

Características nutricionais de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* Bonpl. sob tratamentos de fertilização em área degradada na AmazôniaNutritional traits of young *Bertholletia excelsa* Bonpl. plants under fertilization treatments in a degraded area in AmazoniaMarciel José Ferreira¹, José Francisco de Carvalho Gonçalves²,
João Baptista Silva Ferraz² e Viviane Maia Corrêa³**Resumo**

Dentre as alternativas para reincorporação de áreas desflorestadas aos processos produtivos inclui-se o reflorestamento. Porém, a baixa fertilidade natural, o empobrecimento nutricional destas áreas frente à retirada da cobertura florestal e exposição do solo, além do desconhecimento sobre as demandas nutricionais das espécies arbóreas dificultam a escolha da melhor estratégia de adubação para formar plantios florestais nestas áreas. O objetivo deste trabalho foi investigar os efeitos das adubações mineral e orgânica sobre a disponibilidade de nutrientes no solo, o estado nutricional e a eficiência fotossintética no uso de nutrientes em *Bertholletia excelsa* Bonpl. sob plantio florestal em área degradada. O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado, sendo as variáveis: composição química do solo, os teores foliares de nutrientes, a fotossíntese e eficiência fotossintética no uso de nutrientes analisadas após quatro anos do plantio. Os efeitos das adubações se fizeram notar especialmente nas camadas superficiais (0-2,5 e 2,5-7,5 cm) do solo. A adubação mineral aumentou as disponibilidades de K, Mg e Mn, enquanto a adubação orgânica, elevou principalmente os teores de C e N do solo. *B. excelsa* obteve maiores teores foliares de N (15,1 g kg⁻¹), P (2,4 g kg⁻¹), K (5,1 g kg⁻¹), Zn (29,9 mg kg⁻¹) e Mn (56,6 mg kg⁻¹) sob adubação orgânica. As taxas de fotossíntese foram três vezes maiores nas plantas sob adubação orgânica comparada ao controle. Os tratamentos de fertilização melhoraram a eficiência fotossintética no uso de todos os nutrientes, com destaque para a eficiência no uso do fósforo. Portanto, o maior teor de nitrogênio foliar aliado ao incremento da fotossíntese e da eficiência no uso do fósforo em *B. excelsa* sob adubação orgânica representaram ganhos funcionais importantes que podem ter concorrido para o adequado estabelecimento inicial desta espécie no campo.

Palavras-chave: Fotossíntese, eficiência fotossintética no uso de nutrientes, Castanheira-da-amazônia, reflorestamento.

Abstract

Among the alternatives for reintegration of deforested areas into the productive processes, one is the reforestation. However, the low natural fertility, the nutritional impoverishment of these areas by the removal of the forest cover and soil exposure, besides the lack of knowledge about the performance of tree species makes it difficult to define the best strategy of fertilization for the establishment of forest plantations in these areas. The aim of this study was to investigate the effects of mineral and organic fertilizations on the availability of nutrients in the soil, nutritional status and photosynthetic nutrient use efficiency in *Bertholletia excelsa* Bonpl. under forest plantations in degraded areas. The experimental design was completely randomized, with the variables: soil chemical composition, leaf nutrient contents, photosynthesis and photosynthetic nutrient use efficiency analyzed after four years from the planting. The effects of fertilization became especially noted in the superficial layers (0-2.5 and 2.5-7.5 cm) of soil. The mineral fertilization treatment increased the availability of K, Mg and Mn, while the organic fertilization raised the C and N soil contents. *B. excelsa* showed a higher leaf N (15.1 g kg⁻¹), P (2.4 g kg⁻¹), K (5.1 g kg⁻¹), Zn (29.9 mg kg⁻¹) and Mn (56.6 mg kg⁻¹) under organic fertilization. The photosynthetic rates were three times higher in plants under organic fertilization compared to the control. The fertilization treatments improved the photosynthetic efficiency use of all nutrients, with emphasis on phosphorus use efficiency. Therefore, the higher leaf nitrogen content coupled with increased photosynthesis and phosphorus efficiency use in *B. excelsa* under organic fertilization represent important gains that may have contributed to the appropriate initial establishment of this species in the field.

Keywords: Photosynthesis, photosynthetic nutrient use efficiency, Brazil nut, reforestation.

¹Professor Adjunto da Faculdade de Ciências Agrárias. UFAM – Universidade Federal do Amazonas. Av. General Rodrigo Octavio Jordão Ramos, 3000, Bloco V, Sala 2 – Coroado I – 69077-000 – Manaus, AM. E-mail: mjf.ufam@gmail.com

²Pesquisador Titular. INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – Coordenação de Dinâmica Ambiental. Av. Efigênio Sales (Antigo V8) – Caixa Postal, 476 – 69011-970 – Manaus, AM. E-mail: jfc@inpa.gov.br; jferraz@inpa.gov.br

³Mestre em Ciências de Florestas Tropicais. INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Av. André Araújo, 2936 – Aleixo - 69060-001 – Manaus, AM. E-mail: vivicorrea@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

Os dados sobre desflorestamento na Amazônia dão conta que até 2010, uma área de 746.387 km² já havia sido desflorestada, em termos percentuais corresponde a 18,4% da Amazônia Legal (INPE, 2013). Com a remoção da cobertura florestal induzida por diferentes atividades, em particular, àquelas de caráter antropogênico, várias mudanças ocorrem no sistema solo-vegetação-atmosfera. No solo, mais especificamente, as alterações nas propriedades químicas são refletidas, de maneira evidente e rápida, a partir das reduções dos teores e estoques de nutrientes (ASNER et al., 2004). Em razão da redução da ciclagem de nutrientes via decomposição da serrapilheira, da baixa capacidade de retenção de nutrientes nesses solos (em sua maioria Latossolos Amarelos, álicos, ou "Oxisols") (FEARNSIDE; LEAL FILHO, 2002), da intensificação dos processos de lixiviação (QUESADA et al., 2011) e alterações físicas face ao nível de precipitação da Região Amazônica, verifica-se que estes fatores contribuem de forma determinante para formação de extensas áreas com baixa capacidade produtiva e, por conseguinte, são abandonadas.

