



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**ADSORÇÃO DO FÓSFORO EM SOLO SOB RECUPERAÇÃO FLORESTAL APÓS
MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS, PA**

CASSIO RAFAEL COSTA DOS SANTOS

Orientador: Profº. D.Sc. Osvaldo Ryohei Kato

Co-Orientadores: Profº. D.Sc. Marcos André Piedade Gama

Profº. D.Sc. Norberto Cornejo Noronha

BELÉM

2018



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

**ADSORÇÃO DO FÓSFORO EM SOLO SOB RECUPERAÇÃO FLORESTAL APÓS
MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS, PA**

CASSIO RAFAEL COSTA DOS SANTOS

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais para obtenção do título de Mestre.

Orientador: D.Sc. OSVALDO RYOHEI KATO

Co-Orientadores: D.Sc. MARCOS ANDRÉ PIEDADE GAMA

D.Sc. NORBERTO CORNEJO NORONHA

BELÉM

2018

Santos, Cássio Rafael Costa dos
Adsorção do Fósforo Em Solo Sob Recuperação Florestal Após
Mineração De Bauxita Em Paragominas, Pa Cássio Rafael Costa dos
Santos. – Belém, PA, 2018.
57 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade
Federal Rural da Amazônia, 2018.
Orientador: Prof. Osvaldo Ryohei Kato.

1. Recuperação de Áreas Degradadas. 2. Recuperação Florestal. 3.
Restauração Ambiental. 4. Isotermas de Adsorção. 5. Mineração de
Bauxita. 6. Retenção do Fósforo (P). I. Kato, Osvaldo Ryohei, (orient.)
II. Título

CDD – 333.73185098115

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA

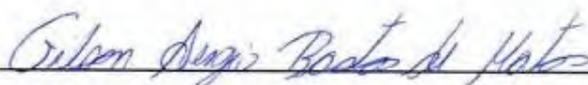
CASSIO RAFAEL COSTA DOS SANTOS

**ADSORÇÃO DO FÓSFORO EM SOLO SOB RECUPERAÇÃO FLORESTAL APÓS
MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS, PA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia como parte das exigências do Curso de Pós Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovação em 27 de Julho de 2018.

BANCA EXAMINADORA



Dr. Gilson Sergio Bastos de Matos

Universidade Federal Rural da Amazônia



Dr. João Roberto Rosa e Silva

Embrapa Amazônia Oriental



Dr. Eric Victor de Oliveira Ferreira

Universidade Federal Rural da Amazônia



Dr. Osvaldo Ryohei Kato (Orientador)

Embrapa Amazônia Oriental

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por conceder a oportunidade de conquistar um futuro melhor.

À Universidade Federal Rural da Amazônia, por servir a mim como um segundo lar, em especial ao Departamento de Ciência do Solo (Campus Belém), pelo amadurecimento e pelos aprendizados.

Ao Campus Capitão Poço, em especial aos Laboratórios de Engenharia da Irrigação (LEI), Anatomia e Tecnologia da Madeira (LANTOM) e Multiusuário, pelo apoio logístico durante boa parte de minhas análises para a Dissertação.

À Embrapa Amazônia Oriental pelo apoio logístico, institucional e de orientação durante o Curso de Mestrado.

A Mineração Paragominas pela oportunidade de trabalho e pelo apoio logístico e financeiro dados.

Ao meu orientador Prof^a. D.Sc. Osvaldo Ryohei Kato e aos meus supervisores Prof^o. D.Sc. Marcos André Piedade Gama e Prof^o. D.Sc. Norberto Cornejo Noronha, pelo apoio, incentivo, reconhecimento, conselhos e ensinamentos acadêmicos e de vida.

Aos alunos pertencentes ao Grupo de Estudos em Solos (GEPS), pela amizade, carinho e pelo apoio fornecidos.

A Alberto Bentes Brasil Neto pela amizade, pelos conselhos e pela parceria para a construção deste trabalho.

Aos meus amigos colegas de Curso e de Universidade, aos meus amigos dos tempos de Colégio do Carmo e a todos os outros, pelo incentivo e pelos momentos de alegria.

À minha mãe Margareth Fernandes da Costa, minha avó Raimunda Barbosa dos Santos, meu pai Pedro Cássio Barbosa dos Santos e minha avó Luzia Fernandes da Costa, por construírem os degraus que me ajudaram a subir até alcançar esta conquista.

Aos meus irmãos Cássio Michel, Cássio Gabriel e Maria Eduarda e ao meu padrasto Adriano Estrada, bem como a toda a minha família.

À minha esposa e companheira, amor e melhor amiga Aylana Cristina Lima de Almeida, por estar ao meu lado em todos os momentos e por me apoiar incondicionalmente.

A DEUS, pela vida e pela oportunidade de lutar a mim dadas,

À minha mãe (**MARGARETH**), minha avó (**RAIMUNDA**) meu pai (**PEDRO CÁSSIO**), e
minha avó (**LUZIA**),

Aos meus irmãos (**MICHEL, GABRIEL e MARIA EDUARDA**) e amigos

E à minha companheira **AYLANA**,

**Que sacrificaram e abriram mão dos momentos de convívio para
permitir a conclusão desta caminhada,**

DEDICO.

RESUMO

A compreensão sobre a disponibilidade e retenção do fósforo (P) em solos reconstituídos sob recuperação florestal após mineração de bauxita é importante como auxílio na tomada de decisão quanto ao manejo deste nutriente, bem como na avaliação da qualidade das áreas sob essas condições. O objetivo do trabalho foi avaliar a adsorção de P em solo reconstituído em função de processos de recuperação florestal após mineração de bauxita. O estudo ocorreu em uma área de exploração de bauxita, no município de Paragominas, PA. Nesta área, foram avaliados três sistemas: floresta nativa (FLO), como testemunha, plantio Tradicional de mudas (PLT) e regeneração natural da vegetação (RNV). Em cada sistema, foram implantadas oito parcelas. Em cada parcela, foram coletadas amostras de solo, às profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, para análises de fertilidade e de adsorção do fósforo (P), sendo realizado um inventário da vegetação. Todos os dados foram submetidos às análises de normalidade, homocedasticidade, variância, comparação de médias e análise multivariada, todos à 5% de significância. Quanto aos atributos de fertilidade do solo, FLO foi superior, seguida de RNV e por fim do PLT, para maioria dos atributos. A diversidade de espécies florestais em PLT, com índice de $1,70 \pm 0,30$, mostrou-se significativamente superior à RNV, com índice de $0,61 \pm 0,41$, apesar de haver uma maior área basal por parte dos indivíduos da RNV ($1,31 \pm 1,60 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) do que em PLT ($0,14 \pm 0,11 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), no estrato inferior. O maior índice de diversidade, a maior área basal e a maior biomassa de liteira foram observados para FLO. De modo geral, as curvas de adsorção e a capacidade máxima de adsorção de P no solo seguiu a ordem $\text{PLT} > \text{RNV} > \text{FLO}$. Houve maior relação negativa da adsorção do fósforo com o teor de matéria orgânica, com a $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ e com o P disponível do solo. Isto indica a importância da conservação e manutenção da biomassa, visando garantir maior disponibilidade de P e evitando a utilização de fertilizantes fosfatados, além ou aquém do necessário, em práticas de recuperação. Além disso, tais resultados demonstram que a diversidade de espécies não deve ser o único fator a ser considerado, mas também a cobertura do solo ao se selecionar espécies para recuperação.

Palavras-chave: recuperação de áreas degradadas; restauração ambiental; fósforo disponível; isotermas de adsorção.

ABSTRACT

The comprehension about the phosphorus (P) availability and retention in reconstructed soils under forestry recovery process after bauxite mining is important as a tool in the taking of decision with regard to the management of such nutrient. The aim of this study was to assess the adsorption of P in a reconstructed soil as a function of forestry recovery processes after bauxite mining, as well as its relation with some soil chemical and vegetation attributes. The study was performed in a bauxite exploration area in the municipality of Paragominas, PA. In this area, three systems were evaluated: native forest (FLO), as witness, Traditional planting of seedlings (PLT) and natural regeneration of vegetation (RNV). In each system, eight plots were implanted. In each plot, soil samples were collected at depths 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm, for fertility and phosphorus adsorption analyzes (P), and an inventory of the vegetation was carried out. All data were submitted to analysis of normality, homoscedasticity, variance, comparison of means and multivariate analysis, all at 5% significance. Regarding soil fertility attributes, FLO was higher, followed by RNV and by PLT, for most attributes. The diversity of forest species in PLT, with an index of $1.70 + 0.30$, was significantly higher than the RNV, with a rate of $0.61 + 0.41$, although there is a larger basal area RNV ($1.31 + 1.60 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) than in PLT ($0.14 + 0.11 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), in the lower stratum. In general, the adsorption curves and the maximum adsorption capacity of P in the soil followed the order $\text{PLT} > \text{RNV} > \text{FLO}$. There was a higher negative relation of the phosphorus adsorption with the organic matter content, with the $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ and the available P of the soil. This indicates the importance of the conservation and maintenance of the biomass, aiming at guaranteeing greater availability of P and avoiding the use of phosphate fertilizers, besides or less than necessary, in recovery practices. In addition, such results demonstrate that species diversity should not be the only factor to be taken into account, but also the soil cover when selecting species for recovery.

Key-words: recovery of mined areas; environmental restoration; available phosphorus; adsorption isotherms.

