establishing critical values for soil and plant analysis by means of the boundary line development system (BOLIDES). *Commun Soil Sci Plant Anal*, v.27, n 13 e 14, p.2739–2748. 1996

STAPE, J.L. Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northeastern Brazil. 2002. 225p. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2002.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. 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* [S.I.], v. 193, n. 1-2, p. 219-234, 2004.

VIZCAYNO-SOTO, G.; CÔTÉ, B. Boundary line approach to determine standards of nutrition for mature trees from spatial variation of growth and foliar nutrient concentrations in natural environments. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v.35 p.2965-2985. 2004.

WARING, R. H.; COOPS, N. C.; RUNNING, S. W. Predicting satellite-derived patterns of large-scale disturbances in forests of the Pacific Northwest Region in response to recent climatic variation. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 12, p. 3554-3566, Dec 2011. ISSN 0034-4257.

WALWORTH, J. L.; LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 50; p. 123-128. 1986.

WATERWORTH, R. M.; RICHARDS, G. P.; BRACK, C. L.; EVANS, D. M. W. A generalised hybrid process-empirical model for predicting plantation forest growth. *Forest Ecology and Management* [S.I.], v. 238, n. 1-3, p. 231-243, 2007.

WEBB, R. A. Use of boundary line in the analysis of biological data. *J. Hort. Sci.* V. 47, p. 309-319. 1972.

WHITE, J. D.; COOPS, N. C.; SCOTT, N. A. Estimates of New Zealand forest and scrub biomass from the 3-PG model. *Ecological Modelling*[S.I.], v. 131, n. 2-3, p. 175-190, 2000.

CAPÍTULO II

PRODUTIVIDADE POTENCIAL DE EUCALIPTO NO BRASIL

RESUMO: Embora a produtividade do eucalipto tenha aumentado nos últimos anos, a expansão acelerada dos plantios tem gerado preocupação a cerca dos seus efeitos sobre recursos do meio físico, como água e solo, e sua sustentabilidade quando intensamente manejados. Assim, a necessidade de prover respostas a tais indagações resultou nos últimos anos, em crescente demanda pelo desenvolvimento de modelos que tenham capacidade de explicar e prever diferenças na produtividade dos plantios florestais, em resposta à ação de variáveis climáticas, disponibilidade de nutrientes e opções de manejo silviculturais. Dentre estes modelos, o 3-PG tem obtido destaque devido à sua estrutura simples e de fácil operação, e os bons resultados alcançados ao simular o crescimento de diferentes espécies florestais em todo o mundo. Este trabalho teve por objetivo avaliar o grau de universalidade das parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil e determinar a produtividade potencial do eucalipto em diferentes regiões do Brasil. Foram realizadas simulações do crescimento de povoamentos de eucalipto região-específica utilizando as diferentes parametrizações do modelo 3-PG disponíveis para o Brasil. Nesta etapa, procurou-se comparar o grau de universalidade das parametrizações, conforme a estratégia utilizada na obtenção das parametrizações, parcelas de experimentos irrigados/fertirrigados ou árvores de plantios comerciais. Nestas simulações, dados de solo e de clima específicos de cada região foram utilizados. Na sequência, foi utilizada a parametrização considerada como mais universal para simular a produtividade potencial de eucalipto em todo o Brasil, limitada pelas condições de clima, e com fertilidade do solo plena ($FR=1$). Para a simulação da produtividade potencial foram utilizados dados climáticos, obtidos por meio das coordenadas geográficas de cada localidade, e para a variável água no solo foi utilizada a classe textural média e CAD (capacidade de água disponível) igual a 100 mm. Conclui-se que: a) a estratégia de obtenção da parametrização do modelo 3-PG influencia o grau de universalidade da parametrização do modelo. Parametrizações obtidas em parcelas de experimentos irrigação/fertirrigação

apresentam baixa universalidade ao passo que a parametrização obtida em plantios comerciais tem alta universalidade e assim alto grau de extrapolação; b) a produtividade potencial de madeira (tronco sem casca) de eucalipto aos seis anos, para o Brasil, sob efeito do clima, considerando a faixa abrangida pela média ± 1 desvio padrão (69 % dos sítios simulados), varia de 42,3 a 73,4 m³/ha/ano; c) a precipitação pluviométrica, a radiação solar, a distribuição de chuvas e a temperatura máxima influenciam, nessa ordem, a produtividade potencial de eucalipto no Brasil sob efeito do clima; d) quanto à demanda nutricional para produção de eucalipto (tronco com casca) tem-se a seguinte ordem: Ca > N > K > Mg > P. Considerando a faixa que abrange cerca de 69 % dos sítios simulados (média ± 1 desvio padrão), observa-se as seguintes faixas para as quantidades de macronutrientes acumuladas no tronco: 227 a 393, 17 a 30, 136 a 236, 340 a 590 e 62 a 107 kg/ha de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Palavras chave: produtividade potencial, eucalipto, modelo 3-PG

EUCALYPTUS POTENCIAL PRODUCTIVITY IN BRAZIL

ABSTRACT: Although eucalyptus productivity has increased in recent years, the rapid expansion of plantations has caused concern about its effects on the physical resources such as water and soil, and its sustainability when intensely managed. Thus, the need to provide answers to such questions in recent years has resulted in growing demand by developing models that are able to explain and predict differences in the productivity of forest plantations in response to the action of climatic variables, nutrient availability and options of silvicultural management. Among these models, the 3-PG has obtained highlighted due to its simple structure and easy operation, and the good results achieved by simulating the growth of different tree species around the world. This study aimed to assess the degree of universality of the parameterization of the 3-PG available for Brazil and determine the eucalyptus potential productivity in different regions of Brazil. We simulated the growth of eucalyptus stands for each region specifically using different parameterizations of the model 3-PG

available for Brazil. In this step, we tried to compare the degree of universality of the parameterizations according the strategy used to obtain the parameterizations, plots of experiments (irrigated/fertirrigated) or commercial plantations. In these simulations, soil and climate data specifics for each region were used. Following, we used the parameterization considered more universal to simulate the Eucalyptus potential productivity in Brazil, limited by climatic conditions and with full soil fertility (FR = 1). To simulate the potential productivity we used weather data collected by means of geographical coordinates of each locality, and for soil water variable we used texture class equal sandy-loam and soil water holding capacity (SWC) equal to 100 mm. It was concluded that: a) the strategy for obtaining the parameterization of the 3-PG model influences the degree of universality of the model parameterization. Parameterizations obtained in plots of trials irrigated / fertirrigated have low universality while the parameterization obtained in commercial plantations has high universality and thus a high degree of extrapolation; b) the potential productivity of eucalyptus wood (stem without bark) to the six years, to Brazil, under the influence of climate, considering the range covered by mean \pm 1 standard deviation (69 % of simulated sites) ranges from 42.3 to 73.4 m³/ha/year; c) the rainfall, the solar radiation, the rainfall distribution and the maximum temperature influence, in that order, eucalyptus potential productivity in the Brazil under the effect of climate; d) about the nutritional demand for eucalyptus production (stem) it has the following order: Ca > N > K > Mg > P. Considering the range covering about 69 % of simulated sites (mean \pm 1 standard deviation), it has the following ranges to the quantities of nutrients accumulated in the stem: 227 - 393, 17 - 30, 136 - 236, 340 – 590, and 62 - 107 kg/ha for N, P, K, Ca and Mg, respectively.

Keywords: Potential Productivity, eucalypt, 3-PG Model

INTRODUÇÃO

As tentativas de explicar as diferenças na produtividade entre florestas plantadas de eucalipto têm destacado a importância das variáveis climáticas, além do material genético, como definidoras da produtividade potencial e das características de solo relacionadas aos fluxos de água e nutrientes como limitantes ao alcance deste potencial (STAPE *et al.*, 2006; HUBBARD *et al.*, 2010; STAPE *et al.*, 2010). Normalmente, plantações de eucalipto manejadas comercialmente têm altas taxas de produtividade em sítios férteis e, ou, quando fertilizados, e quando não há limitações hídricas sérias ao crescimento da floresta. Entretanto, estas altas taxas de produtividade estão, também, associadas a altas taxas de uso dos recursos água e nutrientes (BINKLEY *et al.*, 2004), e apesar da elevada eficiência de uso destes recursos pelo eucalipto, a velocidade de expansão dos plantios tem gerado preocupação sobre os seus efeitos nos recursos do meio físico, especialmente solo e água (ALMEIDA *et al.*, 2010). Considerando estes aspectos, a sustentabilidade desses sistemas, quando intensivamente manejados, é questionada, o que demonstra a necessidade do desenvolvimento de ferramentas que permitam quantificar e, por conseguinte, planejar o impacto destes plantios.

Assim, a necessidade de prover respostas a tais indagações resultou nos últimos anos, em crescente demanda pelo desenvolvimento de modelos que tenham capacidade de explicar e prever diferenças no uso da água e na produtividade dos plantios florestais, em resposta à ação de variáveis climáticas, disponibilidade de nutrientes e opções de manejo silviculturais (WHITEHEAD e BEADLE, 2004). Dessa forma, merecem destaque os modelos de crescimento processuais, os quais são baseados no funcionamento do sistema biológico responsável pelo crescimento, variam em complexidade e escala de aplicação (NIGHTINGALE *et al.*, 2004; MIEHLE *et al.*, 2009) e permitem interpretação das variáveis climáticas e do sítio que possam estar limitando a produtividade.

O modelo 3-PG, acrônimo de *Physiological Principles in Predicting Growth* (LANDSBERG e WARING, 1997), um modelo de eficiência de uso de radiação solar e água, e de partição de carbono, possibilita estimar a produtividade de povoamentos florestais monoespecíficos e equiâneos

(DUURSMA, 2004). Ele se baseia em processos fisiológicos, utilizados em modelos de balanço de carbono, e incorpora, também, relacionamentos obtidos a partir de medições experimentais, o que diminui a quantidade de variáveis de entrada, por simplificar o tratamento de processos fisiológicos complexos, facilitando a utilização do mesmo.

O 3-PG incorpora as seguintes simplificações: a) considera que médias mensais dos dados climáticos são adequadas para capturar as tendências principais das variáveis climáticas; b) que para cada mês, o conhecimento da variável mais limitante restringindo a fotossíntese é suficiente; c) a respiração autotrófica e a produção primária líquida (PPL) são, aproximadamente, frações iguais da fotossíntese bruta (PPB); d) a máxima condutância da copa atinge um valor constante quando o índice de área foliar (IAF) excede a 3; e e) a proporção do carbono alocada para a raiz aumenta com a redução na disponibilidade de água e nutrientes (WARING *et al.*, 2011). Assim, dado o emprego de conhecidas constantes e relacionamentos biofísicos, o 3-PG tem sido aplicado a várias espécies florestais (LANDSBERG *et al.*, 2001).