Diante da necessidade de reinserção destas áreas nos processos produtivos e visando promover o equilíbrio econômico e ambiental a partir do uso da terra, os reflorestamentos representam uma das alternativas mais efetivas para implementação de programas de recuperação e/ou reabilitação de áreas degradadas (CHAZDON, 2008). Os plantios podem aumentar os estoques de carbono na biomassa aérea (MELO; DURIGAN, 2006) e a fertilidade do solo em curto a médio prazo (MOREIRA; COSTA, 2004). Ainda com relação ao solo, considerando a baixa capacidade de troca catiônica dos Latossolos Amarelos (BOTSCHEK et al., 1996) é importante salientar que aumento no teor da matéria orgânica do solo, também pode promover maior capacidade de retenção de nutrientes (inclusive cátions) e de água, como consequência da estabilização das características físicas e químicas do solo (LAL, 2004; MENDONÇA-SANTOS et al., 2006), além de promover diversos benefícios associados às recomposições ecológicas relacionados a fauna e flora locais (e.g. aumento do número de microorganismos nitrificantes, participação de micorrizas, estabelecimento de bancos de sementes, entre outros).

Na Amazônia, no entanto, o estabelecimento e crescimento das espécies florestais sobre áreas alteradas têm sido limitados, em grande medida, pela falta de conhecimentos sobre a funcionalidade das espécies e suas interações com o ambiente de crescimento, uma vez que a fisiologia destas árvores altera completamente sob condições de estresse, motivada pela profunda deterioração dos componentes do solo com ênfase nas características físico-químicas e nutricionais, além das condições microclimáticas adversas reinantes (MORAN et al., 2000, SANTOS JR. et al., 2006). Neste sentido, a fim de promover a recomposição vegetal dessas áreas mediante utilização de plantios florestais torna-se necessário restabelecer ou mesmo melhorar as características do solo, particularmente, quanto aos níveis de fertilidade (JAQUETTI et al., 2014).

O suprimento adequado de nutrientes pode promover o crescimento das plantas, estimulado pelo aumento das taxas de fotossíntese para a Castanheira-da-amazônia (FERREIRA et al., 2009), resultado do melhor desempenho tanto da fase fotoquímica, com participações diretas dos nutrientes (Mg, S, Fe, Cu, Cl, Ca e Mn) quanto da fase bioquímica (N, P, S e micronutrientes, além do K nas regulações estomáticas), assim favorecendo sobremaneira o estabelecimento das espécies florestais em áreas degradadas, uma vez que o desempenho funcional constitui fator determinante para a aclimação em condições de campo (ASANOK et al., 2013; MARTÍNEZ-GARZA et al., 2013; BURYLO et al., 2014; CAMPOE et al., 2014). Além da disponibilidade de nutrientes no solo, é fundamental considerar a eficiência na sua utilização (BLAIR, 1993; BÜNDCHEN et al., 2013). Esta eficiência é inerente a cada espécie, sendo mecanismo bastante vantajoso para as espécies que colonizam solos de áreas degradadas na região amazônica (SANTOS JR. et al., 2006; SILVA et al., 2006). A adoção de práticas de manejo de plantios mais adequadas, por sua vez, constitui a melhor alternativa externa para o aumento da eficiência no uso dos nutrientes pelas espécies (BALIGAR et al., 2001). Entretanto, não há na literatura resultados que discriminem a efetiva contribuição entre métodos de adubação mineral e orgânica, a partir de material vegetal de espécies lenhosas, quanto à melhoria da eficiência no uso dos nutrientes em áreas degradadas.

Ao considerar o tratamento de fertilização, deve-se verificar também a(s) espécie(s) a serem testadas na expectativa de agregar valor e ao mesmo tempo garantir uma efetiva cobertura vegetal da área

a ser recuperada. Dentre as espécies com grande potencial de uso em projetos de recuperação de áreas alteradas na Amazônia destaca-se a *Bertholletia excelsa*, conhecida popularmente como Castanheira-da-amazônia, Castanha-do-pará ou Castanha-do-brasil, pertencente à família das Lecythidaceae, que na região Neotropical inclui 200 espécies com ampla distribuição (MORI, 1992). A espécie tem sido utilizada em diferentes sistemas de plantios florestais na região, seja na composição de sistemas agroflorestais ou em plantios homogêneos para recuperação de áreas alteradas ou de reposição florestal (COSTA et al. 2009; SCOLES et al., 2011; FERREIRA et al., 2012).