SUMÁRIO

RESUMO	6
ABSTRACT	7
1. CONTEXTUALIZAÇÃO	9
1.1. Revisão de Literatura	11
2. ADSORÇÃO DO FÓSFORO EM SOLO SOB RECUPERAÇÃO FLORESTAL APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS, PA	22
Resumo	22
Abstract	23
2.1. Introdução	24
2.2. Material e Métodos	25
2.2.1. Área de Estudo	25
2.2.2. Sistemas Avaliados e Delineamento Amostral	26
2.2.3. Distribuição de Parcelas e Procedimentos de Coleta	27
2.2.3.1. Inventário da Vegetação	27
2.2.3.2. Coleta de Amostras de Liteira	27
2.2.3.3. Coleta de Amostras de Solo	27
2.2.4. Variáveis Analisadas	28
2.2.4.1. Diversidade de Espécies (H'), Área Basal das Árvores (G) e Biomassa de Liteira (BLit)	28
2.2.4.2. Ensaio de Adsorção de Fósforo	28
2.2.4.3. Fósforo disponível	28
2.2.4.4. Atributos de Fertilidade do Solo	29
2.2.5. Procedimentos Estatísticos	30
2.2.5.1. Comparação de Médias	30
2.2.5.2. Análise de Componentes Principais	30
2.3. Resultados e Discussão	31
2.3. Inventário da Vegetação e Biomassa de Liteira	31
2.3.1. Atributos de Fertilidade do Solo	32
2.3.2. Adsorção de Fósforo no Solo	33
2.3.3. Isotermas de Adsorção de Fósforo no Solo	34
2.3.4. Influência de Atributos Químicos do Solo na Adsorção de Fósforo	35
2.4. Conclusões	37
2.5. Referências	49

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A exploração mineral de bauxita é uma atividade de extrema importância econômica e social, devido à grande geração de renda que a mesma traz à determinada região (IBRAM, 2012), sendo Paragominas (sudeste do estado do Pará) um dos principais polos de mineração de bauxita em todo o mundo. Contudo, a mineração é extremamente impactante ao ambiente, devido à retirada da floresta sobrejacente e das porções superficial e subsuperficial do solo (BORGES, 2013).

Desta forma, procedimentos que envolvem a exploração de bauxita tornam necessária a intervenção por meio de programas de recuperação, sendo que o aprimoramento de técnicas que vise tal recuperação é um dos principais alvos de empresas e instituições de ensino e pesquisa. Martins (2009) expõe alguns métodos de recuperação, com destaque para: plantio de mudas de espécies nativas diversas e a regeneração natural da vegetação na área. Segundo este autor, ambos os métodos são viáveis, sendo que para determinadas condições em que a área degradada se encontra, pode-se ter um método mais adequado.

A primeira etapa no processo de recuperação de áreas que foram submetidas à mineração de bauxita consiste da utilização do “topsoil”, porção superficial do solo outrora retirada e armazenada, e sua deposição sobre o material “estéril”, visando reconstruir o solo e nivelar o terreno (MIRANDA NETO et al., 2014). A recuperação de áreas mineradas tem por objetivo formar um ecossistema autossustentável e próximo das condições edáficas e vegetacionais naturais ocorrentes na região e em áreas adjacentes inexploradas. O objetivo é aproximar o sítio, em processo de recuperação, das condições de diversidade ecológica presentes em locais inalterados adjacentes (LEI et al., 2016).

Além da importância de haver indivíduos arbóreos que compõem a biodiversidade da área a ser repovoada, é necessário que haja espécies que contribuam com a cobertura e produção de biomassa sobre o solo. Desta forma, é fundamental a escolha correta de espécies vegetais para garantir um processo eficiente de recuperação da área submetida à mineração de bauxita (BRANCALION et al., 2015; SALOMÃO et al., 2014). Espécies adequadas para a recomposição vegetal podem contribuir significativamente com a produção e deposição de liteira, ocasionando, desta forma, a maior ciclagem e reposição de nutrientes (BRANCALION et al., 2015; ZHOU et al., 2016; WOLSCHICK et al., 2016), os quais possuem sua disponibilidade natural baixa nos solos amazônicos (SILVA JÚNIOR et al., 2010).

Entre os nutrientes, o fósforo (P) é um dos mais importantes ao crescimento vegetativo de espécies, em especial, devido a sua função como componente de metabólitos com potencial energético e redutor. O fósforo é absorvido pelos vegetais em suas formas iônicas disponíveis na

solução do solo (NOVAIS et al., 2007; MALAVOLTA, 2006). No entanto, esta fração disponível é altamente instável, apresentando-se como uma pequena parte do reservatório total de P no solo, sendo o mesmo compartimentalizado em frações mais resistentes (não-lábeis) e menos resistentes à solubilização e disponibilização na matriz do solo (HU et al., 2016). As frações lábeis podem ser de origem orgânica ou inorgânica, tendo a matéria orgânica uma influência considerável na ciclagem deste nutriente, o que denota a importância da conservação da biomassa sobre a superfície do solo (Redel et al., 2008).

Diversos fatores podem influenciar a disponibilidade de P às plantas, entre os quais, os íons Al^{+3} e Fe^{+2} livres em solução, as formas oxídicas de Fe e Al, além da matéria orgânica do solo. O P disponível associa-se aos íons Al^{+3} e Fe^{+2} , formando complexos fosfatados insolúveis, os quais são rapidamente precipitados. As formas oxídicas de Fe e Al, por sua vez, possuem alta afinidade pelo P, proporcionando a retenção desse elemento, por meio de processo conhecido como adsorção (RESENDE et al., 2011; BORTOLUZZI et al., 2015; LU et al., 2017). A matéria orgânica, por sua vez, pode ser fonte de P ou até proporcionar diminuição da capacidade de adsorção do mesmo no solo.

Diversos estudos têm demonstrado a contribuição de fatores que afetam a adsorção e disponibilidade de P no solo (SOARES; ALLEONI, 2008; FREITAS et al., 2013; CAMPOS et al., 2016; SANTOS et al., 2016), sendo por isso importante considerar a utilização de ferramentas que visem a avaliação da adsorção de P em áreas sob processo de recuperação ambiental após mineração de bauxita. Um método eficiente na avaliação da adsorção do P é a utilização de isotermas, que consistem de equações que visam a estimativa da adsorção do P, e que tem sido utilizado por diversos autores (GAMA, 2002; VALLADARES et al., 2003; VILAR et al., 2010; BORTOLUZZI, et al. 2015; ANTONIADIS et al., 2016).

Portanto, para garantir a recuperação da área degradada pela mineração e uma diminuição da adsorção de P, é necessário lançar mão de técnicas de manejo que mantenham um acúmulo de biomassa sobre o solo (MARANGUIT et al., 2017). Para subsidiar tais técnicas de manejo, o entendimento da adsorção e da disponibilidade do P pode propiciar uma maior eficácia nas tomadas de decisão e intervenção na dinâmica deste e de outros nutrientes, especialmente quanto à eficiência na adoção dos métodos de recuperação empregados em determinada área. Tal intervenção teria implicações, em especial, nas práticas de preparo da área, na escolha das espécies utilizadas para implantação e na racionalização da fertilização fosfatada (HUANG; TANG, 2016).

Hipótese:

As técnicas de recuperação florestal em áreas submetidas à extração de bauxita não promovem redução da capacidade de adsorção dos solos reconstruídos.

Objetivo Geral:

Avaliar a adsorção de P em solo reconstituído em função de processos de recuperação florestal após mineração de bauxita, bem como sua relação com alguns atributos químicos do solo e de vegetação.

• Objetivo Específicos:

- ✓ Analisar a adsorção do P por meio do ajuste de duas isotermas de adsorção, bem como comparar a adsorção entre os três sistemas em estudo;
- ✓ Analisar atributos químicos do solo reconstituído após mineração de bauxita;
- ✓ Analisar variáveis de vegetação e biomassa de liteira nos diferentes sistemas de recuperação;
- ✓ Avaliar a relação entre a adsorção e a disponibilidade do P com atributos químicos do solo reconstituído e com atributos de vegetação após mineração de bauxita.

1.1.Revisão de Literatura

MINERAÇÃO DE BAUXITA

A bauxita é um minério constituído por diversos minerais, dentre eles, o coríndon (Al_2O_3), o qual é comercialmente conhecido como alumina, sendo matéria prima para a produção de alumínio metálico. Além disto, tal minério é composto por diversos outros minerais, como a gibbissita (trihidrato de coríndon) e diásporo (monohidrato de coríndon). É, portanto, um recurso mineral com grande importância a vários seguimentos industriais, tais como refratários, de transformação química e metalúrgicos (HYDRO, 2015; MHE, 2018). Cerca de 74% das reservas de bauxita no País encontram-se no estado do Pará, sendo este, portanto, o maior produtor deste recurso mineral no Brasil e um dos maiores produtores no mundo. Segundo o PEM (2013), o Pará produz mais de 3,25 milhões de toneladas de alumínio, suprimindo 11 % da produção mundial deste mineral. Ao Ministério de Minas e Energia (2009), o Brasil é o terceiro maior produtor de bauxita no mundo.

De modo geral, a extração de bauxita consiste dos seguintes procedimentos operacionais: supressão vegetal, com retirada de todos os indivíduos da área; decapeamento do solo, o qual consiste da retirada do “*topsoil*” (que normalmente se estende até o horizonte B); remoção do “estéril” (camada regolítica restante até o contato com o minério de interesse econômico), visando chegar até

a reserva onde a rocha se encontra; escavação para retirada da rocha e, por fim, o transporte da bauxita até a área de beneficiamento. No local explorado, permanece um substrato desprotegido, o qual é chamado de “estéril” (sem cobertura vegetal) e, portanto, com grande suscetibilidade à erosão e ao selamento superficial. (BORGES, 2013; SALOMÃO et al., 2014).

RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO

Uma área é considerada degradada quando submetida a uma descaracterização de seu ecossistema (ou ecossistemas), suficientemente intensiva para promover perda de sua resiliência, isto é, sua capacidade de se regenerar ou recuperar pelos seus próprios meios bióticos (espécies animais dispersoras, propágulos vegetativos, banco de sementes) e abióticos (microclima favorável, fertilidade, estrutura e agregação do solo) (MARTINS, 2014; MARTINS, 2015; BRANCALION et al., 2015).