O 3-PG possui estrutura simples, é de fácil operação e é considerado uma ferramenta útil para a predição do impacto dos fatores ambientais determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, água e nutrientes) e de práticas de manejo sobre o potencial produtivo da espécie florestal e, conseqüentemente, sobre a sustentabilidade de florestas plantadas (ALMEIDA *et al.*, 2004b). Ainda, auxilia na quantificação dos riscos associados à produção, aumentando assim a qualidade do processo de tomada de decisão no contexto do manejo florestal.

O desempenho do 3-PG em estimar a produtividade de florestas comerciais, ou não, de eucalipto e, ou, pinus tem sido avaliado em diversos países: Austrália (TICKLE *et al.*, 2001; SANDS e LANDSBERG, 2002; LANDSBERG *et al.*, 2003), Nova Zelândia (COOPS *et al.*, 1998), EUA (COOPS *et al.*, 2001), África do Sul (DYE *et al.*, 2004), Portugal (FONTES *et al.*, 2006), Chile (RODRÍGUEZ *et al.*, 2009) e China (ZHAO *et al.*, 2009).

No Brasil, este desempenho tem sido avaliado a partir de dados obtidos em plantios de empresas florestais situadas na Bahia (STAPE, 2002; STAPE *et al.*, 2004), Espírito Santo (ALMEIDA *et al.*, 2004a,b; ALMEIDA *et al.*, 2010) e

região Centro-Leste e Cerrado de Minas Gerais (SILVA, 2006; BORGES, 2009).

De acordo com Silva (2006) e Borges (2009), os resultados encontrados na avaliação do modelo mostram que a utilização do 3-PG ajustado (parametrizado e calibrado) para as condições específicas da região trabalhada promove melhoria no desempenho do modelo e resulta em estimativas mais exatas da produtividade em plantios de eucalipto. Isso demonstra a necessidade de cautela ao se utilizar parametrizações realizadas em condições diferentes daquelas de onde se deseja aplicá-las. Mas, exceto para a de Borges (2009), obtida com árvores médias de plantios comerciais, as demais parametrizações do 3-PG obtidas no Brasil têm sido feitas com base em dados de árvores cultivadas em parcelas experimentais irrigadas/fertirrigadas. Os reflexos dessas duas estratégias de parametrização devem ser investigados quanto ao grau de universalidade das parametrizações obtidas.

Nessa linha, segundo Almeida *et al.* (2004), o uso de parâmetros obtidos em base do conhecimento hoje disponível sobre o crescimento e fisiologia de árvores, com alguns parâmetros obtidos por meio de calibração, permite ao 3-PG simular com bons resultados, as variáveis que definem o crescimento em áreas para as quais ele não foi calibrado. Para os autores, importantes parâmetros do modelo, como a máxima eficiência quântica da copa, levam valores que podem ser aplicados universalmente, e a um conjunto de outros parâmetros (por exemplo, área foliar específica, condutância da copa, fração de galhos e casca, taxa de queda de litter, etc) podem ser atribuídos valores padrões para a espécie e o sistema de manejo em questão, sem que isto cause erros significativos nas estimativas das variáveis de interesse do manejador florestal. Por último, consideram que a razão primária para diferenças no crescimento entre clones de uma mesma espécie está no modo como estes alocam o carbono produzido pela fotossíntese.

De modo geral, o modelo 3-PG, devidamente parametrizado, apresenta bom desempenho quanto às estimativas da produtividade de plantios de eucalipto, em escala regional, necessitando, contudo, ser aprimorado de modo a ser dotado de resolução em nível local, por exemplo, de talhão, e se constituir em efetiva ferramenta para subsidiar o manejo florestal no contexto da silvicultura de precisão (Silva, 2006).

Assim, o presente trabalho teve por objetivos avaliar o grau de universalidade das parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil e determinar a produtividade potencial do eucalipto em diferentes regiões do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Inicialmente, para avaliar a universalidade das parametrizações, foram realizadas simulações do crescimento de povoamentos de eucalipto utilizando as diferentes parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil: P1) região 1: interior da Bahia (Entre Rios) (STAPE, 2002 e STAPE *et al.*, 2004); P2) região 2: litoral do Espírito Santo (Aracruz) (ALMEIDA *et al.*, 2004); P3) região 3: Vale do Rio Doce (Belo Oriente – MG) (SILVA, 2006) e P4) região 4: Cerrado de Minas Gerais (BORGES, 2009). As três primeiras parametrizações foram obtidas a partir de dados coletados em parcelas experimentais irrigadas/fertirrigadas, já a última foi obtida por meio de medições de árvores médias em plantios comerciais. Neste trabalho, considerou-se como parametrização região-específica aquela obtida na própria região para a qual está sendo realizada a simulação de crescimento.

As estimativas de crescimento obtidas pelo 3-PG para a região do Cerrado de Minas Gerais, utilizando cada parametrização P1, P2, P3 e P4 foram comparadas com dados de inventário florestal contínuo e pré-corte disponíveis para a região. Na sequência, utilizando a parametrização P4 foram geradas estimativas de crescimento para as regiões 1, 2 e 3. Estas estimativas de crescimento obtidas pela parametrização P4 para cada uma das regiões foram comparadas com as estimativas de crescimento obtidas pela parametrização P1 na região 1, bem como com as estimativas obtidas por P2 na região 2 e por P3 na região 3; nessas comparações também foram utilizados dados de parcelas de medição ou de inventário florestal de cada região. A estratégia de comparações assim utilizada procurou comparar o grau de universalidade das parametrizações, conforme a estratégia utilizada na obtenção das parametrizações, parcela de experimentos irrigados/fertirrigados ou árvores de plantios comerciais. Nestas comparações utilizou-se o intervalo de confiança dos dados medidos a 1 % de probabilidade. Considerou-se como

parametrização com maior grau de universalidade aquela que quando aplicada em outra região gerou estimativas de crescimento mais concordantes com os dados medidos.

Nestas simulações foram utilizados dados de solo (água disponível, fertilidade e textura) e clima (temperatura máxima e mínima, precipitação e radiação) específicos para cada região. Os dados de clima de cada região são apresentados na Tabela 1 e os valores atribuídos as variáveis do modelo 3-PG em cada uma das parametrizações são apresentados na Tabela 2.

Na sequência, para obter a produtividade potencial de madeira de eucalipto (tronco sem casca) no Brasil, limitada pelas condições de clima, e com fertilidade do solo plena ($FR=1$) foi utilizado o modelo 3-PG com a parametrização que se apresentou mais universal.

Quanto aos dados meteorológicos necessários à rotina de cálculos do modelo 3-PG, segundo Sands e Landsberg (2002), devido à sensibilidade do modelo a variáveis climáticas, o procedimento de rotina para determinação da produtividade potencial é utilizar dados climáticos médios (normais climatológicas) para a região simulada. Caso se deseje analisar os efeitos de eventos específicos, como a seca, na produtividade das florestas, devem ser utilizados os dados climáticos medidos para o período de crescimento simulado. Para COOPS *et al.* (2005), em regiões onde não há grandes variações nas condições climáticas, principalmente precipitação, em anos subsequentes, não há diferença significativa entre as estimativas de produtividades obtidas pelo 3-PG utilizando as diferentes bases climáticas. Assim, na simulação da produtividade potencial para as diferentes regiões do Brasil, foram utilizados dados climáticos obtidos por meio das coordenadas geográficas de cada localidade, de um banco de dados climáticos da Organização Meteorológica Mundial para a América do Sul com resolução de 0,5° Latitude e de Longitude.

Em relação a variável água no solo, em avaliações prévias, nas quais o modelo foi empregado com diferentes valores para CAD (capacidade de água disponível no solo), considerando a profundidade efetiva do sistema radicular de 2 m, foi observada uma variação de aproximadamente 10 % no valor da variável volume de lenho, aos seis anos de idade, para uma variação da CAD

de 100 a 250 mm ($Vol (m^3/ha) = 270,21 + 0,2281 CAD (mm); R^2 = 0,996$).

Segundo Esprey *et al.* (2004), esta é uma variável com baixo impacto nas estimativas de produtividade obtidas pelo 3-PG. Adicionalmente, a análise com o modelo 3-PG, considerando cenários com solos de textura arenosa, média e argilosa, revelou que, em média, as estimativas de matéria seca de tronco + galhos, no cenário onde a classe textural era média, foram 2 % menores do que naquelas de solo arenoso e 3,2 % maiores do que nos de solos argilosos. Assim, considerando uma profundidade efetiva do sistema radicular de 2 m e o conteúdo de água disponível nesta faixa, optou-se por padronizar nas simulações a classe textural média ("soil class" = SL) e CAD igual a 100 mm.

Após a obtenção das estimativas da produtividade potencial de eucalipto para o Brasil, foi determinado com base no coeficiente de utilização biológica (CUB) a demanda nutricional de N, P, K, Ca e Mg do tronco (lenho + casca) associada à produtividade obtida pelo 3-PG, de modo a obter estimativas dos nutrientes exportáveis pela colheita do tronco. Os valores de CUB utilizados para esses nutrientes foram 600, 8000, 1000, 400 e 2200 kg/kg (matéria seca de tronco/contéudo de nutriente no tronco), respectivamente, valores que são médias obtidas do banco de dados do NUTREE (Programa em Solos e Nutrição Florestal – UFV/SIF) para eucalipto no Brasil.

Tabela 1. Dados climáticos das regiões utilizadas na comparação das diferentes parametrizações do 3-PG.

