

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRICULTURA NO TRÓPICO ÚMIDO -
PPGATU

BIOCARVÃO E EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO FOSFATADA EM MUDAS DE
CASTANHEIRA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) EM LATOSOLO DA
AMAZÔNIA

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

Manaus, Amazonas

Julho, 2017

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

BIOCARVÃO E EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO FOSFATADA EM MUDAS DE
CASTANHEIRA-DO-BRASIL (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) EM LATOSOLO DA
AMAZÔNIA

Orientador:

NEWTON PAULO DE SOUZA FALCÃO

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia-INPA, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências Agrárias: Agronomia, com Área de concentração em Agricultura no Trópico Úmido.

Manaus, Amazonas

Julho, 2017

Folha de aprovação

A Banca Julgadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

TÍTULO: "BIOCARVÃO E EFEITO RESIDUAL DE ADUBAÇÃO
FOSFATADA EM MUDAS DE CASTANHEIRA-DO-BRASIL
(*Bertholletia excelsa bonpl.*) EM SOLO DA AMAZÔNIA"

AUTOR(A):

JOÃO BATISTA DIAS DAMACENO

BANCA JULGADORA:



Dr. MARIA DO ROSÁRIO LOBATO RODRIGUES (EMBRAPA)
(Membro)



Dr. LUIZ ANTONIO DE OLIVEIRA (INPA)
(Membro)



Dr. GIL VIEIRA (UFAM)
(Membro)

Manaus, 28 de julho de 2017

D154 Damaceno, João Batista Dias

Biocarvão e efeito residual de adubação fosfatada em mudas de Castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em Latosolo da Amazônia / João Batista Dias Damaceno. --- Manaus: [s.n.], 2017.

xiv, 71 f.: il.

Dissertação (Mestrado) --- INPA, Manaus, 2017.

Orientador: Newton Paulo de Souza Falcão

Área de concentração: Agricultura no Trópico úmido

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida e pelas vitórias alcançadas;

A minha família pelo apoio motivacional e em especial minha querida mãe Maria Madalena Dias Damaceno pelo incentivo e orações;

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia pela oportunidade de fazer parte de tal órgão tão respeitado por suas contribuições científicas;

Ao Programa de Pós-Graduação em Agricultura no Trópico Úmido pelo apoio em desenvolver a agronomia na Região Amazônica;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pela concessão da bolsa de estudos;

Ao Dr. Newton Paulo de Souza Falcão pela excelente orientação, amizade e companheirismo;

Aos técnicos do Laboratório Temático de Solos e Plantas Mozanei Porfirio da Trindade, Sandoval Moraes, Erison Gomes, Jonas Moraes, Laura Oliveira, Roberta Silva, Gabriela Carvalho e José Edivaldo Chaves;

Aos meus amigos e parceiros que fiz durante o mestrado: Ana Cecília Nina Lobato, Felipe de Jesus Padilha, Rodrigo da Silva Guimarães, Johnny Carlos Campos Cedano, Romildo Torres da Gama, Daniel Silva de Menezes;

Aos meus amigos e colegas do meu estimado Estado de Rondônia pelo incentivo mesmo que a distância e

A todo que contribuíram de alguma forma na realização deste trabalho.

*“Confie no Senhor de todo o seu coração e não se
apoie em seu próprio entendimento”*

Provérbios 3:5

RESUMO

A disponibilidade de fósforo em solos da Amazônia limita atividade agrícolas devido a alta afinidade desse nutriente com o solo, culminando na baixa eficiência dos fertilizantes. Uma das técnicas recentemente estudadas para reverter este cenário destaca-se o biocarvão, ao qual atribui-se a capacidade de diminuir processos que indisponibilizam o fósforo e aumentando seu efeito residual no solo. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência de doses de biocarvão sobre o efeito residual de adubo fosfatado no solo e na nutrição e desenvolvimento de mudas de Castanheira-do-Brasil. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência de doses de biocarvão sobre o efeito residual de adubo fosfatado no solo e na nutrição e desenvolvimento de mudas de Castanheira-do-Brasil. O experimento foi conduzido em casa de vegetação utilizando-se Latossolo Amarelo típico, em sequência a um experimento verificando o efeito imediato do biocarvão com o fósforo. Utilizou-se delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 5 x 2, sendo cinco doses de biocarvão (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹) e duas de fósforo anteriormente aplicado (0 e 100 mg dm⁻³ de P₂O₅). As mudas utilizadas no experimento foram cedidas pela empresa Aruanã S.A com 7 meses de idade sendo padronizadas pela uniformidade e vigor. Ao longo do experimento avaliou-se mensalmente a altura das mudas, o diâmetro de coleto e o número de folhas e posteriormente ao experimento avaliaram-se a produção de matéria seca da parte aérea e das raízes, o comprimento da raiz principal e o volume total de raízes. A partir desses dados calculou-se a taxa e o crescimento absoluto em altura e diâmetro, a relação parte aérea/raiz, o ganho foliar, número de folhas finais e o índice de qualidade de Dickson. Além disso, avaliou-se a os teores de macro e micronutrientes foliares e atributos do solo: potencial hidrogeniônico, acidez potencial, alumínio trocável, teores de macro e micronutrientes e fósforo remanescente. A partir desses calculou-se a saturação e soma de bases, saturação por alumínio, a CTC efetiva e potencial. Independente do fósforo residual, o biocarvão elevou proporcionalmente às bases do solo (K, Ca, Mg) e conseqüentemente a soma e saturação por bases. O biocarvão presente no substrato continuou influenciando positivamente nos atributos do solo após um ano e meio de sua aplicação. A aplicação de 20 e 40 t ha⁻¹ de biocarvão no substrato promoveu o melhor efeito residual do adubo fosfatado. O fósforo residual não influenciou de maneira clara a absorção foliar de K, Ca e Mg. O aumento das doses de biocarvão no substrato promoveu decréscimos na absorção foliar de fósforo e favoreceu a absorção dos micronutrientes. Exceto para os teores de N e Mn, os teores dos outros elementos são semelhantes aos encontrados em trabalhos semelhantes. A presença do fósforo residual em doses mais baixas de biocarvão (< 40 t ha⁻¹) promoveu melhor desenvolvimento mensal em altura das mudas e diâmetro do coleto. A presença do fósforo residual promoveu incrementos nas alturas das mudas de Castanheira, entretanto, não influenciou expressivamente no diâmetro do coleto. As doses acima de 40 t ha⁻¹ de biocarvão promoveram menores ganhos foliares, maior relação altura/diâmetro e menores ganhos de biomassa seca da raiz e da parte aérea. A presença do fósforo residual não influenciou positivamente nessas variáveis. Menor relação matéria seca da parte aérea/ raízes foram obtidas em doses acima de 40 t ha⁻¹ de biocarvão. Obteve-se maior comprimento de raízes em doses de biocarvão acima de 40 t ha⁻¹, enquanto que menor volume de raízes observado em doses abaixo de 40 t ha⁻¹. Obteve-se maior índice de qualidade de Dickson das mudas nas doses abaixo de 40 t ha⁻¹ de biocarvão sem a presença do fósforo residual.

Palavras-Chave: Biochar; disponibilidade; fosfato; adsorção; silvicultura.

ABSTRACT

The availability of phosphorus in Amazonian soils limits agricultural activity due to the high affinity of this nutrient with the soil, culminating in the low efficiency of the fertilizers. One of the techniques recently studied to reverse this scenario is the bio-coal, which is attributed to the ability to reduce processes that make phosphorus unavailable and increase its residual effect on the soil. Considering the above, the objective of this work was to verify the influence of doses of bio-carbon on the residual effect of phosphate fertilizer on soil and nutrition and development of Castanheira-do-Brasil seedlings. Considering the above, the objective of this work was to verify the influence of doses of bio-carbon on the residual effect of phosphate fertilizer on soil and nutrition and development of Brazil Nuts seedlings. The experiment was conducted in a greenhouse using a typical Yellow Latosol, in sequence to an experiment, verifying the immediate effect of the biochar and the phosphorus. A completely randomized design was used in a 5 x 2 factorial arrangement, with five doses of bio-carbon (0, 20, 40, 60 and 80 t ha⁻¹) and two previously applied phosphorus (0 and 100 mg dm⁻³ P₂O₅). The seedlings used in the experiment were assigned by Aruanã S.A company at 7 months of age, being standardized by uniformity and vigor. During the experiment, the height of the seedlings, the collection diameter and the number of leaves were evaluated monthly, and the dry matter production of shoots and roots, main root length and total volume of roots. From these data the rate and absolute growth in height and diameter, shoot / root ratio, leaf gain, number of final leaves and the Dickson quality index were calculated. In addition, the levels of macro and micronutrients foliars and soil attributes were evaluated: hydrogen ionic potential, potential acidity, exchangeable aluminum, macro and micronutrient contents and remaining phosphorus. From these, the saturation and sum of bases, saturation by aluminum, the effective and potential CTC were calculated. Regardless of the residual phosphorus, the biochar increased proportionally to the soil bases (K, Ca, Mg) and consequently the sum and base saturation. The biocarbon present in the substrate continued to positively influence the soil attributes after a year and a half of its application. The application of 20 and 40 t ha⁻¹ of biochar in the substrate promoted the best residual effect of the phosphate fertilizer. Residual phosphorus did not influence in a clear way the foliate absorption of K, Ca and Mg. The increase of the biocharous doses in the substrate promoted decreases in the foliar absorption of phosphorus and favored the absorption of micronutrients. Except for the contents of N and Mn, the contents of the other elements are similar to those found in similar works. The presence of residual phosphorus in lower doses of biochar (<40 t ha⁻¹) promoted a better monthly development in height of the seedlings and diameter of the collection. The presence of residual phosphorus promoted increases in the height of the Castanhaeira seedlings, however, it did not significantly influence the collection diameter. The doses above 40 t ha⁻¹ of bio-carbon promoted lower leaf gain, higher height-to-diameter ratio, and lower gains of dry biomass of root and shoot. The presence of residual phosphorus did not positively influence these variables. Lower dry matter ratio of aerial part / roots were obtained at doses above 40 t ha⁻¹ of bio-coal. Greater root length was obtained at biocharging doses above 40 t ha⁻¹, while lower root volume observed at doses below 40 t ha⁻¹. The highest quality index of dickson seedlings was obtained at doses below 40 t ha⁻¹ of bio-carbon without the presence of residual phosphorus.

Keywords: Biochar; availability; phosphate; Adsorption; forestry.

Lista de Figuras

Figura 1. Experimentação em mudas de castanheira entre 2014 e 2015 (A); Unidades experimentais após o término do período de experimentação (B).	12
Figura 2. Solo destorroado (A); Unidades experimentais sobre plataforma de madeira (B).	15
Figura 3. Mudas selecionadas para o experimento (A) e viveiro da Empresa Agropecuária Aruanã (B)..	16
Figura 4. Covas abertas para o transplântio (A); adubos aplicados no transplântio (B), raízes nuas (C) e mudas transplantadas (D).	16
Figura 5. Avaliação do diâmetro do coleto (A); referência para medição do diâmetro a 3 cm do colo e referência para medição de altura (B) folha nova totalmente expandida (C).	17
Figura 6. Parte aérea de mudas de castanheira seccionada (A); Pesagem da matéria seca das folhas (B) e caule (C).	19
Figura 7. Trituração (A), pesagem (B), acondicionamento (C) e digestão do material vegetal (D).	20
Figura 8. Secagem do solo ao ar (A); peneiramento do solo em malha de 2 mm (B); pesagem do solo (C); filtragem da solução para leitura (D).	20
Figura 9. Média dos teores de Potássio (A), Cálcio (B) e Magnésio (C), soma de bases (D), saturação por bases (E) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	23
Figura 10. Médias dos valores da CTC efetiva (t) e Potencial (T) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	27
Figura 11. Médias dos teores de Nitrogênio do solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (A) e da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	27
Figura 12. Médias dos teores de Manganês (A), Zinco (B) e Ferro (C) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	28
Figura 13. Comportamento dos elementos do solo em função do pH (Mavavolta, 1976) (A) e teores de Alumínio no solo em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (B). ...	30
Figura 14. Médias dos valores de pH (A), teores de Alumínio (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do solo antes e após o experimento com mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	31
Figura 15. Teores de fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (BC).	33

Figura 16. Médias dos valores de fósforo remanescente (P-rem) do solo antes e após o experimento com mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	35
Figura 17. Sintomas observados e descritos por Camargos et al (2002) em plantas da dose 20 e 40 t ha ⁻¹ de biocarvão na ausência de P residual.	37
Figura 18. Teores foliares de fósforo em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses das de biocarvão (A) e da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (B). As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	37
Figura 19. Teores foliares de Potássio (A) e Cálcio (B) em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	39
Figura 20. Teores foliares de magnésio em função doses de biocarvão (A) e teores foliares de cálcio em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (B) em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> . As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	40
Figura 21. Teores foliares de Zinco (A) em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	41
Figura 22. Teores foliares de Ferro (A) e Manganês (B) em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	42
Figura 23. Desenvolvimento de altura de plantas (A e B) e diâmetro do coleto (C e D) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	44
Figura 24. Taxa de crescimento absoluto (TCA) e crescimento absoluto (CA) em altura (A e B) e em diâmetro (C e D) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	45
Figura 25. Taxa de crescimento absoluto (A) e crescimento absoluto em diâmetro de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	46
Figura 26. Altura de Plantas e Diâmetro de Coleto aos 150(B) dias após o transplântio (DAT) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	47

Figura 27. Altura aos 150 dias após transplântio (DAT) em função em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (A) e diâmetro aos 150 DAT em função em função das doses de biocarvão de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> . As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	47
Figura 28. Número de folhas aos 150 dias após tranaplântio (DAT) (A) e ganho foliar (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	49
Figura 29. Relação altura/diâmetro (H/D) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	50
Figura 30. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (A) e das raízes (MSR) (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	53
Figura 31. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (A) e das raízes (MSR) (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	53
Figura 32. Matéria seca total (MST) (A) e relação MSPA/MSR (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	54
Figura 33. Matéria seca total (MST) (A) e relação MSPA/MSR (B)) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	55
Figura 34. Comprimento da raiz principal (CRP) (A) e volume total de raízes (VRT) (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	56
Figura 35. Comprimento da raiz principal (CRP) (A) e volume total de raízes (VRT) (B) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....	56
Figura 36. Raízes de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> apresentando os sinais de compactação do solo.	57
Figura 37. Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As	

médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 57

Figura 38. Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade..... 58

Lista de Tabelas

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas do Latossolo Amarelo distrófico utilizado no experimento. ...	13
Tabela 2. Concentrações dos fertilizantes aplicados adicionalmente ao solo.	13
Tabela 3. Propriedades químicas do biocarvão produzido a partir de ouriços de Castanheira-do-brasil.	14
Tabela 4. Composição dos tratamentos utilizados no experimento.	14
Tabela 5. Detalhe dos fertilizantes adicionados ao longo da experimentação.	15
Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (P) e a interação destes em atributos do solo para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	22
Tabela 7. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e atributos químicos do solo antes do experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	24
Tabela 8. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e atributos químicos do solo após do experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	25
Tabela 9. Classes de interpretação de Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) para solos amazônicos.	26
Tabela 10. Médias dos valores de CTC potencial antes do experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses de biocarvão.	27
Tabela 11. Médias dos teores de ferro (Fe) antes do experimento e zinco (Zn) após o experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses de biocarvão.	29
Tabela 12. Classes de interpretação de Ferro (Fe), Zinco (Zn) e Manganês (Mn) para solos amazônicos.	29
Tabela 13. Médias dos valores de saturação por alumínio (m%) após o experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função doses de biocarvão.	31
Tabela 14. Classes de interpretação de alumínio (Al) para solos amazônicos.	32
Tabela 15. Média dos teores de fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	32
Tabela 16. Equações de regressão para o comportamento do fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	32
Tabela 17. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (P) e a interação destes sobre o fósforo remanescente (P-rem) do solo para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	34
Tabela 18. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo em função do fósforo remanescente. .	35

Tabela 19. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo para solos amazônicos conforme os teores de argila.	35
Tabela 20. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (Pr) na nutrição de mudas de <i>Bertolletia excelsa</i>	36
Tabela 21. Média dos teores foliares de Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	38
Tabela 22. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e os elementos do solo e planta para produção de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	38
Tabela 23. Média dos teores foliares de zinco e magnésio em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	41
Tabela 24. Faixa de teores de nutrientes encontrados na literatura em mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> sob fertilização.	43
Tabela 25. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC), fósforo residual (Pr) e a interação destes no desenvolvimento de mudas de <i>Bertolletia excelsa</i>	43
Tabela 26. Análise de regressão da altura de plantas e diâmetro do coleto de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i> em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.	44
Tabela 27. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (Bc) na ausência de P residual (-Pr) e os parâmetros biométricos de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	51
Tabela 28. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (Bc) na presença de P residual (+Pr) e os parâmetros biométricos de mudas de <i>Bertholletia excelsa</i>	52

SUMÁRIO

1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	3
2.1 Solos da Amazônia.....	3
2.1.1 Latossolos.....	3
2.1.2 Terra Preta de Índio (TPI's).....	3
2.2 Biocarvão.....	4
2.2.1 Biocarvão no solo.....	4
2.2.2 Biocarvão como substrato para produção de mudas.....	5
2.2.3 Biocarvão e fósforo.....	6
2.3. Fósforo.....	7
2.3.1 Fósforos em solos tropicais.....	7
2.3.2 Efeito residual da adubação fosfatada.....	8
2.4 Castanheira-do-Brasil.....	9
2.4.1 Aspectos agrônômicos.....	9
3. Objetivos	11
3.1 Geral.....	11
3.2 Específicos.....	11
4. Material e Métodos	12
4.1 Histórico experimental.....	12
4.1.1 Coleta do solo.....	12
4.1.2 Origem da matéria-prima e produção do biocarvão.....	13
4.2 Instalação experimental.....	14
4.2.1 Localização e delineamento experimental.....	14
4.2.2 Preparo do solo.....	15
4.2.3 Produção, seleção e recepção das mudas de Castanheira-do-brasil.....	15
4.2.4 Condução experimental.....	16
4.2.4.1 Transplântio das mudas de Castanheira-do-Brasil.....	16
4.2.4.2 Manejo das mudas de Castanheira-do-Brasil.....	17
4.3 Análises experimentais.....	17
4.3.1 Biométricas.....	17
4.3.2 Nutricionais.....	19
4.3.3 Atributos do solo.....	20
4.4 Análises estatísticas.....	21
5. Resultados e Discussão	22
5.1 Atributos do solo.....	22
5.2 Aspectos Nutricionais.....	36
5.3 Biometria.....	43
6. Conclusões	59
7. Referências Bibliográficas	60

1. INTRODUÇÃO

A região amazônica compreende 60% do território brasileiro (5,5 milhões de km²), abrangendo os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Rondônia, Roraima, Pará, Tocantins, parte do Maranhão e do Mato Grosso (IBGE, 2015). A partir da década de 70 a ocupação da região, incentivada pelo governo federal, baseou-se na derrubada da floresta nativa, aproveitamento de madeiras comerciais e implantação de cultivos (mandioca, banana, etc.). A não utilização de fertilizantes e corretivos tornou essas áreas improdutivas em cerca de dois anos, contribuindo com o surgimento de uma agricultura itinerante, com a abertura de novas áreas em busca de solos com melhores condições de fertilidade (Pedroso Júnior *et al.*, 2008).

Devido às más condições químicas dos solos da Amazônia (Sanchez *et al.*, 1982), a transformação de áreas florestais em agrícolas afeta diretamente a ciclagem de nutrientes e, conseqüentemente, a capacidade de manutenção da fertilidade do solo (Tiecher *et al.*, 2012; Ferreira *et al.*, 2015). O fósforo (P) destaca-se por ser um dos nutrientes mais afetados por tais transformações, visto que até 80% do seu fornecimento as plantas advêm da mineralização da matéria orgânica, devido aos baixos teores nos solos locais (Mcdowell e Stewart, 2006; Condon e Tiessen, 2005). Somado a isto, a disponibilidade do P ainda é influenciada pela sua interação com a fase sólida do solo, através de reações de precipitação, adsorção e fixação (Falcão e Silva, 2004; Stutter *et al.*, 2015), tornando este elemento um dos mais limitantes ao crescimento vegetal nessas condições (Machado *et al.*, 2011). Assim, acredita-se que esses solos possuem um alto poder residual de P (Silva, 2007), desde que se utilizem medidas agronômicas acessíveis e eficazes que propiciem alterações químicas de modo a atenuar estas interações, aumentando sua disponibilidade (Rheinheimer e Anghinoni, 2003).

Dentre os produtos recentemente propostos para esse fim destaca-se o biocarvão (Lehmann *et al.*, 2003; Kloss *et al.*, 2014), biomassa carbonizada baseada nas Terras Pretas de Índio (TPI's) (Lehmann e Joseph, 2015) capaz de, entre outros benefícios, diminuir a saturação por alumínio, elevar o pH do solo e a retenção de nutrientes (Novotny *et al.*, 2009; Beesley *et al.*, 2010). A relação do biocarvão com o P não está totalmente esclarecida (Lehmann, 2007; Falcão *et al.*, 2003), uma vez que há estudos evidenciando o aumento da sua disponibilidade (Atkinson *et al.*, 2010; De Luca *et al.*, 2015), bem como sua diminuição (Falcão *et al.*, 2003; Yao *et al.*, 2012; Schneider e Haderlein, 2016).

Mesmo com inconsistências, tem verificado-se o uso recorrente do biocarvão em associação com fertilizantes minerais, dentre eles os fosfatados, tanto em cultivos agrícolas (Steiner *et al.*, 2007; Petter *et al.*, 2012), quanto como componente de substrato para produção de

mudas florestais (Souchie *et al.*, 2011; Lima *et al.*, 2016). Sabendo que um dos focos de manejo de áreas de baixa fertilidade na Amazônia tem sido a recomposição florestal (Ferreira *et al.*, 2015), a utilização do biocarvão como parte do substrato pode contribuir na produção de mudas de qualidade (Souchie *et al.*, 2011), visto suas características ideais para este fim (Lehmann *et al.*, 2003; Zanetti *et al.*, 2003; Benites *et al.*, 2005; Novotny *et al.*, 2009). Ao considerar o uso de espécies nativas (Chapin, 1980), a Castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) tem sido amplamente utilizada em sistemas agroflorestais ou em plantios homogêneos na reposição da cobertura vegetal (Costa *et al.*, 2009; Scoles *et al.*, 2011; Ferreira *et al.*, 2012), devido sua rusticidade, adaptabilidade e bom desenvolvimento (Souza *et al.*, 2008).

Assim, tanto para uso agrícola ou para recuperação florestal, o uso do biocarvão e uma fonte externa de nutrientes têm sido indicados, com vistas à replicação de características benéficas das TPI's em solos não antrópicos (Rezende *et al.*, 2011; Novotny *et al.*, 2012; Peake *et al.*, 2014).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Solos da Amazônia

Os solos da Amazônia, formados principalmente a partir de rochas sedimentares, são em sua maioria classificados como latossolos e argissolos, que abrangem 2.103.440 km² (41,05%) e 1.687.880 km² (32,94 %), respectivamente em terra firme, porém ainda podem ocorrer com certa frequência os plintossolos (376.260 km²) e nas várzeas, os gleissolos (314.450 km²) (Rodrigues, 1996). As características do material de origem, o tempo de exposição das rochas e a ação do clima da região aceleraram o processo de intemperismo, dando origem a solos com boas características físicas, porém com características químicas que limitam seu uso para a agricultura (Falesi, 1984). Em contrapartida, ocorrem na região pequenas manchas de solos com boa fertilidade quando comparadas a estes solos, conhecidas como Terras Pretas de Índio (TPI's), que ocupam entre 0,1 a 0,3% (6.000 a 18.000 km²) (Sombroek *et al.*, 2003).

2.1.1 Latossolos

Os latossolos são solos altamente intemperizados, com pouca diferenciação entre horizontes, englobando solos profundos (> 2m) e em sua maioria amarelos na Amazônia central (Falesi, 1986; Rodrigues, 1996). Possuem texturas que variam entre 15 a 95% de argila, possuindo boa drenagem e porosidade (Marques *et al.*, 2004). Quimicamente, são solos geralmente ácidos (pH entra 3,8 e 4,2), com elevada saturação por Alumínio (>50%), baixa saturação por bases (< 20 %), e baixa capacidade de troca de cátions (CTC) (< 10 cmol_c dm⁻³) e baixos teores de fósforo (P) (1-3 mg dm⁻³) (Sanchez *et al.*, 1982; Raij, 2011; Cravo *et al.*, 2012). Na composição mineral dos latossolos predomina a caulinita, mineral do tipo 1:1 com baixa reatividade, podendo representar até 80 % da fração argila, além de altos teores de óxidos de Ferro (hematita e goethita) e Alumínio (gibsitita) (Sombroek, 1966).

2.1.2 Terra Preta de Índio (TPI's)

As Terras Pretas de Índios (TPI's) são áreas distintas na Amazônia em relação aos solos de terra firme, pois apresentam manutenção da fertilidade mesmo após a prática de corte e queima e seguidos cultivos (Sombroek, 1966; Silva *et al.*, 2012). Nessas áreas, encontram-se artefatos cerâmicos que evidenciam a ocupação humana há cerca de 500 a 2500 anos (Kern, 2003; Falcão *et al.*, 2003). As TPI's não possuem ordem específica, sendo classificada como solos de horizonte superficial com aspecto antrópico (Embrapa, 2006), podendo atingir profundidades médias de 30 a 60 cm até 2 m (Kern, 2003). Sua coloração escura é derivada da

queima de materiais orgânicos (ossos, excrementos, restos vegetais, etc.) e deposição no solo ao longo do tempo pelas comunidades (Glaser *et al.*, 2003; Woods, 2003).

O processo de queima deu origem a uma matéria orgânica estável, conhecida como carbono pirogênico ou biocarvão (Falcão *et al.*, 2001), ao qual se tem atribuído benefícios no solo, como elevação do pH (>5,5), baixa saturação por alumínio, alta CTC (>15 cmol_c dm⁻³) (Kern, 1997), além da elevada disponibilidade de nutrientes (Glaser, 2007), destacando-se o fósforo, com valores médios acima de 500 mg dm⁻³, porém podem variar entre TPI's (Falcão e Borges, 2006). Devido à estabilidade da fertilidade promovida pelo biocarvão, que é resistente a degradação (recalcitrante), a comunidade científica tem dado atenção para a replicação das características que esse material exerce nas TPI's, de modo a melhorar as características físicas, químicas e biológicas de solos não-antrópicos (Glaser *et al.*, 2003, Sombroek, 2003).

2.2 Biocarvão

O biocarvão é o subproduto da decomposição térmica incompleta (pirólise) de diversos materiais em ambiente limitado de oxigênio, sob temperaturas consideradas baixas (<700 °C) (Lehmann e Joseph, 2015). Durante a pirólise em equipamento conhecido como biocarbonizador (retorta), a biomassa divide-se em três subprodutos: o bio-óleo (vapores líquidos condensáveis), os gases não condensáveis (hidrocarbonetos) e o biocarvão, estrutura policíclica aromática porosa (Stewart *et al.*, 2013). De modo geral, a queima da biomassa varia com a finalidade do subproduto, no entanto, na produção do biocarvão a faixa de 450-550 °C é considerada ideal (Lehmann, 2007).

Na biocarbonização, as ligações carbono-carbono (C-C) do material são quebradas, formando cadeias de anéis aromáticos com ligações carbono-oxigênio (C-O) e carbono-hidrogênio (C-H) (Lehmann e Joseph, 2009). A oxidação do carbono dá origem aos grupos funcionais (carboxílicos, fenólicos, etc.) com superfícies reativas, fornecendo cargas ao biocarvão (Glaser *et al.*, 2003). As características químicas e físicas finais do biocarvão dependem intrinsecamente do tipo de matéria-prima utilizada, da temperatura e do tempo de pirólise (Cruz, 2015).

2.2.1 Biocarvão no solo

No solo, diversos autores têm demonstrado que o uso do biocarvão contribui com aspectos químicos, físicos e biológicos do solo (Glaser *et al.*, 2003; Lehmann *et al.*, 2003; Steiner *et al.*, 2007; Archanjo *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2016). Devido à estabilidade, a utilização do biocarvão no solo promove benefícios que abrangem a mitigação de mudanças climáticas,

redução da poluição e aumento da fertilidade (Lehmann, 2007). Do ponto de vista ambiental, o biocarvão pode servir como sequestrador de carbono (C), uma vez que sua recalcitrância impede a mineralização e liberação de C para a atmosfera, deferente da matéria orgânica não carbonizada (Lehmann e Joseph, 2009). Devido sua característica adsorvente, o biocarvão tem contribuído com a imobilização de poluentes orgânicos e inorgânicos (Bian *et al.*, 2014) e retenção de metais pesados do solo (Chen *et al.*, 2014). Além disso, os poros do biocarvão são importantes à exploração de raízes finas por água e nutrientes, além de oferecer condições para o aumento da atividade de micro-organismos (Lehmann *et al.*, 2011).