Nas áreas submetidas à exploração de bauxita, ocorrem alterações significativas no ambiente e na paisagem. A retirada da vegetação e o decapeamento do solo comprometem a possibilidade de revegetação da área por meio de estoque de nutrientes ou de banco de sementes, uma vez que estes são em sua boa parte removidos com a retirada da camada superficial do solo. Desta forma, a erradicação da degradação causada pela exploração mineral é iniciada com a conformação do terreno e reposição da camada superficial de solo que fora outrora retirada, por vezes chamada de “topsoil”. Com isto, objetiva-se que o banco de sementes presente no “topsoil”, bem como os maiores teores de material orgânico que o mesmo possui em comparação ao “estéril”, propiciem à área melhores condições para a regeneração de sua vegetação (DEMOLINARI, 2013; SILVA, 2013; BORGES, 2013).

Além da qualidade do substrato reconstituído e a da adoção correta de práticas de fertilização e correção da acidez deste substrato, a escolha correta de espécies vegetais para implantação na área também é um fator chave com vistas a garantir o sucesso no estabelecimento de determinado processo de recuperação de áreas degradadas, sobretudo em áreas de mineração (SALOMÃO e al., 2014). Silva et al. (2016), por sua vez, avaliaram o desempenho de espécies implantadas com vistas à recuperação de sítio de exploração de bauxita no estado de Minas Gerais. Foram implantados indivíduos de espécies pertencentes a 18 famílias. Foram obtidos índices de mortalidade de 22,9 %, sendo estes menores do que em outros estudos observados por estes autores. Os mesmos concluíram que as espécies implantadas têm se mostrado eficientes em prover melhorias ao substrato degradado, evitando processos erosivos e outros intempéries.

Campos e Martins (2016), estudaram a regeneração em áreas de plantio pós mineração de calcário e obtiveram que algumas espécies apresentaram limitações quanto ao seu desenvolvimento devido à competição com espécies herbáceas. Estes autores concluem que práticas de manejo para inibir o crescimento de espécies gramíneas que possam competir com as mudas de espécies florestais são necessárias.

Desta forma, além do plantio de mudas, outra técnica que tem sido bastante utilizada em áreas degradadas (inclusive pela mineração) é a regeneração natural, sem a intervenção direta por meio de implantação de mudas, sementes ou propágulos vegetativos. Esta técnica possui como principais benefícios o menor custo logístico e de mão de obra, além da possibilidade de auto seleção das espécies a repovoarem o sítio degradado por meio do próprio ecossistema (BRANCALION et al., 2015). Shono et al. (2007), em seu estudo, concluíram que a regeneração natural assistida pode ser um método eficaz de recuperar a resiliência do sítio degradado. Este método de recuperação é menos oneroso do que o plantio de mudas, o qual demanda altos custos logísticos e operacionais, encarecendo o processo de recuperação e o tornando, em muitos casos, inviável.

IMPORTÂNCIA DA COBERTURA VEGETAL NA RECUPERAÇÃO DO SOLO DEGRADADO

A sucessão dos ecossistemas amazônicos consiste da seguinte configuração: após a perturbação que gerou a modificação da paisagem e retirada da vegetação, há a colonização inicial da área por espécies herbáceas, arbustivas e, por fim, espécies arbóreas pioneiras provenientes do banco de sementes do solo e de propagação de áreas adjacentes. Contudo, a velocidade de crescimento do povoamento e cobertura do solo depende fundamentalmente do grau de perturbação da área o qual, em áreas mineradas, é considerável (MARTINS, 2015). Com isto, a proteção e cobertura do solo são comprometidos. Portanto, quando se busca o restabelecimento inicial da vegetação em áreas degradadas, em especial, pela mineração, é essencial lançar mão não apenas de maior biodiversidade, mas também de espécies chave quanto à produção de biomassa e cobertura do solo (BRANCALION et al., 2015; PLIEINGER; GAERTNER, 2011).

Em pesquisa desenvolvida em sítios florestais sob processo de recuperação, Rodrigues et al. (2010) estudaram o banco de sementes do solo e a liteira para avaliar a viabilidade de transposição destes materiais para áreas sob recuperação. Os autores concluíram que a utilização de banco de sementes em áreas degradadas se faz mais eficiente se o solo estiver coberto com biomassa vegetal (liteira).

Além disto, a cobertura vegetal também apresenta uma influência considerável na manutenção da ciclagem de nutrientes do ecossistema, por meio da constante reposição destes nutrientes ao solo. Um ecossistema com cobertura vegetal permite que o retorno de nutrientes ao solo se dê pela constante deposição de fitomassa sobre a superfície, tornando o ambiente sustentável. Isto se dá pelo fato do considerável acúmulo de biomassa na parte aérea de espécies vegetais, aumentando a atividade microbiana, o que acelera o processo de mineralização da matéria orgânica e liberação de nutrientes (YADA et al., 2015; WOLSCHICK et al., 2016). Além disto, o sistema radicular de tais espécies contribui de forma considerável com a agregação do solo, possivelmente diminuindo fenômenos como a erosão e o selamento superficial do solo (STUMPF et al. 2016). Desta forma, ecossistemas submetidos à recuperação em que a preocupação com a cobertura do solo e produção de biomassa estejam presentes são mais eficientes e tendem a tornar a recuperação do substrato reconformado mais expressivo, diminuindo os riscos com perda de nutrientes e material propagativo, especialmente por erosão (ARAÚJO et al., 2013).

Neste contexto, a cobertura vegetal exerce uma função vital na proteção do solo. Solos desprovidos de vegetação são muito suscetíveis à redução de sua biodiversidade devido à exposição ao sol (altas temperaturas), ao selamento ou encrostamento superficial e à erosão, a qual ocasiona perdas de materiais sólidos, nutrientes e materiais propagativos. Além disto, a cobertura vegetal favorece a infiltração de água e provê nutrientes ao solo por meio de sua mineralização e constante ciclagem (FINK et al., 2014; LUNA et al., 2016; MARANGUIT et al., 2017). Em solos degradados pela mineração, os quais são normalmente desprovidos de biomassa e de grandes montantes de matéria orgânica, os efeitos deletérios da reduzida cobertura vegetal tornam-se ainda mais expressivos (ZHOU et al., 2016). Esta diminuição da biomassa vegetal sobre o solo causa a perda expressiva do aporte de nutrientes ao solo, dentre eles o P disponível (FINK et al., 2014).

ADSORÇÃO E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO

O fósforo (P) é um elemento essencial ao desenvolvimento de plantas, estando o mesmo envolvido em reações fosforilativas e como componente de metabólitos com potencial energético, como a adenosina trifosfato (ATP). Na solução do solo, a forma iônica $H_2PO_4^-$ é a forma predominante para solos ácidos. Para solos alcalinos, por sua vez, a forma iônica predominante deste nutriente é HPO_4^{2-} . O transporte até próximo das raízes das plantas se dá por meio do processo de difusão, com gradiente de concentração (MALAVOLTA, 2006; ERIKSSON et al., 2016).

Apenas uma pequena porcentagem deste P em solução encontrada em sua forma disponível no solo, correspondente a 0,01% (BRADY; WEIL, 2013). No solo, o P pode ainda ocorrer em formas lábeis, que geralmente são as fontes que abastecem o P disponível na solução do solo (NOVAIS; SMITH, 1999). Vincent et al. (2012) consideram que cerca de 30% do P presente em solos tropicais, na camada superficial, encontra-se na forma orgânica, com boa parte de P orgânico lábil oriundo de adições de biomassa ao solo.

Por outro lado, a forma inorgânica lábil, oriunda das rochas fosfáticas (apatitas), apresenta menor expressividade no que concerne ao abastecimento do P ao solo (TEIXEIRA et al., 2009). Assim, a ciclagem de seu compartimento orgânico tem participação considerável em sua disponibilização ao solo na forma de íon fosfato, o que denota a importância da produção e deposição de biomassa para a disponibilidade deste nutriente (ACHAT et al., 2010; DE FOREST et al., 2010).

O P disponível é altamente instável, sendo sua presença no solo consideravelmente efêmera. Diversos fatores podem influenciar na disponibilidade de P às plantas e, notadamente, a presença de íons Al^{+3} e Fe^{+2} está entre os principais. É comum a associação do P disponível com estes íons bastante ocorrentes em solos tropicais ácidos. Como resultado desta associação, tem-se precipitação com a formação de complexos fosfatados pouco solúveis (YANG et al., 2014). A adsorção também é um fator que ocasiona, de forma significativa, a indisponibilização de P e de outros nutrientes. Este processo ocorre por meio da atração dos íons fosfato à coloides do solo, especialmente aqueles de natureza oxídica (CASAGRANDE, 1993).

Dentre os coloides minerais, os aluminossilicatos ocasionam o aumento da adsorção do P, especialmente, por meio da formação de grupamentos OH e OH_2^+ , em condições de pH mais baixo (NOVAIS; SMITH, 1999). No entanto, os óxi-hidróxidos de Fe e Al apresentam um nível de influência muito mais expressiva na adsorção deste nutriente, como constatado por Fink et al. (2016). Estes óxidos apresentam formas cristalinas e não cristalinas, as quais formam revestimentos por sobre as argilas cauliníticas. É nesta condição que a fixação do P ocorre (COSTA et al., 2016). Coloides orgânicos também contribuem com a adsorção do P, porém com menor energia de ligação (BRADY; WEIL, 2013).

Matos et al. (2017) desenvolveram um estudo avaliando a adsorção de P em solos sob floresta natural e área de savana do norte da Amazônia constataram elevadas porcentagens de adsorção de P em solos naturais. Margenot et al. (2017) avaliaram o efeito do acúmulo e da retirada de resíduos vegetais na superfície do solo sobre a disponibilidade e as frações do P, concluindo que, embora com

pouco aumento no teor de P disponível acrescentado com o acúmulo de biomassa vegetal, a fração lábil de P apresentou um aumento considerável, bem como o reservatório total de P.