Aracruz - ES					Belo Oriente - MG				
	Tmax (° C)	Tmin (° C)	Prec. (mm)	Rad. T (MJ m⁻² dia⁻¹)		Tmax (° C)	Tmin (° C)	Prec. (mm)	Rad. T (MJ m⁻² dia⁻¹)
Jan	31,4	22,3	89	21,9	Jan	31,5	21,2	190	19,3
Fev	32,6	22,5	59	22,7	Fev	32,0	20,9	202	20,6
Mar	31,6	21,8	131	19,2	Mar	31,6	20,9	131	19,4
Abr	30,1	21,2	69	16,8	Abr	30,5	19,9	77	16,4
Mai	27,7	18,9	41	14,2	Mai	28,5	16,8	25	14,1
Jun	26,5	18,3	56	13,3	Jun	27,6	14,9	12	13,0
Jul	26,3	17,9	29	13,4	Jul	27,5	13,8	10	13,6
Ago	27,5	17,4	37	15,2	Ago	29,0	15,1	9	15,6
Set	28,1	18,7	67	15,0	Set	29,1	17,0	39	15,5
Out	28,9	18,8	130	15,9	Out	31,4	19,3	63	18,7
Nov	29,9	19,6	257	15,8	Nov	30,7	20,6	183	17,4
Dez	30,1	21,7	214	20,0	Dez	31,2	20,9	305	21,0

Entre Rios - BA					Cerrado - MG				
	Tmax (° C)	Tmin (° C)	Prec. (mm)	Rad. T (MJ m⁻² dia⁻¹)		Tmax (° C)	Tmin (° C)	Prec. (mm)	Rad. T (MJ m⁻² dia⁻¹)
Jan	31,0	21,0	50	21,6	Jan	29,0	19,0	270	16,9
Fev	31,0	21,0	74	21,8	Fev	30,0	19,0	151	17,9
Mar	31,0	21,0	69	18,1	Mar	30,0	19,0	166	16,3
Abr	30,0	21,0	187	19,8	Abr	29,0	17,0	53	16,1
Mai	28,0	20,0	158	15,8	Mai	28,0	16,0	17	15,0
Jun	27,0	19,0	206	15,4	Jun	27,0	13,0	6	14,2
Jul	26,0	18,0	134	13,5	Jul	27,0	12,0	7	15,0
Ago	27,0	18,0	129	15,4	Ago	28,0	14,0	18	16,3
Set	28,0	19,0	83	16,2	Set	29,0	16,0	29	16,9
Out	30,0	20,0	59	18,9	Out	30,0	18,0	65	16,9
Nov	31,0	21,0	84	21,5	Nov	29,0	19,0	272	16,4
Dez	31,0	21,0	61	20,3	Dez	29,0	20,0	313	13,6

Tabela 2. Valores das principais variáveis, das diferentes parametrizações do modelo 3-PG (STAPE *et al.*, 2004; ALMEIDA *et al.* 2004; SILVA, 2006; e BORGES, 2009) cujos desempenhos são comparados neste trabalho.

Variáveis	Símbolo	U	P1	P2	P3	P4
Biomassa inicial de folhas	W_F	t/ha	0,168	0,168	0,168	0,168
Biomassa inicial de stem (tronco + galhos)	W_S	t/ha	0,106	0,106	0,106	0,106
Biomassa inicial de raiz	W_R	t/ha	0,099	0,099	0,099	0,099
Partição folha/stem para $^1D = 2$ cm	pFS2	-	0,96	0,7	1	1,64
Partição folha/stem para $D = 20$ cm	pFS20	-	0,034	0,1	0,09	0,10
Constante do relacionamento entre massa do stem vs DAP	stemConst	-	0,065	0,045	0,1076	0,020
Potência do relacionamento entre massa do stem vs DAP	stemPower	-	2,68	2,812	2,51	3,11
Fração máxima da PPL para raízes	pRx	-	0,8	0,6	0,5	0,5
Fração mínima da PPL para raízes	pRn	-	0,2	0,1	0,1	0,1
Taxa de queda de "litter" para plantios em idade adulta	gammaFx	1/mês	0,07	0,13	0,1	0,07
Taxa de queda de "litter" para $t = 0$	gammaF0	1/mês	0,001	0,00169	0,001	0,001
Idade em que a taxa de queda de "litter" tem valor médio	tgammaF	mês	4	13	12	4
Taxa média de ciclagem radicular	Rttover	1/mês	0,015	0,025	0,015	0,015
Temperatura mínima para o crescimento	Tmin	°C	8	8	8	8
Temperatura ótima para o crescimento	Topt	°C	25	25	25	25
Temperatura máxima para o crescimento	Tmax	°C	40	36	40	40
Valor de 'm' quando $FR = 0$	m0	-	0	0	0	0
Valor de f_N quando $FR = 0$	fN0	-	0,5	0,6	0,5	0,5
Potência de $(1 - FR)$, na expressão do f_N	fNn	-	1	1	1	1
Taxa de fertilidade do solo (FR)	FR	-	0,7	0,7	0,9	0,7/0,9
Variável relacionada com disponibilidade de água no solo	² SoilClass	-	³ CL	CL	CL	CL
Idade máxima do povoamento para computar a idade relativa	MaxAge	Ano	9	9	9	9
Potência da idade relativa na função para f_{age}	nAge	-	4	4	4	4
Idade relativa para dar $f_{age} = 0,5$	rAge	-	0,95	0,95	0,95	0,95
Área foliar específica para plantios em idade inicial	SLA0	m ² /kg	11	10,5	17	13,74
Área foliar específica para plantios em idade adulta	SLA1	m ² /kg	8,5	8	8,24	7,56
Idade na qual a área foliar específica = $\frac{1}{2}(\sigma_0 + \sigma_1)$	tSLA	ano	2,5	2,5	0,81	1,23

Tabela 2. (continuação) Valores das principais variáveis, das diferentes parametrizações do modelo 3-PG (STAPE *et al.*, 2004; ALMEIDA *et al.* 2004; SILVA, 2006; e BORGES, 2009) cujos desempenhos são comparados neste trabalho.

Variáveis	Símbolo	U	P1	P2	P3	P4
Coefficiente de extinção da ⁴ RFAA pelo dossel	k	-	0,4	0,5	0,47	0,5
Idade de fechamento do dossel	fullCanAge	Ano	1,5	0	1	2
Máxima proporção de chuva interceptada pelo dossel	MaxIntcptn	-	0,15	0,15	0,15	0,15
⁵ IAF em que a interceptação de água pelo dossel é máxima	LAI _{maxIntcptn}	m ² /m ²	0	3	3,33	3,33
Eficiência quântica máxima do dossel	Alpha	-	0,08	0,068	0,07	0,08
Relação ⁶ PPL/PPB	Y	-	0,5	0,47	0,47	0,5
Máxima condutância do dossel	MaxCond	m/s	0,02	0,021	0,02	0,02
IAF em que a condutância do dossel é máxima	LAI _{gcx}	m ² /m ²	3,33	3	3,33	3,33
Define a resposta estomática ao déficit de pressão do vapor	CoeffCond	mbar ⁻¹	0,0324	0,047	0,04	0,0324
Condutância da camada limítrofe do dossel	BLcond	m/s	0,2	0,2	0,2	0,2
Massa de lenho máxima para cada 1000 árvores/ha	wSx1000	kg/arv.	300	180	300	300
Fração de galho e casca para plantios em idade inicial	fracBB0	-	0,75	0,3	0,79	0,59
Fração de galho e casca para plantios em idade adulta	fracBB1	-	0,15	0,12	0,11	0,19
Idade na qual a fração de galhos e casca = $\frac{1}{2}(P_{BB0} + P_{BB1})$	tBB	Ano	2	2	1,35	2,17
Densidade básica mínima – plantios em idade inicial	rhoMin	t/m ³	0,450	0,480	0,356	0,382
Densidade básica máxima – plantios em idade adulta	rhoMax	t/m ³	0,450	0,520	0,500	0,505
Idade na qual a densidade básica = $\frac{1}{2}(\rho_0 + \rho_1)$	tRho	ano	4	4	2,1	2,264
Constante do relacionamento entre Altura vs DAP	aH	-	-	-	0,885633	0,67
Potência do relacionamento entre Altura vs DAP	nHB	-	-	-	1,21067	1,27
Constante do relacionamento entre Volume vs DAP	aV	-	-	-	-	0,0256
Potência do relacionamento entre Volume vs DAP	nVB	-	-	-	-	3,22

U = unidade; P1 = Stape *et al.* (2004); P2 = Almeida *et al.* (2004); P3 = Silva (2006); P4 = Borges (2009); ¹ D = diâmetro; ² Soilclass = item de inicialização do 3-PG relacionado com a disponibilidade de água no solo; ³ CL = indica a classe textural do solo (argiloso); ⁴ RFAA = radiação fotossinteticamente ativa absorvida; ⁵ IAF = índice de área foliar; ⁶ PPL = produção primária líquida e PPB = produção primária bruta;

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 1 (a, b) são apresentadas estimativas de crescimento geradas pelo 3-PG para povoamentos de eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais. Esta comparação permite avaliar a capacidade de extrapolação do 3-PG e a consistência de suas estimativas. Nesta Figura também são comparadas as estimativas de crescimento obtidas pelo modelo ajustado por Borges (2009) para povoamentos de eucalipto na região do Cerrado (região-específica), frente às estimativas obtidas por outras parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil (STAPE *et al.*, 2004; ALMEIDA *et al.*, 2004b; SILVA, 2006).

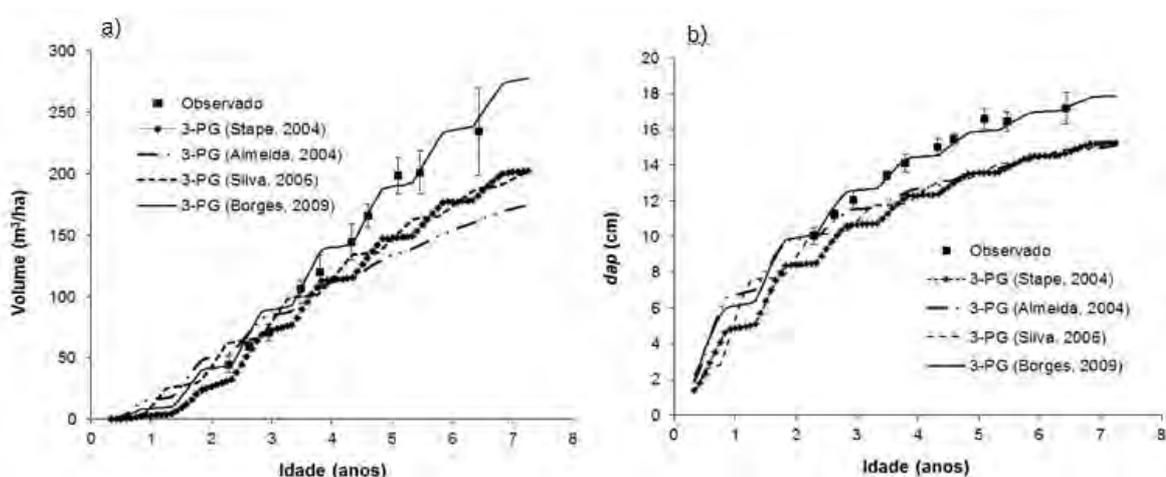


Figura 1. Estimativas para (a) volume de lenho e (b) *dap* obtidas por diferentes parametrizações do modelo 3-PG e comparadas com intervalo de confiança (1 %) ($n = 314$ talhões) de dados de inventário contínuo e pré-corte para a região do Cerrado de Minas Gerais.

Conforme a Figura 1, conclui-se que o uso da parametrização do 3-PG região-específica produz estimativas de crescimento que se ajustam melhor aos dados medidos na região, apresentando, portanto, maior exatidão frente às estimativas obtidas por outras parametrizações do 3-PG disponíveis para o Brasil.

O desempenho inferior das outras parametrizações do 3-PG realizadas no Brasil, ao simular o crescimento de florestas de eucalipto na região do Cerrado (Figura 1), nos leva a supor que o 3-PG parametrizado para esta região (BORGES, 2009) também teria um baixo desempenho quando aplicado nas regiões onde cada uma destas parametrizações foi obtida.