Nesse contexto, o presente trabalho teve por objetivo analisar as seguintes questões: qual a efetiva contribuição da fertilização (mineral e orgânica) para o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e melhoria do status nutricional de *B. excelsa*; e quais os efeitos da fertilização sobre a eficiência fotossintética no uso de nutrientes em *B. excelsa* crescendo sobre área degradada.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado no município de Manaus, AM (60° 01' 07" O e 03° 05' 08" S), sobre área degradada previamente desflorestada pela retirada da vegetação original formada por "Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme" (VELOSO et al., 1991). O clima da região segundo o sistema de classificação de Köppen é do tipo "Amw", com temperatura e pluviosidade média anual de 26,7°C e 2.186 mm, respectivamente (FISCH, 1990). O solo pode ser classificado quanto à textura como franco argilo arenoso (areia total = 67%, silte = 7% e argila = 25%).

A área degradada foi resultado da remoção de uma camada de solo de aproximadamente 3 m. A superfície desta área foi então terraplanada e compactada para o início de construções militares. Posteriormente, com a não execução das obras, a área foi abandonada. Assim, a partir da demanda para recomposição vegetal neste sítio, mudas de *Bertholletia excelsa*, com sete meses e altura média de 55 cm foram plantadas em covas de tamanho 30 x 40 cm, em espaçamento de 1 x 1 m (FERREIRA et al., 2012).

No plantio, as covas receberam diferentes tratamentos de adubação, caracterizados da seguinte forma: 1) controle - não recebeu adubação; 2) adubação mineral - adubação mineral convencional com 150 g planta⁻¹ de adubo mineral comercial incorporado ao solo em mini covas laterais distantes cerca de 10 cm de cada muda (Oumag[®] 4% N, 14% P, 7% K, 11,5% Ca, 2,7% Mg, 10,4% S, 0,07% B, 0,59% Zn e 0,15% Cu) e 3) adubação orgânica - constituída de material vegetal aplicado em cobertura com 9 kg m⁻² de material vegetal fresco sem incorporação ao solo (folhas e fragmentos de galhos com 10 cm de comprimento e Ø = 2,5 cm provenientes da poda de plantas presentes na floresta secundária adjacente ao experimento) (C = 514 g kg⁻¹, N = 8,7 g kg⁻¹, P = 0,3 g kg⁻¹, K = 1,4 g kg⁻¹, Ca = 4,3 g kg⁻¹, Mg = 0,5 g kg⁻¹, S = 0,8 g kg⁻¹, B = 5,3 mg kg⁻¹, Cu = 4,8 mg kg⁻¹, Fe = 108 mg kg⁻¹, Mn = 75,3 mg kg⁻¹ e Zn = 14,7 mg kg⁻¹) (FERREIRA et al., 2009). Em todos os tratamentos 50 g de calcário dolomítico foram incorporados no raio de 30 cm da planta.

Todas as análises foram realizadas após quatro anos de condução do experimento, sendo os tratamentos de fertilização renovados uma vez ao ano a partir da primeira aplicação no plantio. As concentrações dos macro (C, N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Mn e Zn), Al e o pH_{H2O} do solo foram analisadas a partir de amostras coletadas nas profundidades 0-2,5, 2,5-7,5, 7,5-20 e 20-40 cm. O C orgânico foi determinado pelo método de Walkley-Black (WALKLEY; BLACK, 1934). Ca e Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al pelo método de titulação com NaOH (McLEAN, 1965). O P foi determinado pelo método do azul de molibdato e por espectrofotometria (λ = 660 nm) (MURPHY; RILEY, 1962), K e micronutrientes foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin-Elmer, 1100B, Ueberlingen, Germany). Os valores de pH_{H2O} foram obtidos potenciométricamente, utilizando eletrodo combinado, imerso em solução de solo e água (1:2,5) (THOMAS, 1996).

As concentrações de macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn e Mn) foliares foram determinadas em folhas maduras, completamente expandidas, em bom estado fitossanitário e expostas a pleno sol. As amostras foliares foram secas em estufa a 65°C até massa constante e posteriormente moídas. Nitrogênio foi determinado de acordo com o método Kjeldahl (BREMNER, 1996). As concentrações de fósforo foram determinadas pelo método com molibdato e espectrofotometria a 725 nm (VITTI; FERREIRA, 1997). A partir do mesmo extrato foram retiradas alíquotas e

as concentrações dos nutrientes K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn foram determinadas por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin-Elmer, 1100B, Ueberlingen, Germany).

As taxas de fotossíntese líquida (A_N) foram determinadas com analisador de gases a infravermelho (Li-6400, Li-Cor, Lincoln, NE, USA), no período entre 9:00 e 12:00 horas, em dez indivíduos por tratamento. A A_N foi medida nas mesmas folhas utilizadas para a determinação de nutrientes. Os dados pontuais de A_N na unidade de massa foliar foram obtidos à densidade de fluxo de fótons saturante (PPFD) de $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com a câmara foliar ajustada para concentração de CO_2 , temperatura e vapor de H_2O em torno de $380 \pm 4 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $31 \pm 1^\circ\text{C}$ e $21 \pm 1 \text{mmol mol}^{-1}$, respectivamente.

A eficiência fotossintética no uso de nutrientes (EFUnutriente) foi calculada por meio da razão entre as taxas de fotossíntese líquida de cada planta e seus respectivos teores foliares de nutrientes (SANTOS JR. et al., 2006).