A avaliação da capacidade de um solo em reter íons fosfatos geralmente é realizada em duas etapas. Na primeira etapa, é realizado um ensaio de incubação de amostras de solo com fosfato de cálcio ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) ou de potássio (KH_2PO_4) para determinação do P remanescente, o qual será utilizado para determinação da amplitude e das doses de P (ALVAREZ et al., 2000). Na segunda etapa, aplicam-se tais doses de P às amostras de solo, seguindo-se a agitação por 24 horas. Após tal procedimento, a solução aplicada (por vezes chamada de solução de equilíbrio) ao solo é filtrada e submetida à quantificação de P. Com base nesta análise, determina-se por diferença o P adsorvido. Com os valores do P adsorvido (Y) e do P contido na solução de equilíbrio (X), são ajustadas equações de adsorção, sendo duas equações mais comumente utilizadas em trabalhos envolvendo retenção de P: isoterma de Langmuir, a qual corresponde à transformação de um modelo hiperbólico e a isoterma de Freundlich, a qual é oriunda do modelo matemático exponencial (CASAGRANDE, 1993; ANTONIADIS et al., 2016).

Com base nos ajustes de isotermas de adsorção, é possível estimar alguns parâmetros que ajudam a fazer inferências acerca da capacidade que determinado solo possui de adsorver o P. A energia de ligação corresponde ao coeficiente linear nas equações de Freundlich e de Langmuir, e representa a energia necessária para que haja ligação entre o P da solução que é adicionado às amostras de solo e os colóides do solo. A Equação de Langmuir consegue ainda estimar outros dois atributos importantes: A Capacidade Máxima de Adsorção de P (CMAP), a qual corresponde à capacidade máxima que o solo possui de reter P por meio dos processos que envolvem a adsorção, a da qual ocorre a saturação dos sítios de adsorção; a Capacidade Tampão do P (também conhecido como Fator Capacidade), o qual é resultado do produto entre CMAP e energia de ligação no contexto do ajuste de isotermas, diz respeito à capacidade que o solo possui de manter as condições de P presente na solução do solo (conhecido como Fator Intensidade), sem haver ganho ou perda deste nutriente por meio de adsorção e/ou outros processos de fixação (MOUGHLI et al., 1993; BOSCHETTI et al., 1998, NOVAIS et al., 2007).

Desta forma, a utilização dos ensaios de adsorção, bem como da utilização das isotermas representam um método eficaz que nos permite inferir a respeito do P, o que pode ser útil quanto a tomadas de decisão em relação ao manejo deste e de outros nutrientes em ecossistemas degradados. Campos et al. (2016) analisaram a capacidade de adsorção de P de 29 solos brasileiros com diferentes

atributos edáficos. Os mesmos concluíram que, para a maioria dos solos, as argilas e os óxidos de Fe e Al foram os principais responsáveis pela adsorção deste nutriente no solo.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, V.; NOVAIS, R. F.; DIAS, L. E.; OLIVEIRA, J. A. Determinação e uso do fósforo remanescente. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Boletim Informativo**, v. 25, n. 1, p. 27-32, 2000.

ACHAT, D. L.; BACKER, M. R.; ZELLER, B.; PELLERIM, S.; BIENAME, S.; MOREL, C. Long-term organic phosphorus mineralization in Spodosols under forests and its relation to carbon and nitrogen mineralization. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 42, n. 5, p. 1479-1490, 2010.

ANTONIADIS, V.; KOLINIATI, R.; EFSTRATIOU, E.; GOLIA, E. Petropoulos S. Effects of soils with varying degree of weathering and pH values on phosphorus adsorption. **Catena**, v. 139, p. 214-219, 2016.

ANIKWE, M. A. N.; IBUDIALO, J. C. A. N. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani Enugu Southeastern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, v. 158, p. 32-38, 2016.

ARAÚJO, A. S. F.; CEZARS, S.; LEITE, L. F. C.; BORGES, C. D.; TSAI, S. M.; EISENHAUER, N. Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 66, p. 175-181, 2013.

BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Recuperação Florestal**. Oficina de Textos, São Paulo, 2015, 431 p.

BORGES, S. R. **Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e cafeeiro e pós-mineração de bauxita**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, 2013, 124 p.

BORUVKA, L.; KOSAK, J.; MÜHLHANSELOVÁ, M.; DONÁTOVÁ, H.; NIKODEM, A.; NEMECEK, K.; DRÁBEK, O. Effect of covering with natural “topsoil” as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 113, p. 118-123, 2012.

BORTOLUZZI, E. C.; PÉREZ, C. A. S.; ARDISSON, J. D.; TIECHER, T.; CANER, L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. **Applied Clay Science**, v. 104, p. 196–204, 2015.

BOSCHETTI, N. G.; QUINTERO, C. E.; BENVÍDEZ Q., R. A. Caracterização do Fator Capacidade de solos de Entre Ríos, Argentina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 95-99, 1998.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos**. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013. 685 p.

CAMPOS, W. H.; MARTINS, S. V. Natural regeneration stratum as an indicator of restoration in area of environmental compensation for mining limestone, municipality of Barroso, MG, Brazil. **Revista Árvore**, v.40, n.2, p.189-196, 2016.

CAMPOS, M.; ANTONANGELO, A.; ALLEONI, LRF. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 156, p. 110-118, 2016.

CASAGRANDE, J. C. **Avaliação de um modelo de complexação de superfície para adsorção de fosfato em solos ácidos no norte paulista.** Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Piracicaba: Universidade de São Paulo-Campus ESALQ, 1993, 160 p.

COSTA, M. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GONÇALVES J. L. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; SALES, M. V. S.; ALEIXO, S. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. **Forests**, v. 7, p. 1-15, 2016.

DAWS, M. I.; STANDISH, R. J.; KOCH, J. M.; MORALD, T. K.; TIBBETT, M.; HOBBS, R. J. Phosphorus fertilization and large legume species affect jarrah forest restoration after bauxite mining. **Forest Ecology and Management**. v. 354, p. 10-17, 2015.

DE FOREST, J. L.; SCOTT, L. G. Available Organic Soil Phosphorus Has an Important Influence on Microbial Community Composition. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 6, n. 74, p. 059-2066, 2010.

DEMOLINARI, M. S. M. **Dinâmica da matéria orgânica de solos em processo de reabilitação após mineração de bauxita.** Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013, 90 p.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos. 2 Ed.**, Embrapa-Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Rio de Janeiro, 1997, 212 p.

ERIKSSON, A. K.; HESTERBERG, D.; KLYSUBUN, W.; GUSTAFSSON, J. P. Phosphorus dynamics in Swedish agricultural soils as influenced by fertilization and mineralogical properties: Insights gained from batch experiments and XANES spectroscopy. **Science of the Total Environment**, v. 566-567, p. 1410-1419, 2016.

FINK, J. R.; INDA, A. B.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical soils as affected by management system and mineralogy. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 62-68, 2016.

Freitas, I. F.; Novais, R. F.; Villani, E. M. A.; Novais, S. V. Phosphorus extracted by ion exchange resins and Mehlich-1 from Oxisols (Latosols) treated with different phosphorus rates and sources for varied soilsource contact periods. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.37, p.667-677, 2013.

GAMA, M. A. P. **Dinâmica do fósforo em solo submetido a sistemas de preparo alternativos ao de corte e queima no nordeste paraense.** Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Escola Superior de Agricultura “Luíz de Queiróz”-ESALQ/USP, Piracicaba, 2002, 107 p.

HYDRO. Hydro Paragominas: Mina de bauxita. Disponível em: < <http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Operacoes-no-Brasil/Hydro-Paragominasmina/>>. Acesso em 31 de julho de 2015.

HUANG, R.; TANG, Y. Evolution of phosphorus complexation and mineralogy during (hydro)thermal treatments of activated and anaerobically digested sludge: Insights from sequential extraction and P K-edge XANES. **Water Research**, v. 100, n. 1, p. 439-447, 2016.

HU, B.; YANG, B.; PANG, X.; BAO, W.; TIAN, G. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest. **Geoderma**, v. 279, p. 61-69, 2016.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. **Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira**. 7. ed. Dez. 2012. Disponível em < www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00002806.pdf> Acesso em 02 de março de 2017.

KLEIN, A. S.; CITADINI-ZANETTI, V.; LOPES, R. P.; SANTOS, R. Regeneração natural em área degradada pela mineração de carvão em Santa Catarina, Brasil. **REM: R. Esc. Minas**, v. 62, n. 3, p. 297-304, 2009.

LEI, K.; PAN, H.; LIN, C. A landscape approach towards ecological restoration and sustainable development of mining areas. **Ecological Engineering**, v. 90, p. 320-325, 2016. ien

LUNA, L.; MIRALLES, I.; ANDRENELI, M. C.; GISPERT, M.; PELLEGRINI, S.; VIGNOZZI, N.; SOLÉ-BENET, A. Restoration techniques affect soil organic carbon, glomalin and aggregate stability in degraded soils of a semiarid Mediterranean region. **Catena**, v. 143, p. 256-264, 2016.

MALAVOLTA, E. **Manual de Nutrição Mineral de Plantas**. São Paulo: Ceres, 2006, 638 p.

MARGENOT, A. J.; PAUL, B. K.; SOMMER, R. R.; PULLEMAN, M. M.; PARIKH, S. J.; JACKSON L. E.; FONTE, S. J. Can conservation agriculture improve phosphorus (P) availability in weathered soils? Effects of tillage and residue management on soil P status after 9 years in a Kenyan Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v.166, p. 157-166, 2017.

MARTINS, S. V. **Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração**. 1. ed. Viçosa, MG: Aprenda Fácil Editora, 2014, 270 p.

MARTINS, S. V. **Recuperação Ecológica de Ecossistemas Degradados**. 2 ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2015, 376 p.