Entretanto, na região 1, exceto aos três anos, as estimativas de produtividade proporcionadas pelo 3-PG parametrizado por Borges (2009), parametrização P4, concordaram com as medições feitas, considerando o intervalo de confiança a 1% (Figura 2a), cabendo observar que aos três anos a produtividade simulada pelo 3-PG conforme a parametrização P1, obtida para a região de Entre Rios – BA, também difere do valor observado. Cabe ressaltar que para a região litorânea da Bahia foi feita alteração no valor da mínima partição de carbono para a raiz (pR_n) utilizada na parametrização P4. Nesta região utilizou-se o valor de 0,2 para a variável pR_n . Almeida *et al.* (2004) e Perez-Cruzado *et al.* (2011), por meio de análises de sensibilidade dos principais parâmetros do 3-PG, concluíram que a variável “mínima partição para a raiz” (pR_n) tem pouca influência sobre as estimativas de crescimento da parte aérea geradas pelo 3-PG. Segundo estes autores, apenas a biomassa de raiz é significativamente afetada por esta variável.

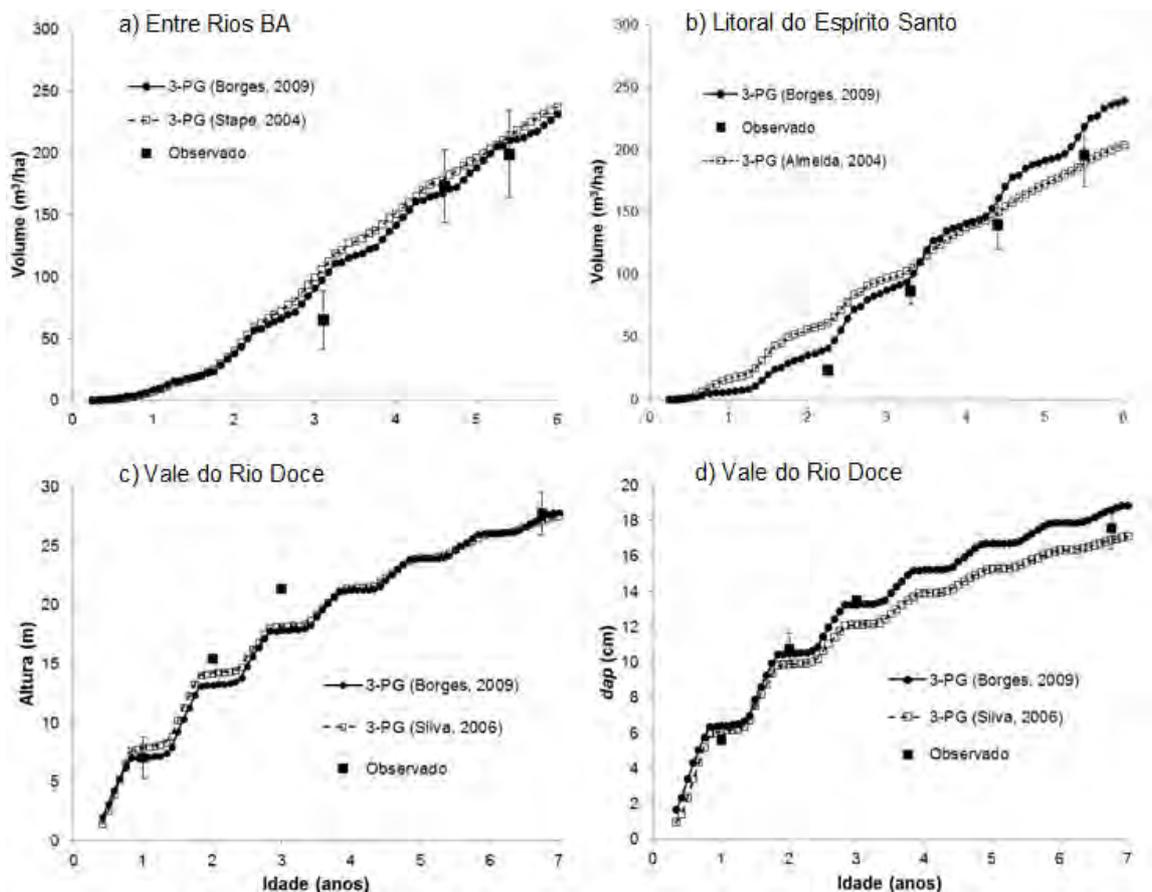


Figura 2. Comparação entre as estimativas de produtividade obtidas pelo modelo 3-PG ajustado por Borges (2009) e as estimativas de produtividade obtidas pelas parametrizações do 3-PG região-específica de (a) Stape *et al.* (2004), (b) Almeida *et al.* (2004) e (c)(d) Silva (2006) e os dados medidos em cada região.

Na região 2, exceto aos 2,25 anos a parametrização P4 também proporcionou estimativas concordantes com o intervalo de confiança dos valores observados (Figura 2b).

Na região 3, a parametrização P4 foi, ao longo do ciclo, de desempenho equivalente ao da parametrização P3, esta obtida na própria região, situando-se dentro do intervalo de confiança dos dados observados para altura e *dap* (Figura 2a e 2b, respectivamente).

Observa-se que P4 além de ter proporcionado estimativas adequadas, concordantes com os valores observados, na região de Cerrado de Minas Gerais na qual foi obtida, também proporcionou estimativas adequadas quando utilizada em outras regiões. Considerando, que para obtenção de P4 foram usadas árvores médias de plantios comerciais, contrariamente à estratégia usada na obtenção das demais parametrizações, o bom desempenho de P4 em todas as regiões avaliadas sugere a importância do desenvolvimento de estudos que possam melhor elucidar as razões para essa maior universalidade.

Na sequência, a partir de dados climáticos (normais climatológicas) abrangendo as diferentes regiões do Brasil e utilizando a parametrização do 3-PG de Borges (2009), P4, - que pode ser considerada a mais universal, como mostrado nos parágrafos anteriores, e assim com maior capacidade de extrapolação -, procedeu-se a simulação da produtividade potencial de eucalipto para todo o Brasil. O incremento médio anual de madeira (IMA de tronco sem casca, em m³/ha/ano), para a idade de seis anos, obtido nestas simulações, é apresentado na Figura 3, estratificado por classe de produtividade potencial. Em termos médios, a produtividade potencial de madeira (tronco sem casca) de eucalipto para o Brasil, aos seis anos, independente da região, foi de 58 m³/ha/ano com desvio-padrão de 15,54, com 69 % dos valores variando de 42,3 a 73,4 m³/ha/ano. Na Figura 4 é apresentado mapa com a distribuição da produtividade potencial nas diferentes regiões do Brasil.

Cabe destacar que o conceito de produtividade potencial adotado neste trabalho é semelhante ao apresentado por STAPE *et al.* (2006) e STAPE *et al.* (2010). Segundo estes autores a produtividade potencial de eucalipto em uma determinada região é definida pelas variáveis climáticas e o material genético utilizado, sendo as características de solo relacionadas aos fluxos de água e

nutrientes, a fisiografia do terreno, o manejo adotado para um dado material genético de planta e as práticas silviculturais as variáveis que limitam o alcance desse potencial. Nesse contexto, o clima é considerado amplamente como o fator que primariamente determina a produtividade de plantas. Nas estimativas de produtividade potencial obtidas pelo 3-PG neste trabalho (Figura 4), para as diferentes regiões do Brasil, foram considerados apenas as limitações impostas pelos elementos do clima. E, portanto, esta produtividade deve ser entendida como o potencial que poderia ser alcançado, caso o material genético fosse escolhido adequadamente para o local, não existisse limitação devido à fisiografia do terreno nem ao solo, e as práticas silviculturais e de manejo fossem otimizadas. Dessa forma, deve ficar clara a diferença entre dois conceitos: produtividade potencial e produtividade máxima. Conforme já discutimos, a produtividade potencial seria aquela definida pelo clima e pelo material genético. Já a produtividade máxima seria a máxima produtividade que pode ser obtida para o conjunto das variáveis de clima, material genético, condições de solo, fisiografia do terreno e nível de manejo adotado em cada região. Percebe-se assim que a produtividade máxima só será igual à produtividade potencial na situação onde todos os fatores de produção são otimizados.

Assim, os valores de produtividade apresentados na Figura 4 não devem ser entendidos como a máxima produtividade que pode ser alcançada para as diferentes regiões do Brasil, mas sim como a produtividade potencial, ou seja, aquela definida pelo clima já que nas simulações não se fez variações nos parâmetros do material genético. Nesse sentido, também usando o 3-PG e considerando a classe taxonômica de solo, Borges *et al.* (2010) obtiveram estimativas da produtividade máxima de tronco de eucalipto, para a região do Meio Norte (Maranhão e parte do Piauí) do Brasil, considerando o clima, as classes de solo predominante na região e que o manejo adotado seria otimizado.

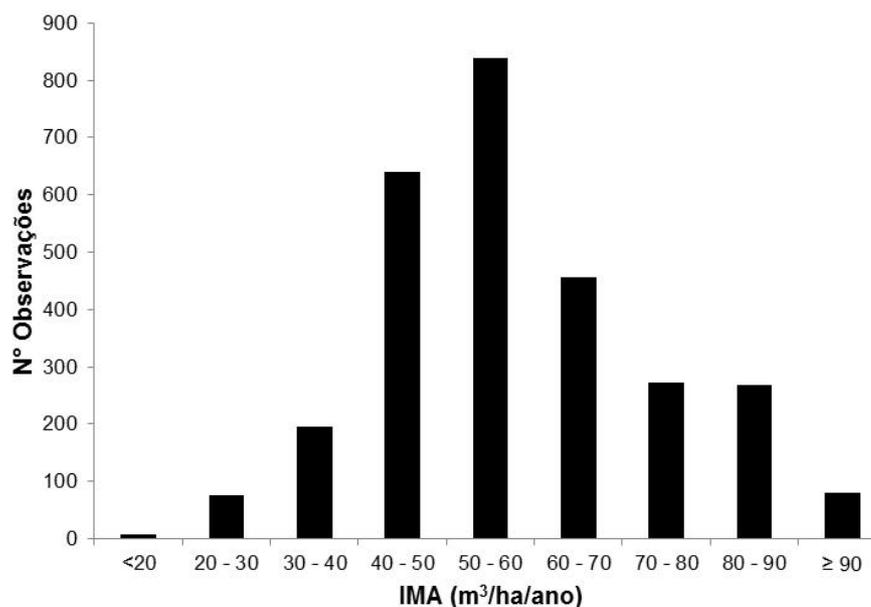


Figura 3. Estimativas de produtividade (IMA), aos seis anos de idade, obtidas pelo modelo 3-PG ajustado por Borges (2009), estratificadas por classe de produtividade potencial.