Fisicamente, a liberação de compostos voláteis do biocarvão origina micro (< 2nm), meso (2-50nm) e macroporos (>50nm) (Novotny *et al.*, 2009), que contribuem com a elevação da área superficial e, conseqüentemente, o aumento do armazenamento de água (Karhu *et al.*, 2011; Gonçalves *et al.*, 2012) e a estruturação do solo (Nóbrega, 2011). Quimicamente, a presença do biocarvão aumenta os teores de matéria orgânica do solo (Novak *et al.*, 2009) e pode elevar o teor de alguns nutrientes no solo (Graber *et al.*, 2010), assim como elevar o pH, reduzir a atividade do alumínio (Anderson *et al.*, 2011), aumentar a CTC do solo e a retenção de nutrientes (Karhu *et al.*, 2011).

2.2.2 Biocarvão como substrato para produção de mudas

A produção de mudas, para fins agrícolas ou para recuperação de áreas, é a principal etapa para o sucesso dessas atividades, assim, um bom substrato torna-se fundamental para obtenção de mudas de qualidade (Cavalcante *et al.*, 2011). A composição do substrato deve ser uniforme, com baixa densidade, que apresente elevada retenção de água e CTC, boa aeração e drenagem e que reduzam o uso de insumos, a fim de proporcionar condições favoráveis para o desenvolvimento das mudas (Terra *et al.*, 2011). Dentre os produtos recentemente estudados, destaca-se o uso biocarvão como substrato para produção de mudas (Arruda *et al.*, 2007; Souchie *et al.*, 2011; Petter *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2016), por apresentar características físicas e químicas consideradas ideais para esses fins (Lehmann *et al.*, 2003).

Entre os benefícios do seu uso estão o aumento da CTC, o aumento da retenção de nutrientes (Benites *et al.*, 2005; Novotny *et al.*, 2009), além de aumentar a porosidade, aeração e retenção de água no substrato (Zanetti *et al.*, 2003). Tem verificado-se que a combinação do biocarvão com fertilizantes minerais beneficia a produção de mudas (Petter *et al.*, 2012; Lima *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2016). Ao avaliar o uso de doses de biocarvão como parte do substrato (0%, 10%, 30%, 50% e 70%) associado com NPK, Nunes (2010) observou acréscimos em altura e produção de matéria seca em mudas de Castanheira-do-Brasil nas doses de 30 e 50%,

favorecendo ainda o aumento da macroporosidade, do pH e dos teores de P disponível em solo argiloso.

2.2.3 Biocarvão e fósforo

O biocarvão tem a capacidade de adsorver os ânions fosfato, no entanto, os mecanismos ainda não estão totalmente compreendidos (Falcão *et al.*, 2003; Lehmann, 2007), no entanto, estudos recentes reportam o aumento da disponibilidade de fósforo (P) na presença de biocarvão no solo (Atkinson *et al.*, 2010; De Luca *et al.*, 2015) assim como a sua diminuição (Yao *et al.*, 2012; Schneider e Haderlein, 2016). Os diferentes materiais de origem e temperaturas de pirólise do biocarvão afetam as reações físico-químicas do solo ligadas com a disponibilidade de (P) (Steiner *et al.*, 2007; Nguyen e Lehmann, 2010). As reações dos grupos funcionais da superfície do biocarvão que influenciam na disponibilidade do P são a precipitação dos cátions livres em solução (Ca, Fe, Al), a competição por sítios de adsorção de fosfato e no aumento do pH do solo (Guppy *et al.*, 2005).

De acordo com De Luca *et al.* (2009), a adsorção direta dos íons fosfatados pelo biocarvão evita a adsorção pela argila e óxidos e hidróxidos de Fe e Al, consequentemente impedindo que o P seja fixado. Segundo Donagemma *et al.*(2008) e Cui *et al.* (2011), os grupos funcionais do biocarvão neutralizam a superfície dos argilominerais responsáveis pela adsorção específicas, resultando em maiores valores de P disponível e residual, bem como a eficiência de adubos fosfatados. De acordo com Wang *et al.*(2012), a adição do biocarvão adsorve os cátions livres em solução (Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+}) em suas cargas negativas, impedindo, a formação de precipitados, como fosfato de Al ($AlPO_4$) e de Fe ($FePO_4$), não absorvidos pelas plantas.

Segundo De Luca *et al.* (2015), a elevação de pH promovida pela adição do biocarvão aumentam a disponibilidade de P, visto que as reações de precipitação dependem de tal fator. De acordo com Piccolla (2013) e Morales *et al.* (2013), os tipos de grupos na superfície do biocarvão também influenciam na disponibilidade de P, sendo que os carboxílicos são mais eficazes na redução da adsorção de P que os fenólicos. Em relação ao P da matéria-prima, durante a biocarbonização, o P transforma-se de orgânico para inorgânico, porém em temperaturas acima e 700 °C ele é volatilizado (De Luca *et al.*, 2009). Assim, quanto maior a temperatura de pirólise, menor será o conteúdo de P inorgânico presentes nas cinzas do biocarvão, vista sua resistência a mineralização (Wang *et al.*, 2012; Trazzi *et al.*, 2016).

2.3. Fósforo

O fósforo (P) é um macronutriente mineral insubstituível as plantas, sendo utilizado na agricultura em fertilizantes (superfosfato triplo, simples, etc.) advindos da mineração de rochas fosfáticas (Malavolta, 2006). Os maiores produtores mundiais são a China, EUA e Marrocos, já o Brasil, que produz apenas 3 % do fosfato mundial, exporta grande parte do que é utilizado (DNPM, 2015). Por não ser renovável, estudos indicam que as jazidas de fosfato serão esgotadas até o fim do século (Cordell *et al.*, 2009).

Por se movimentar pouco no solo, o P é absorvido pelas plantas por gradiente de concentração através da interceptação radicular (Raij, 1991; Stutter *et al.*, 2015). Na planta, o P exerce funções de armazenamento e transporte de energia através de moléculas fosfáticas (ADP e ATP), participando ainda dos processos de fotossíntese, respiração e divisão células (Grant *et al.*, 2001; Dechen e Nachtigall, 2007). Segundo Taiz e Zeiger (2010), o P é fundamental no desenvolvimento inicial das plantas e sua limitação promove crescimento atrofiado e coloração verde-escura à arroxeadada nas folhas mais velhas.

2.3.1 Fósforos em solos tropicais

A maioria dos solos tropicais, como os do Brasil, apresenta baixos teores de fósforo (P) além de forte interação desse elemento com o solo, devido à predominância de argilas do tipo 1:1, presença elevada de óxidos e hidróxidos de Fe e Al e pH baixos que favorecem a sua baixa disponibilidade (Sanchez *et al.*, 1982). No solo, o P pode estar sob formas orgânicas, como fosfatos de inositol (10-80%) e fosfolipídios (0,5-7%) (Giaveno *et al.*, 2010) e inorgânicas que dependem do pH do solo, sendo que valores entre 2,1 e 7,2, predomina a forma de $\text{H}_2\text{PO}_4^{4-}$ (ortofosfato biácido), que representa 90% do P no solo e entre 7,2 e 12 a forma de HPO_4^{-2} (ortofosfato monoácido) (Raij, 2011).

O P inorgânico pode estar adsorvido nas argilas, nos óxidos e hidróxidos de Fe e Al precipitado com elementos (Al^{3+} , Fe^{3+} e Ca^{2+}) ou presente na solução do solo (Cessa *et al.*, 2009). O abastecimento da fase sólida para a solução classifica o P em P-lábil, fosfato fracamente adsorvido e em equilíbrio com a solução, P-moderadamente lábil, fosfato retido com energia que dificulta sua liberação e P-não lábil, fosfato “fixado”, que representa a maioria do P no solo (Gatiboni *et al.*, 2013). Em solos tropicais, reações químicas complexas interferem a disponibilidade de P, sendo elas a precipitação/dissolução, adsorção/dessorção e fixação/liberação (Raij, 2011).

A precipitação é uma reação química lenta, onde o P forma compostos de baixa solubilidade (precipitados) com cátions livres de Al (AlPO_4) e Fe (FePO_4) em solos ácidos, e

com o Ca ($\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) em solos alcalinos (Quispe, 2004). A dissolução dos precipitados ocorre com o aumento do pH nas ligações do P com o Fe e Al e com a diminuição do pH, nas ligações do P com o Ca. No geral, na faixa de pH de 5,5 a 6,8, ocorre à maior disponibilidade de P, porém ainda ocorrem precipitações, principalmente com Al (Havlin *et al.*, 2005). A adsorção ocorre na superfície dos argilominerais do solo, através de ligações eletrostáticas e covalentes por complexos de esfera externa (não-específica) ou de esfera interna (específica) (Novais e Smyth, 1999). A não-específica ocorre lentamente, onde o P liga-se eletrostaticamente nos colóides do solo por meio ligantes (H_2O), enquanto que a específica ocorre rapidamente e diretamente na superfície dos óxidos de Fe e Al, por meio de ligações covalentes (Meurer, 2010).

A energia de ligação específica do P nos minerais do solo pode ser monodentada um oxigênio do fosfato ligado ao metal, bidentada (dois oxigênios ligados) e binucleada (dois oxigênios do fosfato ligados a dois átomos do metal), e a possibilidade de dessorção de P diminui na ordem de monodentada > bidentada > binucleada (Novais e Smyth, 1999; Rheinheimer e Anghinoni, 2003). Segundo Novais e Smith (1999), as ligações do P com o solo tendem a “envelhecer” com o tempo, de forma que a adsorção específica seja do tipo binucleada, e nestas condições, torna essa interação praticamente irreversível (Meurer, 2010). A quantidade de P fixado é determinada por meio de isotermas de adsorção, modelos matemáticos que descrevem o P adsorvido na fase sólida em relação à concentração de P na solução. O modelo mais utilizado é a isoterma de Langmuir, possibilitando avaliar a capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) e a constante de energia de adsorção (EAP) (Novais e Smyth, 1999).

2.3.2 Efeito residual da adubação fosfatada

Na ocasião da adubação fosfatada, o cenário ideal seria que a aplicação do P se torna inteiramente disponível as plantas, no entanto, em torno de 10% ficam na solução do solo, enquanto que os 90% restantes são retidos pelo solo nos processos de precipitação, adsorção e fixação, tornando este indisponível a nutrição das plantas (Santos, 2010). Devido a isto, o efeito residual desse nutriente é considerado alto, uma vez que sua contribuição pode representar a economia de adubos fosfatados em cultivos subsequentes (Silva, 2007). O efeito residual de P no solo são afetados por diversos fatores, como o tempo de aplicação do fertilizante, o tipo de argila e a presença elevada de óxidos de Fe e Al, o método que foi aplicado, o pH do solo, a exportação pela cultura e as doses e fontes de P aplicados (Sousa e Lobato, 2003).

Os principais fertilizantes fosfatados solúveis mais utilizados são o superfosfato triplo (41% de P_2O_5 solúvel em CNA + H_2O e o superfosfato simples (18% de P_2O_5 solúvel em CNA + H_2O), estes quando adicionados ao solo sob a presença de água reagem rapidamente tornando o

P disponível as plantas. No entanto, esses fertilizantes solúveis ainda apresentam efeito residual 60%, 45%, 35%, 15% e 5%, após um, dois, três, quatro e cinco anos da aplicação, respectivamente (Novais *et al.*, 2007). De acordo com Almeida *et al.* (2003), a melhor forma de avaliar o efeito residual do P no solo é inferindo sobre a produção do cultivo subsequente, o rendimento geral de matéria seca (parte aérea e raízes) e o conteúdo de P no tecido foliar.

2.4 Castanheira-do-Brasil

A Castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) pertence à família Lecythidaceae, sendo a única representante do seu gênero (Souza, 1963; Mori e Prance, 1990). Nativa do Brasil distribuiu-se naturalmente na Amazônia brasileira, boliviana, peruana, equatoriana e venezuelana (Müller *et al.*, 1995; Lorenzi, 2002). É uma espécie social, adaptada aos solos locais, possui fuste retilíneo, podendo atingir até 60 m de altura e 4 m de diâmetro. O florescimento se inicia a partir de 12 anos, e os frutos (ouriços) abrigam entre 15 a 25 sementes angulares com tamanho de 4 a 7 cm (Müller *et al.*, 1995; Ávila, 2006).

De acordo com a FAO (2015), os maiores produtores mundiais são a Bolívia e o Brasil, sendo os maiores produtores o Acre, Amazonas e Pará, respondendo por cerca de 90% da produção nacional (IBGE, 2015). Segundo Homma (2004), sua exploração tornou-se a principal atividade econômica para comunidades regionais após o declínio da borracha. As amêndoas são ricas em proteínas e vitaminas, muito utilizadas no ramo alimentício e cosmético. O ouriço é utilizado na fabricação de artesanato, utensílios, produção de carvão (Wadt e Kainer, 2009) e a madeira para construção civil interna, no entanto, a exploração de castanheiras nativas é proibida por lei (Decreto 1.282/94), sendo permitida a exploração apenas de plantios legalizados (Lorenzi, 2002).

2.4.1 Aspectos agronômicos

No plantio, não se recomenda a semeadura das sementes de Castanheira direta ao campo, pois por apresentar dormência de até 18 meses de duração deve ser preparada utilizando acetato fenil mercúrio que promove 80% de germinação em três meses. As mudas ficam aptas para ir para o campo em torno de 7 a 8 meses, atingindo altura entre 20-40 cm, porém recomenda-se deixar em viveiro por até 2 anos devido seu pegamento em campo. O plantio deve ser realizado em covas de 30 cm x 30 cm x 30 cm, com espaçamentos de 10 m x 10 m na época das chuvas (Souza *et al.*, 2008). Segundo Locatelli *et al.* (2005), a adubação de cova deve ser realizada com 125 g de P₂O₅ (300 g de SFT) no plantio, 1º e 2º ano.

A castanheira é uma planta que apresenta rusticidade, desrama natural, tolerante a incidência de luz e tem rápido crescimento. Sendo uma espécie nativa, é ideal para recuperar áreas degradadas e fazer reflorestamentos além de promover múltiplos usos. A associação de um substrato com fertilizantes tem sido uma das propostas para melhorar a nutrição de plantas (Souza *et al.*, 2008; Caione *et al.*, 2012). De acordo com Simões *et al.* (2015), avaliando a influência de macronutrientes (NPK) combinado e isolados para produção de mudas de Castanheira-do-brasil, os maiores valores de altura das mudas e matéria seca das raízes foram encontrados com o uso do P de forma isolada. De acordo com Gomes e Paiva (2011), a sobrevivência da castanheira em campo está diretamente ligada ao seu sistema radicular, sendo o P o nutriente que mais contribui com o crescimento das raízes.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

Investigar a influência de doses de biocarvão sobre o efeito residual do fósforo, nas demais propriedades do solo e no crescimento e nutrição de mudas de Castanheira-do-Brasil.

3.2 Específicos

Investigar a influência das doses de biocarvão sob a disponibilidade de fósforo e em atributos do solo cultivado com mudas de *Bertholletia excelsa*.

Verificar as condições de estado nutricional de mudas de *Bertholletia excelsa* na presença e ausência de fósforo residual em diferentes doses de biocarvão.

Analisar o desempenho de mudas de *Bertholletia excelsa* em parâmetros de crescimento e partição de matéria seca sob influência de doses de biocarvão e fósforo residual.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Histórico experimental

O presente estudo seguirá as características do experimento desenvolvido entre dezembro de 2014 a dezembro de 2015, que avaliou o efeito de doses de biocarvão e de fósforo no desenvolvimento de mudas de Castanheira-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e nos atributos do solo. Na ocasião do experimento, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 5 x 5, sendo cinco doses de biocarvão (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹) e cinco doses de fósforo (0, 100, 200, 300 e 400 Kg de P₂O₅ ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT), com 4 repetições e 100 unidades experimentais.



Figura 1. Experimentação em mudas de castanheira entre 2014 e 2015 (A); Unidades experimentais após o término do período de experimentação (B).

4.1.1 Coleta do solo

O solo utilizado foi coletado em agosto de 2014 da camada subsuperficial (20-40 cm) de um Latossolo Amarelo distrófico típico (LAd) de uma área de capoeira com mais de 30 anos, localizada na Estação Experimental de Fruticultura Tropical – EEFT/INPA, Km 45 da BR 174 em Manaus – AM (02° 32'12" S 60° 02'22" W). Amostras desse solo foram retiradas de forma homogênea, transformadas em Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) e levadas para caracterização química e física no Laboratório Temático de Solos e Plantas (LTSP) do INPA (Tabela 1).

Posteriormente, o solo foi peneirado em malha de 2,00 mm e homogeneizado com o biocarvão, transferido para as unidades experimentais (vasos plásticos com capacidade de 20 kg), sendo cada vaso disposto sobre plataforma de madeira a 20 cm do nível do solo. Não foi realizada a correção do solo, pois o objetivo era avaliar o efeito do biocarvão sobre o pH e o alumínio. As adubações adicionais para nutrição das mudas de castanheira foram realizadas em todas as unidades experimentais e segundo recomendações de Souza *et al.* (2008) com ureia e cloreto de potássio para os macros e FTE BR12 para os micronutrientes (Tabela 2).

Tabela 1. Propriedades químicas e físicas do Latossolo Amarelo distrófico utilizado no experimento.

pH H ₂ O	K	Ca	Mg	Al	P	Fe	Zn	Mn
		cmol _c dm ⁻³			mg dm ⁻³			
3,9	0,02	0,05	0,08	0,90	0,99	251,4	1,13	0,57
H+Al	T	t	v	m	Argila	Areia	silte	
cmol _c dm ⁻³		%			g kg ⁻¹			
1,65	1,80	1,05	8,33	85,7	418	432	150	

H+Al: acidez Potencial; T: capacidade de troca de cátions potencial; t: capacidade de troca de cátions efetiva; v: saturação por bases; m: saturação por alumínio.

Tabela 2. Concentrações dos fertilizantes aplicados adicionalmente ao solo.

Ureia*				KCl**				
kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g/vaso	g/vaso	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	g/vaso	g/vaso
Ureia	N	Ureia	N	KCl	K ₂ O	K	KCl	K***
888	400	8,88	3,996	888	532,8	442,5	8,88	4,425
FTE BR12 (80 kg ha ⁻¹)								
Elementos	Fe	Zn	Mn	Cu	B	Mo		
Concentração	3,0%	9,0%	2,0%	0,8%	1,8 %	0,1%		
kg ha ⁻¹	2,40	7,20	1,60	0,64	1,44	0,08		
g/vaso****	0,024	0,072	0,016	0,0064	0,0144	0,0008		
mg/vaso	2,4	7,2	1,6	0,64	1,44	0,08		

*Ureia 45% de N** Cloreto de Potássio 60% de K₂O*** Fator de transformação de K₂O para K: 1,204**** vasos com 20 kg de solo.

4.1.2 Origem da matéria-prima e produção do biocarvão

O biocarvão foi produzido a partir do meso e exocarpo de ouriços de Castanheira-do-brasil (safra 2013/2014) da empresa Agropecuária Aruanã S.A. Na biocarbonização, foi utilizado forno de pirólise de tijolo refratário com capacidade para 20 kg de biomassa (biocarbonizador) do Laboratório de Celulose e Carvão vegetal da Coordenação de Pesquisas em Produtos Florestais (CPPF) do INPA.

Elevou-se a temperatura de carbonização do equipamento até 500 °C, mantendo-se por 30 minutos seguidos de 24 h de resfriamento após desligamento. Posteriormente, o material foi peneirado em malha de 2,00 mm, sendo o material menor que 2,00 mm utilizado para caracterização das propriedades químicas no laboratório temático de solos e planta do INPA utilizando a metodologia padronizada para análise de material orgânico (EMBRAPA, 1999). As propriedades químicas do biocarvão estão descritas na tabela 4.

Tabela 3. Propriedades químicas do biocarvão produzido a partir de ouriços de Castanheira-do-brasil.

pH CaCl	N	P	K	Ca	Mg	S
9,1	7,0	0,6	23	6	2,4	1,4
	Fe	Zn	Mn	Cu	B	
	575	25	265	28	41	

4.2 Instalação experimental

4.2.1 Localização e delineamento experimental

O presente estudo foi conduzido em casa de vegetação, localizada no Campus III (V8) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA (3°5'29" S e 59°59'37" W) no município de Manaus - AM, entre os meses de agosto de 2016 a janeiro de 2017, totalizando 180 dias de experimentação. De acordo com a classificação de Köppen (1948), o clima em Manaus é classificado em Am (Tropical úmido e subúmido) com temperatura média de 27,4 °C.

Devido o interesse de se verificar a influência do biocarvão na presença e ausência do P residual, adotou-se um delineamento inteiramente casualizado (DIC), em arranjo fatorial 5 x 2, considerando as cinco doses de biocarvão aplicadas (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹) e duas doses de fósforo anteriormente aplicadas (0 e 100 Kg de P₂O₅ ha⁻¹) na forma de superfosfato triplo (SFT), totalizando 10 tratamentos com 4 repetições e 40 unidades experimentais (Tabela 4).

Tabela 4. Composição dos tratamentos utilizados no experimento.

Tratamentos	Composição						
	Biocarvão (BC)			Fósforo			
	t ha ⁻¹	g/vaso ***	Kg ha ⁻¹ SFT*	Kg ha ⁻¹ P ₂ O ₅	g/vaso SFT	g/vaso P ₂ O ₅	g/vaso P**
T1	0 BC x 0P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
T2	0 BC x 100P ₂ O ₅	0	0	243,9	100	2,4	0,98
T3	20 BC x 0P ₂ O ₅	20	200	0	0	0	0
T4	20 BC x 100P ₂ O ₅	20	200	243,9	100	2,4	0,98
T5	40 BC x 0P ₂ O ₅	40	400	0	0	0	0
T6	40 BC x 100P ₂ O ₅	40	400	243,9	100	2,4	0,98
T7	60 BC x 0P ₂ O ₅	60	600	0	0	0	0
T8	60 BC x 100P ₂ O ₅	60	600	243,9	100	2,4	0,98
T9	80 BC x 0P ₂ O ₅	80	800	0	0	0	0
T10	80 BC x 100P ₂ O ₅	80	800	243,9	100	2,4	0,98

* Superfosfato Triplo 41 % de P₂O₅ ** Fator de transformação de P₂O₅ para P: 2,29 *** Vasos com 20 kg de solo

4.2.2 Preparo do solo

Para reutilização das unidades experimentais, o solo dos vasos foi destorroado manualmente (Figura 1). Retirou-se de cada unidade amostras compostas de solo, no sistema triangular, para determinação das propriedades químicas 7 meses após a finalização do experimento anterior, para caracterizar a fertilidade inicial do presente estudo. As adubações adicionais dos macronutrientes seguiram os resultados da análise de solo e as recomendações de Souza *et al.* (2008). Assim, realizou-se adubação das mudas apenas com nitrogênio (N) e potássio (K) em três ocasiões: no momento do plantio, após 2 meses de plantio e após 4 meses de plantios, dos quais foram solubilizados juntamente com a água de irrigação (Tabela 5).



Figura 2. Solo destorreado (A); Unidades experimentais sobre plataforma de madeira (B).

Tabela 5. Detalhe dos fertilizantes adicionados ao longo da experimentação.

Época	Ureia				Cloreto de Potássio				
	kg ha ⁻¹ Ureia	kg ha ⁻¹ N	g/vaso Ureia	g/vaso N	kg ha ⁻¹ KCl	kg ha ⁻¹ K ₂ O	kg ha ⁻¹ K	g/vaso KCl	g/vaso K ^{***}
Plantio	100	45	1,0	0,45	100	60	49,83	1,0	0,498
2 meses	50	22,5	0,5	0,225	50	30	24,91	0,5	0,249
4 meses	50	22,5	0,5	0,225	50	30	24,91	0,5	0,249

4.2.3 Produção, seleção e recepção das mudas de Castanheira-do-brasil

As mudas de *Bertholletia excelsa* utilizadas no experimento foram cedidas pela Empresa Agropecuária Aruanã S.A, com viveiro localizado no município de Itacoatiara-AM, km 213 da AM-010 (03°0'30.63"S e 58°50'1.50"W). As mudas possuíam idade aproximada de 7 meses, e apresentavam em média 28,2 cm de altura 2,0 mm de diâmetro do coleto e 5 folhas completamente expandidas. Os critérios de seleção das mudas incluíram o estado fitossanitário, o vigor e a uniformidade de tamanho (Figura 2). As mudas foram transportadas acondicionadas sob lonas plásticas e foram mantidas em casa de vegetação até o momento do plantio.

O processo de produção de mudas da Aruanã segue as seguintes etapas: 1) as sementes são coletadas e deixadas por até 6 meses sob areia em constante umidade a fim de quebrar a dormência; 2) Após o descascamento, as amêndoas são levadas para o germinador composto por serragem; 3) Após cerca de 45 dias, as amêndoas recém germinadas recebe um corte de padronização (3-4 cm) e são colocada em sacolas plásticas apropriadas com solo peneirado não adubado; 4). No viveiro, as mudas permanecem sob constante irrigação e são nutridas apenas com as reservas por até 2 anos, sendo constantemente trocadas de posição para não ocorrer o enraizamento no chão, estando prontas para ir pra campo de após 8 meses até 2 anos.



Figura 3. Mudanças selecionadas para o experimento (A) e viveiro da Empresa Agropecuária Aruanã (B).

4.2.4 Condução experimental

4.2.4.1 Transplântio das mudas de Castanheira-do-Brasil

Previamente ao transplântio, as mudas ficaram aclimatadas durante 7 dias em casa de vegetação com cobertura de telhas transparentes 50% e malhas do tipo *sombrite* 35%, permanecendo em sacos de polietileno com dimensões de 12 cm x 18 cm. Nas unidades experimentais foram abertas covas com aproximadamente 15 cm de profundidade e 10 cm de diâmetro utilizando trato do tipo holandês (Figura 3 A).



Figura 4. Covas abertas para o transplântio (A); adubos aplicados no transplântio (B), raízes nuas (C) e mudas transplântadas (D).

Posteriormente, a adubação de manutenção de plantio foi adicionada a aproximadamente 5 cm abaixo das raízes das mudas (Figura 3 B), sendo estas cuidadosamente retiradas do antigo recipiente e transplantadas na forma de "raiz nua" (Figura 3 C e D). No transplântio, as mudas foram casualizadas através de sorteio manual.

4.2.4.2 Manejo das mudas de Castanheira-do-Brasil

Durante o período de experimentação (180 dias), monitorou-se a temperatura e a umidade relativa através de termômetro digital. Em todo o período, procurou-se manter a umidade do solo em torno de 30% (capacidade de campo para latossolos em relação ao peso do solo seco) (Casaroli e Lier, 2008). E levando-se em consideração as diferentes doses de biocarvão (0, 20, 40, 60 e 80 t ha⁻¹), que influenciam na umidade do solo, logo, antes do início do experimento foi determinada a quantidade de água para cada dose. As unidades experimentais foram devidamente casualizadas a cada 30 dias ao longo do tempo de experimentação, de forma a evitar que as plantas ficassem submetidas a qualquer microclima que afetasse o desenvolvimento das mudas. Não se verificou a incidência de pragas ou doenças sobre as mudas de castanheira.

4.3 Análises experimentais

4.3.1 Biométricas

As variáveis biométricas foram determinadas a partir do 2º mês após o transplântio e a cada 30 dias até o final do período de experimentação (180 dias), totalizando cinco avaliações. Neste período, realizou-se o monitoramento do número de folhas lançadas, consideradas apenas as folhas totalmente expandidas, a altura de plantas (colo até a gema apical) utilizando-se fita métrica e o diâmetro do coleto (a 3 cm do nível do solo) utilizando paquímetro digital da marca STARRET® (Precisão de 0,02 mm).

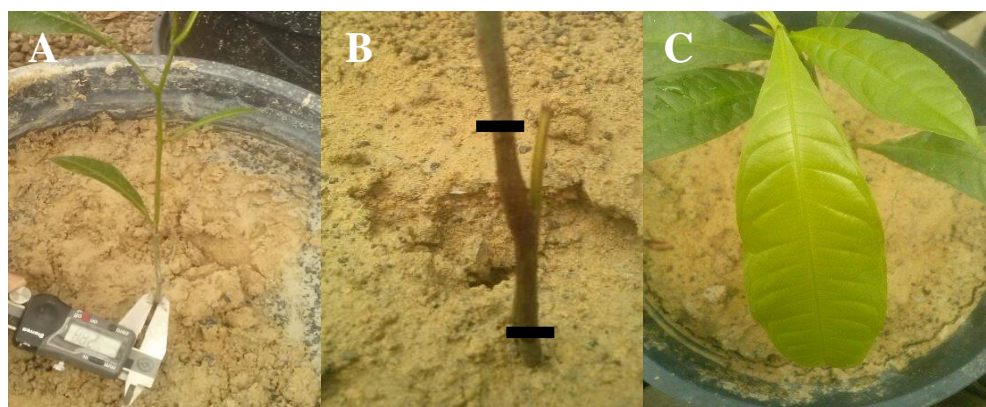


Figura 5. Avaliação do diâmetro do coleto (A); referência para medição do diâmetro a 3 cm do colo e referência para medição de altura (B) folha nova totalmente expandida (C).

De posse dos resultados mensais, calculou-se a relação altura de plantas: diâmetro do coleto (AP: DC), número de folhas finais (NFF), ganho foliar (GF) (equação 1), crescimento absoluto em altura e diâmetro (CA) (equação 2), taxa de crescimento absoluto em altura e diâmetro (TCA) (equação 3), conforme metodologia de Bugbee (1996) e Davanso *et al.* (2002).