MIRANDA NETO, A.; MARTINS S. V.; SILVA, K. A.; LOPS, A. T.; DEMOLINARI, R. A. Natural regeneration in a restored bauxite mine in southeast Brazil. **Bosque**, v. 35, n. 3, p. 377-389, 2014.

MOUGHLI, L.; WESTFALL, D.G. & ALI BOUKHIAL. Use of adsorption and buffer capacity in soil testing for phosphorus. **Community of Soil Science and Plant Analysis**, v. 24, p. 1959-1974, 1993.

MUSEU DE MINERAIS, MINÉRIOS E ROCHAS HEINZ EBERT. **CORÍNDON (Corundum)**. Disponível em: <<https://museuhe.com.br/mineral/corindon-corundum/>>. Acesso em: 13/07/2018, às 17:30.

NOVAIS, R. F.; ÁLVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, 628 p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

LU, C.; YAN, D.; JIANG, H.; ZHOU, B.; LI, L.; ZHENG, Q. Environmental geochemistry significance of organic phosphorus: An insight from its adsorption on iron oxides. **Applied Geochemistry**, v. 84, p. 52-60, 2017.

MATOS, C.H.L.; MELO, V.F.; PEREIRA, S.C.; UCHÔA, S.C.P.; NASCIMENTO, P.P.R.R.; PEREIRA, R.A. Phosphorus adsorption in soils under forest and savanna from Northern Amazon, Brazil. **Semina: Ciências Agrárias**. v. 38, n. 5, p. 2909-2920, 2017.

- OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. B.; MIQUELLUTI, D. J.; SMYTH, T. J.; ALMEIDA, J. A. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 6, Viçosa, 2014.
- PAVINATO, P. S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C. A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, v. 105, p. 149-155, 2009.
- PLIENINGER, T.; GAERTNER, M. Harnessing degraded lands for biodiversity conservation. **Journal of Nature Conservation**, v. 19, p. 18-23, 2011.
- REDEL, Y.; RUBIO, R.; GODOY, R.; BORIE, F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. **Geoderma**, v. 145, p. 216-221, 2008.
- RESENDE, J. C. F.; MARKEWITZ, D.; KLINK, C. A.; BUSTAMANTE, M. M. C.; DAVIDSON, E. A. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequente burning. **Biogeochemistry**, v. 105, n. 3, p. 105-118, 2011.
- RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos do Cerrado**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas), Universidade de São Paulo-Campus ESALQ, 2013, 114 p.
- ROY, E. D. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: A review. **Ecological Engineering**, v. 98, p. 213-227, 2017.
- RODRIGUES, B. D.; MARTINS, S. V.; LEITE, H. G. Avaliação do potencial da transposição da serapilheira e do banco de sementes do solo para recuperação florestal em áreas degradadas. **Revista Árvore**, v.34, n.1, p.65-73, 2010.
- SILVA, E. N.; SANTANA, A. C. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. *Revista Ceres*, v.61, n.5, p.631-636, 2014.
- SILVA, K. A. **Avaliação de uma área em recuperação pós-mineração de bauxita, município de Descoberto, MG**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal), Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013, 103 p.
- SILVA JÚNIOR, C. A.; BOECHAT, C. L.; CARVALHO, L. A. Atributos químicos do solo sob conversão de floresta amazônica para diferentes sistemas na região Norte do Pará, Brasil. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 4, p. 566-572, 2012.
- SALOMÃO, R. P.; BRIENZA JÚNIOR, S.; ROSA, N. A. Dinâmica de reflorestamento em áreas de recuperação após mineração em unidade de conservação na Amazônia. *Revista Árvore*, v.38, n.1, p.1-24, 2014.
- SHONO, K.; CADAWENG, E. A.; DURST, P. B. Application of Assisted Natural Regeneration to Restore Degraded Tropical Forestlands. **Restoration Ecology**, v. 15, n. 4, p. 620–626, 2007.
- SOARES, M.R.; ALLEONI, L.R.F. Contribution of soil organic carbon to the ion exchange capacity of tropical soils. **Journal of Sustainable Agriculture**, v.32, p.439-462, 2008.
- SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; MAMO, T.; FRITZSCHE, F.; ZECH, W. Phosphorus forms and dynamics as influenced by land use changes in the sub-humid Ethiopian highlands. **Geoderma**, v. 105, p. 21-48, 2002.
- STUMPF, L.; PAULETTO, E. A.; PINTO, L. F. S. Soil aggregation and root growth of perennial grasses in a constructed clay minesoil. **Soil & Tillage Research**, v. 161, p. 71-78, 2016.

- TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI F. **Decifrando a Terra**. 2 ed. São Paulo-SP: Companhia Editora Nacional, 2009, 576 p.
- VALLADARES, G. S.; PEREIRA, ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, v.62, n.1, p.111-118, 2003.
- VILAR, C.C.; COSTA, A.C.S.; HOEPERS, A.; SOUZA JUNIOR, I. G. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1059-1068, 2010.
- VINCENT, A. G.; SCHLEUCHER, J.; GRÖBNER, G.; VESTERGRÉN, J.; PERSSON, P. JANSSON, M.; GIESLER, R. Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: the role of iron and aluminium. **Biogeochemistry**, v. 108, 485–499, 2012.
- WOLSCHICK, N. H.; BARBOSA, F. T.; BERTOL, I.; SANTOS, K. F.; WERNER, R. S.; BAGIO, B. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v. 15, n. 2, p. 134-143, 2016.
- VOLKEN, A. V. **Análise da regeneração natural da vegetação em área impactada por pedreira de granito abandonada, Viamão-RS**. Dissertação (Mestrado em Avaliação de Impactos Ambientais em Mineração). Centro Universitário La Salle, Canoas, 2011, 156.
- WICK, A. F.; STAHL, P. D.; INGRAM, L. J.; VICKLUND, L. Soil aggregation and organic carbon in short-term stockpiles. **Soil Use and Management**, v.25, n.3, p.311-319, 2009.
- YADA, M. M.; MINGOTTE, F. L. C.; MELO, W. J.; MELO, G. P.; MELO, V. P.; LONGO, B. M.; RIBEIRO, A. I. Atributos Químicos e bioquímicos em solos degradados por mineração de estanho e em fase de recuperação em ecossistema amazônico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v., 39, p. 714-724, 2015.
- YANG, G. R.; HAO, X. Y.; LI, C. L.; LI, Y.M. Effect of Land Use on Soil Phosphorus Sorption-Desorption Under Intensive Agricultural Practices in Plastic-Film Greenhouses. v. 24, n. 3, p. 367-377, 2014.
- ZHOU, J.; FU, BOJE.; GAO, G.; LÜ, Y.; LIU, Y.; LÜ, N.; WANG, S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Catena*, v. 137, p. 1-11, 2016.

2. ADSORÇÃO DO FÓSFORO EM SOLO SOB RECUPERAÇÃO FLORESTAL APÓS MINERAÇÃO DE BAUXITA EM PARAGOMINAS, PA

RESUMO

A compreensão sobre a disponibilidade e retenção do fósforo (P) em solos reconstituídos sob recuperação florestal em áreas de mineração de bauxita é imprescindível, para garantir melhores tomadas de decisão quanto ao manejo deste nutriente. O objetivo deste estudo foi avaliar a adsorção de P em solo reconstituído em função de processos de recuperação florestal após mineração de bauxita. Foram avaliados três sistemas: floresta nativa (FLO), como testemunha, plantio de tradicional de mudas (PLT) e regeneração natural da vegetação (RNV). Em cada sistema, foram implantadas oito parcelas. Em cada parcela foi realizado um inventário da vegetação e foram coletadas amostras de solo, às profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm, para análises de fertilidade e de adsorção do P. Quanto à maioria dos atributos de fertilidade, FLO se mostrou superior, seguida de RNV e por fim PLT. A diversidade de espécies florestais em PLT, com índice de $1,70 \pm 0,30$, mostrou-se significativamente superior à RNV, com índice de $0,61 \pm 0,41$, apesar de haver uma maior ocupação da área por parte dos indivíduos da RNV ($1,31 \pm 1,60 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) do que em PLT ($0,14 \pm 0,11 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), no estrato inferior. De modo geral, as curvas de adsorção e a capacidade máxima de adsorção de fósforo no solo seguiram a ordem $\text{PLT} > \text{RNV} > \text{FLO}$. Percebeu-se maior relação negativa da adsorção do fósforo com o teor de matéria orgânica, com a acidez potencial e com o fósforo disponível do solo. Isto mostra a importância da conservação e manutenção da biomassa na garantia da disponibilidade de fósforo em práticas de recuperação. Além disto, tais resultados indicam que, além da diversidade de espécies, a cobertura do solo também deve ser considerada ao se selecionar espécies para a melhoria a disponibilidade do P em sistemas em recuperação.

Palavras-chave: recuperação de áreas degradadas; restauração ambiental; fósforo disponível; isotermas de adsorção.

2. PHOSPHORUS ADSORPTION IN SOIL UNDER FORESTRY RECOVERY AFTER BAUXITE MINING IN PARAGOMINAS, PA

ABSTRACT

The comprehension about the phosphorus (P) availability and retention in reconstructed soils under forestry recovery process after bauxite mining is important as a tool in the taking of decision with regard to the management of such nutrient. The aim of this study was to assess the adsorption of P in a reconstructed soil as a function of forestry recovery processes after bauxite mining. The study was performed in a bauxite exploration area in the municipality of Paragominas, PA. In this area, we assessed three systems: native forest (FLO), as witness, Traditional planting of seedlings (PLT) and natural regeneration of vegetation (RNV). In each system, eight plots were implanted. In each plot, soil samples were collected at depths 0-5, 5-10, 10-20 and 20-40 cm, for fertility and phosphorus adsorption analyzes (P), and an inventory of the vegetation was carried out. All data were submitted to analysis of normality, homoscedasticity, variance, comparison of means and multivariate analysis, all at 5% significance. Regarding soil fertility attributes, FLO was higher, followed by RNV and by PLT, for most attributes. The diversity of forest species in PLT, with an index of $1.70 + 0.30$, was significantly higher than the RNV, with a rate of $0.61 + 0.41$, although there is a larger basal area RNV ($1.31 + 1.60 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$) than in PLT ($0.14 + 0.11 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$), in the lower stratum. In general, the adsorption curves and the maximum adsorption capacity of P in the soil followed the order $\text{PLT} > \text{RNV} > \text{FLO}$. There was a higher negative relation of the phosphorus adsorption with the organic matter content, with the $\text{CTC}_{\text{pH}7}$ and the available P of the soil. This indicates the importance of the conservation and maintenance of the biomass, aiming at guaranteeing greater availability of P and avoiding the use of phosphate fertilizers, besides or less than necessary, in recovery practices. In addition, such results demonstrate that species diversity should not be the only factor to be taken into account, but also the soil cover when selecting species for recovery.