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), com três tratamentos (1 - controle, 2 - adubação mineral e 3 - adubação orgânica) e dez repetições, considerando cada planta uma repetição de cada tratamento. Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA One-Way) por meio do software estatístico Statistica versão 6.1 (StatSoft Inc. 2004). Em seguida, o teste de Tukey ($P < 0,05$) foi aplicado para comparação das médias dos tratamentos para os nutrientes N, Ca e Mn. Para os dados de análise química do solo que não atenderam as premissas de normalidade e/ou homogeneidade de variâncias (pH, Al, P, K, Mg, Fe e Zn) foi aplicado o teste não-paramétrico de Kruskal Wallis e as médias foram comparadas pelo método Student Newman Keuls ($P < 0,05$) (ZAR, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para as características químicas do solo, verificou-se que os valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ nas camadas superficiais (0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm) foram mais elevados no tratamento com adubação mineral. O maior $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ resultou em considerável redução nas concentrações de Al no solo atingindo $0,05 \text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ (Tabela 1).

Tabela 1. Valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, Al, macro e micronutrientes no solo em plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação.

Table 1. Values of $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$, Al, macro and micronutrients in the soil, in a plantation of *B. excelsa* in a degraded area after fertilization treatments.

Tratamentos	$\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$	Al cmolc kg ⁻¹	C g kg ⁻¹	N g kg ⁻¹	P mg kg ⁻¹	K mg kg ⁻¹	Ca cmolc kg ⁻¹	Mg cmolc kg ⁻¹	Fe mg kg ⁻¹	Zn mg kg ⁻¹	Mn mg kg ⁻¹
Profundidade do solo (0-2,5 cm)											
Controle	5,07b	0,18ab	5,74b	0,34b	2,36a	19,17b	0,17b	0,08c	17,38ab	2,28b	0,80c
Adubação mineral	6,51a	0,05b	6,95b	0,36b	1,63a	56,67a	0,88a	0,45a	21,00a	14,57a	5,27a
Adubação orgânica	4,87b	0,42a	23,39a	0,84a	2,18a	24,33ab	0,84a	0,21b	14,13b	3,10ab	2,93b
Profundidade do solo (2,5-7,5 cm)											
Controle	5,05ab	0,15ab	1,68b	0,11b	0,15b	3,00b	0,06b	0,02b	12,50ab	0,47a	0,20b
Adubação mineral	5,32a	0,05b	1,78b	0,10b	1,38a	17,00ab	0,16a	0,13a	15,38a	0,43a	0,15b
Adubação orgânica	4,93b	0,27a	5,54a	0,23a	0,74ab	22,33a	0,17a	0,10ab	11,00b	1,83a	0,77a
Profundidade do solo (7,5-20 cm)											
Controle	5,09a	0,13a	0,86b	0,07b	0,33b	2,33c	0,03b	0,01b	126,25a	0,43a	2,08a
Adubação mineral	5,14a	0,05b	1,04b	0,07b	0,99a	30,33a	0,08a	0,08a	84,50b	0,75a	0,90b
Adubação orgânica	5,12a	0,13a	2,21a	0,12a	0,35b	14,00b	0,10a	0,08a	39,67c	0,47a	1,03b
Profundidade do solo (20-40cm)											
Controle	5,12a	0,13a	0,59b	0,07a	0,25b	2,33b	0,03b	0,01b	301,67a	0,50a	5,30a
Adubação mineral	5,14a	0,05b	1,09a	0,07a	3,93a	13,00a	0,13a	0,08a	146,50b	0,97a	1,53b
Adubação orgânica	5,13a	0,08ab	1,48a	0,09a	0,42ab	6,00b	0,07b	0,05ab	92,00b	0,63a	1,70b

Médias seguidas da mesma letra entre os tratamentos não diferem pelos testes de Tukey e Student Newman Keuls ($P \geq 0,05$) (n = 4).

De maneira geral, as maiores concentrações de nutrientes foram encontradas nas camadas superficiais do solo em todos os tratamentos (0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm). Com relação aos macronutrientes, o tratamento com adubação orgânica exibiu valores médios maiores que o controle nas primeiras

camadas do solo (0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm), para C e N 128 e 268%, respectivamente. Apesar da importância da calagem na correção da acidez e consequente aumento na taxa de mineralização do N no solo (ROSOLEM et al., 2003), não se observou diferenças nas concentrações de C e N entre os tratamentos com adubação mineral e controle ao longo de todas as profundidades do solo analisadas. As concentrações de P e K foram mais elevadas no tratamento com adubação mineral que não diferiu do tratamento com adubação orgânica (Tabela 1). As concentrações de Ca e Mg em ambos os tratamentos de adubação, nas camadas superficiais do solo, foram 4 e 5 vezes maiores que o controle, respectivamente. Com relação às concentrações de micronutrientes, Mn e Zn, a semelhança dos macronutrientes, foram mais elevadas nas camadas superficiais. A exceção foi observada para Fe nos três tratamentos e Mn no controle, que exibiram maiores valores com o aumento da profundidade do solo.

Os maiores teores de P (a profundidades abaixo de 2,5 cm) e K encontrados no tratamento com adubação mineral estão relacionados à elevação na disponibilidade destes elementos proporcionada pela correção da acidez e consequente aumento na eficiência do fertilizante mineral aplicado (SILVA et al., 2006). Além disso, valores superiores de Ca e Mg observados nas camadas mais superficiais do tratamento com adubação mineral também pode ser reflexo da correção da acidez do solo e do fornecimento destes nutrientes pela aplicação de calcário dolomítico (ALFAIA; MURAOKA, 1997; SILVA et al., 2006). Por outro lado, maiores concentrações de Ca, observadas no solo com adubação orgânica, devem estar relacionadas aos elevados teores deste elemento no material vegetal, o qual é fornecido ao solo em grande parte pela degradação de lignina (YADAV; MALANSON, 2007).