Equação 1

$$\mathbf{GF = NFF - NF0}$$

Sendo:

GF - ganho foliar;
NFF - número de folhas final;
NF0 - número de folhas inicial

Equação 2

$$\mathbf{CA = Vf - V0}$$

Sendo:

CA - crescimento absoluto, em altura [cm] ou em diâmetro [mm]
Vf - variável final, altura [cm] ou diâmetro [mm]
V0 - variável inicial, altura [cm] ou diâmetro [mm]

Equação 3

$$\mathbf{TCA = (Vf - V0) / (tf - t0)}$$

Sendo:

TCA - taxa de crescimento absoluto, em altura [cm] ou em diâmetro [mm]
Vf - variável final, altura [cm] ou diâmetro [mm]
V0 - variável inicial, altura [cm] ou diâmetro [mm]
tf - tempo final do monitoramento
t0 - tempo inicial do monitoramento

Ao final do experimento, as plantas foram seccionadas, dividindo-as em parte aérea (folhas e caule) e sistema radicular, sendo acondicionadas em sacos de papel separadamente. As raízes foram cuidadosamente retiradas dos vasos, lavadas e mensurado o comprimento da raiz principal (CRP). Determinou-se o volume total das raízes (VTR) colocando-as em proveta graduada com volume conhecido de água, aferindo-se a resposta direta pela elevação do volume conforme a metodologia descrita por Basso (1999).

Posteriormente, o material vegetal foi submetido separadamente à secagem em estufa de circulação de ar forçada a 65°C por aproximadamente 72 horas, sendo o peso seco determinado através de balança digital de precisão obtendo-se, a matéria seca da parte aérea (MSPA) e a matéria seca radicular (MSR). A partir dos valores de matéria seca obteve-se a matéria seca total (MST), calculando-se a razão parte aérea/ raiz (RPA/R). Em posse de todos os dados biométricos

obtidos calculou-se o Índice de Qualidade de Dickson (IQD), através da seguinte equação proposta por Dickson *et al.*(1960):

Equação 4

$$\text{IQD} = \text{MST} / (\text{AP}/\text{DC}) + (\text{MSPA}/\text{MSR})$$

Sendo:

MST - Matéria Seca Total (g)

AP - Altura da Planta (cm)

DC - Diâmetro do Caule (mm)

MSPA - Matéria Seca da Parte Aérea (MSF + MSC) (g)

MSR - Matéria Seca das Raízes (g)



Figura 6. Parte aérea de mudas de castanheira seccionada (A); Pesagem da matéria seca das folhas (B) e caule (C).

4.3.2 Nutricionais

Os teores de macro e micronutrientes foliares foram determinados ao final do experimento. Na seleção das folhas para análise, considerou-se o aspecto fitossanitário das folhas medianas completamente expandidas. Posteriormente a secagem, as amostras foliares foram trituradas em moinho tipo Wiley. Em seguida, levou-se o material ao laboratório temático de solos e plantas do INPA para determinação das concentrações de macros (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Zn e Mn).

Para avaliar as concentrações de P, K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn, pesou-se 0,5 g do material moído submetendo-o a digestão nitro-perclórica em temperatura controlada de 50 em 50°C em intervalos de 30 minutos até atingir 210°C. A partir do mesmo extrato, determinou-se o P por espectrofotometria a 725 nm e o K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn por espectrometria de absorção atômica (EMBRAPA, 1979). Para as concentrações de N pesou-se 0,1g do material seco, submetendo-o a pré-digestão durante uma noite com posterior digestão sulfúrica ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$) em temperatura gradativa até 350°C. Posteriormente, determinou-se o N utilizando a metodologia de Kjeldahl, a partir de uma alíquota de 25 mL do extrato puro (Miyazawa *et al.*, 1999).

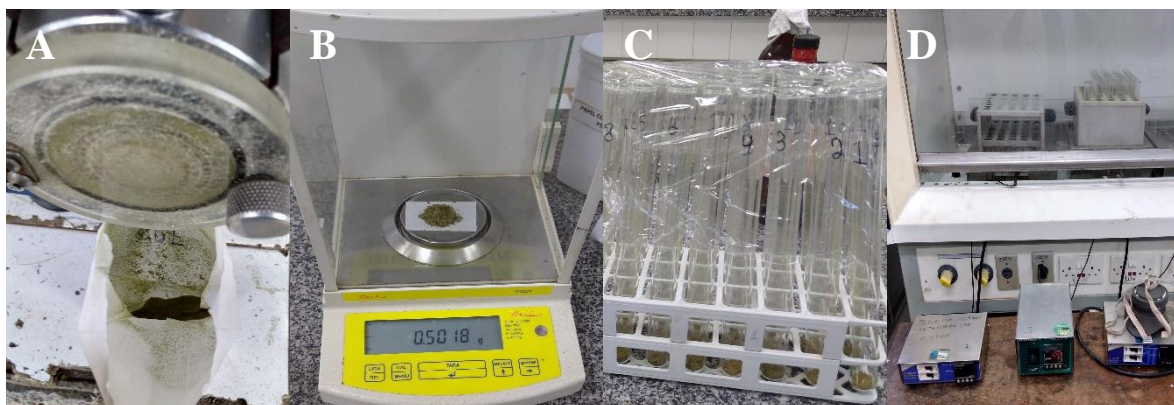


Figura 7. Trituração (A), pesagem (B), acondicionamento (C) e digestão do material vegetal (D).

4.3.3 Atributos do solo

Para avaliar os atributos do solo, após a retirada das mudas, foram coletadas de cada unidade experimental três subamostras de solo para compor uma amostra composta de cerca de 500g, no esquema de amostragem triangular (Malavolta, 1980). As amostras foram secas ao ar, peneiradas em malha de 2 mm e levadas ao laboratório temático de solos (LTSP) e plantas para análises químicas.



Figura 8. Secagem do solo ao ar (A); peneiramento do solo em malha de 2 mm (B); pesagem do solo (C); filtragem da solução para leitura (D).

No LTSP, determinou-se o potencial hidrogeniônico (pH), a acidez potencial (H^+ Al), alumínio trocável (Al), macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn, Mn). O pH foi determinado por meio de eletrodo imerso em suspensão da solução na relação solo: água (1: 2,5). A acidez potencial (H^+ Al) foi extraída por acetato de cálcio $Ca (C_2H_3O_2)_2$ 0,5 mol L^{-1} e determinada por titulometria com hidróxido de sódio NaOH 0,025 mol L^{-1} . O alumínio trocável (Al^{+3}), o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) foram extraídos por solução de cloreto de potássio (KCl) 1 mol L^{-1} , sendo o Al^{+3} determinado por titulometria com NaOH e o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica. O fósforo (P), o potássio (K) e os micronutrientes Fe, Zn e Mn foram extraídos com solução Mehlich 1 (HCl 0,05 M + H_2SO_4 0,0125 M), determinando-se o P pelo método azul de molibdato e por espectrofotometria ($\lambda=660$ nm) e o K e micronutrientes (Fe, Zn e Mn) espectrofotometria de absorção atômica. O N total foi

determinado pelo método de Kjeldahl (EMBRAPA, 1999). O fósforo remanescente foi determinado a partir de 7,5 g de amostras de TFSA em uma solução de equilíbrio de 0,01 mol L⁻¹ de CaCl₂, contendo 60 mg L⁻¹ de P (KH₂PO₄). Posteriormente, as amostras foram agitadas por 30 min a 150 rpm, deixando-as em repouso o período, cerca de 16 horas. No dia seguinte, o P na solução foi determinado pelo método colorimétrico (Alvarez *et al.*, 1999). De posse desses dados, calculou-se a soma de bases (SB) (equação 5), capacidade de troca de cátions efetiva (t) e potencial (T) (equação 6 e 7), saturação por bases (v%) (equação 8) e saturação por alumínio (m%) (equação 9).

$$SB = Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+}$$

Equação 5

Sendo:

SB- Soma de Bases (cmol_c dm⁻³)

Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; K⁺ - Potássio (cmol_c dm⁻³)

$$t = SB + Al^{3+}$$

Equação 6

$$T = SB + (H^{+} + Al^{3+})$$

Equação 7

Sendo:

t- capacidade de troca de cátions efetiva (cmol_c dm⁻³)

T- capacidade de troca de cátions potencial (cmol_c dm⁻³)

SB- Soma de Bases (cmol_c dm⁻³)

Al³⁺ - Alumínio trocável (cmol_c dm⁻³); (H⁺ + Al³⁺) - Acidez potencial (cmol_c dm⁻³)

Equação 8

$$v\% = (SB/T) \cdot 100$$

Sendo:

v%- Saturação por bases

SB- Soma de Bases (cmol_c dm⁻³)

T- capacidade de troca de cátions potencial (cmol_c dm⁻³)

Equação 9

$$m\% = (Al^{3+}/t) \cdot 100$$

Sendo:

m%- Saturação por alumínio

Al³⁺ - Alumínio trocável (cmol_c dm⁻³)

t- capacidade de troca de cátions efetiva (cmol_c dm⁻³)

4.4 Análises estatísticas

Os dados obtidos a partir de cada variável foram submetidos à análise de variância, obtendo-se resposta significativa para o teste F, realizou-se o teste de Tukey (5%) para comparação de médias. Realizaram-se análises de regressão e correlação de Pearson utilizando o software estatístico Assistat versão 7.7 (Silva e Azevedo, 2009).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Atributos do solo

Com exceção do fósforo (P), Ferro (Fe) e a CTC potencial (T), todas as outras variáveis não foram significativas para a interação do biocarvão com o P residual antes do Transplântio. Após o experimento, fósforo (P), Zinco (Zn), alumínio (Al) e a Saturação por alumínio (m%) foram significativamente para essa interação. Em contrapartida, com exceção da à CTC potencial (T), todas as variáveis do solo analisadas foram significativamente influenciadas pelo aumento do biocarvão no solo antes do transplântio. Posteriormente ao experimento, apenas a CTC efetiva (t) e potencial (T) não foram responsivas ao biocarvão (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (P) e a interação destes em atributos do solo para produção de mudas de *Bertholletia excelsa*.

Variáveis do Solo Antes do Transplântio								
F. V.	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn
Bc	**	**	*	**	**	**	**	*
Pr	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns
Bc x Pr	ns	ns	**	ns	ns	ns	*	ns
CV %	5,32	5,65	35,78	15,55	32,14	25,74	10,41	23,92
F. V.	Mn	Al	H+Al	SB	v%	t	T	m%
Bc	**	**	**	**	**	*	ns	**
Pr	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bc xPr	ns	ns	ns	ns	ns	ns	*	ns
CV %	23,10	56,90	9,56	19,74	13,13	14,14	8,71	55,54
Variáveis do Solo ao Final do Experimento								
F. V.	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn
Bc	**	**	**	**	**	**	**	*
Pr	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns
Bc xPr	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	**
CV %	3,88	11,73	12,72	59,97	36,12	44,97	8,98	17,57
F. V.	Mn	Al	H+Al	SB	v%	t	T	m%
Bc	**	**	**	**	**	ns	ns	**
Pr	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Bc xPr	ns	**	ns	ns	ns	ns	ns	*
CV %	28,30	18,11	14,26	48,50	19,02	36,42	26,89	29,86

** e * significativo a 1 e 5% pelo teste de Tukey, respectivamente; ns: não significativo; F. V.: Fatores de Variação; Bc: biocarvão; Pr: fósforo residual; Bc x Pr: Interação biocarvão x fósforo residual; CV: Coeficiente de Variação.

Notou-se forte correlação linear ($p < 0,01$) entre as doses de biocarvão e as bases do solo (K, Ca e Mg), influenciando diretamente na soma de bases (SB) e a saturação por bases antes e após o experimento (Tabela 7 e 8).

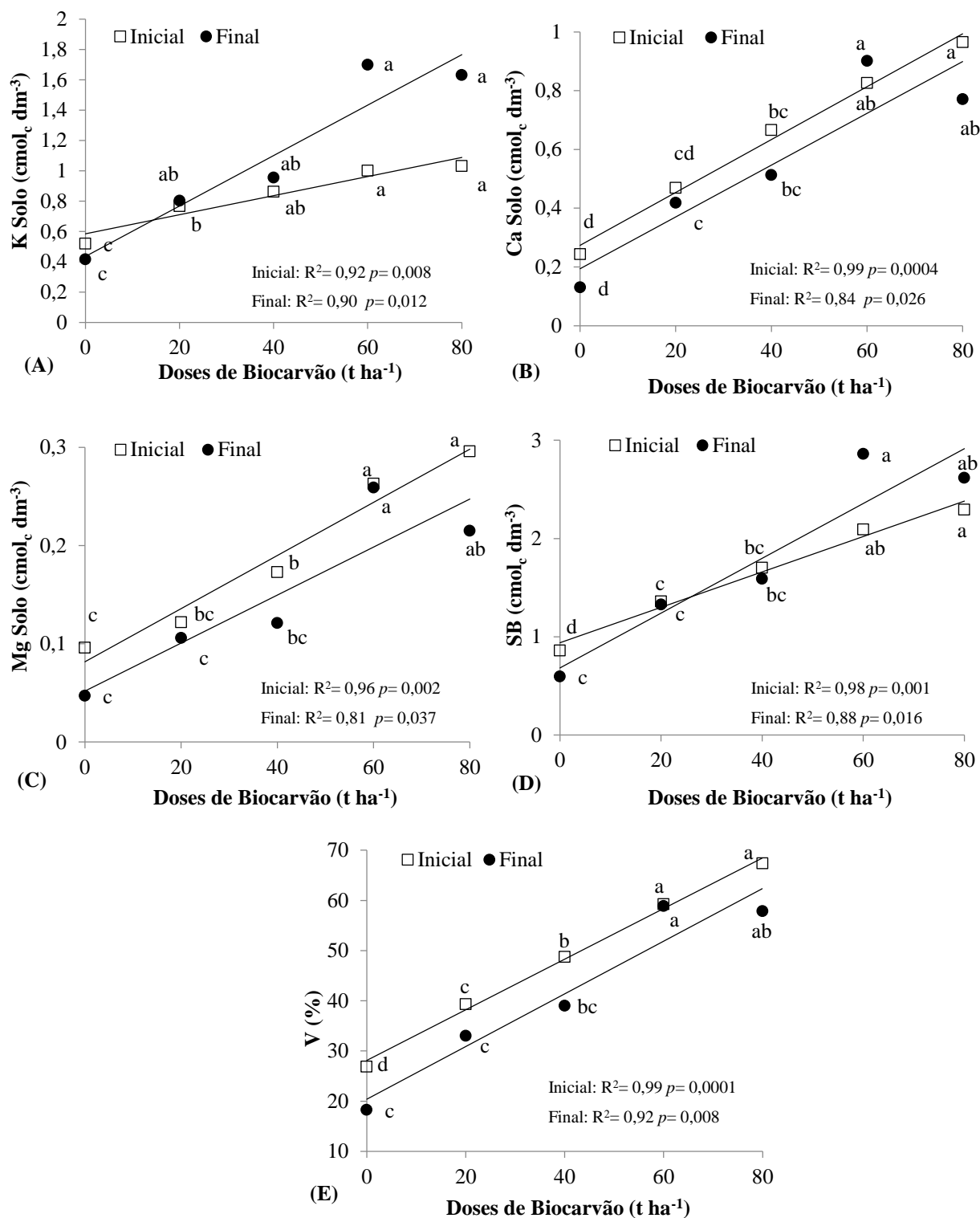


Figura 9. Média dos teores de Potássio (A), Cálcio (B) e Magnésio (C), soma de bases (D), saturação por bases (E) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 7. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e atributos químicos do solo antes do experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa*.

		Solo antes do Transplântio															
	BC	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	Al	H+Al	SB	V%	t	T	m%
BC	—	0,96**	0,93*	ns	0,96**	0,99**	0,98**	ns	0,97**	0,97**	-0,96**	-0,99**	0,99**	0,99**	0,88*	ns	-0,96**
pH		—	0,93*	ns	ns	0,93*	0,98**	ns	0,99**	0,99**	-0,91**	-0,98**	0,92*	0,94*	ns	ns	-0,89*
N			—	ns	ns	0,93*	0,93*	ns	0,90*	0,90*	-0,95*	-0,94*	0,92*	0,92*	ns	ns	-0,93*
P				—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
K					—	0,98**	0,92*	ns	0,88*	0,88*	-0,96**	-0,93*	0,98**	0,97**	ns	ns	-0,98**
Ca						—	0,96**	ns	0,94*	0,94*	-0,97**	-0,98**	0,99**	0,99**	ns	ns	-0,98**
Mg							—	ns	0,98**	0,98**	-0,95*	-0,99**	0,96**	0,97**	ns	ns	-0,94**
Fe								—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn									—	0,99**	-0,90*	-0,98**	0,93*	0,95*	ns	ns	-0,88*
Mn										—	-0,89*	-0,98**	0,93*	0,95*	ns	ns	-0,88*
Al											—	0,95*	-0,97**	-0,97**	ns	ns	0,99**
H+Al												—	-0,97**	-0,98**	ns	ns	0,94*
SB													—	0,99**	ns	ns	-0,98**
V%														—	0,89*	ns	-0,97**
t															—	ns	ns
T																—	ns
m%																	—

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns}Não Significativo pelo Teste t de probabilidade. Informa-se que as correlações são lineares.

Tabela 8. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e atributos químicos do solo após do experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa*.

		Solo Após Experimento															
	BC	pH	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn	Al	H+Al	SB	V%	t	T	m%
BC	—	0,95**	0,98**	ns	0,95*	0,92*	0,90*	ns	0,91*	ns	-0,97**	-0,95*	0,94*	0,96**	ns	0,90*	-0,98**
pH		—	0,97**	ns	0,93*	ns	0,88*	ns	0,93*	0,88*	-0,96**	-0,97**	0,90*	0,91*	ns	ns	-0,93**
N			—	ns	0,97**	0,93*	0,94*	ns	0,96**	ns	-0,99**	-0,98**	0,96**	0,97**	ns	0,92*	-0,98**
P				—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
K					—	**	0,98**	ns	0,98**	ns	-0,98**	-0,98**	0,99**	0,99**	0,94*	0,97**	-0,98**
Ca						—	0,98**	ns	0,95*	ns	-0,95*	-0,94*	0,99**	0,99**	0,96**	0,99**	-0,97**
Mg							—	ns	0,98**	ns	-0,95*	-0,96**	0,99**	0,97**	0,96**	0,98**	-0,95*
Fe								—	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn									—	0,91*	-0,97**	-0,99**	0,97**	0,96**	0,91*	0,94*	-0,94*
Mn										—	ns	-0,90*	ns	ns	ns	ns	ns
Al											—	0,98**	-0,97**	-0,97**	ns	-0,93*	0,98**
H+Al												—	-0,97**	-0,97**	-0,89*	-0,93*	0,96**
SB													—	0,99**	0,95*	0,98**	-0,98**
V%														—	0,93*	0,98**	0,99**
t															—	0,96**	-0,89*
T																—	-0,96**
m%																	—

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns}Não Significativo pelo Teste t de probabilidade. Informa-se que as correlações são lineares.

Com exceção do aumento K disponível devido à fertilização do solo, as outras bases (Ca e Mg) apresentaram decréscimos esperados após o período de experimentação devido à nutrição das mudas (Figura 9 A, B e C). A elevação do K conferiu posterior elevação na soma e saturação por bases (Figura 9 D e C). Estes resultados são similares aos obtidos por Lima (2016), ao qual notaram correlação linear entre o aumento do biocarvão aplicado (0, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 t ha⁻¹) e as bases em argissolo na produção de girassol. Semelhantemente, Zhao *et al.* (2014) verificaram aumento das bases do solo com aplicação de 8, 16 e 32 t ha⁻¹ de biocarvão de eucalipto em experimento de viveiro. Na associação de concentrações de biocarvão (0-70 % v/v) e adubação fosfatada na produção de mudas de *Bertholletia excelsa*, Nunes (2010) encontraram tendência linear no aumento do K (R²=0,98), do Ca (R²=0,87), porém sem linearidade significativa para o Mg (R²=0,87).

Tais resultados confirmam que o biocarvão é capaz de reter esses nutrientes em seus sítios reativos, aumentando sua disponibilidade em solução através da elevação da capacidade de troca de cátions (CTC) (Kämpf *et al.*, 2003; Lehmann *et al.*, 2003). Em geral, os teores de K foram admitidos como altos devido à fertilização, enquanto que os teores de Ca e Mg foram baixos, uma vez verificada a inexistência de calagem, fonte desses nutrientes (Tabela 9).

Tabela 9. Classes de interpretação de Potássio (K), Cálcio (Ca) e Magnésio (Mg) para solos amazônicos.

Elemento	Classe de Teores		
	Baixo	Médio	Alto
K (cmol _c dm ⁻³)	< 0,11	0,12 - 0,23	> 0,23
Ca (cmol _c dm ⁻³)	< 1,5	1,6 - 4,5	> 4,5
Mg (cmol _c dm ⁻³)	< 0,5	0,5 - 1,5	> 1,5

Fonte: Cravo *et al.* (2007)

A elevação da CTC foi proporcional ao aumento das doses do biocarvão, admitindo-se correlação antes e após o experimento (Tabela 7 e 8). Nota-se que, tanto a CTC efetiva (f) quanto a Potencial (T) em relação ao biocarvão apresentaram elevação após o experimento (Figura 10 A e B). Apesar da interação com o biocarvão, a presença do P residual não parece ter influência sobre a CTC do solo (Tabela 10). Segundo Glaser *et al.* (2003), a elevação da CTC se deve a oxidação da superfície do biocarvão ao expor os grupos funcionais carregados negativamente. 78 dias entre o início e o final do experimento, Lima (2016) observou aumento médio de 0,21 cmol_c dm⁻³ na CTC efetiva abaixo do encontrado no período deste trabalho (0,43 cmol_c dm⁻³). Durante 64 dias de experimentação, Andrade *et al.* (2015) também observaram aumento progressivo da CTC efetiva em função das doses de biocarvão. Considerando os baixos valores de CTC encontradas em solos Amazônicos (< 2,0 cmol_c dm⁻³), a aplicação do biocarvão pode ser alternativa de manejo ao longo do tempo.

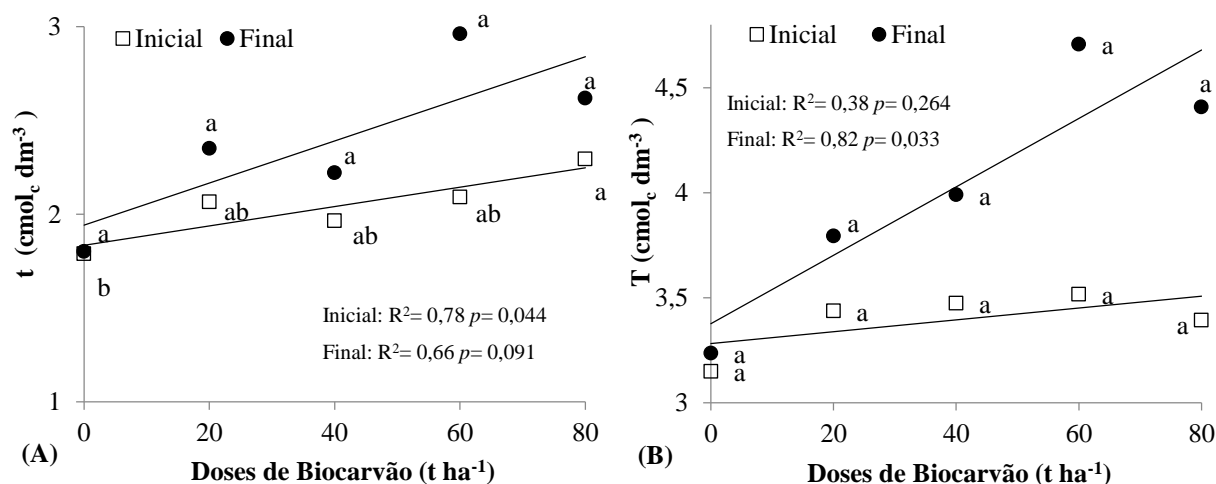


Figura 10. Médias dos valores da CTC efetiva (t) e Potencial (T) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 10. Médias dos valores de CTC potencial antes do experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função doses de biocarvão.

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
CTC Potencial inicial (cmol_c dm⁻³)					
-Pr	3,08 bA	3,31 abA	3,78 aA	3,53 abA	3,19 abA
+Pr	3,21 aA	3,55 aA	3,16 aB	3,49 aA	3,59 aA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

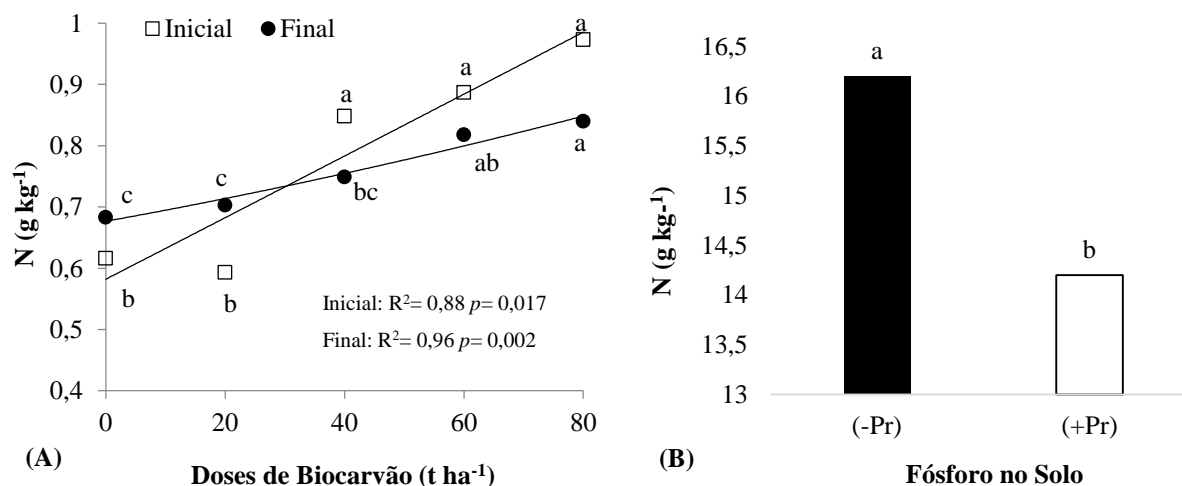


Figura 11. Médias dos teores de Nitrogênio do solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (A) e da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Os teores de nitrogênio (N) no solo foram significativos em função das doses de biocarvão ($r=0,93$ e $0,98$) e do fósforo residual (Tabela 7 e 8; Figura 10 A e B). Acredita-se que a presença mais elevada do P tenha favorecido a melhor absorção de N. Alguns estudos têm

apontado que a adição de biocarvão no solo pode reduzir a volatilização de NH_3 e alterar sua disponibilidade para as culturas (Spokas, 2010; Ball *et al.*, 2010; Knowles *et al.*, 2011). A partir da aplicação de biocarvão de resíduos de capoeira, Lehmann *et al.* (2003) observaram a redução significativa da lixiviação de fertilizantes nitrogenados, corroborando possivelmente com o aumento dos teores de N em solução promovidos pela adição de ureia.

Tanto o Zn quanto o Mn apresentaram forte correlação com as doses de biocarvão no substrato, de $R^2 = 0,97$ e $0,97$ anterior ao experimento ($p < 0,01$) e $0,91$ ($P < 0,05$) e $0,74$ (ns) após o experimento (Tabela 7 e 8). Com exceção do Zn no solo, os outros micronutrientes apresentaram elevação em solução após o período de experimentação (Figura 12).