Key-words: recovery of mined areas; environmental restoration; available phosphorus; adsorption isotherms.

2.1. Introdução

A exploração de bauxita é uma atividade de extrema importância econômica e social (IBRAM, 2012), apesar de causar grande impacto para vegetação, fauna e solo, devido à retirada da cobertura vegetal e da porção superficial e subsuperficial do solo. As alterações geradas por tal atividade tornam necessária a intervenção antrópica por meio de práticas de recuperação (BORGES, 2013). Entre os principais métodos de recuperação estão o plantio de mudas de espécies nativas diversas e a regeneração natural da vegetação na área, sendo que a escolha do método deve ser precedida da avaliação de espécies aptas à melhoria da resiliência da área minerada (Martins, 2009).

Os substratos constituídos em área minerada, utilizados no processo de recuperação, devem apresentar boas condições de fertilidade e de cobertura aos propágulos vegetais (BORUVKA et al., 2012). Isto revela a necessária preocupação com a cobertura de biomassa sobre o solo em recuperação, a qual é responsável por proteger a erosão, bem como prover e ciclar nutrientes no sistema solo-planta (HALL et al., 2010; WOLSCHICK et al., 2016). Neste sentido, destaca-se o fósforo (P), vital ao crescimento e desenvolvimento das plantas, o qual possui uma disponibilidade consideravelmente baixa em solos tropicais (RESENDE et al., 2011; VINCENT et al., 2012). A baixa disponibilidade de P no solo é ocasionada por diversos processos, sendo que a adsorção um dos principais responsáveis por esta baixa disponibilidade no solo (GUEDES et al., 2015; LU et al., 2017).

Para amenizar a deficiência do fósforo no solo, em áreas sob recuperação e em plantios de modo geral, é comum a aplicação de altas doses de adubos fosfatados visando um crescimento mais eficiente da vegetação, o que muitas vezes não ocorre, devido às dinâmicas adsorção (TOWNSEND; PORDER, 2012). No entanto, Daws et al. (2015), constataram que somente a adubação fosfatada, na maioria dos casos, não é suficiente para garantir o crescimento das espécies implantadas em áreas sob processo de recuperação após mineração e que o conhecimento das condições do solo e a escolha de espécies adequadas devem ser também considerados nessas condições.

Desta forma, a adoção de práticas de manejo do solo e o emprego de espécies vegetais adequadas, podem influenciar significativamente a produção de biomassa e cobertura do solo e, conseqüentemente, a ciclagem e reposição de nutrientes (ANIKWE; IBUDIALO, 2016). De acordo com Redel et al. (2008), a fração orgânica do P é a principal responsável pela disponibilização e ciclagem deste nutriente, o que ressalta a importância do manejo que promova a conservação da biomassa, sobretudo em solos degradados sob processo de recuperação.

Adicionalmente, é importante compreender os fatores que influenciam o comportamento do P e sua adsorção no solo, tais como a capacidade de troca catiônica, matéria orgânica do solo, além

da biomassa vegetal acumulada (liteira) e da cobertura vegetal. Campos et al. (2016) desenvolveram um estudo avaliando a influência de diferentes atributos edáficos, como os óxidos de Fe e Al, pH e carbono orgânico, sobre a sorção do P por meio de análise de componentes principais. Estes autores constataram um nível de influência considerável destes atributos sobre os índices de adsorção do P nos solos em estudo.

O presente estudo apresenta a hipótese de que as técnicas de recuperação florestal em áreas submetidas a extração de bauxita não promovem redução da capacidade de adsorção dos solos reconstruídos. Portanto, objetivou-se avaliar a adsorção de P em solo reconstituído em função de processos de recuperação florestal após mineração de bauxita, bem como sua relação com alguns atributos químicos do solo e de vegetação.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Área de Estudo

A área de estudo localiza-se no sítio de extração mineral de bauxita, pertencente à Mineração Paragominas S.A. , a qual está localizada no município de Paragominas, nordeste do estado do Pará (3°15'38"S e 47°43'28"W). O sítio de exploração de bauxita está inserido em um platô Miltônia 3 (Hydro, 2015). O clima da região é o mesotérmico úmido, com classificação Am, de acordo com Koppen (Bastos et al., 2005). A precipitação anual média varia entre 2250 e 2500 mm, umidade do ar média de 85 % e temperatura média anual de 25 °C (SEPOF, 2014). O tipo de vegetação predominante na área do platô antes de sua supressão para a atividade minerária era a floresta ombrófila densa submontana. O solo predominante da área é o Latossolo Amarelo distrófico de textura muito argilosa, com 700 g kg⁻¹ de argila) conforme classificação proposta por Santos et al. (2013).

As atividades de exploração de bauxita das áreas objeto do presente estudo ocorreram até o ano de 2008. A exploração consistiu das seguintes etapas: a supressão da vegetação, com retirada da biomassa vegetal, o que também ocasiona uma perda de parte do horizonte A do solo, a qual ocorreu em 2007; após isto, ocorre o decapeamento do solo, consistindo na retirada da camada superficial e subsuperficial, que está acima da camada de bauxita. A parte superficial com resíduos de matéria orgânica é armazenada em um local separado, sendo denominada de “topsoil”. A parte subsuperficial é chamada de “estéril” e, inicialmente no processo de mineração, foi também armazenada em local separado, após escavação e retirada desse material até encontrar a camada contendo bauxita. A lavra de bauxita ocorreu no ano de 2008.

Após extração de bauxita, se iniciou o processo de reconformação da paisagem retornando

com o “estéril” à área e em seguida realizando o nivelamento superficial. A partir disso ocorreu a deposição e espalhamento do “topsoil” por sobre estéril nivelado. A partir dessa reconstrução do solo ocorreu a aplicação de métodos de recuperação (Figura 1). Na área de estudo, as práticas de conformação do terreno e de aplicação dos métodos de recuperação foram realizadas no ano de 2009.

2.2.2. Sistemas Avaliados e Delineamento Amostral

Neste estudo considerou-se um delineamento inteiramente ao acaso, considerando três áreas de avaliação, descritas abaixo:

FLO: Fragmento de vegetação nativa classificada como remanescente de floresta ombrófila densa, com 20 ha, sem uso para extração mineral. A área foi submetida à exploração madeireira mecanizada e semimecanizada até o ano 2003, portanto 13 anos antes das atividades de coleta e medição do presente estudo.

RNV: Área de 21,04 ha em processo de recuperação florestal, estabelecida entre abril e junho de 2009, pela técnica de regeneração natural após extração de bauxita realizada, a qual ocorreu em 2008.

PLT: Área de 71,44 ha em processo de recuperação florestal, estabelecida entre abril e junho de 2009, pela técnica de plantio de mudas nativas, após extração de bauxita, a qual ocorreu em 2008.

As atividades de reconformação nas áreas de PLT foram semelhantes a RNV, com adição das seguintes práticas de manejo: subsolagem de 60 cm na linha de plantio juntamente com adubação fosfatada com fosfato natural reativo (33 % de P_2O_5 total). Posteriormente, foram abertas covas de 30 x 30 x 30 cm. Após 15 dias, foi realizada adubação NPK 06-30-06 juntamente com 0,5% de B, 0,5% de Cu e 0,5% de Zn, 200 g por cova. Além disto, foram aplicados 2,5 kg de adubo orgânico em sobre a porção de solo retirada da cova. Após a aplicação dos adubos (químico e orgânico) os mesmos foram incorporados e bem misturados fora da cova e posteriormente recolocados toda a mistura na cova. Para esta atividade foi utilizado um dosador padrão.

Em seguida, foi realizado o plantio das mudas com espaçamento 3 x 3 m (1.111 indivíduos ha^{-1}), com uma composição de, aproximadamente, 104 espécies florestais. Segundo informações dos trabalhadores de campo, houve mortalidade de parte dos indivíduos implantados na área. Durante os três primeiros após o plantio, foram realizadas praticas de matocompetição e de capina na área. Tais práticas foram encerradas no ano de 2012.

2.2.3. Distribuição de Parcelas e Procedimentos de Coleta

A coleta de dados e de amostras foi realizada durante os meses de janeiro a março de 2017 (período chuvoso). Foram distribuídas, aleatoriamente, oito parcelas de dimensões 10 x 20 m (200 m²), em toda a extensão de cada uma das áreas em avaliação. Dentro de cada parcela, foram realizadas coletas de amostras de solo e de liteira e inventário da vegetação. As parcelas foram subdivididas em subparcelas de 10 x 10 m (100 m²), visando dividir o levantamento dos indivíduos arbóreos em dois estratos.

2.3.3.1. Inventário da Vegetação

O inventário florestal nas parcelas consistiu na identificação dos indivíduos em nível de espécies e na mensuração do Diâmetro à Altura do Peito (DAP), medido a 1,3 m do solo. Os indivíduos foram classificados em dois estratos: superior e inferior, de acordo com o seu porte (Tabela 1). O levantamento dos indivíduos do estrato médio se deu na porção maior da parcela (10 x 20 m), enquanto que o levantamento dos indivíduos do estrato superior, por sua vez, ocorreu na subparcela de 10 x 10 m a qual também consistiu da identificação botânica e do DAP.