Na literatura tem sido demonstrado o efeito benéfico da correção da acidez em solos tropicais e alterações na disponibilidade de micronutrientes, os quais em altas concentrações podem rapidamente induzirem sintomas de toxicidade nas plantas, ressaltando-se que os limites para separação entre baixa, adequada e alta concentração de micronutrientes foliares é muito tênue devido ao requerimento foliar para estes elementos ser pequeno (ALFAIA; MURAOKA, 1997; NUNES et al., 2004; SILVA et al., 2006). Este efeito foi observado para Fe e Mn em maiores profundidades do solo, no tratamento com adubação mineral, quando comparado com o tratamento controle. Porém, na camada de aplicação do calcário, não se verificou efeito do aumento do pH sobre as concentrações de Mn, como verificado por SILVA et al. (2006). Concentrações altas de Mn e Zn nas camadas superficiais do tratamento com adubação orgânica, provavelmente, estão associadas aos elevados teores destes elementos no material vegetal utilizado (75,3 e 14,7 mg kg⁻¹ para Mn e Zn, respectivamente). Por outro lado, apesar do Fe também ser encontrado em altos teores no material vegetal aplicado, as concentrações deste nutriente nas camadas mais profundas do solo foram inferiores aos demais tratamentos.

O maior teor de N foliar foi obtido no tratamento com adubação orgânica (15,1 g kg⁻¹), sendo superior aos valores observados nos tratamentos controle e adubação mineral, 41 e 37% respectivamente (Tabela 2). Os teores foliares de N obtidos em *B. excelsa* são inferiores aos observados em estudos com outras espécies nativas da Amazônia (SANTOS JR. et al., 2006; SILVA et al., 2006). Por outro lado, embora inferiores, nas plantas do tratamento com adubação orgânica sintomas visuais de deficiência deste nutriente não foram observados. À semelhança dos teores de N, os teores foliares de P também foram mais altos no tratamento com adubação orgânica e não apresentaram diferenças entre os tratamentos controle e adubação mineral (Tabela 2).

Além das análises isoladas dos teores dos nutrientes deve-se verificar também a relação entre nutrientes e suas implicações em termos de equilíbrio químico, como no que se refere a razão N:P, que tem sido proposta como indicadora da limitação de um desses nutrientes. Isto é, valores da razão N:P > 16 indicam maior limitação por fósforo, enquanto que relação N:P < 14 sugere maior limitação por nitrogênio (KOERSELMAN; MEULEMAN, 1996). Portanto, no presente estudo parece que a concentração de N, comparada a de P, pode ser indicada como fator mais limitante ao crescimento das plantas com valores bem abaixo do índice 14 (6,2 - 9,1). Reforçando esta hipótese, experimentos com a omissão de N, dentre macro e micronutrientes, sugerem o N como um dos principais responsáveis por afetar o crescimento de mudas de *Bertholletia excelsa* em condições controladas (CAMARGOS et al., 2002). No entanto, o fato de não conhecer os níveis críticos destes nutrientes para esta espécie dificulta a confirmação do grau de limitação ao crescimento das plantas imposto pela menor concentração de nutrientes.

Tabela 2. Fotossíntese, teores foliares de nutrientes e eficiência fotossintética no uso de nutrientes em plantio de *B. excelsa* sobre área degradada.

Table 2. Photosynthesis, leaf nutrient contents and photosynthetic nutrient use efficiency in a plantation of *B. excelsa* in a degraded area.

Parâmetros	Controle	Adubação mineral	Adubação orgânica	P
AN (nmol g ⁻¹ s ⁻¹)	51,6 ± 8,3c	87,9 ± 15,8b	169,8 ± 12,7a	0,000
N (g kg ⁻¹)	10,7 ± 1,6b	11,0 ± 0,9b	15,1 ± 0,9a	0,000
P (g kg ⁻¹)	1,2 ± 0,4b	1,3 ± 0,8b	2,4 ± 0,6a	0,000
K (g kg ⁻¹)	3,0 ± 1,8b	5,8 ± 1,0a	5,1 ± 1,2a	0,000
Ca (g kg ⁻¹)	11,9 ± 3,5a	12,2 ± 2,1a	11,2 ± 2,8a	0,715
Mg (g kg ⁻¹)	2,4 ± 0,9a	2,8 ± 0,4a	3,0 ± 0,3a	0,151
Fe (mg kg ⁻¹)	119,6 ± 47,5a	121,9 ± 36,1a	77,6 ± 8,0b	0,013
Zn (mg kg ⁻¹)	19,6 ± 10,0b	14,9 ± 5,3b	29,9 ± 9,5a	0,002
Mn (mg kg ⁻¹)	32,6 ± 14,0b	25,8 ± 15,6b	56,6 ± 17,2a	0,000
EFUN (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	67 ± 5c	111 ± 15b	159 ± 20a	0,000
EFUP (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	1462 ± 320b	2467 ± 657a	2296 ± 615a	0,001
EFUK (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	880 ± 489b	595 ± 60b	1385 ± 404a	0,000
EFUCa (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	182 ± 34b	289 ± 30b	647 ± 187a	0,000
EFUMg (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	569 ± 169b	756 ± 107b	1407 ± 224a	0,000
EFUFe (μmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	27 ± 8c	42 ± 8b	124 ± 20a	0,000
EFUZn (μmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	206 ± 78b	409 ± 85a	413 ± 162a	0,000
EFUMn (μmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	102 ± 45b	235 ± 94a	180 ± 59a	0,001

Médias ± desvios-padrão. Médias seguidas da mesma letra entre os tratamentos não diferem pelo teste de Tukey (P ≥ 0,05) (n = 10).