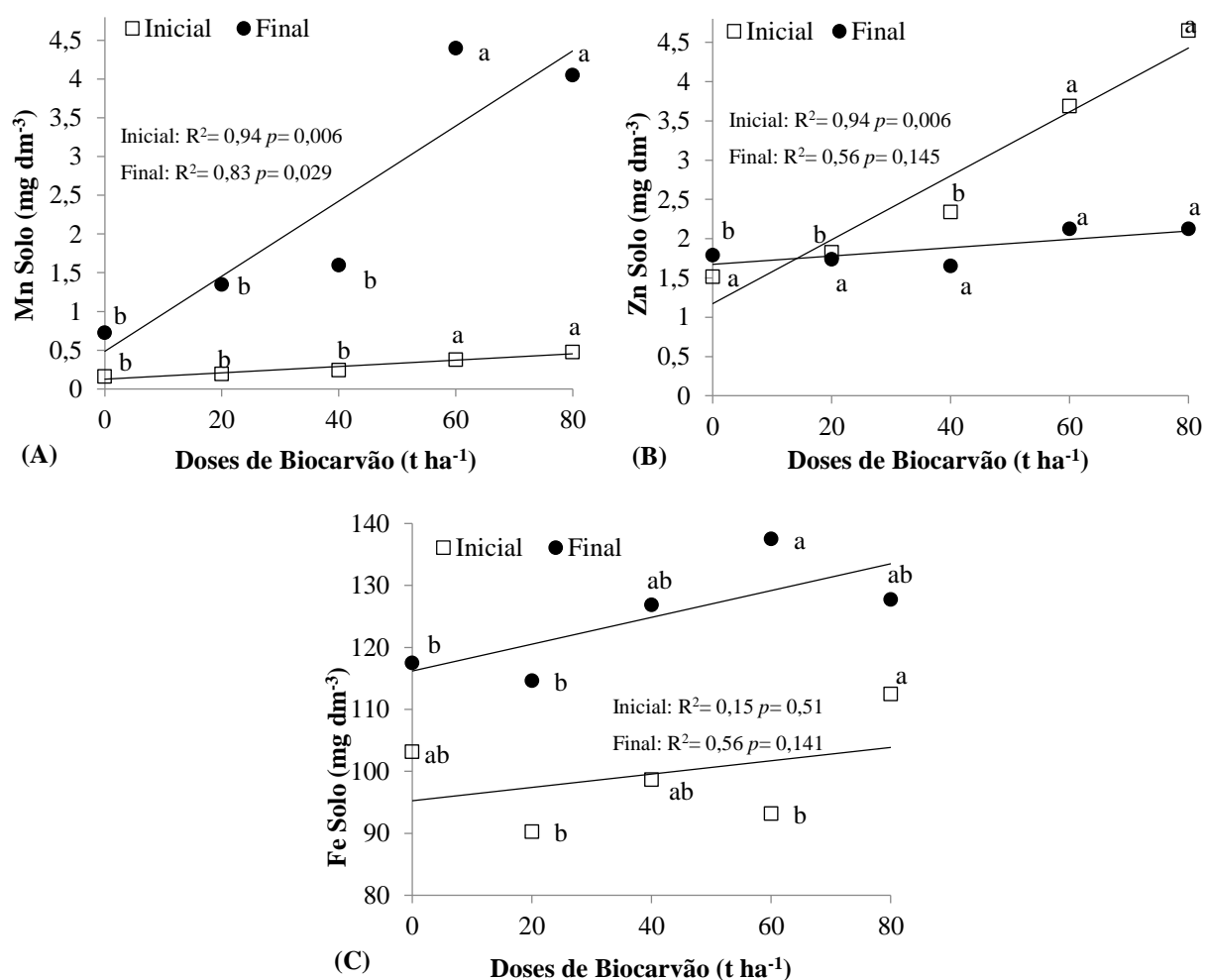


Figura 12. Médias dos teores de Manganês (A), Zinco (B) e Ferro (C) do solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

No caso do Fe e do Mn, possivelmente os maiores valores obtidos após esse período estão ligados aos teores destes no biocarvão, 575 e 275 mg kg^{-1} , visto que pode ser fonte de nutrientes apesar de ser considerado inerte (Figura 12) (Novotny *et al.*, 2009). Tal fato confirma-se quando se nota que na dose 0 t ha^{-1} de biocarvão, os teores desses micronutrientes variaram

levemente e segundo Mukome (2013) e Lima *et al.* (2015), a utilização de biocarvão com baixos teores de nutrientes pode-se ser fator limitante ao desenvolvimento vegetal.

Ao observar a interação do biocarvão sob ausência e presença do P residual nos teores de Fe, é possível notar diferença significativa apenas na dose 0 t ha⁻¹ (Tabela 11). É interessante notar que apesar do aumento não linear, os maiores teores de Fe no solo na dose 80 t ha⁻¹ coincidem com os mais baixos teores de P nesta dose (Tabela 15) sendo possível inferir que o excesso de Fe livre em solução tenha formado complexos de baixa solubilidade com P, porém no pH médio observado nesta dose a formação de complexos com Fe são consideradas baixas (Novais e Smyth, 1999). Para o Zn, notou-se diferença significativa entre a residualidade de P apenas na dose 80 t ha⁻¹ (Tabela 11). De acordo com Dechen e Nachtigall (2006), os elevados níveis de Zn e Mn no solo também podem contribuir para formação de precipitados no solo. De forma geral, os teores de Fe foram considerados elevados no solo (> 45 mg dm⁻³), enquanto que os teores de Zn variaram de médio a alto e os de Mn foram considerados baixos (Tabela 12).

Tabela 11. Médias dos teores de ferro (Fe) antes do experimento e zinco (Zn) após o experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção demudas de *Bertholletia excelsa* em função doses de biocarvão.

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
	Fe inicial (mg kg⁻¹)				
-Pr	102,8 abB	90,0 bA	100,1 abA	94,8 abA	113,6 aA
+Pr	103,5 aA	90,5 aA	97,2 aA	91,5 aA	111,3 aA
	Zinco Final (mg kg⁻¹)				
-Pr	1,85 abA	1,95 abA	1,52 bA	2,25 aA	1,65 abB
+Pr	1,72 bA	1,52 bA	1,77 bA	2,00 abA	2,60 aA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Tabela 12. Classes de interpretação de Ferro (Fe), Zinco (Zn) e Manganês (Mn) para solos amazônicos.

Elemento	Classes de Teores		
	Baixo	Médio	Alto
Fe (mg dm ⁻³)	< 18	18 - 45	> 45
Zn (mg dm ⁻³)	< 0,9	0,90 - 2,2	> 2,2
Mn (mg dm ⁻³)	< 5	5 - 12	> 12

Fonte: Cravo *et al.* (2007)

Analisando-se o comportamento do pH é possível notar forte correlação com as doses de biocarvão antes (r=0,96) e após o experimento (r=0,95) (Tabela 7 e 8). Outros estudos também verificaram correlação entre as doses de biocarvão e o aumento do pH (Nunes, 2010; Van Zwieten *et al.*, 2010). De acordo com Van Zwieten *et al.* (2010) o aumento do pH promovido pela adição de biocarvão ao solo se deve ao aumento dos teores de carbonato de cálcio e

magnésio após a pirólise presentes nas cinzas. Tais resultados indicam fortemente que o biocarvão tem efeito corretivo semelhante ao calcário, servindo como alternativa aos solos ácidos amazônicos (Major *et al.*, 2010).

Avaliando-se o efeito das doses de biocarvão sobre o pH e conseqüentemente sobre a disponibilidade de nutrientes, é possível notar que a faixa próxima acima de 5,0 corroborou para diminuição drástica do Al do solo (Figura 14 A e B). A redução do pH observada após o experimento, principalmente nas doses mais elevadas de biocarvão (>40 t ha⁻¹) pode ser explicada pelo alto poder tampão dos solos Amazônicos, ou seja, é possível que tenha ocorrido a reposição do H⁺ da fase mineral para a fase sólida (Gatiboni *et al.*, 2013). Após um ano de experimentação, Peter (2010) também verificou que a respectiva adição de 0, 2, 4, 8 e 16 t ha⁻¹ reduziram a acidez e a atividade do Al de um Latossolo Vermelho a níveis baixos. Da mesma forma, Van Zwieten *et al.* (2010) aplicando 10 t ha⁻¹ em experimento com vasos, onde verificaram redução do Al trocável de 2,0 cmol_c dm⁻³ a níveis não detectáveis após dois meses, atribuindo-se esse efeito ao aumento do pH de 4,20 para 4,73. Assim como sugerido por Malavolta (1976), a elevação do pH induzida pela adição do biocarvão culminou na redução dos teores de Al do solo afetando diretamente sua saturação (Figura 13).

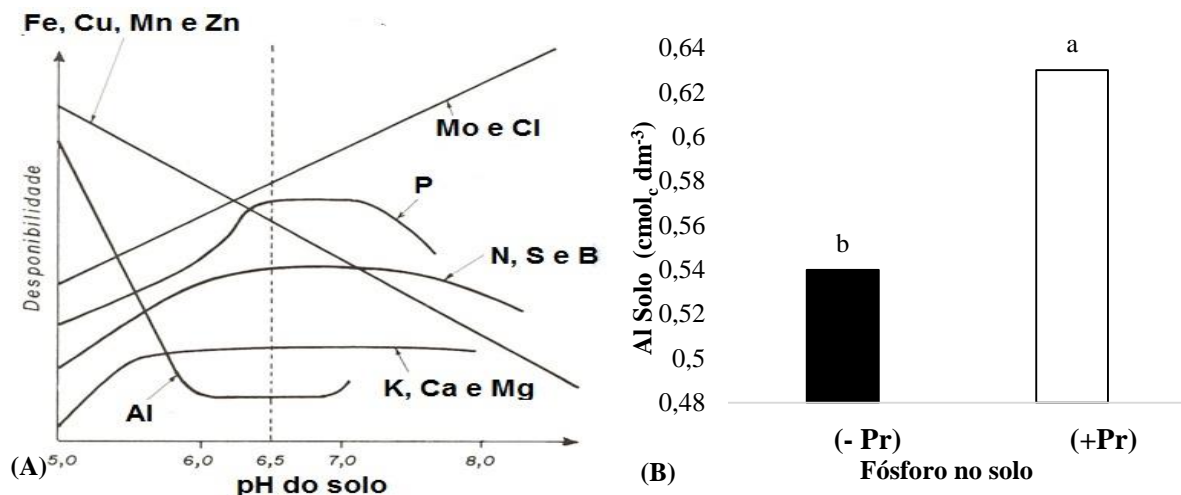


Figura 13. Comportamento dos elementos do solo em função do pH (Malavolta, 1976) (A) e teores de Alumínio no solo em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (B).

A elevação do Al na solução do solo após o período experimental foi possivelmente desencadeada pelo decréscimo observado do pH, entretanto, essa elevação observada em maior proporção nas doses mais baixas de biocarvão podem estar relacionadas ao reduzido número de cargas proporcionais as doses, fazendo com que o Al se torna mais ativo em solução (Karhu *et al.*, 2011) (Figura 14 B). De forma geral, a correlação fortemente negativa observada entre as

doses de biocarvão e a acidez potencial (H+Al) são reflexos dos processos do biocarvão sobre a neutralização dos íons H⁺ e do Al³⁺ (Tabela 7 e 8).

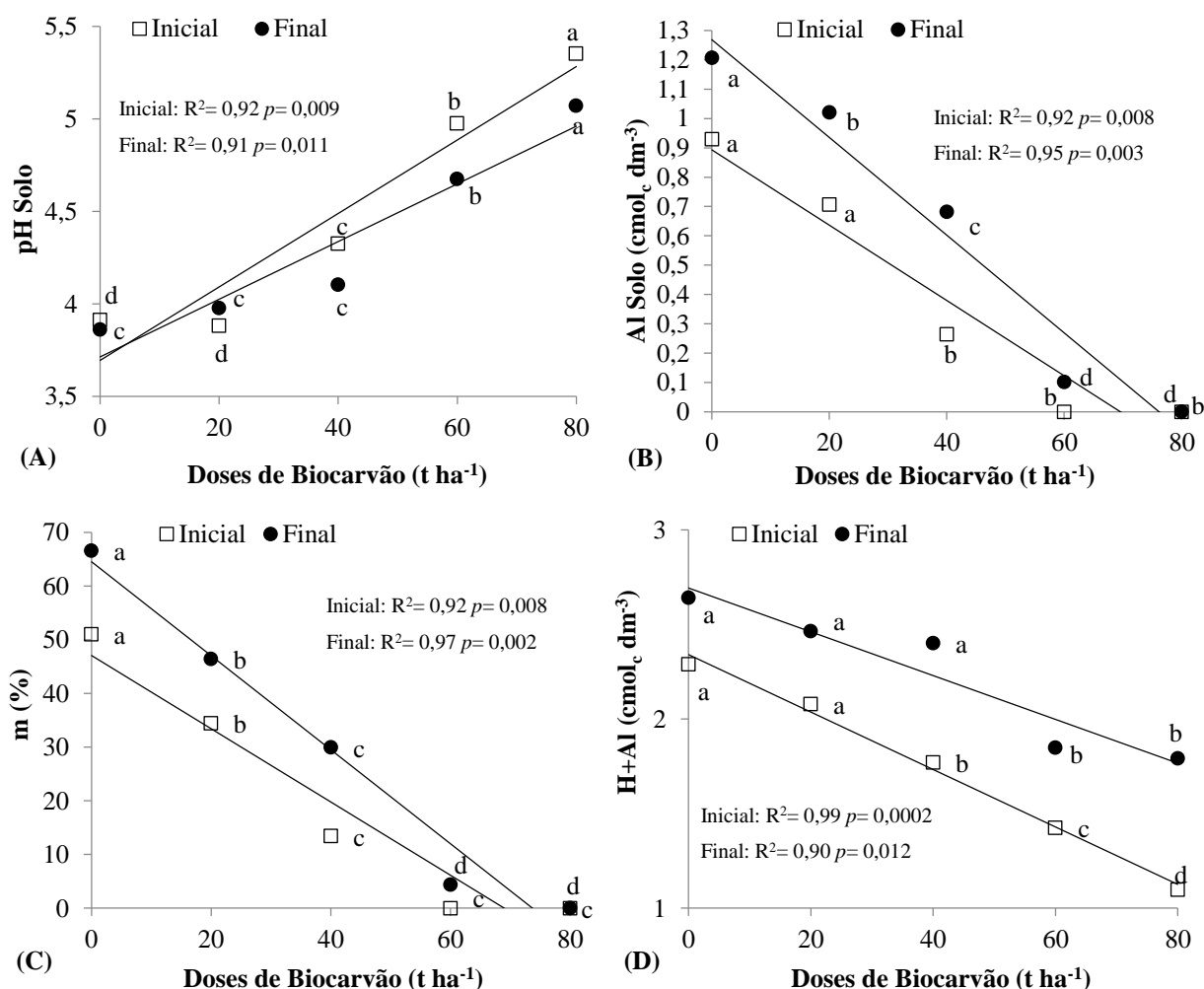


Figura 14. Médias dos valores de pH (A), teores de Alumínio (B), saturação por alumínio (C) e acidez potencial (D) do solo antes e após o experimento com mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 13. Médias dos valores de saturação por alumínio (m%) após o experimento em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) em solo para produção demudas de *Bertholletia excelsa* em função doses de biocarvão

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
Alumínio final (cmol_c dm⁻³)					
-Pr	1,01 aB	0,88 aB	0,64 bA	0,17 cA	0,00 cA
+Pr	1,39 bA	1,15 bA	0,61 cA	0,03 dA	0,00 cA
Saturação por Alumínio final (cmol_c dm⁻³)					
-Pr	59,1 aB	36,7 bB	31,6 bA	7,8 cA	0,1 cA
+Pr	74,1 aA	56,1 aA	28,3 bA	0,9 cA	0,0 cA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Ao verificar-se a interação sobre o alumínio e a saturação de alumínio (m%), é possível verificar que houve diferença significativa apenas nas doses 0 e 20 T ha⁻¹ (Tabela 13; Figura 13 B). Acredita-se que os maiores teores de Al obtidos sob oferta de P tenha sido devido a maior liberação de Al em solução pela formação de precipitados (Havlin *et al.*, 2005). Os teores de Al observados neste estudo encontraram-se na faixa considerado alto sem a adição de biocarvão, médios na adição de doses intermediárias e baixo na adição de doses acima de 60t ha⁻¹ (Tabela 14).

Tabela 14. Classes de interpretação de alumínio (Al) para solos amazônicos.

Elemento Al (cmol _c dm ⁻³)	Classe de Teores		
	Baixo < 0,3	Médio 0,3 - 1,0	Alto > 1,0

Fonte: Cravo *et al.* (2007)

Observando a interação das doses de biocarvão com o P residual sobre a disponibilidade de fósforo, é possível notar obviamente teores superiores sob adubação fosfatada inicial, entretanto antes do experimento verifica-se que na dose de 80 t ha⁻¹ houve similaridade significativa, indicando influência direta do biocarvão sobre o P residual (Tabela 15). Embora todas as condições forneçam uma relação quadrática com as doses biocarvão, observa-se que esta é significativa apenas na presença de P residual na solução do solo (Tabela 16). Tal condição já é prevista na literatura, uma vez que o biocarvão é capaz de adsorver fortemente as moléculas fosfatadas (Falcão *et al.*, 2003; Lehmann, 2007).

Tabela 15. Média dos teores de fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
P Antes do experimento (mg dm⁻³)					
-Pr	1,07 aB	1,04 aB	2,11 aB	1,67 aB	1,68 aA
+Pr	5,13 abA	7,28 abA	6,54 aA	5,74 aA	2,67 bA
P Após o experimento (mg dm⁻³)					
-Pr	1,03 abB	1,05 abB	1,40 abB	1,44 aB	0,62 bB
+Pr	4,07 bA	4,86 aA	4,72 abA	5,05 aA	1,96 cA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

Tabela 16. Equações de regressão para o comportamento do fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

	Antes do Experimento		Após o Experimento	
- Pr	$y = -0,0003x^2 + 0,0297x + 0,9397$	$R^2=0,58^{ns}$	$y = -0,0003x^2 + 0,0234x + 0,9183$	$R^2=0,62^{ns}$
+Pr	$y = -0,0019x^2 + 0,1177x + 5,264$	$R^2=0,96^{**}$	$y = -0,0013x^2 + 0,084x + 3,8966$	$R^2=0,84^*$

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns} Não Significativo

Não foi observada correlação significativa entre as doses de P no solo e os outros componentes que podem interagir com ele (Fe, Zn, Mn, Fe, Al e pH) (Tabela 7 e 8). Isto teoricamente representa que o comportamento do P foi exclusivamente distinto. Sob oferta residual de P, a redução verificada na dose 80 t ha⁻¹ contradizem as propriedades químicas do solo que favorecem o aumento da sua disponibilidade, como pH acima de 5,0 e baixa atividade do Al (Novais e Smyth, 1999) (Figura 15). De acordo com Falcão *et al.* (2003), o biocarvão pode controlar os processos de adsorção e dessorção do P no solo, podendo ainda ser mais eficiente na adsorção do que a argila presente mais comuns nos solos da Amazônia (Caulinita).

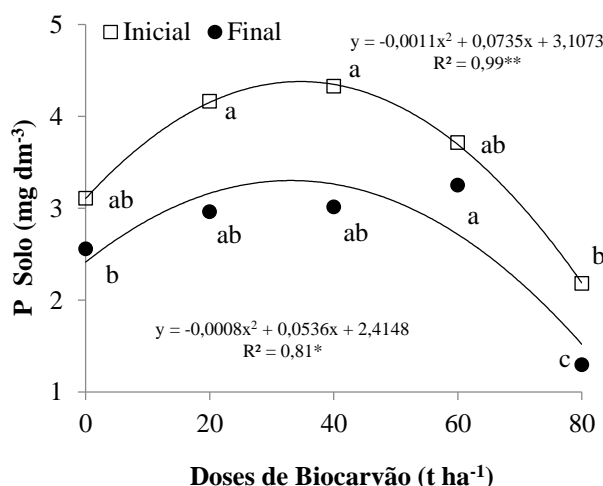


Figura 15. Teores de fósforo disponível (P) no solo antes e após o experimento para produção de mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (BC).

Segundo Trazzi *et al.* (2016), observando o comportamento de biocarvão de cana-de-açúcar produzidos em diferentes temperaturas (300, 500 e 700° C), tempos de residência (20 e 60 minutos) e concentrações de fósforo em solução (25, 50, 100, 200 e 400 mg dm⁻³), afirmaram que a adsorção do P ocorre em função das características de produção do material e principalmente pelo aumento a disponibilidade de P no solo. Ainda de acordo com Trazzi *et al.* (2016), o aumento da concentração de biocarvão aumentam consideravelmente os pontos de adsorção do P, causando diminuição da sua disponibilidade, corroborando com os resultados aqui obtidos. Em quatro cultivos consecutivos de feijão-Caupi e milho, Oliveira (2012) observou que a aplicação de 40 t ha⁻¹ de biocarvão de bambu produzido a 500°C culminou no aumento do poder residual do superfosfato triplo ao final do quarto cultivo, sugerindo que o biocarvão tenha promovido o prolongamento da disponibilidade de P por essa fonte solúvel.

A redução do P disponível nas doses mais elevadas de biocarvão no solo pode estar relacionada com a formação de pontes de ligantes entre os cátions adsorvidos na superfície de biocarvão e as moléculas de fosfato, assim a maior retenção desses cátions culmina na maior retenção do fosfato (Mukherjee *et al.*, 2011) (Figura 15). Segundo De Luca *et al.* (2009), o biocarvão ainda pode reter o fosfato por meio de adsorção física (van der waals), onde as moléculas de fosfato estariam ligadas a superfície negativa do biocarvão por meio de campo eletrostático, entretanto, teoricamente essa fraca ligação permitiria a fácil troca do P adsorvido com a solução do solo. De acordo com Silber *et al.* (2010) e Nóbrega (2011), cada biocarvão possui um ponto de carga zero (PCZ) específico, assim é possível que a presença de cargas positivas na sua superfície adsorva diretamente as moléculas de fosfato, assim como ocorrem na superfície dos argilominerais.

Não se verificou interação significativa entre as doses de biocarvão e fósforo residual para o comportamento do P-remanescente, entretanto, foi significativo em relação ao aumento das doses de biocarvão (Tabela 17; Figura 16). De acordo com Alvarez *et al.* (2000), o P-remanescente apresenta estreita afinidade com o fator capacidade do fósforo, ou seja, a taxa com que a fase sólida abastece a solução (Novais e Smyth, 1999), assim quanto maior o teor de P-menor a capacidade do solo em adsorvem o fosfato.

Tabela 17. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (P) e a interação destes sobre o fósforo remanescente (P-rem) do solo para produção de mudas de *Bertholletia excelsa*.

Variável	Fatores de Variação			C.V. %
	Bc	Solo antes do transplântio Pr	Bc x Pr	
P-remanescente	**	ns	ns	4,61
P-remanescente	**	Solo após o experimento		5,84
		ns	ns	

** e * significativo a 1 e 5% pelo teste de Tukey, respectivamente; ns: não significativo; F. V.: Fatores de Variação; Bc: biocarvão; Pr: fósforo residual; Bc x Pr: Interação biochar x fósforo residual; CV: Coeficiente de Variação.

De acordo com Wadt e Silva (2011), para solos amazônicos os valores de P-rem entre 18 e 36 mg L⁻¹ são considerados com baixo fator capacidade de fósforo enquanto que valores acima de 36 mg L⁻¹ esse fator é considerado muito baixo. De forma geral, o aumento do P-rem em função das doses de biocarvão indicam que o aumento da sua concentração no substrato está reduzindo a adsorção de P pelo solo, confirmado pelos menores valores observados onde não foi aplicado o biocarvão (Figura 16).

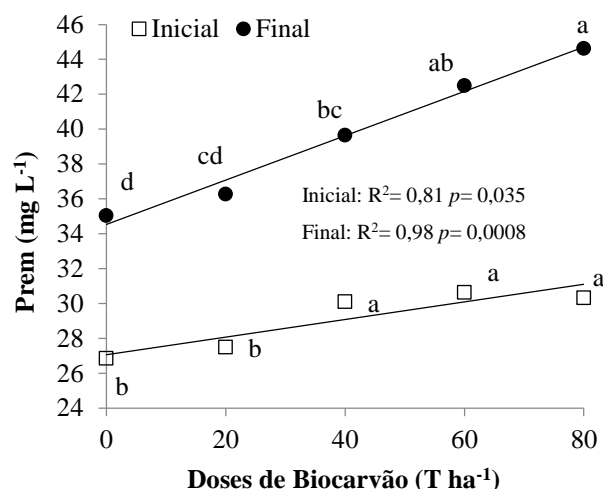


Figura 16. Médias dos valores de fósforo remanescente (P-rem) do solo antes e após o experimento com mudas de *Bertholletia excelsa* em função doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observando as tabelas de interpretação de Alvarez *et al.* (1999), é possível notar que em função da baixa retenção de P no solo, os teores observados de P disponível abaixo de 15,1 mg dm⁻³ são considerados muito baixos (Tabela 18). Considerando a disponibilidade de fósforo em função da argila para solos amazônicos, é possível verificar que antes do experimento e com exceção da dose 80 t ha⁻¹ de biocarvão, a disponibilidade do P foi considerada média ao passo que após o experimento, com exceção da dose 60 t ha⁻¹ de biocarvão, a disponibilidade de P foi considerada baixa (Tabela 19).

Tabela 18. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo em função do fósforo remanescente.

P- Rem (mg L ⁻¹)	Fósforo disponível (mg dm ⁻³)				
	M. Baixo	Baixo	Médio	Bom	M. Bom
0 - 4	< 3,1	3,1 - 4,3	4,3 - 6,0	6,0 - 9,0	> 9,0
4 - 10	< 4,1	4,1 - 6,0	6,0 - 8,3	8,3 - 12,5	> 12,5
10 - 19	< 6,1	6,1 - 8,3	8,3 - 11,4	11,4 - 17,5	> 17,5
19 - 30	< 8,1	8,1 - 11,4	11,4 - 15,8	15,8 - 24,0	> 24,0
30 - 44	< 11,1	11,1 - 15,8	15,8 - 21,8	21,8 - 33,0	> 33,0
44 - 60	< 15,1	15,1 - 21,8	21,8 - 30,0	30,0 - 45,0	> 45,0

Fonte: Alvarez *et al.* (1999)

Tabela 19. Classes de interpretação da disponibilidade de fósforo para solos amazônicos conforme os teores de argila.

Teor de argila (%)	Fósforo disponível (mg dm ⁻³)			
	Baixa	Média	Alta	Muito Alta
Argilosa (> 35)	< 5	6 - 10	11 - 15	> 15
Média (15 - 35)	< 8	9 - 15	16 - 20	> 20
Arenosa (< 15)	< 10	11 - 18	19 - 25	> 25

Fonte: Cravo *et al.* (2007)

5.2 Aspectos Nutricionais

Com exceção do nitrogênio (N) e do ferro (Fe), todos os teores de nutrientes foram significativamente influenciados pela interação do biocarvão e fósforo residual (Tabela 20). Apesar de não haver faixa de suficiência adequada para *Bertholletia excelsa*, os teores foliares de N encontrados (entre 20,8 e 25,4 g kg⁻¹) são similares aos obtidos por Corrêa (2013) entre 21,5 e 20,6 g kg⁻¹ respectivamente para adubação completa e apenas para ausência de P em mudas de castanheira. Para esta espécie, Gomes (2012) encontrou valores entre 9,5 e 17,3 g kg⁻¹, respectivamente para o tratamento controle e o fertilizado corretamente. Assim como visto por esse autor, não se visualizou sintomas de deficiência descritos por Camargos *et al.* (2002) para essa espécie, como clorose das folhas mais baixas. Notou-se correlação negativa (r: -0,88) entre o N do solo e sua respectiva concentração na planta indicando que o aumento da disponibilidade no solo não elevou necessariamente seus teores na planta (Tabela 22).

Tabela 20. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC) e doses residuais de Fósforo (Pr) na nutrição de mudas de *Bertholletia excelsa*.

Fatores de Variação	Elementos			
	N	P	K	Ca
Bc	ns	**	**	**
Pr	ns	*	ns	**
Bc xPr	ns	**	**	**
CV %	10,43	9,43	6,69	8,93

Fatores de Variação	Elementos			
	Mg	Fe	Zn	Mn
Bc	**	**	**	**
Pr	ns	ns	**	Ns
Bc xPr	**	ns	**	**
CV %	9,47	14,70	11,03	9,75

* e * significativo a 1 e 5% pelo teste de Tukey, respectivamente; ^{ns}: não significativo; Bc: biocarvão; Pr: fósforo residual; Bc_x Pr: Interação biocarvão x fósforo residual; CV: Coeficiente de variação; F. V.: Fatores de variação; N: Nitrogênio; P: Fósforo; K: Potássio; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; Fe: Ferro; Zn: Zinco; Mn: Manganês

Nos estudos com mudas de castanheira, Corrêa (2013) também observou teores de P significativamente mais elevados no tratamento controle (1,1 g kg⁻¹) em relação ao com adubação completa (0,51 g kg⁻¹), porém semelhante à omissão de P (0,5 g kg⁻¹). Esse autor atribui que tal resultado seja efeito da diluição do P devido às maiores taxas de crescimento e produção de matéria seca, fato semelhantemente notado em outros estudos (Fernandes *et al.*, 2000; Santos *et al.*, 2008). Tal fato pode ser notado observando-se Tabela 20, em que os teores foliares de P são mais elevados sob ausência de P residual confirmando-se tal teoria. Visualmente, as folhas lançadas sem o P residual apresentam sintomas sugeridos por Camargos

et al. (2002) na omissão de P em mudas de *Bertholletia excelsa*, folhas com coloração bem esverdeadas e compridas (Figura 17).



Figura 17. Sintomas observados e descritos por Camargos *et al.* (2002) em plantas da dose 20 e 40 t ha⁻¹ de biocarvão na ausência de P residual.

Verificou-se comportamento linear (R^2 : 0,89) de decréscimo do P foliar proporcionalmente ao aumento do biocarvão ao substrato e do aumento de P (Figura 18 A e B). Observou-se da mesma forma forte correlação negativa (r : -0,94) entre o aumento das doses de biocarvão e o P foliar (Tabela 22). Ao associar concentrações e biocarvão (0 - 35%) e doses de fósforo (0 - 400 mg dm⁻³), Lima *et al.* (2016) não observaram diferenças significativas para o P foliar em mudas de angico, assim como Moline *et al.* (2015) para os teores foliares de P em laranja Pêra com aplicação de biocarvão (1,64 g kg⁻¹), biocarvão + NPK (1,82 g kg⁻¹) e o controle (1,93 g kg⁻¹).