Foram determinadas as cinco espécies mais relevantes para sistema avaliado dentro de cada estrato vertical, por meio da análise do Índice de Valor de Importância (IVI), conforme exposto na Tabela 2.

2.3.3.2. Coleta de Amostras de Liteira

Em cada parcela (10 x 20 m), foram realizadas amostragens pontuais (de um único período do ano) de liteira depositada e acumulada sobre o solo, com o auxílio de um quadro coletor de tamanho 50 x 50 cm (2500 cm²). Tal amostragem consistiu da coleta de três amostras simples distribuídas de forma homogênea na área da parcela. Após a secagem e pesagem, estas três amostras foram misturadas e homogeneizadas para obtenção de uma amostra composta representativa de cada parcela.

2.3.3.3. Coleta de Amostras de Solos

Nos pontos de coleta de liteira, foram realizadas amostragens de solo, com auxílio de um trado holandês. Estas amostragens consistiram da coleta de três amostras simples distribuídas aleatoriamente na área da parcela as quais foram misturadas e homogeneizadas para a formação de

uma amostra composta. As amostras coletadas nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm foram utilizadas no estudo de adsorção de P e na análise de atributos químicos do solo.

2.2.4. Variáveis Analisadas

2.2.4.1. Diversidade de Espécies (H'), Área Basal das Árvores (G) e Biomassa de Littera (BLit):

Para cada um dos dois estratos estabelecidos, foi determinado o Índice de Diversidade de Espécies para as espécies florestais nas parcelas de cada uma das três áreas estudadas. A determinação da Diversidade de Espécies Florestais se deu pelo cálculo do Índice de Shannon-Weaver, o qual considera a abundância ou densidade das espécies, como expresso abaixo:

$$H' = - \sum_{i=1} \left(\frac{ni}{N} \right) * \ln \left(\frac{ni}{N} \right)$$

Na qual: ni =número de indivíduos da espécie i ; N =número de indivíduos total da amostra.

Também foi determinada a área basal das espécies florestais dentro de cada parcela, para cada uma das áreas em estudo. Além disto, foi feita a lista das cinco espécies mais relevantes em cada sistema por estrato por meio do cálculo do valor de importância, que leva em consideração a abundância relativa (razão entre número de indivíduos por espécie e número total de indivíduos), dominância relativa (equivalente à área basal da espécie dividido pela área basal total) e frequência relativa (razão entre ocorrência de indivíduos na parcela por cada espécie e ocorrência total de indivíduos), para fins de caracterização das áreas em avaliação (Tabela 2).

As amostras de littera foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar, a uma temperatura de 65 °C até peso constante. Estas foram, então, separadas em material lenhoso e não lenhoso e, posteriormente, pesadas em balança analítica. Após pesagem, as massas secas das três subamostras foram utilizadas para determinação da média de matéria de littera (BLit) para cada parcela. Os valores foram extrapolados para $g\ m^{-2}$, multiplicando-se o valor de massa seca de littera pelo fator de proporcionalidade obtido a partir da razão $1\ m^2/0,25\ m^2$ (que corresponde à área do esquadro utilizado para a coleta de littera, 0,5 x 0,5 m).

2.2.4.1. Ensaios de Adsorção de P

A análise da adsorção foi dividida em três etapas: na primeira etapa, algumas amostras foram submetidas à adição de 60 $mg\ L^{-1}$ de P na forma de KH_2PO_4 , para avaliação do P remanescente (P-rem). Com o valor obtido e com a tabela fornecida por Alvarez et al. (2000), foi estabelecida a amplitude das doses de P a serem aplicadas às amostras, como sendo de 0 a 110 $mg\ L^{-1}$ de P na forma

de KH_2PO_4 . Tais incubações ocorreram com temperatura do ar em 20 °C. Com isto, iniciou-se a segunda etapa, a qual consistiu da aplicação das seguintes doses de P: 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 70, 90, 110 mg de P/L de solução, juntamente com CaCl_2 0,01 M (eletrólito suporte), a serem adicionados às amostras, seguindo a metodologia descrita por Casagrande (1993).

Após 24 horas de agitação a 120 rpm, realizou-se a filtração para separação da solução de equilíbrio, seguida da determinação do P da solução de equilíbrio, por meio da metodologia proposta por Murphy e Riley (1962). A diferença entre o P da solução de equilíbrio e a dose adicionada ao solo foi utilizada para determinar o P adsorvido pelos colóides do solo. Para tais procedimentos, foi tomada como base a metodologia proposta por Olsen & Watanabe (1957). Com base nos dados obtidos, procedeu-se a terceira etapa, que consistiu na estimativa da adsorção de P por meio do ajuste de duas isotermas: a Isoterma de Langmuir (1) e a Isoterma de Freundlich (2):

$$(1) \text{Pad} = \frac{k * P * \text{CMAP}}{1 + k * P}$$

Na qual: *Pad*: P adsorvido (mg g^{-1}); *k*: constante da energia de ligação do elemento com o solo (mg L^{-1}); P: concentração de P na solução de equilíbrio (mg L^{-1}); CMAP: Capacidade Máxima de Adsorção do P (mg L^{-1}).

$$(2) \text{Pad} = k * P^{1/n}$$

Na qual: *Pad*: P adsorvido (mg g^{-1}); *k*: constante da energia de ligação do elemento com o solo (mg L^{-1}); P: concentração de P na solução de equilíbrio (mg L^{-1}).

Ambas as isotermas, Langmuir (1) e Freundlich (2) foram ajustadas em suas formas linearizadas, para posterior conversão em suas formas originais, como exposto abaixo:

$$(1) \frac{P}{\text{Pad}} = \frac{1}{k * \text{CMAP}} + \frac{1}{\text{CMAP}} * P$$

Na qual: *Pad*: P adsorvido (mg g^{-1}); *k*: constante da energia de ligação do elemento com o solo (mg L^{-1}); P: concentração de P na solução de equilíbrio (mg L^{-1}); CMAP: Capacidade Máxima de Adsorção do P (mg L^{-1}).

$$(2) \log(\text{Pad}) = \log(k) + \left(\frac{1}{n}\right) * \log(P)$$

Na qual: *Pad*: P adsorvido (mg g^{-1}); *k*: constante da energia de ligação do elemento com o solo (mg L^{-1}); P: concentração de P na solução de equilíbrio (mg L^{-1}).

Os dois modelos foram comparados para determinação do melhor modelo a ser utilizado para estimativa da adsorção de P no solo. Os seguintes critérios foram considerados: coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (EP), e quadrado médio residual da estimativa (QMR).

2.2.4.3. Atributos de Fertilidade do Solo

Foram analisados: os teores de P disponível (Pd); pH em H_2O e pH em KCl; cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), potássio (K^+) e alumínio (Al^{+3}) trocáveis; acidez potencial (H+Al) e carbono orgânico do solo (C.O.), seguindo metodologia descrita por Embrapa (2009). Além disto, foram determinadas, por meio de cálculos, a matéria orgânica do solo (M.O.S.) por meio do cálculo $C.O. * 1,724$; a soma de bases (SB), que envolve a somatória de bases trocáveis (Ca^{+2} , Mg^{+2} e K^+), a capacidade de troca catiônica potencial (CTC_{pH7}) pela fórmula: $CTC_{pH7}=SB+H+Al$, e a saturação por bases (V%), expressa conforme a fórmula: $V\% = \left(\frac{SB}{CTC_{pH7}} \right) * 100$.

2.2.5. Procedimentos Estatísticos

Antes de proceder as análises estatísticas, todos os dados foram submetidos aos testes de normalidade por Kolmogorov-Smirnov e de homocedasticidade por Hartle, ambos a 5 % de significância ($p<0,05$).

2.2.5.1. Comparação de Médias

Os dados de H' (Estratos 1 e 2), G (Estratos 1 e 2), BLit, CMAP, de Pd, de P adsorvido para cada dose de P aplicada e dos demais atributos de fertilidade do solo foram submetidos à análise de variância ("one-way") pelo Teste F ($p<0,05$) e à comparação de médias pelo Método de Tukey ($p<0,05$), entre os diferentes sistemas (FLO, RNV e PLT) em cada profundidade estudada (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm).

2.2.5.2. Análise de Componentes Principais (ACP)

Foram tomadas as seguintes variáveis: H' (Estratos 1 e 2), G (Estratos 1 e 2), BLit, CMAP, Pd, pH em H_2O , pH em KCl, SB, Al^{+3} , CTC_{pH7} , M.O., V%. Estas foram dispostas em uma matriz, visando avaliar as inter-relações que as mesmas apresentam entre si. A partir da formação dos grupos, foram determinados os componentes principal e secundário, com o critério estabelecido por Kaiser (1958) para a determinação das correlações mais relevantes (autovalores maiores ou iguais a 1). As variáveis ecológicas (H', G e BLit) foram submetidas a quatro análises de componentes principais juntamente com as variáveis de fertilidade do solo em cada uma das profundidades do solo (0-5, 5-10, 10-20 e 20-40 cm).

2.3. Resultados e Discussão

2.3.1. Inventário da Vegetação e Biomassa de Liteira

Houve diferença quanto à área basal (G) em ambos os estratos estabelecidos (Tabela 3). No estrato 1, FLO e PLT foram estatisticamente iguais, tendo ambos apresentado valores médios significativamente maiores em relação a RNV. Isto pode estar relacionado ao estabelecimento das mudas no plantio que, pela mortalidade nas áreas de PLT, proporcionou diminuição da densidade de indivíduos e aumento do diâmetro de parte das árvores nesse sistema, ocasionando a proximidade deste sistema com FLO. Por outro lado, no estrato 2, PLT apresentou área basal significativamente menor que FLO e RNV, os quais foram estatisticamente iguais entre si. Portanto, a técnica de recuperação com RNV apresenta maior ocupação de área com indivíduos mais jovens do que PLT, uma vez que as práticas de manejo exercidas em PLT podem ter diminuído a quantidade de indivíduos de porte menor nesse sistema.