Os teores de K foram maiores nos tratamentos de adubação quando comparados ao controle. A presença de K é importante no ajustamento osmótico de plantas submetidas a condições de déficit hídrico (ASHRAF et al., 2001), podendo favorecer a manutenção da abertura estomática e a maior captura de CO₂ com incremento na eficiência do uso da água (FERREIRA et al., 2012). Em todos os tratamentos, as plantas acumularam altos teores de Ca. Altas concentrações foliares de Ca (11,2-12,2 g kg⁻¹) podem estar relacionadas às estratégias de adaptação das plantas que promovem absorção diferenciada deste elemento ou à elevada concentração de Ca na solução do solo (MCLAUGHLIN; WIMMER, 1999; JANDL; HERZBERGER, 2001). O Ca, além de ser constituinte de parede celular, juntamente com o Mn, são os principais responsáveis pelo funcionamento do complexo de evolução de oxigênio (CEO) do aparato fotossintético (SAUER; YACHANDRA, 2004). O Ca participa como cofator essencial para a quebra oxidativa da molécula de água, sendo que sua remoção ou substituição por outro íon metálico pode inibir o CEO (VRETTOS et al., 2001). Os tratamentos de fertilização não influenciaram diferentemente as concentrações foliares de Mg, que variaram entre 2,4 (controle) e 3,0 g kg⁻¹ (adubação orgânica). Com relação aos micronutrientes, apenas no tratamento com adubação orgânica *B. excelsa* apresentou teores foliares médios de Mn superior a 50 mg kg⁻¹, considerado suficiente para o adequado crescimento vegetal (KIRKBY, 2012). Em função dos baixos teores de Mn obtidos nos tratamentos controle e adubação mineral a razão Fe:Mn, a semelhança do observado em *Cedrela fissilis* (BÜNDCHEN et al., 2013), foi bem superior a 1 (3,7-4,7), característica que tem sido apontada como não comum entre espécies arbóreas nativas (BARRICK; NOBLE, 1993).

Com relação à eficiência fotossintética no uso de nutrientes (EFUnutriente), *B. excelsa* sob tratamento com adubação orgânica apresentou maiores valores de eficiência para todos os nutrientes foliares, os quais foram 135, 57, 57, 255, 147, 363, 100 e 76% maiores que o tratamento controle para os nutrientes N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn, respectivamente (Tabela 2). Este resultado tem importante significado para o manejo de plantios florestais em regiões tropicais, principalmente, quanto à eficiência no uso do fósforo, nutriente que tem sido indicado como o mais limitante ao crescimento de plantas em cerca de 90% dos solos amazônicos (MENDONÇA-SANTOS et al., 2006). O fato é que a maior eficiência no uso do fósforo representa estratégia preferencial de espécies arbóreas crescendo em florestas nativas sobre solos com baixa disponibilidade de nutrientes (ESPIG et al., 2008; HIDAKA; KITAYAMA, 2009; MENDES et al., 2013). No presente estudo, a maior eficiência no uso de nutrientes em *B. excelsa* foi determinada pelo incremento das taxas de assimilação de carbono (A_N) nas plantas submetidas à fertilização (Tabela 2). Os valores de A_N foram em média três vezes

superiores sob adubação orgânica comparada ao controle. Diante disto percebe-se que as maiores taxas de fotossíntese das plantas sob adubação orgânica também foram acompanhadas pelos maiores teores foliares de nitrogênio e fósforo, nutrientes diretamente envolvidos nos processos de captação, conversão e armazenamento de energia no complexo fotossintético (RIDDOCH et al., 1991; RYCHTER; RAO, 2005). Estes resultados sinalizam e reforçam a hipótese de que a adoção de melhores práticas de manejo do solo pode constituir eficiente estratégia para o aumento da EFUnutriente pelas espécies (BALIGAR et al., 2001).

CONCLUSÕES

A adubação orgânica proporcionou aumentos importantes nos teores de C e N do solo, enquanto a adubação mineral contribuiu para o incremento de P e, em geral, outros nutrientes metálicos como K, Mg e Fe, com destaque para os aumentos nas camadas superficiais do solo. Os tratamentos com adubação (mineral e orgânica) foram capazes de proporcionar incrementos diferenciados nos teores foliares de nutrientes. Os tratamentos implicaram diferenças na eficiência no uso dos nutrientes, em particular, para a eficiência no uso do fósforo nas plantas submetidas à adubação orgânica, determinada pelo maior ganho de carbono proporcionado por este tratamento. Portanto, o incremento da eficiência fotossintética no uso de fósforo aliado aos altos teores de nitrogênio foliar em *B. excelsa* podem explicar o bom estabelecimento inicial desta espécie no campo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI-INPA) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do projeto 553316/2005-2 pelo financiamento da pesquisa. Agradecem ainda ao 1º Batalhão de Infantaria na Selva - Amv (Manaus, AM) pela cessão da área experimental e à Empresa Agropecuária Aruanã S. A. (Itacoatiara, AM) pela doação das mudas. J.F.C. Gonçalves é bolsista de produtividade CNPq.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFAIA, S. S.; MURAOKA, T. Efeito residual de calagem e micronutrientes em latossolo amarelo sob rotação de culturas. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 27, n. 3, p. 153-162, 1997.
- ASANOK, L.; MAROD, D.; DUENGKAE, P.; PRANMONGKOL, U.; KUROKAWA, H.; AIBA, M.; KATABUCHI, M.; NAKASHIZUKA, T. Relationships between functional traits and the ability of forest tree species to reestablish in secondary forest and enrichment plantations in the uplands of northern Thailand *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 296, p. 9-23, 2013.
- ASHRAE, M.; AHMAD, A.; MCNEILLY, T. Growth and photosynthetic characteristics in pearl millet under water stress and different potassium supply. *Photosynthetica*, Praha, v. 39, n. 3, p. 389-394, 2001.
- ASNER, G. P.; ELMORE, A. J.; OLANDER, L. P.; MARTIN, R. E.; HARRIS, A. T. Grazing systems, ecosystem responses, and global change. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 29, p. 261-299, 2004.
- BALIGAR, V. C.; FAGERIA, N. K.; HE, Z. L. Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 32, n. 7, p. 921-950, 2001.
- BARRICK, K. A.; NOBLE, M. G. The Iron and Manganese Status of Seven Upper Montane Tree Species in Colorado, USA, Following Long-Term Waterlogging. *Journal of Ecology*, Oxford, v. 81, n. 3, p. 523-531, 1993.
- BLAIR, G. Nutrient efficiency—what do we really mean. In: RANDALL, P. J.; DELHAIZE, E.; RICHARDS, R. A.; MUNNS, R. (Eds.). *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993. p. 205-213.