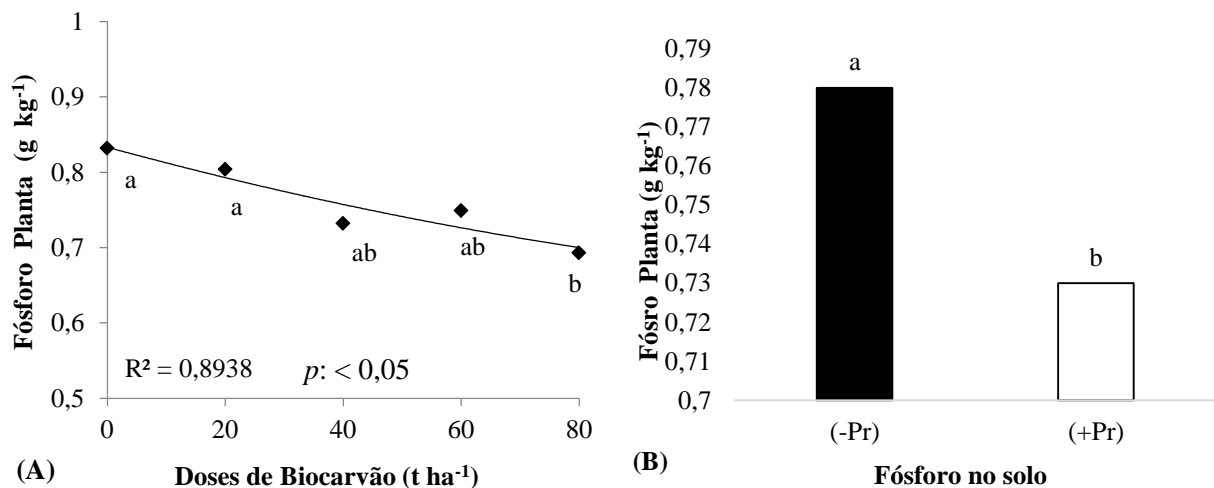


Figura 18. Teores foliares de fósforo em mudas de *Bertholletia excelsa* em função doses das de biocarvão (A) e da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (B). As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os teores foliares de K, observou-se diferenças significativas nas doses 40, 60 e 80 t ha⁻¹, com valores menores sem P residual nas doses intermediárias e maiores sob P residual na máxima, respectivamente. Em ambos os casos, os teores de K nas folhas na dose de 0 t ha⁻¹

podem ser em decorrência dos menores teores desse nutriente no solo, 0,52 e 0,41 cmolc dm⁻³ sem e com P residual (Tabela 21). Os valores gerais entre 11,96 e 14,76 g kg⁻¹ estão dentro da faixa dos encontrados por Corrêa (2013), entre 2,5 e 15,4 g kg⁻¹, com valores observados na presença da adubação fosfatada entre 10,6 e 15,4 g kg⁻¹ em mudas de castanheira, corroborando com os encontrados neste trabalho. Os teores encontrados estão acima dos obtidos por Gomes (2012), entre 6,37 e 11,47 g kg⁻¹ para essa mesma espécie.

Tabela 21. Média dos teores foliares de Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio em mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
	Fósforo Planta (g kg ⁻¹)				
-Pr	0,89 aA	0,75 abcA	0,85 abA	0,70 cA	0,72 bcA
+Pr	0,76 abB	0,85 aA	0,60 cB	0,79 abA	0,65 bcA
	Potássio Planta (g kg ⁻¹)				
-Pr	11,96 bA	11,96 aA	14,66 aA	14,24 aA	12,24 bB
+Pr	12,24 bA	14,76 aA	12,23 bB	12,18 bB	14,28 aA
	Cálcio Planta (g kg ⁻¹)				
-Pr	4,86 aB	4,89 aA	3,46 bB	5,10 aA	4,94 aA
+Pr	5,89 aA	4,17 bB	5,59 aA	5,28 aA	5,12 aA
	Magnésio Planta (g kg ⁻¹)				
-Pr	1,85 abA	1,27 cB	1,65 bA	2,02 aA	1,93 abA
+Pr	1,56 bB	1,70 bA	1,64 bA	2,24 aA	1,88 bA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

Tabela 22. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (BC) e os elementos do solo e planta para produção de mudas de *Bertholletia excelsa*.

	Elementos Planta								
	BC	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn
Solo	BC	----	ns	-0,94*	ns	ns	ns	ns	ns
	N	----	-0,88*	-0,94*	ns	ns	ns	ns	ns
	P	----	----	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	K	----	----	----	ns	ns	ns	ns	ns
	Ca	----	----	----	----	ns	ns	ns	ns
	Mg	----	----	----	----	----	ns	ns	ns
	Fe	----	----	----	----	----	----	ns	ns
	Zn	----	----	----	----	----	----	----	ns
	Mn	----	----	----	----	----	----	----	----

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns} Não Significativo pelo Teste t de probabilidade. Informa-se que as correlações são lineares.

Em relação às doses de biocarvão e os teores foliares de K, verificou-se incremento até 20 t ha⁻¹ com posterior decréscimo com o aumento das doses (Figura 19 A). Foi observado por Lima *et al.* (2016) acréscimos substanciais de K foliar até 20% v/v de biocarvão no substrato, encontrados menores teores foliares também na concentração de 0% v/v. Estes mesmos autores também não observaram incremento dos teores foliares de K com a adição isolada de biocarvão. Considerando que para espécies florestais a média necessária para promoção do crescimento vegetal seja em torno de 10 g kg⁻¹ (Kerbaux, 2004), todas as plantas apresentaram teores acima dos adequados.

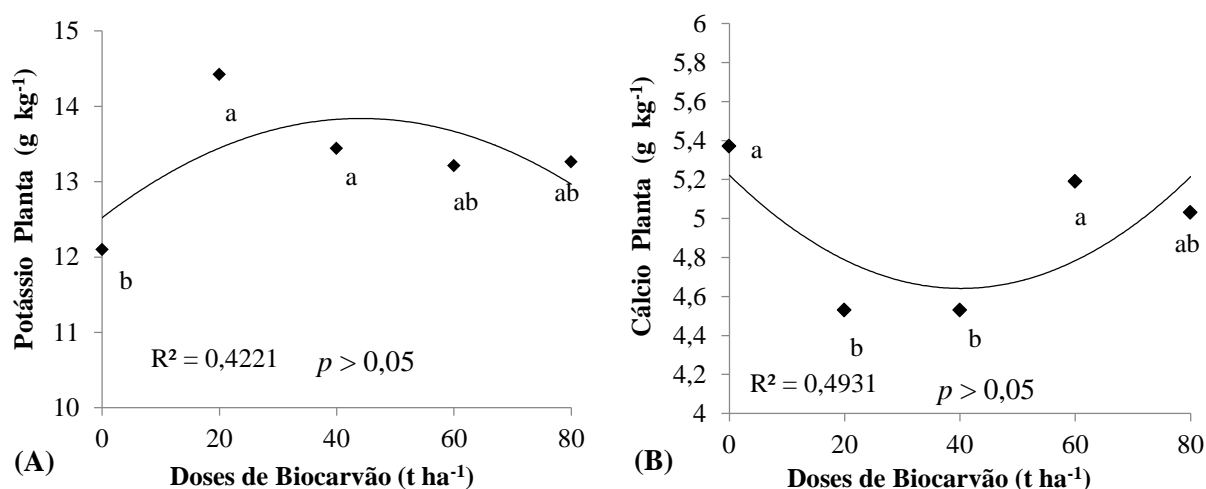


Figura 19. Teores foliares de Potássio (A) e Cálcio (B) em mudas de *Bertholletia excelsa* em função doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nos teores foliares de Ca, observou-se interação significativa para biocarvão e fósforo residual apenas nas doses abaixo de 40 t ha⁻¹ de biocarvão, obtendo-se maiores teores respectivamente sob P residual nas doses 0 e 40 t ha⁻¹ e sem P residual na dose 20 t ha⁻¹ (Tabela 21). Em termos gerais, o aumento do cálcio disponível no solo em relação às doses de biocarvão não influenciaram o respectivo aumento dos teores foliares (Figura 19 B; Figura 20 B). Embora a adsorção de cátions como o K e o Ca seja característica inerente ao biocarvão (Lehmann 2007; Carvalho *et al.*, 2014), tal efeito não se relaciona diretamente com o aumento da eficiência do uso de tais nutrientes pela planta (Lima *et al.*, 2016). Os teores de 3,42 a 5,89 g kg⁻¹ de Ca encontrados são similares aos obtidos por Corrêa (2013) sob restrição de P (3,9 g kg⁻¹) e adubação completa (3,9 g kg⁻¹). Em mudas de Acariquara, Souza (2006) encontrou valores de 3,97 g kg⁻¹ para adubação com P+ macronutrientes e 3,21 para o controle. Assim como nestes trabalhos, o P parece ter influenciado significativamente a absorção de Ca pelas mudas de *Bertholletia excelsa* (Figura 20 B). Associando-se biocarvão com P, Lima *et al.* (2016)

observaram aumento da concentração desse nutriente em mudas de angico, fato corroborado neste estudo.

Nos teores de Mg, verificou-se diferença significativa somente nas doses de 0 e 20 t ha⁻¹ em relação a ausência ou presença de P residual, em ambos os casos, obteve-se maiores concentrações desse nutriente na dose de 60 t ha⁻¹ (Tabela 21; Figura 20 A). A presença de P residual no substrato parece não ter influenciado os teores desse nutriente na planta, fato semelhantemente observado por Corrêa (2013) sob restrição de P (1,7 b g kg⁻¹) e adubação completa (1,4 g kg⁻¹) em mudas de castanheira. Observando os altos teores de K nas mudas, principalmente em doses intermediarias de biocarvão, pode-se sugerir que o antagonismo promovido por esse nutriente ao Ca e o Mg tenha desfavorecido a absorção destes (Malavolta *et al.*, 1997; Vitti *et al.*, 2006). Souza (2006) também não observou diferenças significativas desse nutriente em mudas de Acariquara com adubação de P + macronutrientes (1,07 g kg⁻¹) e o controle (1,46 g kg⁻¹)

Em geral, o aumento do Mg foliar com o aumento das doses de biocarvão foi possivelmente promovida pelo aumento da disponibilidade desse nutriente no solo e respectivamente pela redução da acidez e o favorecimento da sua absorção pelas plantas (Lehmann, 2007; Carvalho *et al.*, 2014) (Figura 20). Entretanto, Lima *et al.* (2016) observou que o aumento do Mg foliar não refletiu essencialmente na qualidade final das mudas de angico, fato corroborado neste estudo.

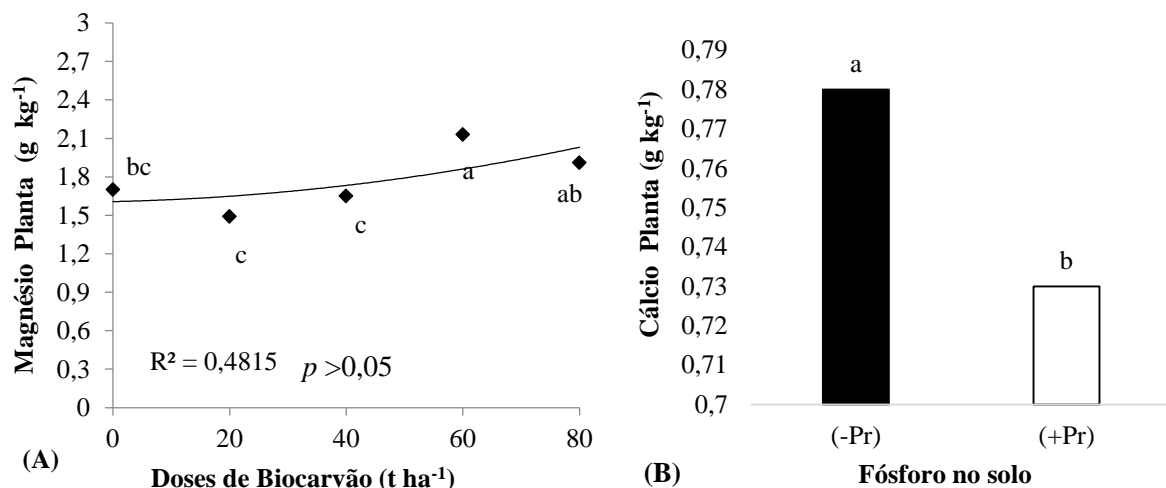


Figura 20. Teores foliares de magnésio em função doses de biocarvão (A) e teores foliares de cálcio em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (B) em mudas de *Bertholletia excelsa*. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para os teores foliares de Zn observou-se diferença significativa entre a presença e ausência de P apenas na dose de 0 e 80 t ha⁻¹ de biocarvão, com valores mais elevados sem P residual em ambas as doses (Tabela 23; Figura 21 A). Em termos gerais, os menores teores de Zn

observados na presença de P residual podem refletir a diminuição dos teores de zinco foliar pelo aumento da disponibilidade de P no solo, e conseqüentemente a formação de fosfatos de Zinco de baixa solubilidade (Figura 21 B) (Biasioli, 2003; Gonçalves *et al.*, 2005; Dechen e Nachtigall, 2006).

Os teores obtidos entre 12,3 e 21,3 mg kg⁻¹ se encontram dentro ou entre da faixa demandada pelas plantas (entre 15 e 30 mg kg⁻¹) (Kerbaudy, 2004) porém abaixo dos 25 mg kg⁻¹ sugeridos por Dechen e Nachtigall (2006). Esses valores ficaram abaixo dos encontrados por Corrêa (2013), entre 21 e 36,7 mg kg⁻¹, sendo verificados valores de 25,1 sob adubação completa para mudas de castanheira. Os teores obtidos por Gomes (2012) (entre 15,25 e 18,33 mg kg⁻¹) são similares aos verificados nesse estudo e, segundo esse autor, esses não foram limitantes ao crescimento.

Tabela 23. Média dos teores foliares de zinco e magnésio em mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão (BC) na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

	Doses de biocarvão (t ha ⁻¹)				
	0	20	40	60	80
Zinco Planta (mg kg ⁻¹)					
-Pr	21,3 aA	15,6 bcA	12,3 cA	15,6 bcA	16,0 bA
+Pr	13,6 aB	16,0 aA	13,3 aA	15,3 aA	13,0 aA
Manganês Planta (mg kg ⁻¹)					
-Pr	29,6 bcA	33,3 abcA	28,6 cA	36,0 abB	38,3 aA
+Pr	34,3 bA	27,0 cB	32,3 bcA	42,6 aA	37,0 abA

As médias seguidas pelas mesmas letras maiúsculas nas colunas e minúsculas nas linhas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5%

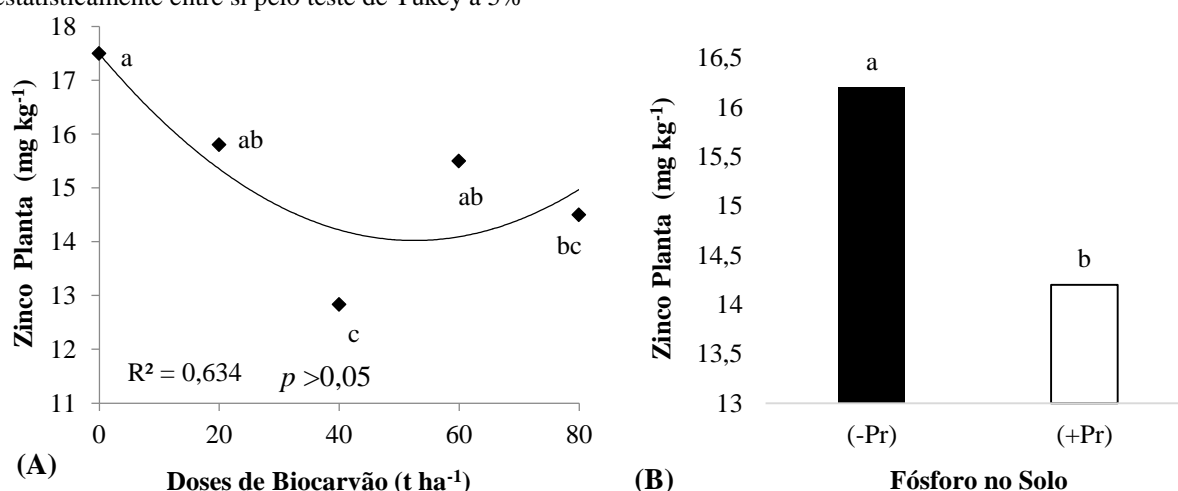
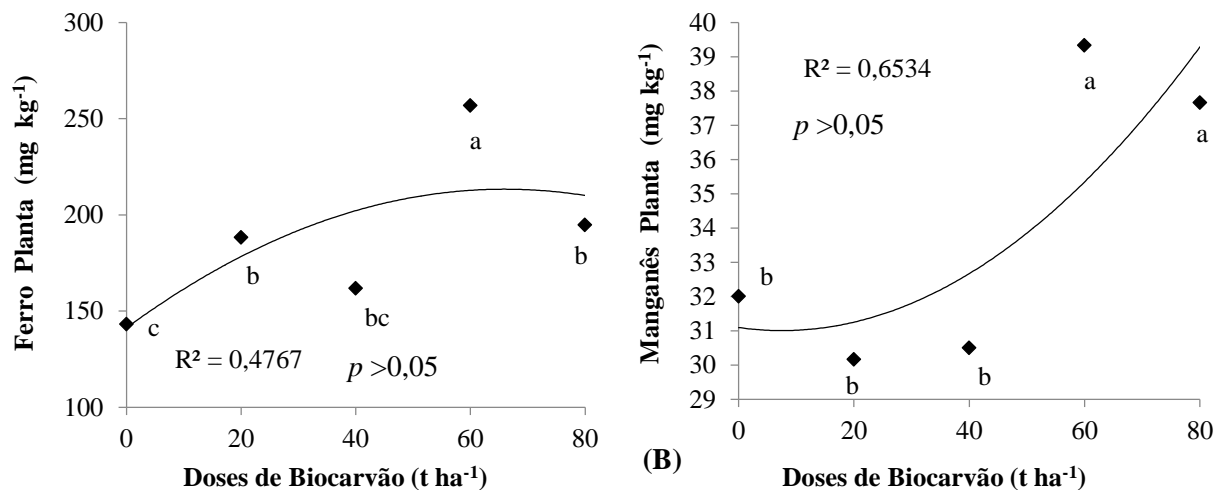


Figura 21. Teores foliares de Zinco (A) em mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação aos teores de Mn, observou-se diferença significativa entre a presença e ausência de P residual apenas na dose 20 e 60 t ha⁻¹, com teores significativamente maiores sem e com P residual, respectivamente (Tabela 23; Figura 22 B). Em geral, os maiores teores foliares

de Mn nas maiores doses e biocarvão respondem diretamente as concentrações elevadas desse nutriente no solo em tais condições. Semelhantemente ao observado para o Zn, no aumento da disponibilidade de P e redução da acidez a absorção desse micronutriente decresce devido a formação de compostos de baixa solubilidade (Oliveira Jr *et al.*, 2000; Roque *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2006).

De acordo com Dechen e Nachtigall (2006) os teores foliares adequados de Mn devem estar acima de 20 mg kg⁻¹ nas plantas, assim verificados neste estudo (entre 27,0 e 42,6 mg kg⁻¹) sugerindo-se não limitação desse nutriente. Sob adubação com P mais macronutrientes, Souza (2006) verificou 53,0 mg kg⁻¹ e de 120,0 mg kg⁻¹ no controle em mudas de Acariquara. Para mudas de castanheira, Correa (2013) verificou teores de 10,2 mg kg⁻¹ de Mn sob adubação completa e 11,7 mg kg⁻¹ sob restrição de P e, apesar de ser valores dos obtidos nesse trabalho, observa-se comportamento similar a restrição de P culminando em teores mais elevados.



(A) a 22. Teores foliares de Ferro (A) e Manganês (B) em mudas de *Bertholletia excelsa* em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação as doses de biocarvão, observou-se maiores teores de Fe na dose de 60t ha⁻¹ e menores na dose 0 t ha⁻¹ (Figura 22 A). De acordo com Van Zwieten *et al.* (2010), os teores de Fe foliares podem ser proporcionais aos teores desse elemento no biocarvão, fato observado aqui devido aos teores de Fe (575 mg kg⁻¹). Os valores gerais obtidos de Fe foliar entre 135,3 e 273,5 mg kg⁻¹ estão acima dos obtidos por Corrêa (2013), entre 37,8 e 65,9 mg kg⁻¹ em mudas de castanheira. Já Gomes (2012) para essa espécie verificaram valores ente 121,7 e 182,7 mg kg⁻¹. Assim, como verificado por este último autor, os teores de Fe ficaram muito acima dos considerados adequados de 100 mg kg⁻¹ (Kerbaui, 2004). É relevante destacar que de acordo com os níveis altos de Fe do solo, entre 90,24 e 137,5 mg kg⁻¹ corroboram os altos níveis foliares e indicam a não limitação desse nutriente.

Tabela 24. Faixa de teores de nutrientes encontrados na literatura em mudas de *Bertholletia excelsa* sob fertilização.

N	P	K	Ca	Mg	Fe	Zn	Mn
-----mg kg ⁻¹ -----				-----g kg ⁻¹ -----			
11,0-20,6	0,6-1,3	5,6-14,2	3,9-12,2	0,7-2,8	52,0-278,5	14,9-26,7	10,2-25,8

Fontes: Corrêa (2013), Gomes (2012), Ferreira *et al.* (2015).

Com exceção dos teores de N e de Mn, os outros teores estão de acordo com outros trabalhos com adubação de mudas de castanheira, incluindo a adubação fosfatada, indicando que a ausência de P não necessariamente afeta a nutrição de uma espécie rústica como a *Bertholletia excelsa* (Tabela 24).

5.3 Biometria

Todas as variáveis biométricas estudadas apresentaram respostas significativas em pelo menos um dos fatores de variação analisados (biocarvão, adubação fosfatada residual e a interação destes) (Tabela 25).

Tabela 25. Resumo da análise de variância (ANOVA) para os efeitos de biocarvão (BC), fósforo residual (Pr) e a interação destes no desenvolvimento de mudas de *Bertolletia excelsa*.

DAT	Variáveis											
	Altura das Plantas				Diâmetro do Coleto				Número de Folhas			
	Fatores				de				Variação			
Bc	Pr	Bc x Pr	CV%	Bc	Pr	Bc x Pr	CV%	Bc	Pr	Bc x Pr	CV%	
30	*	ns	ns	11.7	ns	ns	ns	10.2	ns	ns	ns	71.8
60	*	ns	ns	11.2	ns	ns	ns	9.8	ns	ns	ns	71.8
90	**	*	ns	10.1	ns	ns	ns	16.0	ns	ns	ns	74.1
120	**	*	*	9.7	*	ns	*	19.2	ns	**	ns	60.9
150	ns	*	**	11.0	*	ns	*	21.4	**	ns	ns	44.2
Var.	Fatores de Variação				Variáveis				Fatores de Variação			
Bc	Pr	Bc x Pr	CV%					Bc	Pr	Bc x Pr	CV%	
CA _H	ns	ns	*	49.0	Relação H/D				**	ns	ns	21.5
TCA _H	ns	ns	*	49.0	MSPA				**	ns	**	39.5
CA _D	*	ns	*	50.6	MSR				**	ns	**	32.2
TCA _D	*	ns	*	50.6	MST				**	ns	**	34.6
NFF	ns	ns	ns	22.6	Relação PA/R				**	*	**	12.2
GF	**	ns	ns	34.5	IQD				**	ns	**	43.0
VTR	*	ns	*	22,0	CRP				**	ns	**	7.3

** e * significativo a 1 e 5% pelo teste de Tukey, respectivamente; ns: não significativo; Var.: Variáveis; DAT: Dias após transplantio; Bc: biochar; Pr : fósforo residual; Bc x Pr : Interação biochar x fósforo residual; CV: Coeficiente de Variação; CA_H e TCA_H: Crescimento Absoluto e Taxa de Crescimento Absoluto para altura de plantas (H), respectivamente; CA_D e TCA_D: Crescimento Absoluto e Taxa de Crescimento Absoluto para diâmetro do coleto (D), respectivamente; FF: Numero de Folhas Finais; GF: Ganho Foliar; CRP: Comprimento da Raiz Principal; VTR: Volume Total de Raízes.

Das variáveis avaliadas durante o período experimental (180 dias), apenas a altura de planta (AP) e diâmetro do coleto (DC) das mudas de *Bertholletia excelsa* foram

significativamente influenciadas pela interação dos fatores, porém somente aos 120 e 150 dias após o transplante (DAT) (Tabela 25). Analisando o desenvolvimento em AP e DC é possível notar similaridade no crescimento das mudas de *B. excelsa* na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual. Em ambas as variáveis houve comportamento quadrático a partir do terceiro mês de avaliação (90 DAT). Tal efeito também foi reportado por Corrêa (2013), porém a partir do sétimo mês de avaliação e de forma linear. Sob ausência de P, é importante destacar o aumento quadrático do DC em longo dos meses em doses abaixo de 40 t ha⁻¹. Em ambas as condições (-Pr e +Pr) o desenvolvimento do DC foi comprometido por doses acima de 40 t ha⁻¹ (Figura 23; Tabela 26).

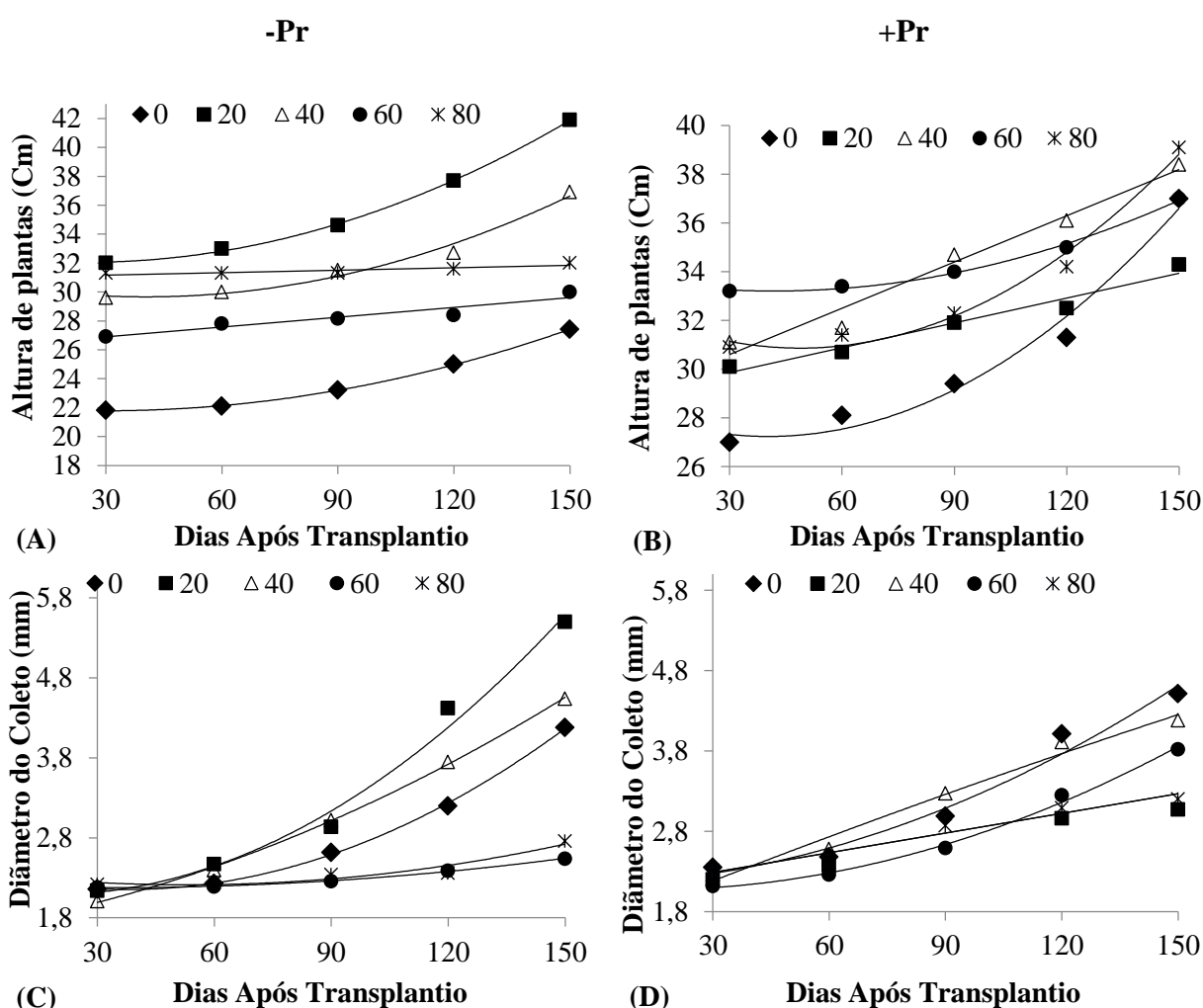


Figura 23. Desenvolvimento de altura de plantas (A e B) e diâmetro do coleto (C e D) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

Tabela 26. Análise de regressão da altura de plantas e diâmetro do coleto de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual.