A regressão múltipla ajustada entre a produtividade potencial, aos seis anos, estimada pelo 3-PG e as variáveis climáticas padronizadas (z - calculado por: valor observado menos a média, dividido pelo desvio padrão) (precipitação total anual, temperatura máxima em termos de média das máximas anual, radiação total anual e nº de meses sem chuva) explicou 83 % da variação observada no valor da produtividade estimada pelo 3-PG (Tabela 3). Segundo o modelo de regressão ajustado, a variável precipitação total anual foi a que mais influenciou as estimativas de produtividade obtidas pelo 3-PG.

Tabela 3. Modelo de regressão múltipla ajustado entre produtividade potencial e variáveis climáticas.

Modelo	R ²	n
IMA_3PG = 58,72 + - 5,6530 Tmax + 12,5701 Prec - 0,9050 Prec ² - 6,3656 NMSC + 9,2228 RAD	0,838	2 837

Tmax: temperatura máxima; Prec: Precipitação total anual; NMSC: nº de meses sem chuva; RAD: radiação total anual; Variáveis climáticas normalizadas; IMA_3PG: m³/ha/ano aos seis anos. * significativo a 0,1%.

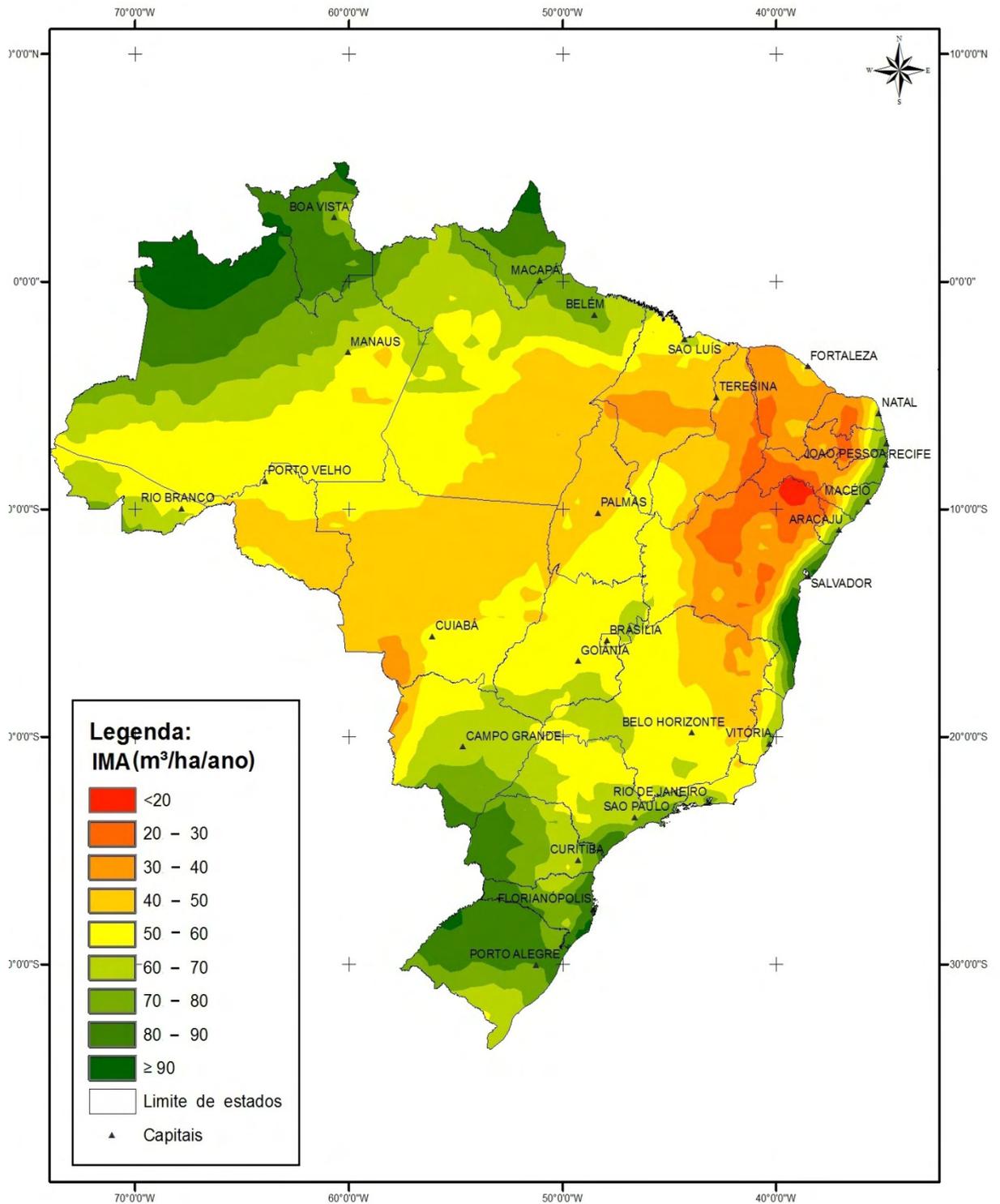


Figura 4. Produtividade potencial de madeira de eucalipto (tronco sem casca), limitada pelo clima, aos seis anos de idade, obtidas pelo modelo 3-PG.

De modo geral, há aumento no valor da produtividade estimada com o aumento da precipitação e, ou, com a redução da temperatura máxima. A correlação entre as variáveis, precipitação e n° de meses sem chuva (que reflete o padrão de distribuição das chuvas) foi relativamente forte (-0,63), ou

seja, de modo geral, com o aumento da precipitação, há concomitantemente uma redução no n° de meses sem chuva. Adicionalmente, observa-se que para locais onde os valores de precipitação anual situam-se em faixas semelhantes, há uma redução na produtividade com o aumento do n° de meses sem chuva (Figuras 5 e 6). Do mesmo modo, em locais com o mesmo número de meses sem chuva há um aumento na produtividade potencial estimada com o aumento da precipitação total anual (Figuras 5 e 6). Esses relacionamentos demonstram que o 3-PG além de ser sensível a precipitação total anual é também fortemente influenciado pela distribuição da precipitação, conforme apresentado por Borges (2009). Observa-se também que nas regiões de maior precipitação a redução na radiação total anual foi o fator limitante a produtividade, provavelmente devido ao aumento da nebulosidade (Figura 6).

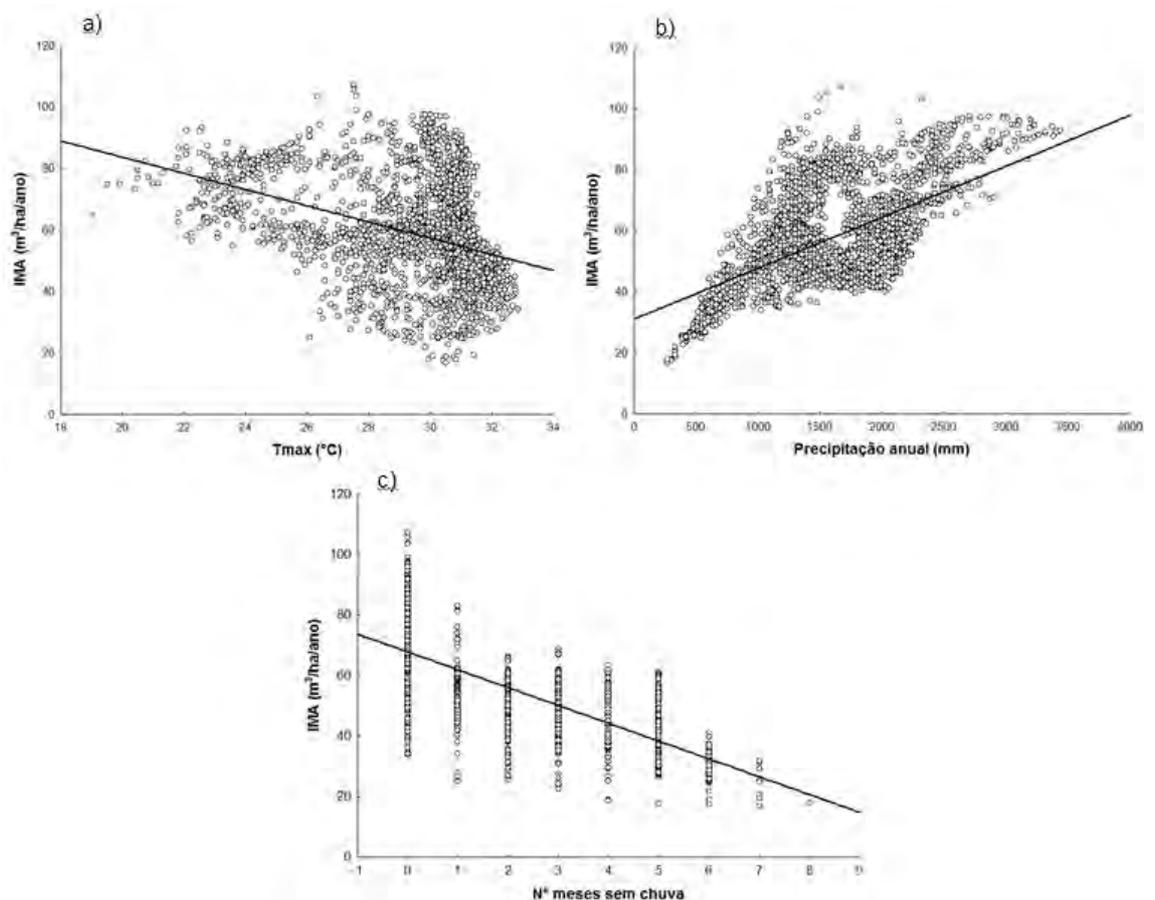


Figura 5. Relacionamento entre as variáveis climáticas, (a) temperatura máxima, (b) precipitação total anual e (c) n° meses sem chuva, e a produtividade potencial (IMA) estimada pelo 3-PG.