- BOTSCHKE, J.; FERRAZ, J.; JAHNEL, M.; SKOWRONEK, A. Soil chemical properties of a toposequence under primary rain forest in the Itacoatiara vicinity (Amazonas, Brazil). **Geoderma**, v. 72, n. 1-2, p. 119-132, 1996.
- BREMNER, J. M. Nitrogen-total. In: SPARKS, D. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 3 - Chemical Methods**, Madison: Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 1085-1121.
- BÜNDCHEN, M.; BOEGER, M. R. T.; REISSMANN, C. B.; SILVA, S. L. C. Status nutricional e eficiência no uso de nutrientes em espécies arbóreas da floresta subtropical no sul do Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 98, p. 227-236, 2013.
- BURYLO, M.; DUTOIT, T.; REY, F. Species traits as practical tools for ecological restoration of Marly eroded lands. **Restoration Ecology**, Malden, v. 22, n. 5, p. 633-640, 2014.
- CAMARGOS, S. L.; MURAOKA, T.; FERNANDES, S. A. P.; SALVADOR, J. O. Diagnose nutricional em mudas de castanheira-do-Brasil. **Revista Agricultura Tropical**, Cuiabá, v. 6, n. 1, p. 89-107, 2002.
- CAMPOE, O. C.; IANNELLI, C.; STAPE, J. L.; COOK, R. L.; MENDES, J. C. T.; VIVIAN, R. Atlantic forest tree species responses to silvicultural practices in a degraded pasture restoration plantation: From leaf physiology to survival and initial growth. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 313, p. 233-242, 2014.
- CHAZDON, R. L. Beyond Deforestation: Restoring Forests and Ecosystem Services on Degraded Lands. **Science**, Washington, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008.
- COSTA, J. R.; CASTRO, A. B. C.; WANDELLI, E. V.; CORAL, S. C. T.; SOUZA, S. A. G. Aspectos silviculturais da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 843-850, 2009.
- ESPIG, S. A.; FREIRE, F. J.; MARANGON, L. C.; FERREIRA, R. L. C.; FREIRE, M. B. G. S.; ESPIG, D. B. Composição e eficiência da utilização biológica de nutrientes em fragmento de Mata Atlântica em Pernambuco. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 307-314, 2008.
- FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N. **Solo e desenvolvimento na Amazônia: lições do projeto dinâmica biológica de fragmentos florestais**. Manaus: INPA, 2002. 43 p.
- FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F. C.; FERRAZ, J. B. S. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanheira-da-amazônia em área degradada e submetidas à adubação. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 2, p. 393-401, 2012.
- FERREIRA, M. J.; GONÇALVES, J. F. C.; FERRAZ, J. B. S. Photosynthetic parameters of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H. B.) plants subjected to fertilization in a degraded area in Central Amazonia. **Photosynthetica**, Praha, v. 47, n. 4, p. 616-620, 2009.
- FISCH, G. Climatic Aspect of the Amazonian tropical Forest. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 20, n. 1, p. 39-48, 1990.
- HIDAKA, A.; KITAYAMA, K. Divergent patterns of photosynthetic phosphorus-use efficiency versus nitrogen-use efficiency of tree leaves along nutrient-availability gradients. **Journal of Ecology**, London, v. 97, p. 984-991, 2009.
- INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Terra Class**. 2013. Disponível em: <http://www.inpe.br/cra/projetos_pesquisas/terraclass2010> Acesso em: 17 jul. 2013
- JANDL, R.; HERZBERGER, E. Is soil chemistry an indicator of tree nutrition and stand productivity? **Die Bodenkultur**, Viena, v. 52, n. 2, p. 155-163, 2001.

JAQUETTI, R. K.; GONÇALVES, J. F. C.; FERRAZ, J. B. S.; FERREIRA, M. J.; SANTOS JR., U. M.; LACERDA, C. F. Green fertilization enhances the photosynthetic performance and the growth of leguminous trees for restoration plantation in central Amazon. **American Journal of Plant Sciences**, v. 5, n. 16, p. 2497-2508, 2014.