BC		Altura de Plantas			
t ha ⁻¹		-Pr		+Pr	
0	$y = 0,0004x^2 - 0,023x + 22,12$	$R^2=0,99^{**}$		$y = 0,0008x^2 - 0,0627x + 28,5$	$R^2=0,96^*$
20	$y = 0,0006x^2 - 0,0312x + 32,44$	$R^2=0,99^{**}$		$y = 0,034x + 28,84$	$R^2=0,96^{**}$
40	$y = 0,0006x^2 - 0,0466x + 30,6$	$R^2=0,98^{**}$		$y = 0,0633x + 28,7$	$R^2=0,97^{**}$
60	$y = 0,0227x + 26,21$	$R^2=0,90^*$		$y = 0,0003x^2 - 0,0265x + 33,76$	$R^2=0,99^{**}$
80	$y = 0,0057x + 30,99$	$R^2=0,76^{ns}$		$y = 0,0008x^2 - 0,076x + 32,72$	$R^2=0,98^{**}$
BC		Diâmetro do Coleto			
t ha ⁻¹		-Pr		+Pr	
0	$y = 0,0002x^2 - 0,012x + 2,38$	$R^2=0,99^{**}$		$y = 0,0082x + 2,043$	$R^2=0,95^*$
20	$y = 0,0002x^2 - 0,007x + 2,148$	$R^2=0,98^*$		$y = 1E-04x^2 + 0,0016x + 2,138$	$R^2=0,97^*$
40	$y = 7E-05x^2 + 0,0084x + 1,676$	$R^2=0,99^{**}$		$y = -1E-05x^2 + 0,0194x + 1,61$	$R^2=0,97^*$
60	$y = 3E-05x^2 - 0,0018x + 2,206$	$R^2=0,99^{**}$		$y = 9E-05x^2 - 0,0024x + 2,086$	$R^2=0,99^{**}$
80	$y = 5E-05x^2 - 0,0057x + 2,364$	$R^2=0,92^*$		$y = 0,0082x + 2,043$	$R^2=0,95^*$

Tais fatores tornam-se mais claros ao se avaliar a taxa de crescimento absoluto (TCA) e o crescimento absoluto (CA) em diâmetro e altura das mudas de *Bertholletia excelsa* (Figura 23).

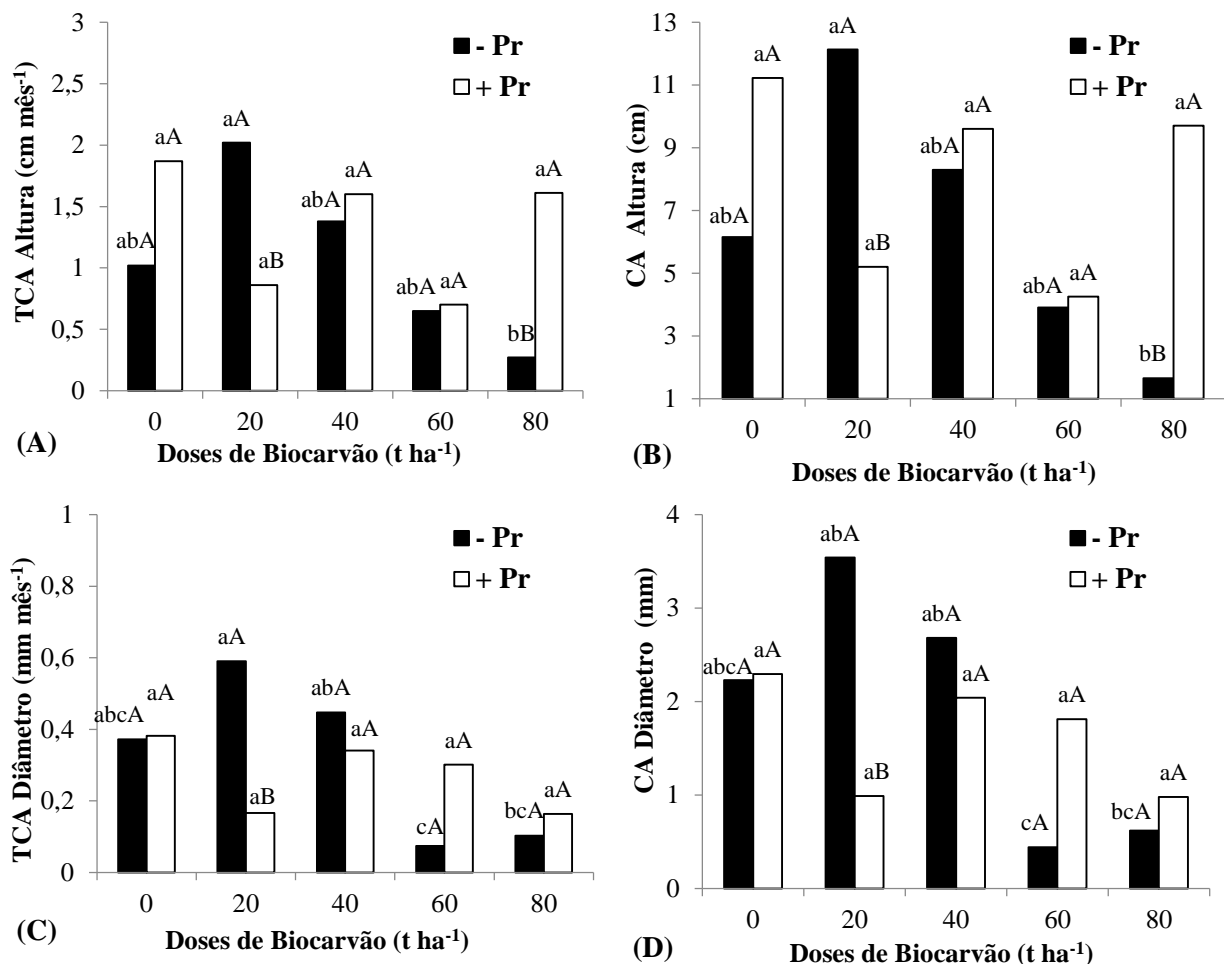


Figura 24. Taxa de crescimento absoluto (TCA) e crescimento absoluto (CA) em altura (A e B) e em diâmetro (C e D) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

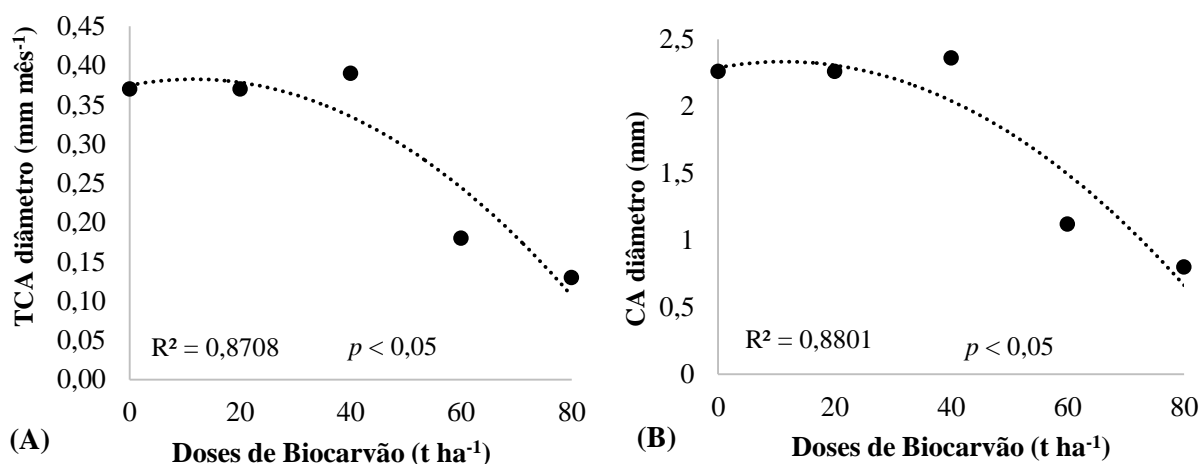


Figura 25. Taxa de crescimento absoluto (A) e crescimento absoluto em diâmetro de mudas de *Bertholletia excelsa* em função em função das doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Verificou-se TCA em altura mais elevado para as mudas de castanheira para todas as doses de BC e +Pr, com exceção na dose de 20 t ha⁻¹. Tal comportamento seguiu de forma idêntica no CA (Figura 24 A e B). Para a TCA em diâmetro obteve-se o maior valor na dose 20 t ha⁻¹ corroborando com os dados de altura, visto sua correlação positiva ($r=0,94$) refletindo de mesma maneira no CA em diâmetro (Figura 24 C e D; Figura 25 A e B). Em todos os casos, não se observou diferença significativa quando as mudas foram submetidas aos substratos com P residual, no entanto, sob condição contrária notou-se decréscimo após 20 t ha⁻¹. A TCA média em altura (1,32 cm mês⁻¹) e diâmetro (0,23 mm mês⁻¹) sob P residual estão abaixo dos encontrados por Gomes (2012) (3,3 cm mês⁻¹ e 1,0 mm mês⁻¹) e Corrêa (2013) (5,0 cm mês⁻¹ e 0,72 mm mês⁻¹) e compatíveis aos encontrados por Ferreira *et al.* (2012) (1,36 cm mês⁻¹ e 0,30 mm mês⁻¹) sob condições de adubação e tempo de experimentação semelhantes.

Ao analisar a altura e o diâmetro das mudas de castanheira ao final do experimento, não foi constatada correlação significativa entre as doses de fósforo no solo e o comportamento dessas variáveis (Tabela 27 e 28). Em ambas as variáveis, os maiores valores verificados foram encontrados na dose 20 t ha⁻¹. Não foi percebida diferença significativa entre as médias de AP e DC sob presença de adubação fosfatada residual (+Pr). Sem o P residual (-Pr) notou-se decréscimo com adições acima de 20 t ha⁻¹, tanto para AP quando para DC (Figura 26 A e B).

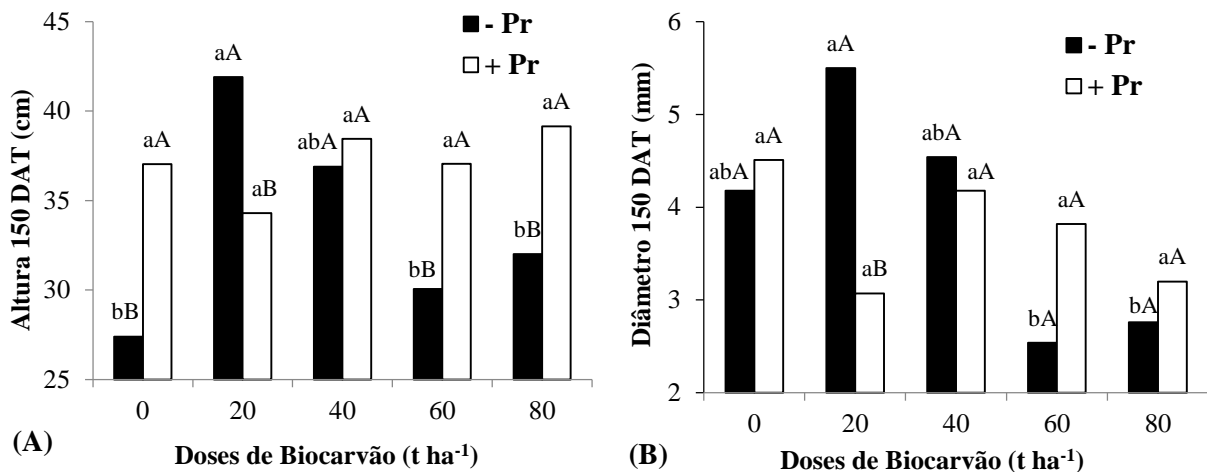


Figura 26. Altura de Plantas e Diâmetro de Coleto aos 150(B) dias após o transplântio (DAT) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

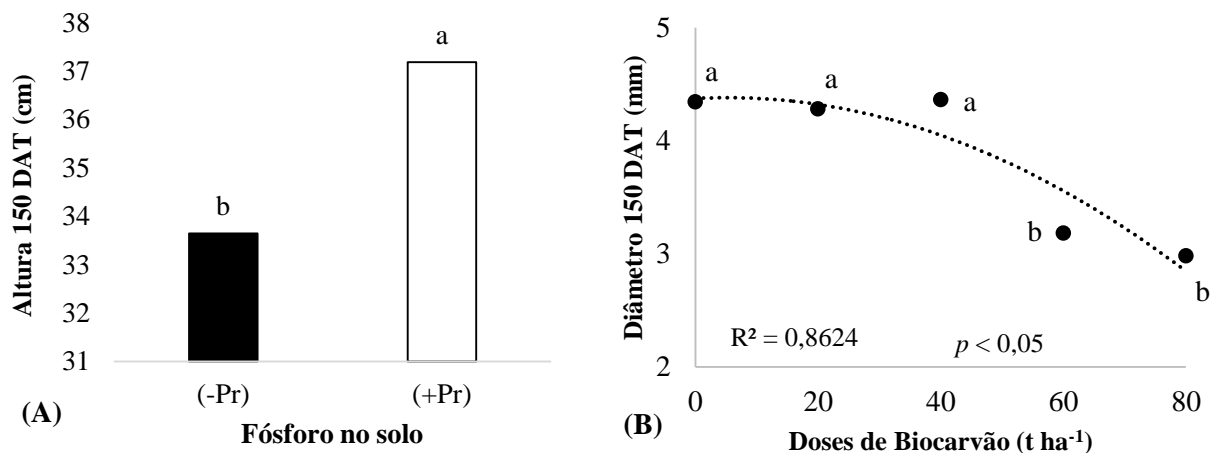


Figura 27. Altura aos 150 dias após transplântio (DAT) em função em função da ausência (-Pr) e presença (+Pr) de fósforo residual (A) e diâmetro aos 150 DAT em função em função das doses de biocarvão de mudas de *Bertholletia excelsa*. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Em relação à AP, Lima *et al.* (2016) não averiguaram diferenças para AP após 120 dias de plantio em mudas de angico na interação de P (0, 50, 100, 200 e 400 mg dm⁻³) e distintas concentrações de biocarvão de eucalipto (0, 5, 10, 20 e 35%), indicando baixo requerimento nutricional da espécie. Embora mudas de castanheira apresentem característica semelhante até 2 anos de idade devido sua amêndoa rica em nutrientes (Ferreira *et al.*, 2006), foi possível apurar que a nutrição fosfatada favoreceu a AP (Figura 25 A; Figura 27 A). Observou-se decréscimo de 39,2% e 23,4% do DC após a dose de 40 t ha⁻¹, respectivamente para - Pr e +Pr (Figura 25 B; Figura 27 B). Tal comportamento do DC corrobora com os obtidos por Simões *et al.* (2015) e Nunes (2010), no qual observaram valores elevados para essa variável na ausência de fertilização

do substrato ou em doses baixas de biocarvão na produção de mudas de castanheira, sugerindo ser característica de adaptação da espécie. Entretanto, os valores estáveis dessa variável sob P residual sugerem que a castanheira responde a adubação fosfatada.

Em geral, a ausência de proporcionalidade do aumento dos valores de AP e DC com o aumento das doses de biocarvão foram reportadas por Rezende *et al.* (2016) para composição do substrato na produção de mudas de Teca (*Tectona grandis*), argumentando que as adições de doses crescentes ao substrato podem afetar a macroporosidade podendo prejudicar o desenvolvimento das plantas. Tanto a AP quando o DC são utilizados na avaliação de mudas florestais, entretanto, Fonseca *et al.* (2002) advertem que tais variáveis não podem ser consideradas isoladas para avaliar a qualidade das mudas, visto o risco de se selecionar mudas mais altas no entanto fracas. O efeito do biocarvão sobre essas variáveis, dependem diretamente da espécie avaliada, podendo ser ausente (Zanetti *et al.*, 2003, Petter e Madari, 2012) ou benéfico (Kwapinski *et al.*, 2010; Dharmakeerthi *et al.*, 2012).

A AP média das mudas sob +Pr (36,3 cm) está acima da encontrada por Simões *et al.* (2015) (31,39 cm) aos 150 DAT, por Santos *et al.* (2013) (24,7cm) aos 12 meses de idade, e abaixo da obtida por Gomes (2012) (45,4 cm) e por (42,6 cm) aos 12 meses de idade sob condições de adubação completa para mudas de *Bertholletia excelsa*. Já Nunes (2010), avaliando o efeito de concentrações de biocarvão no substrato (0-70 % v\v) e adubação básica fosfatada (0,2 kg m⁻³ de substrato) em mudas de castanheira, encontrou valores de 26,2 cm. O DC médio sob mesmas condições (3,75 mm), ficou abaixo do encontrado por Simões *et al.* (2015) (4,05 mm), Santos *et al.* (2013) (6,6 mm) e Albuquerque *et al.* (2015) (7,7 mm) e acima do encontrado por Nunes (2010) (4,4 mm) para mudas de *Bertholletia excelsa*.

O número de folhas (NF) não apresentou significância tanto para a interação, encontrando-se incrementos mensais variando de 1,4 a 1,8 folhas por mês. Pode-se observar que a condição de -Pr ou +Pr ou as doses de biocarvão não tiveram correlação significativa para essas variáveis (Tabela 27 e 28). No último mês avaliado encontrou-se o maior número de folhas na dose 40 t ha⁻¹ e o menor em 80 t ha⁻¹ (Figura 28 A). De acordo com Taiz e Zeiger (2004), o NF reflete nas demais variáveis fisiológicas das plantas, como altura e diâmetro, fato confirmado neste estudo em doses acima de 40 t ha⁻¹ dada a correlação significativa desses ($r=0,94$ e $0,97$) (Tabela 27 e 28).

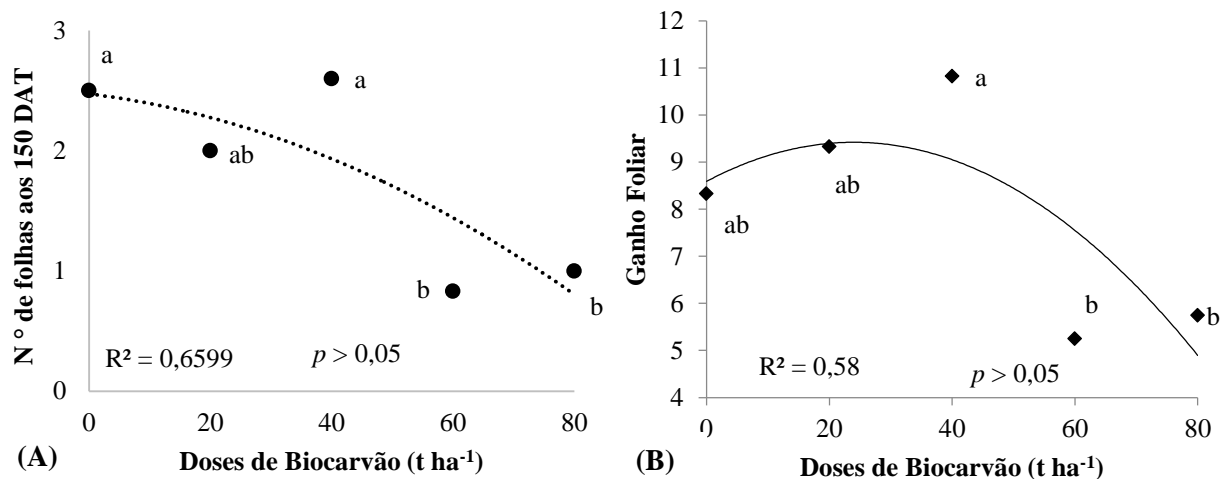


Figura 28. Número de folhas aos 150 dias após transplântio (DAT) (A) e ganho foliar (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O número de folhas finais (NFF) não apresentou significância para a interação ou fatores isolados, ficando a média entre 11,33 e 17,33 folhas (Tabela 25). Tais valores são similares aos obtidos por Simões *et al.* (2015) para mudas de *Bertholletia excelsa* sob fertilização (entre 11,6 e 15,7). O ganho foliar (GF) apresentou significância apenas em relação as doses de biocarvão, com acréscimos até 40 t ha⁻¹ (Figura 28 B). Foi notado por Souchie *et al.* (2011), estudando doses de biocarvão no substrato para produção de mudas de carvoeiro (*Tachi vulgaris*), que o aumento das doses favorece a umidade do substrato promovendo maior ganho foliar, premissa não constatada por Damaceno *et al.* (2016), ao qual encontraram maior perda acumulada de água nas doses 60 e 80 t ha⁻¹ após 144 horas de avaliação.

Obteve-se efeito significativo na relação altura/diâmetro (H/D) apenas em função das doses de biocarvão, sendo significativamente proporcionais as doses ($p < 0,05$) (Tabela 25). De acordo com Bircherl *et al.* (1998), relações H/D acima de 10 determinam mudas de menor qualidade, assim a dose de até 40 t ha⁻¹ de biocarvão exprimiram relações consideradas ideais (Figura 29). Ao contrário do que foi constatado neste trabalho, Petter *et al.* (2012) observaram diminuição da relação H/D em função do aumento de biocarvão no substrato (0; 7,5; 15; 30 e 60% do v/v). A relação H/D média em função das doses de biocarvão no substrato até 40 t ha⁻¹ está próximo ao observado por Simões *et al.* (2015) (7,66) e diferentes dos observados por Santos *et al.* (2013) (3,7) para mudas de castanheira. Diferente dos valores recomendados para outras espécies florestais, como pinus (*Pinus taeda*), entre 5,4 e 8,1 (Carneiro, 1995) e paricá (*Schizolobium amazonicum*), entre 8,77 e 9,48 (Caione, 2012), para mudas de castanheira não há relação de valores considerada ideal (Simões *et al.*, 2015).

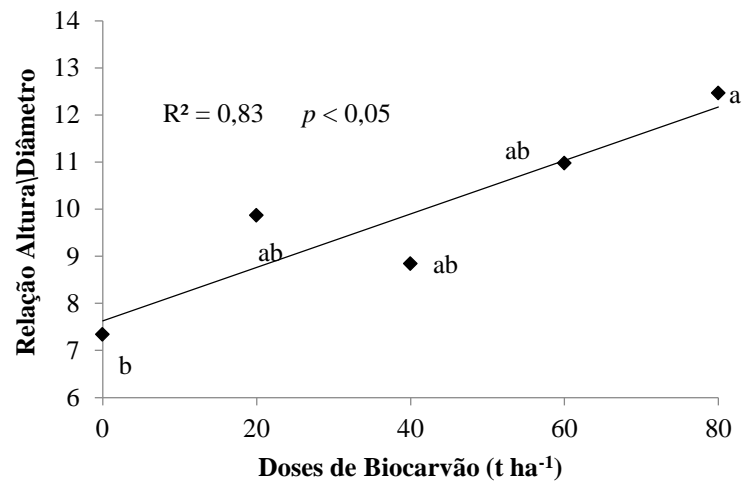


Figura 29. Relação altura/diâmetro (H/D) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Tabela 27. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (Bc) na ausência de P residual (-Pr) e os parâmetros biométricos de mudas de *Bertholletia excelsa*.

	BC	-Pr	AP	DC	NF	GF	NFF	AP\ DC	VTR	CRP	MSPA	MSR	MST	PA\R	CAA	CAD	TCAA	TCAD	IQD
BC	---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,95*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
-Pr		---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
AP			---	ns	ns	ns	0,95*	ns	0,95*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
DC				---	0,94*	0,93*	ns	ns	ns	ns	ns	0,92*	0,92*	0,92*	ns	0,99**	0,94*	0,99**	0,96**
NF					---	0,90*	ns	-0,91*	ns	ns	ns	ns	0,88*	0,97**	ns	0,97*	ns	0,95*	0,93*
GF						---	0,94*	ns	0,88*	ns	ns	0,99**	0,99**	0,88*	ns	0,94*	0,91*	0,94*	0,99**
NFF							---	ns	0,98**	ns	ns	0,96**	0,95*	ns	ns	ns	ns	ns	0,91*
AP\ DC								---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
VTR									---	ns	ns	0,91*	0,90*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CRP										---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
MSPA											---	ns	ns	ns	0,99**	ns	ns	ns	ns
MSR												---	0,99**	ns	ns	0,92*	0,90*	0,92*	0,98**
MST													---	ns	ns	0,93*	0,90*	0,92*	0,99**
PA\R														---	ns	0,93*	ns	0,92*	0,91*
CAA															---	ns	ns	ns	ns
CAD																---	0,94*	0,99**	0,96**
TCAA																	---	0,94*	0,92*
TCAD																		---	0,96**
IQD																			---

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns}Não Significativo pelo Teste t de probabilidade. Informa-se que as correlações são lineares.

Tabela 28. Correlação de Pearson entre as doses de biocarvão (Bc) na presença de P residual (+Pr) e os parâmetros biométricos de mudas de *Bertholletia excelsa*.

	BC	+Pr	AP	DC	NF	GF	NFF	AP\ DC	VTR	CRP	MSPA	MSR	MST	PA\R	CAA	CAD	TCAA	TCAD	IQD	
BC	---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,94*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
+Pr		---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
AP			---	0,88*	0,97**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,89*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
DC				---	ns	ns	ns	-0,97**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,97**	ns	0,98**	0,91*	
NF					---	0,95*	ns	ns	ns	ns	0,91*	0,95*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,95*	
GF						---	ns	ns	ns	ns	ns	0,93*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
NFF							---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
AP\DC								---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,98**	ns	-0,97**	-0,91*	
VTR									---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
CRP										---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
MSPA											---	0,97**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,98**	
MSR												---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,98**	
MST													---	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
PA\R														---	ns	ns	ns	ns	ns	
CAA															---	ns	0,99**	ns	ns	
CAD																---	ns	0,99**	ns	
TCAA																	---	ns	ns	
TCAD																		---	ns	
IQD																			---	ns

**Significativo a 1 % ($p < 0,01$), *Significativo a 5% ($0,01 \leq p < 0,05$) e ^{ns}Não Significativo pelo Teste t de probabilidade. Informa-se que as correlações são lineares.

Houve interação entre as doses de biocarvão e o P residual para variáveis matéria seca da parte aérea (MSPA), das raízes (MSR), total (MST) e a relação da MSPA/MSR (Tabela 25). Tanto para MSPA quanto para MSR não foram observados ganhos significativos e biomassa seca com o aumento da disponibilidade de fósforo (Figura 30 A e B). Em ambos os casos (-Pr e +Pr) a redução da biomassa seca nas doses acima de 40 t ha⁻¹ parece estar relacionada com a diminuição da disponibilidade de P, restringindo o ganho (Fageria, 2008) ou com a influência na macroporosidade do substrato, influenciando a exploração das raízes (Figura 31 A e B) (Rezende *et al.*, 2016).

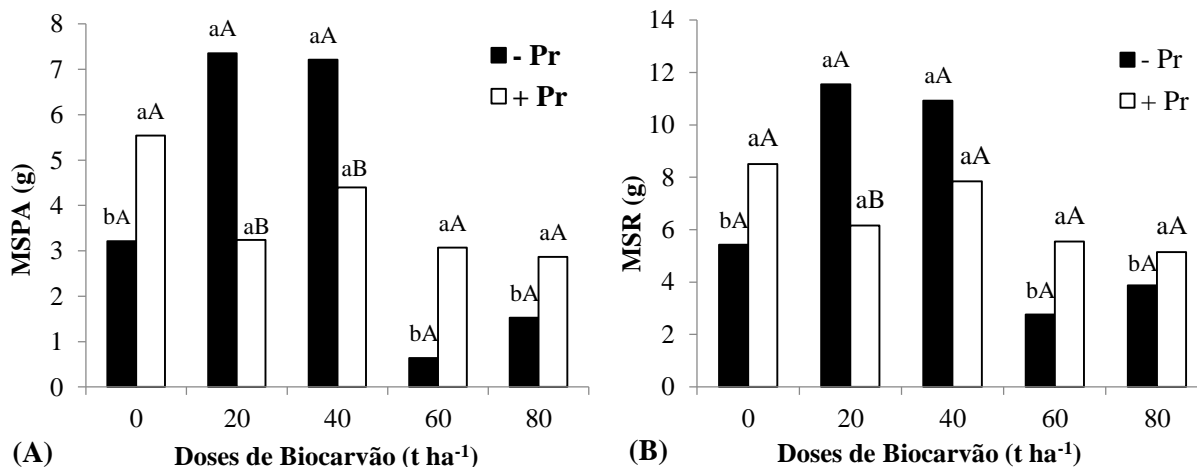


Figura 30. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (A) e das raízes (MSR) (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

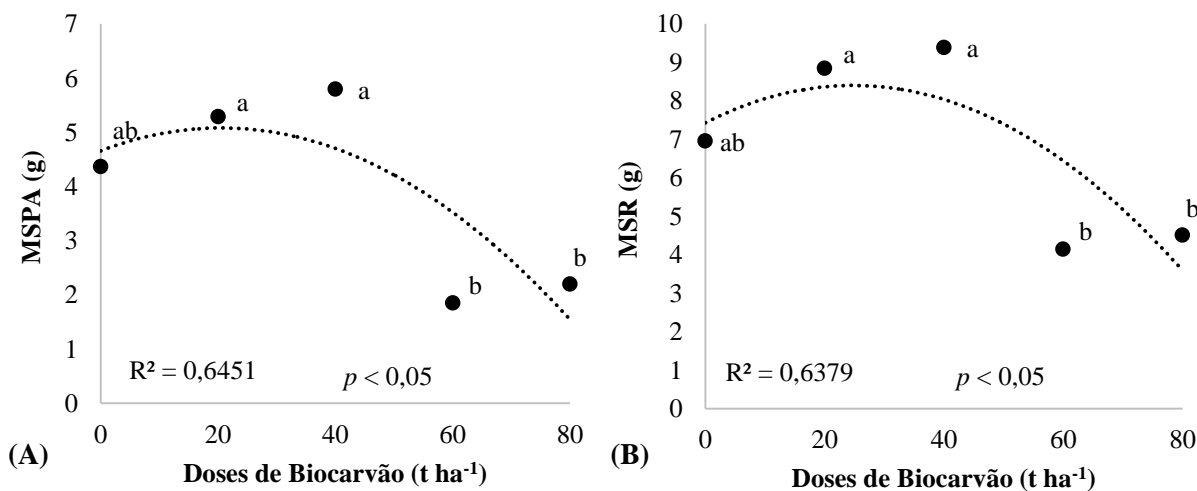


Figura 31. Matéria seca da parte aérea (MSPA) (A) e das raízes (MSR) (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Espécies amazônicas (Andiroba e Mogno) responderam positivamente a essas variáveis ao aumento da disponibilidade de P no solo (Neves *et al.*, 2004; Santos *et al.*, 2008), assim, subentende-se que a restrição do P diminuiu a produção de biomassa das mudas de castanheira. Estes resultados são compatíveis com os obtidos por Petter *et al.* (2012), que não verificaram ganhos de matéria seca dessas partes proporcionais ao aumento das concentrações de biocarvão no

substrato para formação de mudas de eucalipto. Os valores médios de MSPA sob +Pr (3,83 g) estão abaixo dos obtidos por Simões *et al.* (2015) (5,65 g) e por Santos *et al.* (2013) (7,5 g) e acima dos encontrados por Nunes (2010) (3,28 g) sob condições semelhantes de experimentação. O valor médio de MSR deste estudo (6,64 g) é semelhante ao obtido por Santos *et al.* (2013) (6,3) e abaixo dos obtidos por Nunes (2010) (8,11 g), no entanto acima do observado por Simões *et al.* (2015) (1,48 g), este último possivelmente por não considerar o peso da amêndoa como parte das raízes. Em geral, os maiores valores de MSR em comparação com a MSPA podem indicar baixa disponibilidade de P no solo, culminando no direcionamento dos fotoassimilados para o sistema radicular a fim de aumentar a área de exploração (Khamis *et al.*, 1990).