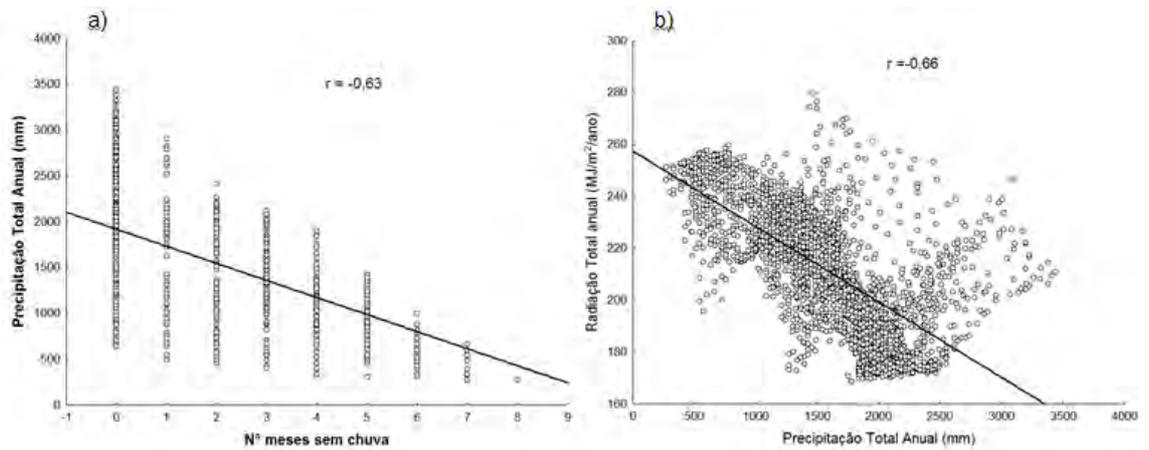


Figura 6. Relacionamento entre as variáveis climáticas: (a) Precipitação total x nº de meses sem chuva e (b) Radiação total anual x Precipitação total.

Diante dos resultados encontrados, pode-se dizer que o tratamento dado pelo 3-PG às variáveis climáticas é coerente, e o coloca como uma importante ferramenta, entre outras possibilidades, para avaliação dos impactos causados pelos fenômenos de mudanças climáticas sobre as florestas plantadas, por exemplo. Neste sentido, pode-se citar o trabalho de Baesso (2011) que utilizou o modelo 3-PG para simular os efeitos de diferentes cenários de mudanças climáticas sobre a produtividade do eucalipto no Brasil.

Na sequência, nas Figuras de 7 a 11, são apresentados mapas com as quantidades demandadas dos nutrientes N, P, K, Ca e Mg pelo tronco (lenho + casca) para a produtividade potencial simulada. Conforme esperado, para as áreas nas quais a produtividade potencial estimada foi maior, há também maior demanda por nutrientes. Nesse contexto, os nutrientes tiveram a seguinte ordem de demanda nutricional para a produção de eucalipto (tronco com casca): $Ca > N > K > Mg > P$. Considerando a faixa que abrange cerca de 69 % dos sítios simulados (média ± 1 desvio padrão), observa-se as seguintes faixas para as quantidades de macronutrientes acumuladas no tronco: 227 a 393, 17 a 30, 136 a 236, 340 a 590 e 62 a 107 kg/ha de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Diante da magnitude da demanda nutricional para a produtividade potencial do eucalipto torna-se claro a importância da manutenção na área, dos resíduos da colheita das árvores, principalmente a casca, que além de devolver ao solo parte dos nutrientes absorvidos pelas árvores, confere também maior grau de proteção física ao solo e aumenta a transferência de C do resíduo para

as frações mais estáveis da matéria orgânica do solo. Dessa forma, esta prática contribui positivamente para a qualidade do solo e para a manutenção da capacidade produtiva do sítio.

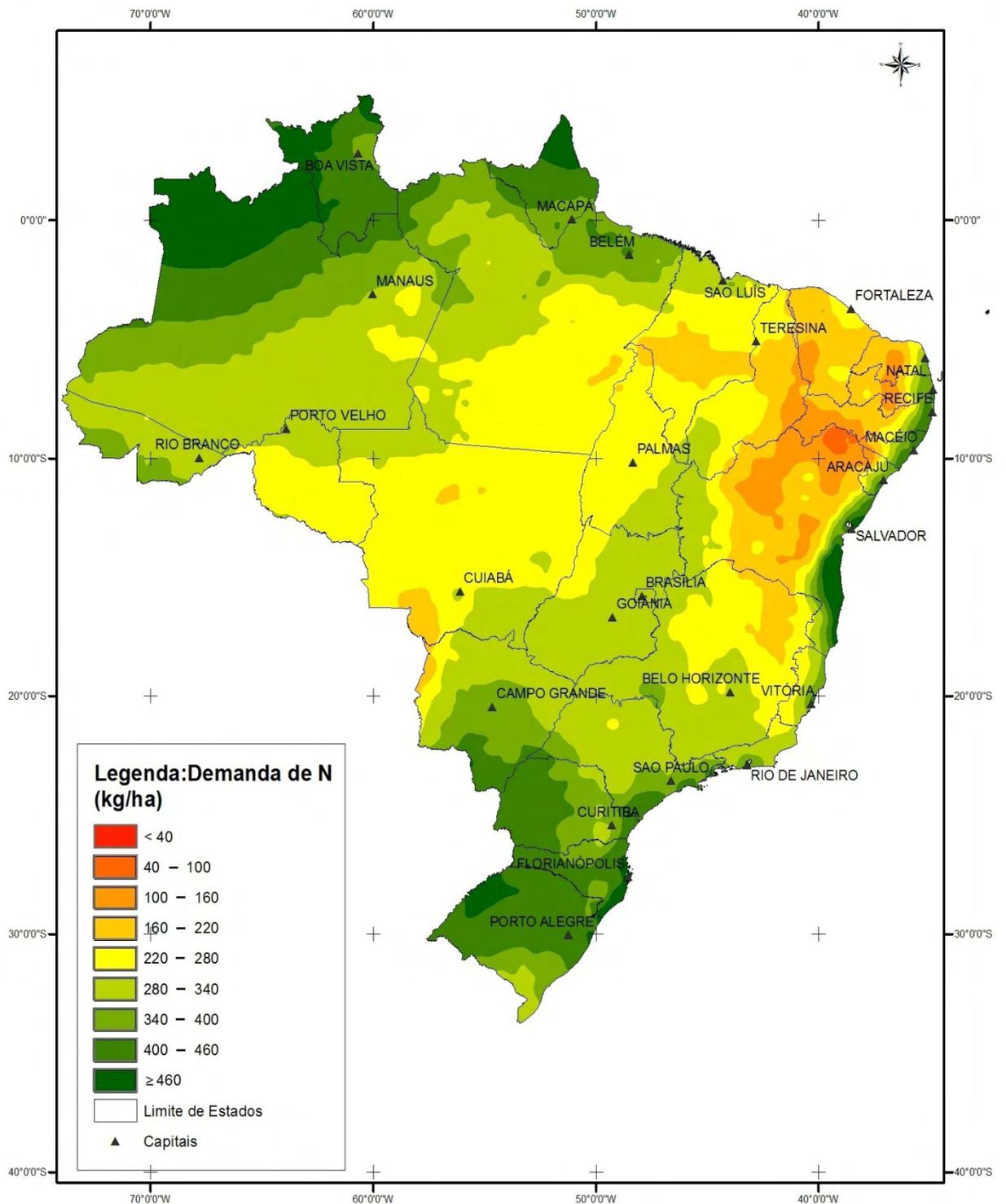


Figura 7. Quantidade de N demandada para a produção potencial de tronco (lenho + casca) de eucalipto aos seis anos, no Brasil, simulada pelo 3-PG.

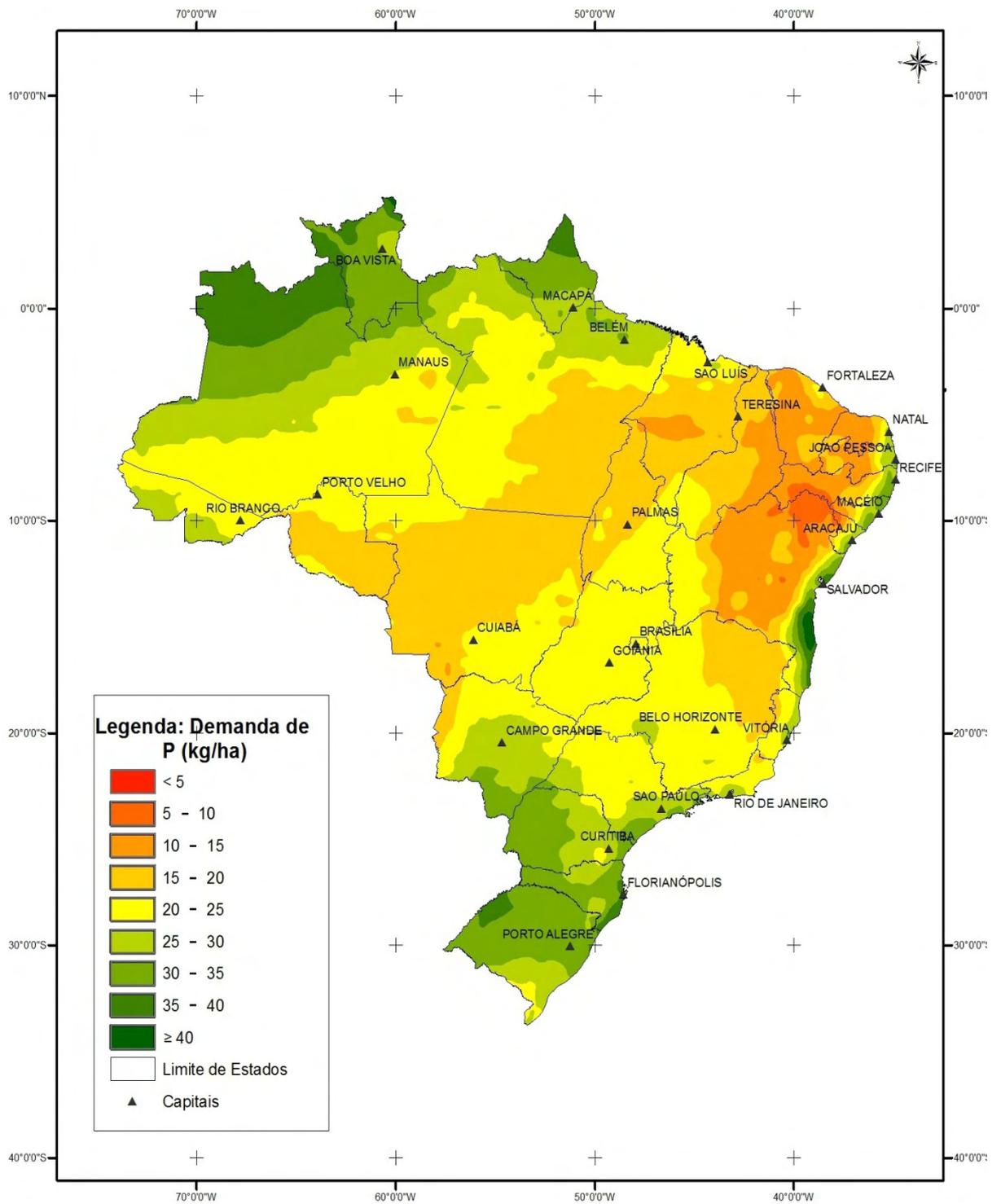


Figura 8. Quantidade de P demandada para a produção potencial de tronco (lenho + casca) de eucalipto aos seis anos, no Brasil, simulada pelo 3-PG.