KIRKBY, E. Introduction, definition and classification of nutrients. In: MARSCHNER, P. (Ed.). **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**. Oxford: Elsevier, 2012. p. 3-5.

KOERSELMAN, W.; MEULEMAN, A. F. M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrients limitation. **Journal of Applied Ecology**, London, v. 33, n. 6, p. 1441-1450, 1996.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. **Science**, Washington, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

MARTÍNEZ-GARZA, C.; BONGERS, F.; POORTER, L. Are functional traits good predictors of species performance in restoration plantings in tropical abandoned pastures. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 303, p. 35-45, 2013.

McLAUGHLIN, S. B.; WIMMER, R. Tansley Review No. 104 Calcium physiology and terrestrial ecosystem processes. **New Phytologist**, Cambridge, v. 142, n. 3, p. 373-417, 1999.

McLEAN, E. O. Aluminum. In: BLACK, C. A. (Ed.), **Methods of soil analysis: Part 2, Chemical methods**. Madison: ASA, 1965. p. 978-998.

MELO, A. C. G.; DURIGAN, G. Fixação de carbono em reflorestamentos de matas ciliares no Vale do Paranapanema, SP, Brasil. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 149-154, 2006.

MENDES, K. R.; MARENCO, R. A.; MAGALHÃES, N. S. Crescimento e eficiência fotossintética de uso do nitrogênio e fósforo em espécies florestais da Amazônia na fase juvenil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 707-716, 2013.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; DOS SANTOS, H. G.; COELHO, M. R.; BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. A.; MANZATTO, C. V.; FIDALGO, E. C. C. Soil and land use in the Brazilian Amazon. In: MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J.; BRUSSAARD, L. (Eds.), **Soil Biodiversity in Amazonian and Other Brazilian Ecosystems**, Wallingford: CAB International, 2006. p. 13-42.

MORAN, E. F.; BRONDIZIO, E. S.; TUCKER, J. M.; SILVA-FORSBERG, M. C.; MCCracken, S.; FALES, I. Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazônia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 139, n. 1-3, p. 93-108, 2000.

MOREIRA, A.; COSTA, D. G. Dinâmica da matéria orgânica na recuperação de clareiras da floresta amazônica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 10, p. 1013-1019, 2004.

MORI, S. A. The Brazil nut industry - past, present, and future. In: PLOTKIN, M.; FAMOLARE, L. (Eds.). **Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products**. Washington: Island Press, 1992. p. 241-251.

MURPHY, J.; RILEY, J. P. A modified single solution reagent for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

NUNES, F. N.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; GEBRIM, F. O.; JOSÉ, J. F. B. Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 423-429, 2004.

QUESADA, C. A.; LLOYD, J.; ANDERSON, L. O.; FYLLAS, N. M.; SCHWARZ, M.; CZIMCZIK, C. I. Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. **Biogeosciences**, v. 8, n. 6, p. 1415-1440, 2011.

RIDDOCH, I.; LEHTO, T.; GRACE, J. Photosynthesis of tropical tree seedlings in relation to light and nutrient supply. **New Phytologist**, Oxford, v. 119, n. 1, p. 137-147, 1991.

RYCHTER, A. M.; RAO, I. M. Role of phosphorus in photosynthetic carbon metabolism. In: PESSARAKLI, M. (Ed.). **Handbook of photosynthesis**. New York: Marcel Dekker Inc., 2005. p. 123-148.

ROSOLEM, C. A.; FOLONI, J. S. S.; OLIVEIRA, R. H. Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 2, p. 301-309, 2003.

SANTOS JR., U. M.; GONÇALVES, J. F. C.; FELDPAUSCH, T. R. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in Central Amazonia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 226, n. 1-3, p. 299-309, 2006.

SAUER, K.; YACHANDRA, V. K. The water-oxidation complex in photosynthesis. **Biochimica et Biophysica Acta**, Philadelphia, v. 1655, n. 1-3, p. 140-148, 2004.

SCOLES, R.; GRIBEL, R.; KLEIN, G.N. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diferentes condições ambientais na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi: Ciências Naturais**, Belém, v. 6, n. 3, p. 273-293, 2011.

SILVA, C. E. M.; GONÇALVES, J. F. C.; FELDPAUSCH, T. R.; LUIZÃO, F. J.; MORAIS, R. R.; RIBEIRO, G. O. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 36, n. 4, p. 503-512, 2006.

THOMAS, G. W. Soil pH and Soil Acidity. In: SPARKS, D. L.; PAGE, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMNER, M. E. (Eds.) **Methods of Soil Analysis: Part 3, Chemical Methods**, Madison, SSSA, 1996. p. 475-490.

VELOSO, H. P.; RANGEL FILHO, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, 1991. 123 p.

VITTI, G. C.; FERREIRA, A. C. **Síntese de análises químicas em tecido vegetal**. Piracicaba: ESALQ, 1997.

VRETTOS, J. S.; DANIEL, A. S.; GARY, W. B. Quantifying the ion selectivity of the Ca⁺² site in photosystem II: Evidence for direct involvement of Ca⁺² in O₂ formation. **Biochemistry**, Washington, v. 40, n. 26, p. 7937-7945, 2001.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Philadelphia, v. 37, n. 1, p. 29-38, 1934.

YADAVI, V.; MALANSON, G. Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration. **Progress in Physical Geography**, Thousand Oaks, v. 31, n. 2, p. 131-154, 2007.

ZAR, J. H. **Biostatistical Analysis**. 4.ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. 663 p.

Recebido em 08/08/2014

Aceito para publicação em 11/06/2015