Para a matéria seca total (MST), verificou-se comportamento semelhante das sessões isoladas, em que na condição de +Pr as mudas não apresentaram distinção significativa em relação as nutridas com -Pr. Apurou-se ganhos expressivos nas doses 20 e 40 t ha⁻¹ com -Pr. Em ambos os casos, o efeito depressivo observado após a adição de 40 T ha⁻¹ pode ser efeito da menor disponibilidade de P obtidas nesse estudo (Figura 32 A; Figura 33 A).

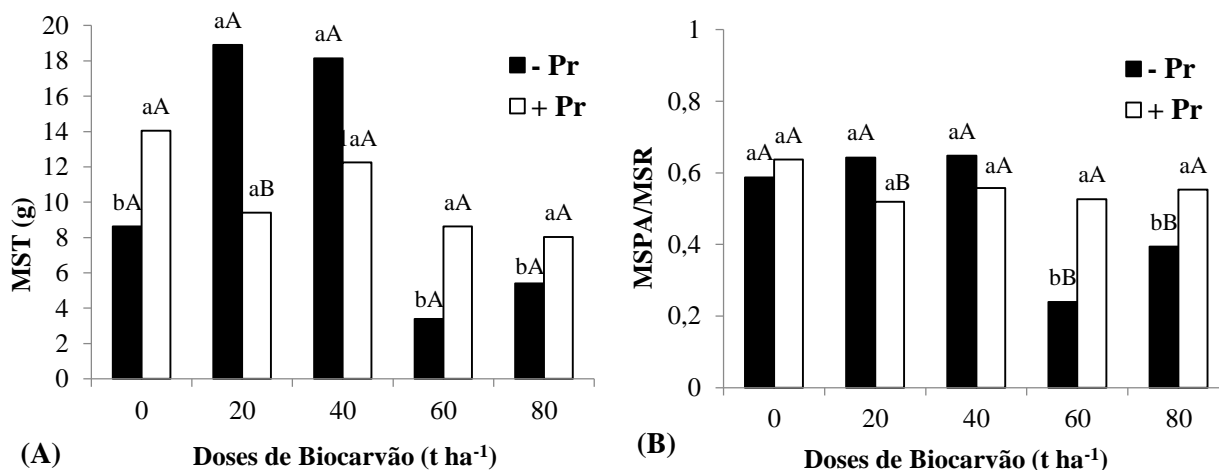


Figura 32. Matéria seca total (MST) (A) e relação MSPA/MSR (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

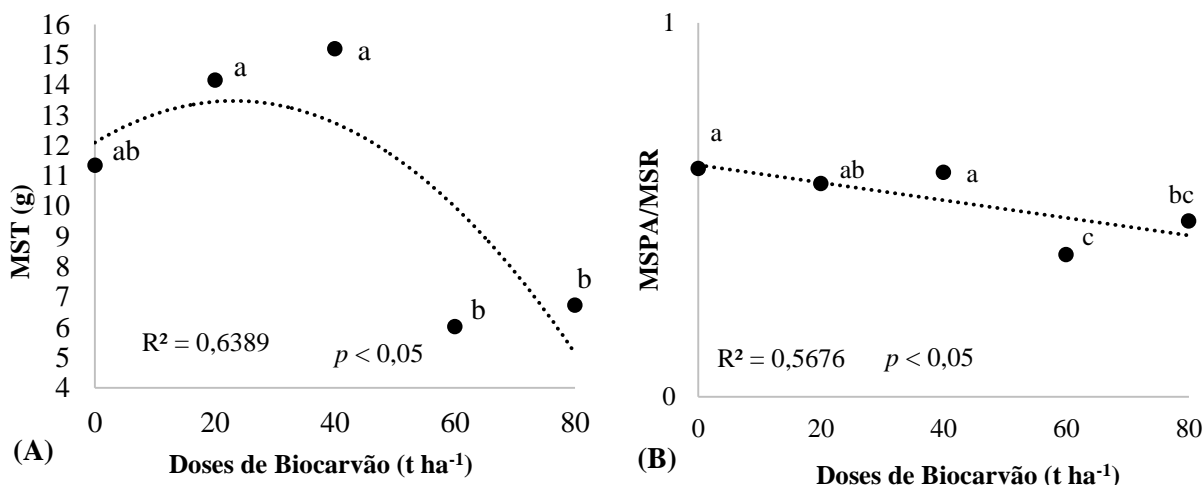


Figura 33. Matéria seca total (MST) (A) e relação MSPA/MSR (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Esses resultados corroboram com os obtidos por Dharmakeerthi *et al.* (2012), que encontraram maiores valores de biomassa seca total em concentrações de biocarvão até 2 % (v/v) no crescimento de mudas de *Hevea brasiliensis*. O valor médio de MST encontrados neste trabalho (10,47 g) está abaixo dos obtidos por Santos *et al.* (2013) (13,9 g), acima dos obtidos por Simões *et al.* (2015) (6,63 g) e semelhantes aos observados por Nunes (2010) (11,39 g) sob condições semelhantes a este trabalho.

Em decorrência dos valores mais estáveis de produção de biomassa seca (MSPA e MSR), não houve diferença significativa na relação MSPA/MSR com +Pr, independente da dose de biocarvão. Observaram-se relações significativamente mais elevadas na condição de +P, com exceção da dose de 20 t ha⁻¹ (Figura 32B; Figura 33 B). Em função do aumento das concentrações de biocarvão, Petter *et al.* (2012) observaram diminuição significativa dessa relação em mudas de Eucalipto (*Eucalyptus urophylla*), 2,52 e 1,70, respectivamente para concentrações de 0 e 30% v/v, indicando maior desenvolvimento da parte aérea. Segundo Gomes *et al.* (2004), valores abaixo de 1 dessa relação refletem maior desenvolvimento radicular, fato observado nesse estudo. Marschner (2012) atribuiu esse comportamento como mecanismo de espécies florestais a condições adversas como estratégia de expansão do sistema radicular em busca de água e nutrientes. Relação de 0,47 foi observado por Nunes (2010) em argissolo amazônico para 30% v/v de biocarvão no substrato e fertilização fosfatada básica para mudas de *Bertholletia excelsa*. De acordo com Caione *et al.* (2012), a relação ideal para mudas florestais deve ser próxima a 2,0, porém para castanheira não há indicação.

Para o comprimento da raiz principal (CRP), houve diferença significativa apenas na dose 0 t ha⁻¹ com maior valor para +Pr e em 20 t ha⁻¹ para -Pr (Figura 34 A). Considerando o efeito do P no desenvolvimento da raiz principal (0 t ha⁻¹), é possível verificar claramente que a maior disponibilidade de P favorece o crescimento radicular e, segundo Grant *et al.* (2001), o comprimento das raízes é diretamente proporcional ao P disponível. Com exceção do verificado para dose de 60 T ha⁻¹, observou-se proporcionalidade antes o aumento das doses de biocarvão no substrato e o comprimento das raízes (Figura 35 A). Esse resultado corrobora parcialmente com os obtidos por Cavalcante *et al.* (2011), que encontrou comportamento significativamente linear (R²: 0,97) pra CRP em função do aumento das doses de biocarvão no substrato (0, 5, 12,5, 25 e 50% v/v) para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. De acordo com Zanetti *et al.* (2003), a mistura do biocarvão ao substrato favorece o aumento da porosidade e aeração, que pode favorecer a exploração radicular em profundidade.

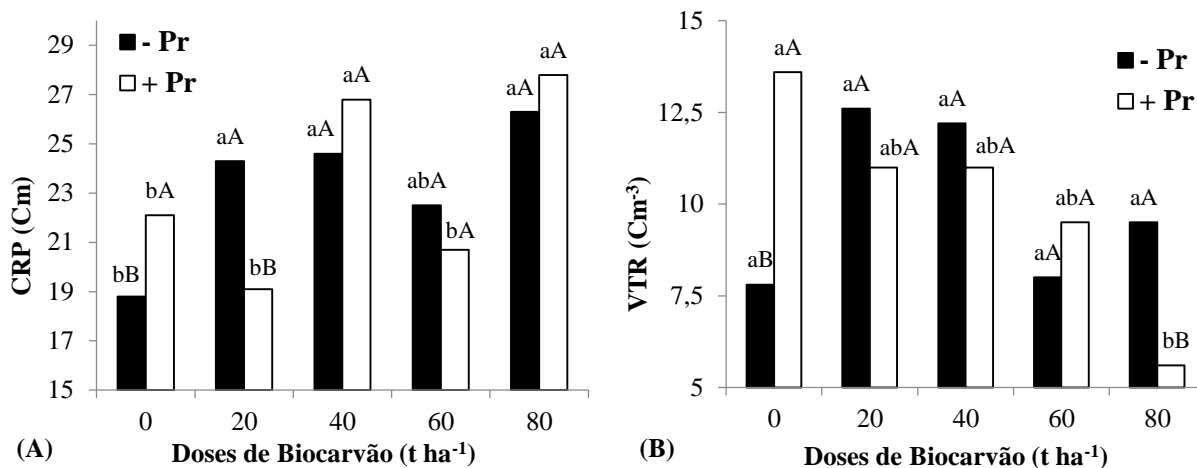


Figura 34. Comprimento da raiz principal (CRP) (A) e volume total de raízes (VRT) (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarcvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

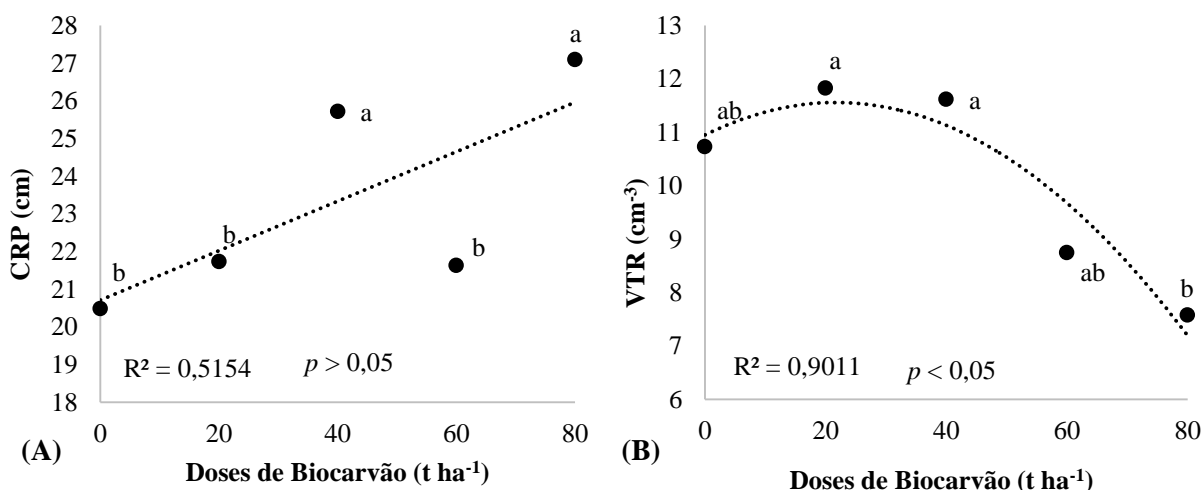


Figura 35. Comprimento da raiz principal (CRP) (A) e volume total de raízes (VRT) (B) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarcvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Analisando-se o volume total de raízes (VTR), é possível observar que sob +Pr essa variável diminuiu proporcionalmente com o aumento as doses de biocarcvão (Figura 34 B). De acordo com Grant *et al.* (2001), a maioria das plantas em fase inicial responde a baixas concentrações de P aumentando o volume radicular através do desenvolvimento abundante de raízes laterais, assim, o biocarcvão pode ter atuado no aumento da disponibilidade de P as mudas. Neste estudo, considerando que houve menor disponibilidade de P nas doses mais elevadas de biocarcvão, observou-se aumento das raízes em profundidade em detrimento da expansão lateral (Figura 35 B). O maior volume de raízes com -Pr nas doses 20 e 40 t ha⁻¹ sugerem reflexo das melhores características gerias dessas mudas. Os dados aqui observados diferem dos encontrados por Cavalcante *et al.* (2011), no qual verificaram aumento do VTR proporcional ao aumento de doses de biocarcvão no substrato.



Figura 36. Raízes de mudas de *Bertholletia excelsa* apresentando os sinais de compactação do solo.

De acordo com Bergamin *et al.* (2010), a redução do volume das raízes promovida pela baixa emissão de raízes laterais pode indicar a compactação do solo, considerando que o latossolo tem susceptibilidade a compactação, diminuindo espaços porosos que as raízes possam penetrar. Segundo Primavesi (2002), em plantas com raízes pivotantes como a *Bertholletia excelsa*, é comum observar que em condições de solo compactado essas se forquilha ficando retorcidas, penetrando-se no solo entre os torrões em lugar de crescimento retilíneo, fato observado em diversas plantas do estudo independente da presença de P, sugerindo-se que o solo após revolvimento sofreu compactação (Figura 36).

Com exceção dos maiores valores de IQD nas doses de 20 e 40 t ha⁻¹ obtidos em o P residual, na condição de +Pr notaram-se mudas com maior qualidade. Em ambos os casos, as doses maiores de biocarvão no substrato promoveram mudas de menor qualidade (Figura 37; figura 38). Há relatos na literatura que, para este índice, a interação do biocarvão com fertilizante ou na composição do substrato na produção de mudas florestais não promoveu diferenças significativas (Freitas *et al.* 2014; Lima *et al.*, 2016), enquanto outros identificaram que o aumento das doses de biocarvão promoveu melhorias na qualidade das mudas (Petter *et al.*, 2012; Rezende *et al.*, 2016).

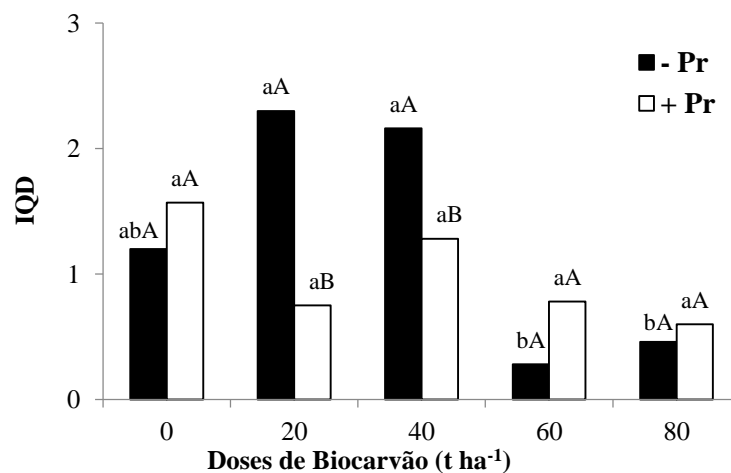


Figura 37. Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função da interação de doses de biocarvão na ausência (-Pr) e presença (+Pr) de adubação fosfatada residual. As médias seguidas pelas mesmas letras minúsculas nas barras pretas e brancas e maiúsculas entre as barras pretas e brancas não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

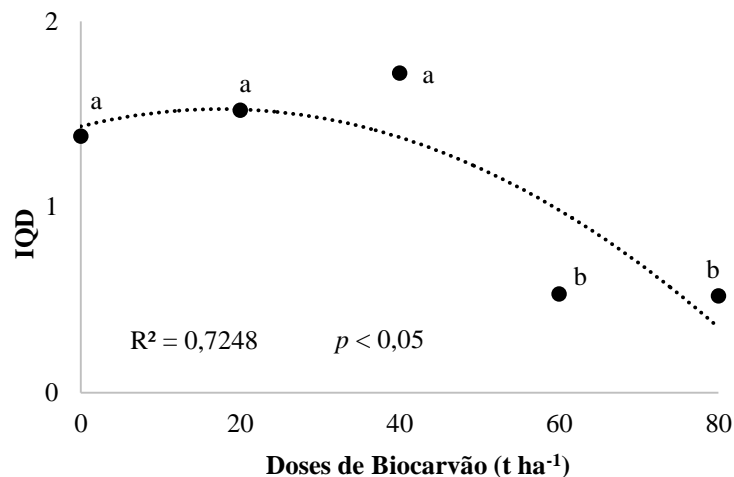


Figura 38. Índice de Qualidade de Dickson (IQD) de mudas de *Bertholletia excelsa* em função de doses de biocarvão. As médias seguidas por letras iguais não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Segundo Fonseca *et al.* (2002), o IQD é mais preciso e confiável para avaliar a qualidade das mudas por considerar a junção de vários parâmetros, sendo que mudas com maior IQD são classificadas como as que apresentam maior qualidade. O melhor resultado para IQD de 1,57 sob +Pr estão acima dos obtidos por Freitas *et al.* (2014) (entre 1,00 e 1,29), utilizando diferenças misturas com inserção de biocarvão para produção de mudas de Cumaru (*Dipteryx odorata*). Lima *et al.* (2016), associando concentrações de biocarvão e doses de P, não verificou diferenças significativas para o IQD de mudas de angico. Em doses elevadas de biocarvão e sob restrição de P residual, as mudas apresentaram valores próximos ao limiar mínimo sugerido para espécies florestais (0,20) culminando nas mudas de pior qualidade geral.

Para mudas de castanheira, Simões *et al.* (2015) verificou os maiores valores de IQD para o tratamento controle (0,82), abaixo do observado para o controle deste trabalho (1,2). Santos *et al.* (2013) encontraram valores de 2,8 para adubação completa e 1,8 para completa – P, sugerindo que o P limita o desenvolvimento de mudas de castanheira, entretanto tais resultados divergem dos encontrados neste trabalho, visto que os maiores valores observados (2,3 e 2,1) foram para os tratamentos sem P residual. Esses mesmo autores sugerem que a variabilidade dos parâmetros que compõem o cálculo, refletindo sobre o IQD final, podem estar relacionadas a grande reserva de nutrientes presente nas amêndoas, sugerindo que o P residual não afetou o desenvolvimento de mudas de qualidades em doses intermediárias de biocarvão.

6. CONCLUSÕES

O biocarvão presente no substrato continuou influenciando positivamente nos atributos do solo após um ano e meio de sua aplicação.

A aplicação de 20 e 40 t ha⁻¹ de biocarvão no substrato promoveu o melhor efeito residual do adubo fosfatado.

O fósforo residual não influenciou de maneira clara a absorção folia de K, Ca e Mg.

O aumento das doses de biocarvão no substrato promoveu decréscimos na absorção foliar de fósforo e favoreceu a absorção dos micronutrientes.

Exceto para os teores de N e Mn, os teores dos outros elementos são semelhantes aos encontrados em trabalhos semelhantes.

A presença do fósforo residual em doses mais baixas de biocarvão (< 40 t ha⁻¹) promoveu melhor desenvolvimento mensal em altura das mudas e diâmetro do coleto.

A presença do fósforo residual promoveu incrementos nas alturas das mudas de Castanhaeira, entretanto, não influenciou expressivamente no diâmetro do coleto.

As doses acima de 40 t ha⁻¹ de biocarvão promoveram menores ganhos foliares, maior relação altura/diâmetro e menores ganhos de biomassa seca da raiz e da parte aérea. A presença do fósforo residual não influenciou positivamente nessas variáveis.

Menor relação matéria seca da parte aérea/ raízes foram obtidas em doses acima de 40 t ha⁻¹ de biocarvão.

Obteve-se maior comprimento de raízes em doses de biocarvão acima de 40 t ha⁻¹, enquanto que menor volume de raízes observado em doses abaixo de 40 t ha⁻¹.

Obteve-se maior índice de qualidade de dickson das mudas nas doses abaixo de 40 t ha⁻¹ de biocarvão sem a presença do fósforo residual.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albuquerque, T.C.S., Evangelista, T.C., Neto, A.A.R.A. 2015. Níveis de sombreamento no crescimento de mudas de Castanheira do Brasil. *Revista Agro@ambiente On-line*, 9: 440-445.
- Almeida, J.A.; Torrent, J.B. 2003. Cor de solo, Formas de Fósforo e Adsorção de Fosfatos em Latossolos Desenvolvidos de Basalto do Extremo- Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 27: 985-1002.
- Alvarez, V.H.; Novais, R.F.; Dias, L.E.; Oliveira, J.A. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. *Boletim Informativo da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 25: 27- 32.
- Alvarez, V.H.; Ribeiro, A.C. 1999. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: Ribeiro, A.C.; Guimarães, P.T.G.; Alvarez V, V.H. (Ed.). *Recomendação para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação*. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, Viçosa, p. 25-32.
- Anderson, C.R.; Hamonts, K; Clough, T.J.; Condrón, L.M.; Fiers, M.; Stewart, A.; Hill, R.A.; Sherlock, R.R. 2011. Biochar induced soil microbial community change: Implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. *Pedobiologia*, 54: 309 - 320.
- Andrade, C.A.; Bibar, M.P.S.; Coscione, A.R.; Pires, A.M.M.; Soares, Á.G. 2015. Mineralização e efeitos de biocarvão de cama de frango sobre a capacidade de troca catiônica do solo. *Pesquisa agropecuária brasileira*, 50: 407-416.
- Archanjo, B.S.; Araujo, J.R.; Silva, A.M.; Capaz, R.B.; Falcão, N.P.S.; Jorio, A.; Achete, C.A. 2014. Chemical analysis and molecular models for calcium-oxygen-carbon interactions in black carbon found in fertile Amazonian Anthrosoils. *Environmental Science and Technology*, 48: 7445-7452.
- Arruda, M.R.; Pereira, J.C.R.; Moreira, A.; Teixeira, W.G. 2007. Enraizamento de estacas herbáceas de guaranazeiro em diferentes substratos. *Ciência e Agrotecnologia*, 31: 236-24.
- Atkinson, C.J.; Fitzgerald, J.D.; Higgs, N.A. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil*, 337: 1–18.
- Ávila, F. 2006. *Árvores da Amazônia*. Empresa das Artes, São Paulo. 243 p.
- Ball, P.N.; Mackenzie, M.D.; Deluca, T.H.; Holben, W.E. 2010. Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry ontane forest soils. *Journal of Environmental Quality*, 39: 1243-1253.
- Basso, S. M. S. Caracterização morfológica e fixação biológica de nitrogênio de espécies de *Adesmia* DC e *Lotus* L. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 268p.
- Beesley, L.; Jimenez, E. M., Gomez, L. E. J. 2010. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*, 158: 2282-2287.
- Benites, V.M.; Madari, B.; Bernardi, A.C.C.; Machado, P.L.O. 2005. Matéria orgânica do solo. In:Wadt, P.G.S. (Ed.). *Manejo de solo e recomendação de adubação para o Estado do Acre*. Embrapa Acre, Rio Branco, p. 93-120.

- Bergamin, A.C.; Vitorino, A.C.T.; Franchini, J.C.; Souza, C.M.A.; Souza, F.R. 2010. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférrico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34:681-91.
- Bian, R.; Joseph, S.; Cui, L.; Pan, G.; Li, L.; Liu, X.; Zhang, A.; Rutledge, H.; Wong, S.; Chia, C.; Marjo, C.; Gong, B.; Munroe, P.; Donne, S. 2014. A three-year experiment confirms continuous immobilization of cadmium and lead in 96 contaminated paddy field with biochar amendment. *Journal of Hazardous Materials*, 272:121-128.
- Biasioli, G.M. 2003. Influência do pH e da força iônica na liberação de fósforo de compostos do tipo Fe-K-P presentes em superfosfatos. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, São Paulo. 76p.
- Birchler, T.; Rowse, R.W.; Royo, A.; Pardos, M. 1998. La planta ideal: revisión del concepto, parámetros definitorios e implementación práctica. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 7:109-121.
- Bugbee, G. 1996. Growth, analyses and yield components. In: Salisbury, F. B. (Ed.). *Units, Symbols and Terminology for plant physiology*, Oxford University Press, New York, p. 115-119
- Caione, G.; Lange, A.; Schoninger, E.L. 2012. Crescimento de mudas de *Schizolobium amazonicum* (Huber ex Ducke) em substrato fertilizado com nitrogênio, fósforo e potássio. *Scientia Forestalis*, 40: 213-221.
- Camargos, S.L.; Muraoka, T.; Fernandes, S.A.P.; Salvador, J.O. 2002. Diagnose nutricional em mudas de Castanheira-do-brasil. *Revista Agricultura Tropical*, 6:81-96.
- Carneiro, J.G.A. 1995. *Produção e controle de qualidade de mudas florestais*. UFPR, Curitiba, 451 p.
- Carvalho, M.T.M.; Maia, A.H.N.; Madari, B.E.; Bastiaans, L.; Van Oort, P.A.J.; Heinemann, A.B.; Silva, M.A.S.; Petter, F.A.; Marimon J.R.B.H.; Meinke, H. 2014. Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*, 5: 939-952.
- Casaroli, D.; Lier, Q.J.V. 2008. Critérios para determinação da capacidade de vaso. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, 32:59-66.
- Cavalcante, Í.H.L.; Rocha, L.F.; Silva Junior, G.B.; Falcão Neto, R.; Silva, R.R.S. 2011. Seedling production of gurguéia nut (*Dypterix lacunifera* Ducke) I: seed germination and suitable substrates for seedlings. *International Journal of Plant Production*, 5: 319-322.
- Cavalcante, L.I.H.; Petter, A.F.; Albano, G.F.; Silva, R.R.S.; Júnior, G.B.S. 2014. Biochar no substrato para produção de mudas de maracujazeiro amarelo. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 111: 41-47.
- Cessa, R.M.; Celi, L.; Vitorino, A.C.; Novelino, J.O.; Barberis, E. 2009. Área superficial específica, porosidade da fração argila e adsorção de fósforo em dois Latossolos Vermelhos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33: 1153- 1162.
- Chapin, F. S. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 11: 233-260.
- Chen, T.; Zhang, Y.X.; Wang, H.T.; Lu, W.J.; Zhou, Y.C.; Ren, L.L. 2014. Influence of pyrolysis temperature on characteristics and heavy metal adsorptive performance of biochar derived from municipal sewage sludge. *Bioresource technology*, 164: 47-54.