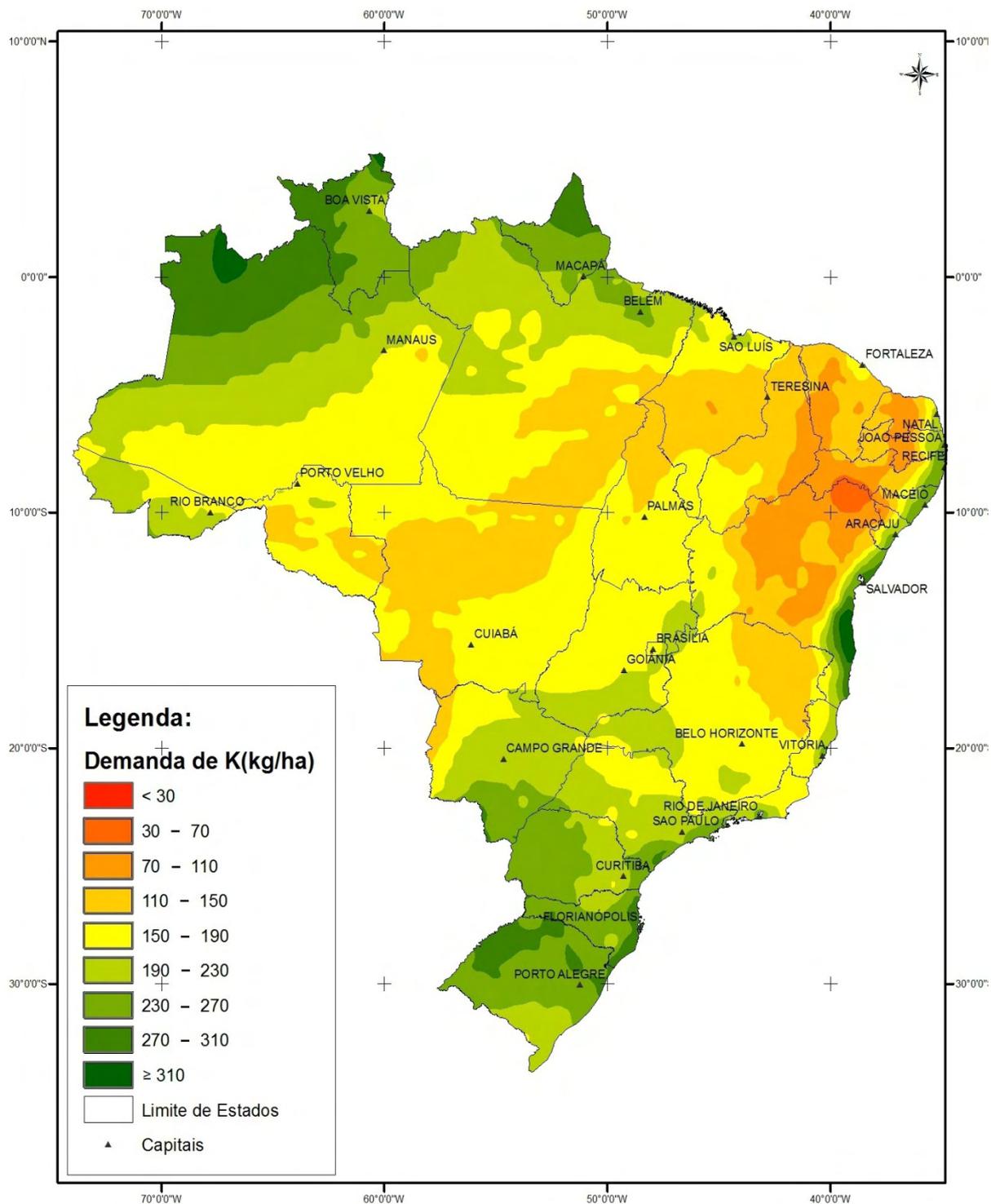


Figura 9. Quantidade de K demandada para a produção potencial de tronco (lenho + casca) de eucalipto aos seis anos, no Brasil, simulada pelo 3-PG.

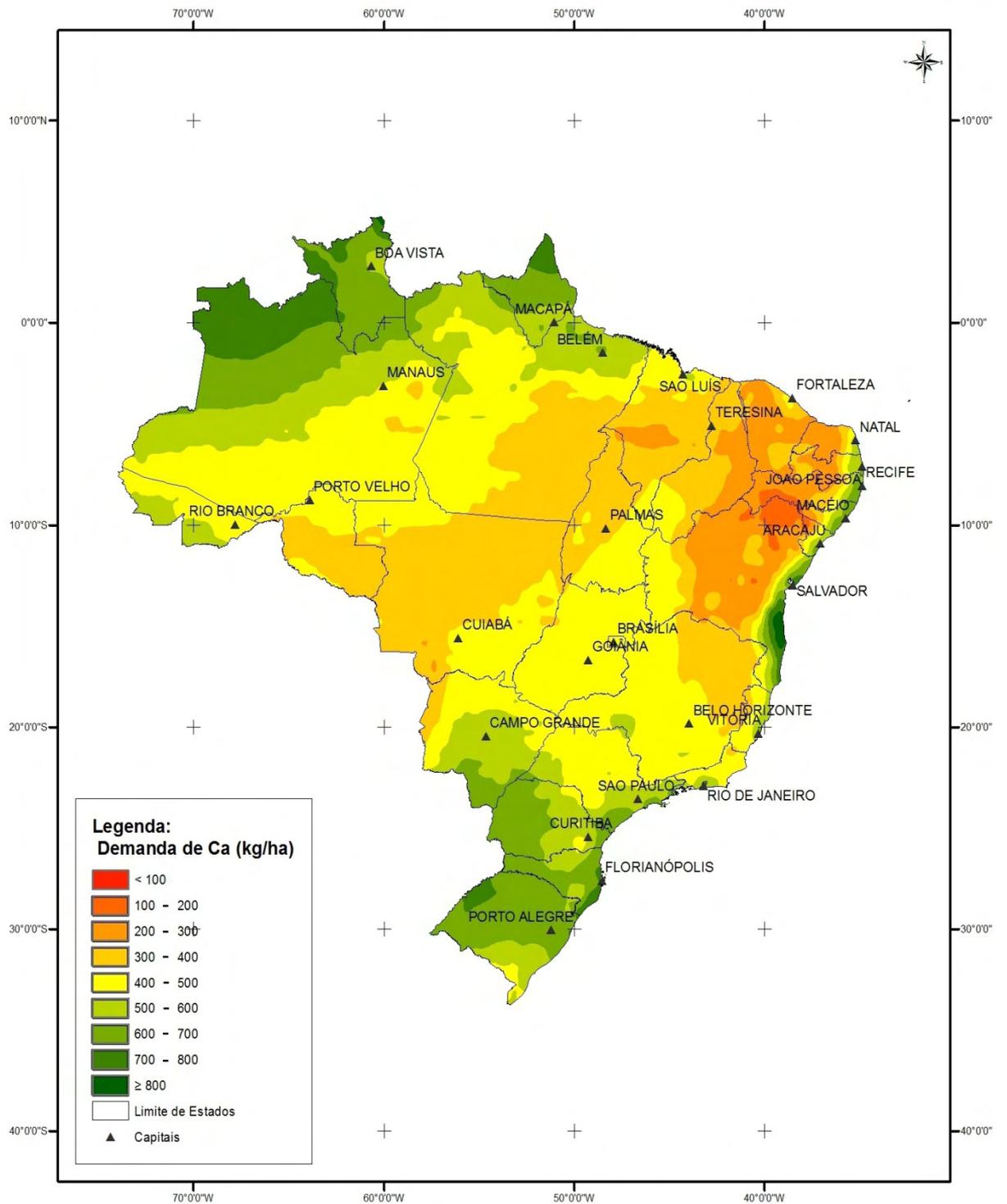


Figura 10. Quantidade de Ca demandada para a produção potencial de tronco (lenho + casca) de eucalipto aos seis anos, no Brasil, simulada pelo 3-PG.

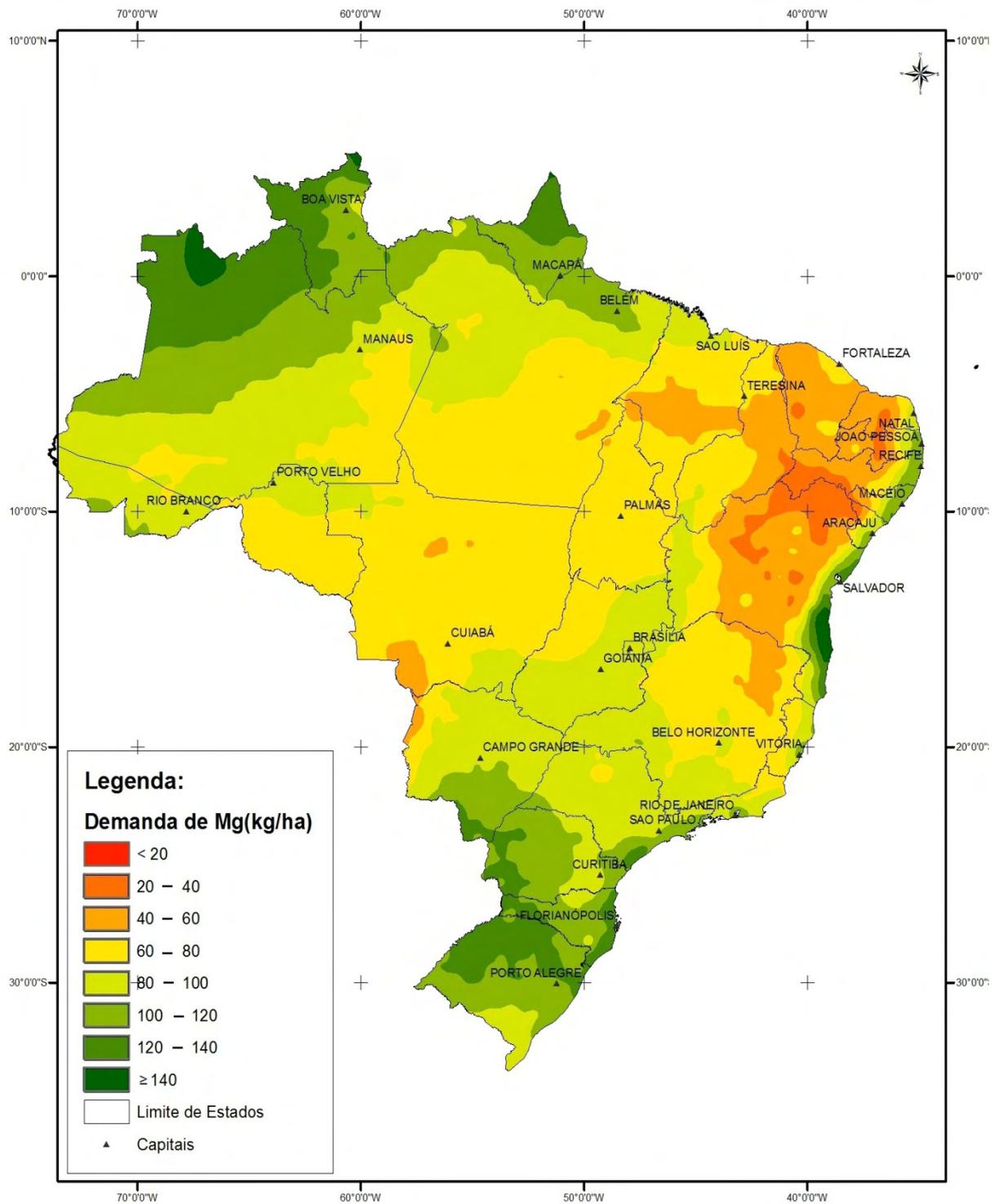


Figura 11. Quantidade de Mg demandada para a produção potencial de tronco (lenho + casca) de eucalipto aos seis anos, no Brasil, simulada pelo 3-PG.