- Condron, L.M.; Tiessen, H. 2005. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. In: Turner, B.L.; Frossard, E.; Baldwin, D.S. (Ed.). *Organic phosphorus in the environment*. CAB international, Wallingford, p. 295-307.
- Cordell, D.; Drangert, J.O.; White, S. 2009. The story of phosphorus: global food security and food for thought. *Global Environmental Change*. 19: 292-305.
- Corrêa, V.M. 2013. *Crescimento, aspectos nutricionais e fotossintéticos de plantas jovens de Bertholletia excelsa* H.B. submetidas à diferentes tratamentos de fertilização. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 66p.
- Costa, J.R.; Castro, A.B.C.; Wandelli, E.V.; Coral, S.C.T.; Souza, S.A.G. 2009. Aspectos silviculturais da castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 39: 843-850.
- Cravo, M.S.; Smyth, T.J.; Brasil, E.C. 2012. Calagem em Latossolo amarelo distrófico da Amazônia e sua influência em atributos químicos do solo e na produtividade de culturas anuais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 895-907.
- Cravo, M.S.; Veigas, I.J.M.; Brasil, E.C. 2007. Recomendações de Adubação e calagem para o estado do Pará. Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 262 p.
- Cruz, R.F. 2015. *Caracterização de matérias-primas e biochars para aplicação na agricultura* Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 133p.
- Cui, H.J.; Wang, M.K.; Fu, M.L.; Ci, E. 2011. Enhancing phosphorus availability in phosphorus-fertilized zones by reducing phosphate adsorbed on ferrihydrite using rice straw-derived biochar. *Soils Sediments*, 11: 1135-1174.
- Damaceno, J.B.D., Gama, R.T., Oliveira, D.M., Guimarães, R.S.; Padilha, F.J., Falcão N.P.S. 2016. Influência de doses de biocarvão sobre a perda de umidade em latossolo da Amazônia Central. *FertBio: Rumo a novos desafios*.
- Davanso, V. M.; Souza, L. A.; Medri, M. E.; Pimenta, A.; Bianchini, E. 2002. Photosynthesis, Growth and development of *Tabebuia ovellanae* Lor. Ex Griseb. (Bignoniaceae) in flooded soil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45: 375-384.
- De Luca, T.H.; MacKenzie, M.D.; Gundale, M.J. 2015. Biochar effects on soil nutrient transformations. In: Lehmann, J.; Joseph, S. (Ed.). *Biochar for environmental management: science, technology and implementation*. Taylor and Francis, New York. 944p.
- Dechen, A.R.; Nachtigall, G.R. 2006. Micronutrientes. In: Fernandes, M. S. (Ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. SBCS, Viçosa, p.328-352.
- Dechen, A.R.; Nachtigall, G.R. 2007. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: Novais RF, Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, p. 91 – 132.
- DeLuca, T.H.; MacKenzie, M.D.; Gundale, M.J. 2009. Biochar effects on soil nutrient transformation. In: Lehmann, J.; Joseph, S. (Ed.). *Biochar for environmental management science and technology*. Earthscan, London, p. 251–280.

- Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. 2015. Sumário da produção mineral do ano 2014. (<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015>). Acesso em 20/06/2016.
- Dharmakeerthi, R.S.; Chandrasiri, J.A.S.; Edirimanne, V.U. 2012. Effect of rubber wood biochar on nutrition and growth of nursery plants of *Hevea brasiliensis* established in an Ultisol. *SpringerPlus*, 1: 1-12.
- Dickson A, Leaf, A.L., Hosner, J.F. 1960. Quality appraisal of white spruce and White pine seedling stock in nurseries. *Forestry Chronicle*, 36:10-13.
- Donagemma, G.K.; Ruiz, H.A.; Alvarez, V.V.H.; Ker, J.C.; Fontes, M.P.F. 2008. Fósforo remanescente em argila e silte retirados de Latossolos após pré-tratamentos na análise textural. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32: 1785-1791.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 1979. *Manual de métodos de análise de solo*. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 212 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 1999. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 2da ed. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, 20 p.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. 2006. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2da ed. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 286 p.
- Fageria, N.K. 2008. *The use of nutrients in crop plants*. CRC Press, New York, 428 p.
- Falcão, N.P.S.; Borges, L.F. 2006. Efeito da fertilidade de terra preta de índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão havaí (*Carica papaya* L.). *Acta Amazonica*, 36:401-406.
- Falcão, N.P.S.; Carvalho, E.J.M.; Comerford, N. 2001. Avaliação da fertilidade de solos antropogênicos da Amazônia Central. In: *XI Congresso da Sociedade de Arqueologia Brasileira*, Grupo de trabalho: Terras Pretas Arqueológicas na Amazônia, Estado da Arte, Rio de Janeiro.
- Falcão, N.P.S.; Comerford, N.; Lehmann, J. 2003. Determining nutrient bioavailability of Amazonian Dark Earth soils, methodological challenges. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Ed.). *Amazonian Dark Earths; origin, properties, managements*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 255-270.
- Falcão, N.P.S.; Silva, J.R.A. 2004. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 34: 337-342.
- Falesi, I. C. 1984. Estado atual de conhecimentos de solos da Amazônia brasileira. In: *I Simpósio do Trópico Úmido*; Belém. Belém: Embrapa Trópico Úmido.
- Falesi, I.C. 1986. Estado atual de conhecimentos de solos da Amazônia brasileira. In: *I Simpósio do Trópico Úmido*, Embrapa Trópico Úmido, Belém.
- Fernandes, L.A.; Furtini Neto, A.E.; Fonseca, F.C.; Vale, F.R. 2000. Crescimento inicial, níveis críticos de fósforo e frações fosfatadas em espécies florestais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35: 1191-1198
- Ferreira, E.S.; Silveira, C.S.; Lucien, V.G.; Amaral, A.S. 2006. Caracterização físico-química da amêndoa, torta e composição dos ácidos graxos majoritários do óleo bruto da Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.). *Alimentos e Nutrição*, 17: 203-208.
- Ferreira, M. J.; Gonçalves J. F. C.; Ferraz, J. B. S.; Corrêa, V. M. 2015. Características nutricionais de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* Bonpl. sob tratamentos de fertilização em área degradada na Amazônia. *Scientia Florestalis*, 43: 863-872.

- Ferreira, M. J.; Gonçalves, J. F. C.; Ferraz, J. B. S. 2012. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de Castanheira-da-Amazônia em área degradada e submetida à adubação. *Ciência Florestal*, 22: 393-401.
- Fonseca, E.P.; Valéri, S.V.; Miglioranza, E.; Fonseca, N.A.N.; Couto, L. 2002. Padrão de qualidade de mudas de *Trema micrantha* (L.) Blume produzidas sob diferentes períodos de sombreamento. *Revista Árvore*, 26: 515-523.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO. The statistics division. (www.fao.org). Acesso em 18/06/2016.
- Freitas, A.F.; Souza, L.A.G.; Cardoso, I.M.; Paiva, H.N. 2014. Fino de carvão vegetal em substrato para produção de mudas de *Dipteryx odorata*. *Revista Brasileira de Agroecologia*, 9: 31-40.
- Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J. 2013. Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: usos e limitações. *Tópicos em Ciência do Solo*, 8: 141-187.
- Giaveno, C.; Richardson, A.; Simpson, R.; Barberis, E. 2010. Interaction of phytases with minerals and availability of substrate affect the hydrolysis of inositol phosphates. *Soil Biology and fertility of soils*, 49:491-498.
- Glaser, B. 2007. Prehistorically modified soils of central Amazonia: a model for sustainable agriculture in the twenty-first century. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 362:187-196.
- Glaser, B.G.; Guggenberger, G.; Zech, W.; Ruivo, M.L. 2003. Soil Organic Matter Stability in Amazonian Dark Earths. In: Lehmann, J., Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. (Ed.). *Amazonian Dark Earths: origin, properties, management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p.141-158.
- Gomes, I.B. 2012. *Respostas ecofisiológicas de plantas jovens de Bertholletia excelsa Bonpl. submetidas à fertilização em plantiohomogêneo*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 59p.
- Gomes, J. M.; Paiva, H. N. 2011. *Viveiros Florestais: propagação sexuada*. UFV, Viçosa, 116 p.
- Gomes, K.C.O.; Paiva, H.N.; Neves, J.C.L.; Barros, N.F.; Silva, S.R. 2004. Influência da saturação por bases e do fósforo no crescimento de mudas de angico-branco. *Revista Árvore*, 28: 785-792.
- Gonçalves, J.F.C.; Barreto, D.C.S.; Santos Junior, U.M.; Fernandes, A.V.; Sampaio, P.T.B.; Buckeridge, M.S. 2005. Growth, photosynthesis and stress indicators in young rosewood plants (*Aniba rosaeodora* Ducke) under diferente light intensities. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17: 325-334.
- Gonçalves, L.G.V.; Morais, L.A.; Carvalho, M.T.M.; Silva, M.A.S.; Madari, B.E. 2012. Dinâmica da água e resposta fisiológica de *Oryza sativa* pelo biocarvão do solo. In: *Seminário Jovens Talentos*. Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio de Goiás.
- Graber, E.R.; Meller-Harel, Y.; Kolton, M.; Cytryn, E.; Silber, A.; David, D.R.; Tsechansky, L.; Borenshtein, M.; Elad, Y. 2010. Biochar impact on development and productivity of pepper and tomato grown in fertigated soilless media. *Plant and Soil*, 337: 481-496.
- Grant, C.A.; Flaten, D.N.; Tomasiewicz, D.J.; Sheppard, S.C. 2001. *A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta*. Piracicaba: Potafos, 16 p.
- Grant, C.A.; Platen, D.N.; Tomaziewicz, D.J.; Sheppard, S.C. 2001. A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta. Informações Agrônomicas. Piracicaba: Potafos, (*Encarte técnico*, 95).

- Groot, C.C.; Marcelis, L.F.M.; Boogaard, R.V.D.; Kaiser, W.M.; Lambers, H. 2003. Interaction of nitrogen and phosphorus nutrition in determining growth. *Plant and soil*, 248: 257-268.
- Guppy, C.N.; Menzies, N.W.; Mood, P.W.; Blamey, F.P.C. 2005. Competitive sorption reactions between phosphorus and organic matter in soil: a review. *Soil Research*; 43:189-202.
- Havlin, J.L.; Beaton, J.D.; Tisdale, S.L.; Nelson, W.L. 2005. *Soil fertility and fertilizers: na introduction to nutrient management*. Pearson Education, New Jersey. 215 p.
- Homma, A.K.O. 2004. Cemitério das Castanheiras. *Ciência Hoje*, 34:60-63.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Estados @. IBGE, Brasília, (<http://www.ibge.gov.br/estadosat>). Acesso 20/10/2015.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística -IBGE. Produção extrativa vegetal. (http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/pevs/2014/default_ods.shtm). Acesso em 18/06/2016.
- Karhu, K.; Mattila, T.; Bergström, I.; Regina, K. 2011. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity – Results from a shortterm pilot field study. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 140: 309-313.
- Kerbaudy, G.B. 2004. *Fisiologia Vegetal*. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 531 p.
- Kern, D.C.; Costa, M.L. 1997. Composição química de solos antrópicos desenvolvidos em Latossolo Amarelo derivados de lateritos. *Geociências*, 16: 141-156.
- Kern, D.C.; Rodrigues, T.E.; Sombroek, W. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.G. (Ed.). *Amazonian Dark Earths: origin, properties, Management*. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, p. 51-75.
- Khamis, S.; Chaillou, S.; Lamaze, T. 1990. CO₂ assimilation and partitioning of carbon in maize plants deprived of orthophosphate. *Journal of Experimental Botany*, 41: 1619-1625.
- Kloss, S.; Zehetner, F.; Wimmer, B.; Buecker, J.; Rempt, F.; Soja, G. 2014. Biochar application to temperate soils: effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177: 3–15.
- Knowles, O.A.O.; Robinson, B.H.B.; Contangelo, A.A.; Clucas, L.L. 2011. Biochar for the mitigation of nitrate leaching from soil amended with biosolids. *Science of the Total Environment*, 409: 3206-3210.
- Köppen, W. 1948. *Climatologia: con un studio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Economica, México, 478p.
- Kwapinski, W.; Byrne, C.M.P.; Kryachko, E.; Wolfram, P.; Adley, C.; Leahy, J.J.; Novotny, E.H.; Hayes, M.H.B. 2010. Biochar from biomass and waste. *Waste and Biomass Valorization*, 1:177-189.
- Lehman, J.; Rillig, M.C.; Thies, J.; Masiello, C.A.; Hockaday, W.C.; Crowley, D. 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43: 912–1836.
- Lehmann, J. 2007. Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5: 381-387.
- Lehmann, J.; Joseph, S. 2009. *Biochar for Environmental Management: An Introduction*. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*. Earthscan.
- Lehmann, J.; Joseph, S. 2015. *Biochar for Environmental Management: An Introduction*. In: *Biochar for Environmental Management - Science and Technology*, 2da ed. Earthscan.

- Lehmann, J.; Silva Júnior, J.P.; Steiner, C.; Nehls, T.; Zech, W.; Glaser, B. 2003. Nutrient availability and leaching in a archaeological anthrosol and a ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant and Soil*, 249: 343-357.
- Liang, B.; Lehmann, J.; Sohi, S.P.; Thies, J.E.; O’Niell, B.; Trujillo, L.; Gaunt, J.; Solomon, D.; Grossman, J.; Neves, E.G.; Luizão, F.J. 2010. Black carbon affects the cycling of non-black carbon in soil. *Organic Geochemistry*. 41: 206-213.
- Lima, I. S. 2016. Parâmetros físico-hídricos do solo, lixiviação de nutrientes e desenvolvimento do girassol (*Helianthus annuus* L) em argissolo amarelo tratado com biocarvão. 2016. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, Sergipe, Aracaju, 79 p.
- Lima, S.L.; Marimon Junior, B.H.; Melo-Santos, K.S.; Reis, S.M.; Petter, F.A.; Vilar, C.C.; Marimon, B.S. 2016. Biochar no manjo de nitrogênio e fósforo para produção de mudas de angico. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51: 120-131.
- Lima, S.L.; Tamiozzo, S.; Palomino, E.C.; Petter, F.A.; Marimon-Junior, B.H. 2015. Interactions of biochar and organic compound for seedlings production of *Magonia pubescens* A. St. Hil. *Revista Árvore*, 39: 655-661.
- Locatelli, M.; Vieira, A.H.; Gama, M.G.R.; Martins, E.P.; Filho, E.P.S.; Souza, V.F.; Macedo, R.S. 2005. Cultivo da castanha-do-Brasil em Rondônia. Rondônia: Embrapa Rondônia (*Sistemas de Produção*, 7).
- Lorenzi, H. 2002. Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 4da ed. Instituto Plantarum, São Paulo, 368p.
- Machado, V.J.; Souza, C.H.E.; Andrade, B.B.; Lana, R.M.Q.; Korndorfer, G.H. 2011. Curvas de disponibilidade de fósforo em solos com diferentes texturas após a aplicação de doses crescentes de fosfato monoamônico. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27: 70-76.
- Major, J.; Rondon, M.; Molina, D.; Riha, S.J.; Lehmann, J. 2010. Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna oxisol. *Plant Soil*, 333:117–128.
- Malavolta E. 1980. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. Ceres, São Paulo, 251 p.
- Malavolta, E. 2006. *Manual de nutrição mineral de plantas*. Ceres, São Paulo, 638 p.
- Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. 1997. Avaliação do estado nutricional de plantas: princípios e aplicações. Potafos, Piracicaba, 308 p.
- Malvolta E. 1976. *Manual de química agrícola: nutrição de plantas e fertilidade do solo*. Ceres, São Paulo, 528 p.
- Marques, J.D.; Teixeira, W.G.T.; Reis, A.M.; Cruz-Júnior, O.; Martins, G.C. 2004. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um latossolo amarelo na região Amazônica. *Acta Amazônica*, 34: 145-154.
- Marschner, P. 2012. *Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants*. 3ª edição, Elsevier, 643 p.
- McDowell, R. W.; Stewart, I. 2006. The phosphorus composition of contrasting soils in pastoral, native and forest management in Otago, New Zealand: Sequential extraction and 31P NMR. *Geoderma*, 130: 176-189.
- Meurer, E.J. 2010. *Fundamentos de química do solo*. 4da ed. Evangraf, Porto Alegre, 280p.
- Miyazawa, M.; Pavan, M.A.; Muraoka, T.; Carmo, C.A.F.S.; Melo, W. J. 1999. Análise química de tecidos vegetais. In: Silva, F.C. (Ed.). *Manual de Análise Química de Solos, Plantas e Fertilizantes*. EMBRAPA, Brasília, p. 172-223.

- Moline, E.F.V.; Lavres Júnior, J.; Silva, D.P.; Clement, C.R.; Falcão, N.P.S. 2015. Efeito da aplicação de biocarvão, cama de frango e formulado NPK no estado nutricional de laranjeira em terra mulata. *Bioscience Journal*, 31: 362-369.
- Morales, M.M.; Comerford, N.; Guerrini, I.A.; Falcão, N.P.S.; Reeves, J.B. 2013. Sorption and desorption of phosphate on biochar and biochar–soil mixtures. *Soil Use and Management*, 29: 306-316.
- Mori, S.A.; Prance, G.T.; Balick, M.J. 1990. Taxonomy, ecology and economic botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.: Lecythidaceae). *Advances in Economic Botany*, 8: 130-150.
- Mukherjee, A.; Zimmerman, A.R.; Harris, W. 2011. Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars. *Geoderma*, 163: 247-255.
- Mukome, F. N. D. 2013. Use of chemical and physical characteristics to investigate trends in biochar feedstocks. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 61: 2196-2204.
- Müller, C.H. 1995. A cultura da Castanha-do-brasil. Brasília: Embrapa, (*Coleção Plantar*, 23).
- Neves, O.S.C.; Benedito, D.S.; Machado, R.V.; Carvalho, J. G. 2004. Crescimento, produção de matéria seca e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg e S na parte aérea de mudas de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) cultivadas em solo de várzea, em função de diferentes doses de fósforo. *Revista Árvore*, 28: 343-349.
- Nguyen, B.T.; Lehmann, J. 2010. Black carbon decomposition under varying water regimes. *Organic Geochemistry*, 40: 846-853.
- Nóbrega, Í.P.C. 2011. *Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: Sequestro de carbono no solo*. Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica do Lisboa, Lisboa. 46 p.
- Novais, R.F.; Smyth, T.J. 1999. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 399 p.
- Novais, R.F.; Smyth, T.J.; Nunes, F.N. 2007. Fósforo. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, p. 471-550.
- Novak, J.M.; Busscher, W.J.; Laird, D.L.; Ahmedna, M.; Watts, D.W.; Niandou, M.A.S. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil. *Soil Science*, 174: 105-112.
- Novotny, E.H.; Hayes, M.H.B.; Madari, B.E.; Bonagamba, T.J.; Azevedo, E.R.; Souza, A.A.; Song, G.; Nogueira, C.M.; Mangrich, A.S. 2009. Lessons from the Terra Preta de Índio of the Amazon Region for the utilisation of charcoal for soil amendment. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 20: 1003-1010.
- Novotny, E.H.; Madari, B.E.; Maia, C.M.B.; Mangrich, A.S. 2012 O Potencial do Biocarvão (Carvão Pirogênico) no Sequestro de Carbono, na Ciclagem de Nutrientes, no Crescimento das Plantas e no Estímulo de Processos Microbiológicos. In: *Fertbio 2012*. Alagoas, Brasil.
- Nunes, M.M. 2010. *Carvão vegetal como componente de substrato para produção de mudas de Castanheira-do-brasil (Bertholletia excelsa H. B. K.)*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus, Amazonas. 75 p.
- Oliveira Jr., J.A.; Malavolta, E.; Cabral, C.P. 2000. Efeitos do manganês sobre a soja cultivada em solo de cerrado do triângulo mineiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35: 1629-1636.

- Oliveira, D.M. 2012. *Biocarvão de bambu e fontes de fósforo afetando a disponibilidade de P e o crescimento de feijão caupi e milho em latossolo amarelo distrófico da Amazônia*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 37 p.
- Peake, L. R.; Reid, B. J.; Tang, X. 2014. Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, 235:182-190.
- Pedroso Junior, N. N.; Murrieta, R. S. S.; Adams, C. 2008. A Agricultura de Corte e Queima: um Sistema em Transformação. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Humanas* 3: 153-174.
- Petter, F.A. 2010. *Biomassa carbonizada como condicionador de solo: aspectos agrônômicos e ambientais de seu uso em solos de Cerrado*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 130 p.
- Petter, F.A.; Madari, B.E. 2012. Biochar: agronomic and environmental potential in Brazilian savannah soils. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16: 761-768.
- Petter, F.A.; Madari, B.E.; Silva, M.A.S.; Carneiro, M.A.C.; Carvalho, M.T.M.; Marimon Júnior, B.H.; Pacheco, L.P. 2012. Soil fertility and upland rice yield after biochar application in the Cerrado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47: 699-706.
- Piccolla, C.D. 2013. *Características químicas de biocarvões produzidos a partir do bagaço de cana-de-açúcar e a disponibilidade de fósforo no solo*. Dissertação de Mestrado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba. 70 p.
- Primavesi, A. 2002. *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais*. Nobel, São Paulo, 549 p.
- Quispe, J.F.S. 2004. *Eficiência agrônômica de fosfatos com solubilidade variável em água em solos distintos quanto a capacidade de fixação de fósforo*. Tese de Doutorado, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 57p.
- Raij, B.V. 1991. *Fertilidade do solo e adubação*. Ceres, São Paulo, 343 p.
- Raij, B.V. 2011. Fertilidade do solo e manejo de nutrientes. International Plant Nutrition Institute. Piracicaba, 142 p.
- Rezende, F. A.; Santos, V. A. H. F.; Maia, C. M. B. F.; Morales, M. M. 2016 Biochar na composição de substratos para a produção de mudas de teca. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51: 1449-1456.
- Rheinheimer, D.S.; Anghinoni, I. 2003. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34: 2339-2354.
- Rodrigues, T.E. 1996. Solos da Amazônia. In: Alvarez, V.H.; Fontes, L.E.F.; Fontes, M.P.F. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, Minas Gerais, p.19-60.
- Roque, C.G.; Prado, R.M.; Natale, W.; Beutler, A.N.; Centurion, J.F. 2004. Estado nutricional e produtividade da seringueira em solo com calcário aplicado superficialmente. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39: 485-490.
- Sanchez, P.A.; Bandy, D.; Villarica, J.; Nicholaidis, J. 1982. Amazon basin soils: management for continuous crop production. *Science*, 216: 821-827.
- Santos, H.C. 2010. *Cinética de sorção e disponibilidade de fósforo em função do tempo de contato do fósforo com o solo*. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Areias. 70 p.

- Santos, J.Z.L.; Resende, Á.V.; Neto, A.E.F.; Corte, E.F. 2008. Crescimento, acúmulo de fósforo e frações fosfatadas em mudas de sete espécies arbóreas nativas. *Revista Árvore*, 32: 799-807.
- Santos, R.A.; Tucci, C.A.F.; Hara, F.A.S.; Silva, W.G. 2008. Adubação fosfatada para a produção de mudas de mogno (*Swietenia macrophylla* King). *Acta Amazonica*, 38: 453-458.
- Santos, S.C.; Venturin, N.; Teixeira, G.C.; Carlos, L.; Macedo, R.I.G. 2013. Avaliação da qualidade de mudas de castanha-do-brasil submetidas à ausência de nutrientes. *Enciclopédia Biosfera*, 9:439-450.
- Schneider, F.; Haderlein, S.B. 2016. Potential effects of biochar on the availability of phosphorus-mechanistic insights. *Geoderma*, 277: 83–90.
- Scoles, R.; Gribel, R.; Klein, G.N. 2011. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diferentes condições ambientais na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. *Ciências Naturais*, 6: 273-293.
- Silber, A.; Levkovitch, I.; Graber, R.E. 2010. pH-Dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: *Agronomic implications, Environmental Sciences Technologies*, 44: 9318-9323.
- Silva, A.K.T.; Guimarães, J.T.F.; Lemos, V.P.; Costa, M.L.; Kern, D.C. 2012. Mineralogia e geoquímica de perfis de solos com Terra Preta Arqueológica de Bom Jesus do Tocantins, sudeste da Amazônia. *Acta amazonica*, 42: 477-490.
- Silva, C.E.M.; Gonçalves, J.F.C.; Feldpausch, T.R.; Luizão, F.J.; Morais, R.R.; Ribeiro, G.O. 2006. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. *Acta Amazonica*, 36: 503-512.
- Silva, F.A.S.; Azevedo, C.A.V. 2009. Principal components analysis in the software Assistat-statistical attendance. In: *Proceedings of the VII World Congress On Computers In Agriculture and Biological Engineering*, Reno: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Silva, J.A. 2007. *Aplicação inicial de P₂O₅ no solo, avaliação em três cultivos Sucessivos no feijão-caupi*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Areia. 73 p.
- Simões, P.H.O.; Palheta, L.F.; Vale, R.S.; Correia, R.G.; Neves, R.L.P. 2015. Crescimento e qualidade de mudas de Castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl. Lecythidaceae) em substratos fertilizados com macronutrientes. *Enciclopédia Biosfera*, 11: 689-703.
- Sombroek, W.G. 1966. *Amazon Soils- A reconnaissance of the soils of the Brazilian Amazon region*. Center for Agriculture Publications and Documentation, Wageningen, 330p.
- Sombroek, W.G.; Ruivo, M.D.L.; Fearnside, P.M.; Glaser, B.; Lehmann, J. 2003. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W. (Ed.). *Amazonian Dark Earths – Origin, Properties, and Management*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, p. 125-139.
- Souchie, F.F.; Marimon Junior, B.H.; Petter, F.A.; Madari, B.E.; Marimon, B.S.; Lenza, E. 2011. Carvão pirogênico como condicionante para substrato de mudas de *Tachigali vulgaris* L.G. Silva & H.C. Lima. *Ciência Florestal*, 21: 811-821.
- Sousa, D.M.G.; Lobato, E. 2003. Adubação fosfatada em solos da região do cerrado. Informações Agronômicas. Piracicaba: Potafos, (*Encarte técnico*, 102).
- Souza, A.H. 1963. Castanha do Pará: Estudo botânico químico e tecnológico. Edições Serviço de Informação Agrícola. Rio de Janeiro: Ministério da Agricultura, (*Estudos Técnicos*, 23).

- Souza, C.R.; Azevedo, C.P.; Rossi, L.M.B.; Lima, R.M.B. 2008. Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.). Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, (*Comunicado Técnico*, 63).
- Souza, M.A.S.M. 2006. *Resposta de mudas de espécies florestais, acariquara (Minquartia guianensis Aubl.) e mogno (Swietenia macrophylla Beth.) a diferentes formas de adubação*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 161 p.
- Spokas, K.A. 2010. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management*, 1:289-303.
- Steiner, C.; Teixeira, W.G.; Lehmann, J.; Nehls, T.; Macêdo, J.L.V.; Winfried, E.H.; Blum, W.Z. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant and Soil*, 291: 275-290.
- Stewart, C.E.; Zheng, J.; Botte, J.; Contrufo, M.F. 2013. Co-generated fast pyrolysis biochar mitigates green-house gas emissions and increases carbon sequestration in temperate soils. *Global Change Biology Bioenergy*, 5:153-164.
- Stutter, M.I.; Shand CA, George TS, Blackwell MAS, Dixon L, Bol R, Mackay RL, Richardson AE, Condron LM, Haygarth PM. 2015. Land use and soil factors affecting accumulation of phosphorus species in temperate soils. *Geoderma*; 257:29-39.
- Taiz, L.; Zeiger, E. 2004. *Fisiologia vegetal*. 3.ra ed. Artmed ,Porto Alegre, 719 p.
- Taiz, L.; Zeiger, E. 2010. *Plant Physiology*. 5da ed. Sinauer Associates, Sunderland, 34p.
- Terra, S.B.; Ferreira, A.A.F.; Peil, R.M.N.; Stumpf, E.R.T.; Beckmann-Cavalcante, M.Z.; Cavalcante, Í.H.L. 2011. Alternative substrates for growth and production of potted chrysanthemum (cv. Funny). *Acta Scientiarum Agronomy*, 33: 465-471.
- Tiecher, T.; Rheinheimer, D.S.; Kaminski, J.; Calegari, A. 2012. Forms of inorganic phosphorus in soil under different long term soil tillage systems and winter crops. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 36: 271-281.
- Trazzi, P.A.; Leahy, J.J.; Hayes, M.H.B.; Kwapinski, W. 2016. Adsorption and desorption of phosphate on biochars. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4: 37-46
- Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, Y.K.; Downie. A.; Joseph, S.; Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil*, 327:235-246.
- Vitti, G.C.; Lima, E.; Cicarone, F. 2006. XII - Cálcio, magnésio e enxofre. In: Fernandes, M.S. (Ed.). *Nutrição Mineral de Plantas*. SBCS, Viçosa, p.328-352.
- Wadt, L.H.O.; Kainer, K.A. 2009. Domesticação e melhoramento de castanheira. In: Borém, A.; Lopes, M.T.G.; Clement, C.R. (Ed.). *Domesticação e melhoramento: espécies amazônicas*. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, p. 301-321.
- Wadt, P.G.S.; Silva L.M. 2011. Determinação do fósforo remanescente para a avaliação da disponibilidade de fósforo em solos do Estado do Acre. Embrapa Acre, Rio Branco (*Comunicado técnico*, 178).
- Wang, T.; Arbestain, M.C.; Hedley, M.; Bishop, P. 2012. Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. *Plant soil*, 357:173-187.

- Woods, W.I. 2015. Development of antrosol research. In: Lehmann, J.; Kern, D.C.; Glaser, B.; Woods, W.I. 2003. *Amazonian dark earths; origin, properties and management*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 3-14.
- Yao, Y.; Gao, B.; Zhang, M.; Inyang, M.; Zimmermand, A.R. 2012. Effect of biochar amendmen on sorption and leaching of nitrate, ammonium, and phosphate in a Sandy soil. *Chemosphere*, 89:1467–1471.
- Zanetti, M.; Cazetta, J.O.; Mattos Junior, D.; Carvalho, S.A. 2003. Uso de subprodutos de carvão vegetal na formação do porta-enxerto limoeiro “cravo” em ambiente protegido. *Revista Brasileira Fruticultura*, 25: 508-512.
- Zhao, X.; Wang, J.W.; Xu, H.J.; Zhou, C.J.; Wang, S.Q.; Xing, G.X. 2014. Effects of crop-straw biochar on crop growth and soil fertility over a wheat-millet rotation in soils of China. *Soil Use and Management*, 30: 311-319.