CONCLUSÕES

A estratégia de obtenção da parametrização do modelo 3-PG influencia o grau de universalidade da parametrização do modelo. Parametrizações obtidas em parcelas de experimentos irrigação/fertirrigação apresentam baixa universalidade ao passo que parametrização obtida em plantios comerciais tem alta universalidade e assim alto grau de extrapolação.

A produtividade potencial de madeira (tronco sem casca) de eucalipto aos seis anos, para o Brasil, sob efeito do clima, considerando a faixa abrangida pela média ± 1 desvio padrão (69 % dos sítios simulados), varia de 42,3 a 73,4 m³/ha/ano;

A precipitação pluviométrica, a radiação solar, a distribuição de chuvas e a temperatura máxima influenciam, nessa ordem, a produtividade potencial de eucalipto no Brasil sob efeito do clima.

Quanto à demanda nutricional para produção potencial de eucalipto (tronco com casca) tem-se a seguinte ordem: Ca > N > K > Mg > P. Considerando a faixa que abrange cerca de 69 % dos sítios simulados (média ± 1 desvio padrão), observa-se as seguintes faixas para as quantidades de macronutrientes acumuladas no tronco: 227 a 393, 17 a 30, 136 a 236, 340 a 590 e 62 a 107 kg/ha de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, A. C.; LANDSBERG, J. J.; SANDS, P. J. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing *Eucalyptus grandis* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 179-195, 2004a. ISSN 0378-1127.

ALMEIDA, A. C. et al. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 167-177, 2004b. ISSN 0378-1127.

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 [S.l.]*, v. 259, n. 9, p. 1730-1740, 2010.

BAESSO, R. C. E. Modelagem do comportamento ecofisiológico de plantios de eucalipto submetidos a aumentos na concentração de CO₂. 2011. 128p. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2011.

BINKLEY, D.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management [S.l.]*, v. 193, n. 1-2, p. 5-16, 2004.

BORGES, J. S. Parametrização, Calibração e Validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais. 2009. 77p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição e Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2009.

BORGES, J. S.; LOURENÇO, H. M.; NEVES, J. C. L.; KER, J. C.; SILVA, G. G. C.; BARROS, N. R.; FÁRIA, M. M. A cultura do eucalipto, seus potenciais e riscos para a conservação dos solos no Meio-Norte brasileiro. XVIII Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água – Novos Caminhos para a agricultura conservacionista no Brasil. Teresina – PI, agosto 2010. CD-ROM

COOPS, N. C.; WARING, R. H.; LANDSBERG, J. J. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *Forest Ecology and Management*, v. 104, n. 1-3, p. 113-127, 1998. ISSN 0378-1127.

COOPS, N. C.; WARING, R. H.; LANDSBERG, J. J. Estimation of potential forest productivity across the Oregon transect using satellite data and monthly weather records. *International Journal of Remote Sensing*, v. 22, n. 18, p. 3797-3812, Dec 2001. ISSN 0143-1161.

COOPS, N.C.; WARING, R. H.; LAW, B. Predicting the influence of climatic variability on the productivity and distribution of ponderosa pine ecosystems in the Pacific Northwest. *Ecological Modelling*, v. 183, p107–124. 2005.

DYE, P. J.; JACOBS, S.; DREW, D. Verification of 3-PG growth and water-use predictions in twelve Eucalyptus plantation stands in Zululand, South Africa. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 197-218, 2004. ISSN 0378-1127.

DUURSMA, R. A. A simple process-based model of forest growth, and a test for the Priest River Experimental Forest. 2004. 169p. Thesis (PhD) – University of Idaho, [S.I.], 2004.

ESPREY, L. J.; SANDS, P. J.; SMITH, C. W. Understanding 3-PG using a sensitivity analysis. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1-2, p. 235-250, 2004. ISSN 0378-1127.

FONTES, L. et al. Calibration and testing of a generalized process-based model for use in Portuguese eucalyptus plantations. *Canadian Journal of Forest Research-Revue Canadienne De Recherche Forestiere*, v. 36, n. 12, p. 3209-3221, 2006. ISSN 0045-5067

HUBBARD, R. M.; STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; ALMEIDA, A. C.; ROJAS, J. Effects of irrigation on water use and water use efficiency in two fast growing Eucalyptus plantations. *Forest Ecology and Management [S.I.]*, v. 259, n. 9, p. 1714-1721, Apr 2010.

LANDSBERG, J. J. et al. Applying 3-PG, a simple process-based model designed to produce practical results, to data from loblolly pine experiments. *Forest Science*, v. 47, n. 1, p. 43-51, 2001. ISSN 0015749X.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, v. 95, n. 3, p. 209-228, 1997. ISSN 0378-1127.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H.; COOPS, N. C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management*, v. 172, n. 2-3, p. 199-214, 2003. ISSN 0378-1127.

MIEHLE, P.; BATTAGLIA, M.; SANDS, P. J.; FORRESTER, D. I.; FEIKEMA, P. M.; LIVESLEY, S. J.; MORRIS, J. D.; ARNDT, S. K. A comparison of four process-based models and a statistical regression model to predict growth of Eucalyptus globulus plantations. *Ecological Modelling[S.I.]*, v. 220, n. 5, p. 734-746, 2009.

NIGHTINGALE, J. M.; PHINN, S. R.; HELD, A. A. Ecosystem process models at multiple scales for mapping tropical forest productivity. *Progress in Physical Geography [S.I.]*, v. 28, n. 2, p. 241-281, Jun 2004.

PEREZ-CRUZADO, C. et al. Combining empirical models and the process-based model 3-PG to predict *Eucalyptus nitens* plantations growth in Spain. *Forest Ecology and Management*, v. 262, n. 6, p. 1067-1077, Sep 2011. ISSN 0378-1127.

RODRÍGUEZ, R. et al. A process-based model to evaluate site quality for *Eucalyptus nitens* in the Bio-Bio Region of Chile. *Forestry*, v. 82, n. 2, p. 149-162, 2009. ISSN 0015752X.

SANDS, P. J.; LANDSBERG, J. J. Parameterisation of 3-PG for plantation grown *Eucalyptus globulus*. *Forest Ecology and Management*, v. 163, n. 1-3, p. 273-292, 2002. ISSN 0378-1127.

SILVA, G. G. C. Nutrição, crescimento e sua modelagem em povoamentos de eucalipto em reposta à disponibilidade de água e nutrientes. 2006. 116p. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

STAPE, J.L. Production ecology of clonal eucalyptus plantations in northesastern Brazil. 2002. 225p. Tese (Doutorado) - Colorado State University, Fort Collins, Colorado, 2002.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. 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 [S.I.]*, v. 193, n. 1-2, p. 219-234, 2004.

STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; JACOB, W. S.; TAKAHASHI, E. N.A twin-plot approach to determine nutrient limitation and potential productivity in Eucalyptus plantations at landscape scales in Brazil. *Forest Ecology and Management [S.I.]*, v. 223, n. 1-3, p. 358-362, 2006.

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. DE 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 [S.I.]*, v. 259, n. 9, p. 1684-1694, Apr 2010.

TICKLE, P. K. et al. Assessing forest productivity at local scales across a native eucalypt forest using a process model, 3PG-SPATIAL. *Forest Ecology and Management*, v. 152, n. 1-3, p. 275-291, Oct 2001. ISSN 0378-1127.

WARING, R. H.; COOPS, N. C.; RUNNING, S. W. Predicting satellite-derived patterns of large-scale disturbances in forests of the Pacific Northwest Region in response to recent climatic variation. *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 12, p. 3554-3566, Dec 2011. ISSN 0034-4257.

WHITEHEAD, D.; BEADLE, C. L. Physiological regulation of productivity and water use in *Eucalyptus*: a review. *Forest Ecology and Management* [S.l.], v. 193, n. 1-2, p. 113-140, May 2004.

ZHAO, M. F. et al. Simulating age-related changes in carbon storage and allocation in a Chinese fir plantation growing in southern China using the 3-PG model. *Forest Ecology and Management*, v. 257, n. 6, p. 1520-1531, 2009. ISSN 0378-1127.

CONCLUSÃO GERAL

- O uso dos Índices Balanceados de Kenworthy e do método da linha de fronteira aplicado aos resultados de análises foliares em populações de plantios jovens de eucalipto permite determinar o grau de limitação à produtividade em função do grau de balanço de cada nutriente ou do conjunto dos nutrientes, isolando os efeitos de fatores não nutricionais, e embasando a determinação de modulador edáfico para uso em modelos ecofisiológicos de crescimento florestal.

- A estratégia de obtenção da parametrização do modelo 3-PG influencia o grau de universalidade da parametrização do modelo. Parametrizações obtidas em parcelas de experimentos irrigação/fertirrigação apresentam baixa universalidade ao passo que parametrização obtida em plantios comerciais tem alta universalidade e assim alto grau de extrapolação.

- A produtividade potencial de madeira (tronco sem casca) de eucalipto aos seis anos, para o Brasil, sob efeito do clima, considerando a faixa abrangida pela média ± 1 desvio padrão (69 % dos sítios simulados), varia de 42,3 a 73,4 m³/ha/ano;

- A precipitação pluviométrica, a radiação solar, a distribuição de chuvas e a temperatura máxima influenciam, nessa ordem, a produtividade potencial de eucalipto no Brasil sob efeito do clima.

- Quanto à demanda nutricional para produção de eucalipto (tronco com casca) tem-se a seguinte ordem: Ca > N > K > Mg > P. Considerando a faixa que abrange cerca de 69 % dos sítios simulados (média ± 1 desvio padrão), observa-se as seguintes faixas para as quantidades de macronutrientes acumuladas no tronco: 227 a 393, 17 a 30, 136 a 236, 340 a 590 e 62 a 107 kg/ha de N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.