Quanto à diversidade de espécies florestais no estrato 1, observou-se que a FLO apresentou maior valor médio, seguida do PLT e, RNV. A grande quantidade de espécies implantadas em PLT contribuiu para maior diversidade em comparação a RNV. No estrato 2, por sua vez, RNV apresentou diversidade de espécies florestais igual a PLT e ambos apresentaram diversidade estatisticamente menor à FLO (Tabela 3).

Estes resultados ressaltam a importância da escolha de espécies adequadas e adaptadas às condições adversas da área a ser recuperada, como também constatado por Salomão et al. (2014) ao desenvolverem um estudo avaliando o crescimento e o estabelecimento de espécies plantadas, com vistas à recuperação, em área de mineração. Estes autores concluíram que quase metade das 89 espécies implantadas na área foram inadequadas à recuperação, tendo em vista o alto grau de mortalidade de tais espécies, e a conseqüente diminuição no grau de ocupação de área pelas mesmas. Os autores reiteram a importância de se escolher espécies adequadas para compor a recuperação.

Além disso, os resultados de área basal encontrados para o PLT e RNV podem ser associados às práticas de roçagem e capina realizadas nas áreas sob PLT, o que não ocorreu quando a recuperação é com RNV, favorecendo a maior regeneração por espécies que compõem o banco de sementes do solo reconstituído. A área basal em RNV estatisticamente igual à PLT, no estrato 2, pode ter contribuído grandemente para a produção de biomassa vegetal elevada na superfície do solo sob regeneração.

Como exposto na Tabela 4, as áreas sob RNV apresentaram valores maiores de massa seca de liteira (BLit) do que PLT, não diferindo da FLO, a qual apresentou dados semelhantes a outros estudos que avaliaram o acúmulo de liteira em solos sob florestas tropicais, sejam secundárias, intactas ou exploradas (BARLOW ET AL., 2007; VASCONCELOS ET AL., 2008; ALMEIDA ET AL., 2015)

A composição florística da RNV é predominantemente composta por espécies pioneiras com elevada produção de biomassa em espaço de tempo relativamente curto (MARTINS, 2015). Para a RNV, tais resultados são também reflexo do hábito de crescimento das espécies mais relevantes nesta área (Tabela 2), as quais apresentam ritmo de desenvolvimento acelerado, com rápida produção de biomassa e deposição de folhas e galhos sobre o solo (MARTINS, 2012), como também constatado por Lima (2014) e Martins (2016) na presente área de estudo.

2.3.1. Atributos de Fertilidade do Solo

Os dados de fertilidade do solo em função das técnicas de recuperação e profundidades avaliadas (Tabela 5) demonstram que os valores de pH em KCl são menores do que os valores de pH_{H₂O}, demonstrando maior eletronegatividade deste solo, em função, especialmente, da deposição de resíduos que contribuiriam com o aumento dos teores de M.O.S. (ANTONIADIS et al., 2016). Maiores valores de pH H₂O e de pH em KCl foram encontrados em RNV em comparação aos demais sistemas, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Na profundidade de 20-40 cm, contudo, os valores de pH foram estatisticamente iguais entre RNV e PLT. Em praticamente todas as profundidades, FLO apresentou valores mais baixos de pH, provavelmente devido à liberação de ácidos húmicos e fúlvicos com a decomposição da matéria orgânica (BRADY; WEIL, 2013).

Esses resultados com pH do solo sob FLO justificam os maiores teores de Al⁺³ obtidos nessas áreas nas profundidades 5-10, 10-20 e 20-40. Alguns trabalhos mostram que a redução dos valores pH do solo ocasionam maior solubilização do Al⁺³ e diminuição das bases trocáveis (FRANCHINI et al., 2000). Corroborando com os resultados do presente estudo, Bizutti (2017) também constatou em solo sob floresta valores mais baixos de pH e valores elevados de acidez potencial e de matéria orgânica, ao avaliar atributos químicos de um solo degradado por mineração de bauxita, comparando uma área recém-minerada, uma área submetida à recuperação florestal e uma área de floresta nativa inexplorada

Quanto a SB e V %, obtiveram-se valores significativamente maiores em RNV do que em PLT, o que provavelmente denota uma maior ciclagem de nutrientes na RNV, ainda que na área de PLT tenha ocorrido a implantação de espécies vegetais, além de calagem e adubação. O menor valor

desses parâmetros no PLT em relação a RNV pode estar associado às práticas de roçagem e capina realizadas na primeira área.

A roçagem e a capina podem ter diminuído significativamente a biomassa vegetal viva presente na superfície do solo, proporcionando menor teor de matéria orgânica e perda considerável de nutrientes por lixiviação e/ou por erosão e diminuição da ciclagem de nutrientes em PLT. Segundo Silva Júnior et al. (2010), em sistemas de manejo que ocasionam a diminuição da biomassa vegetal sobre a superfície do solo, a consequente depleção da matéria orgânica acarreta a diminuição significativa do teor de nutrientes, especialmente a médio e longo prazo. Houve um comportamento similar entre os valores de CTC_{pH7} e M.O., os quais foram, no geral, significativamente maiores em FLO do que nos demais sistemas. Esse resultado é geralmente esperado já que a MO contribui no aumento dos valores de CTC.

Em todas as profundidades, o PLT apresentou menores teores de M.O. e, conseqüentemente, CTC. às atividades de capina e de coroamento podem ter causado a diminuição na produção de biomassa vegetal sobre o solo. A RNV, por sua vez, mostrou-se mais próxima do FLO quanto a CTC, sendo ambos os sistemas avaliados estatisticamente iguais às profundidades 5-10 e 10-20 cm. Isto evidencia o fato de que ao deixar área sob regeneração natural desprovida de tratamentos silviculturais severos, como capina, roçagem e coroamento, ocorre maior acúmulo de biomassa sobre o solo, com redução dos custos operacionais (SHONO et al., 2007).

Braga et al. (2016), em seu estudo, ressaltam a importância da biomassa em florestas tropicais para a ciclagem de nutrientes, a qual é sempre elevada e constante. Banning et al. (2008) consideram que, em áreas mineradas em processo de recuperação, ações que visem ao aumento do teor de carbono orgânico no solo são fundamentais para garantir uma maior atividade biológica e, conseqüentemente, um aumento na disponibilidade de nutrientes por meio da mineralização da matéria orgânica. Tal fato justifica a necessidade de se adotar práticas de manejo visando a manutenção da biomassa em solos degradados, como no presente estudo.

2.3.1. Adsorção de P no Solo

Para as primeiras doses, houve uma porcentagem de adsorção extremamente elevada, com valores acima de 95% de P aplicado ao solo e adsorvido (Tabela 6). No entanto, para as maiores doses de P aplicado (70, 90 e 110 mg dm⁻³ de P), uma proporção menor deste P foi retida pelo solo (em torno de 50 %), denotando uma saturação nos sítios de adsorção, provavelmente devido à uma alta afinidade do P pela fase sólida, a qual diminui à medida que os sítios de adsorção são reinseridos no sistema (FALCÃO et al., 2004).

A RNV apresentou o menor valor de P adsorvido para todas profundidades quando da aplicação de 5 mg dm^{-3} de P e igualando-se estatisticamente à FLO em algumas profundidades das doses 10 e 15 mg dm^{-3} de P, o que denota uma menor capacidade de adsorção do solo sob RNV com aplicação de doses mais baixas de fosfato. Com exceção da dose de 90 mg dm^{-3} do P, a RNV e a FLO apresentaram adsorção menor que PLT na profundidade de 0-5 cm, o que provavelmente está atrelado a uma maior influência da cobertura vegetal nesta profundidade, em especial para estes dois sistemas, uma vez que o PLT apresentou valores de biomassa de liteira menores do que a RNV e a FLO (Tabela 3).

Para a maioria das doses de P aplicadas, valores de P adsorvido foram significativamente maiores para PLT em relação a FLO e RNV, especialmente nas profundidades de 0-5 e 5-10 cm. Para as profundidades de 10-20 e 20-40 cm, no entanto, os valores de P adsorvido foram iguais entre RNV e PLT para a maioria das doses, o que denota uma maior relevância do material predominante em tais profundidades (material “estéril”), especialmente por conta dos menores teores de matéria orgânica e, conseqüentemente, maior influência dos óxidos de Fe e Al nestas profundidades.

2.3.2. Isotermas de Adsorção de P no Solo

Para todos os sistemas avaliados e para todas as profundidades, obtiveram-se ajustes satisfatórios de ambos os modelos de Langmuir e Freundlich, com erros padrão e quadrados médios residuais relativamente baixos e com coeficientes de determinação (R^2) acima de 0,90 (Tabela 7), demonstrando a eficiência dos modelos para estimar a adsorção de P em solos sob recuperação florestal após mineração de bauxita. Para todas as profundidades, a CMAP seguiu a seguinte ordem: PLT>RNV>FLO.

Em todas as profundidades, RNV e PLT apresentaram melhores ajustes com a equação de Langmuir. Contudo, para FLO, Freundlich apresentou melhores parâmetros de ajuste. Tais resultados são refletidos nas curvas ajustadas de Langmuir e Freundlich (Figura 4). Percebe-se que em todas as profundidades FLO apresenta maior estabilização na adsorção com o aumento do P da solução de equilíbrio, semelhante ao que ocorre com a RNV. A PLT, no entanto, apresentou estabilização da curva de Langmuir com valores bem maiores à de P adsorvido e menores valores de P da solução de equilíbrio. Em todas as profundidades e para todos os sistemas, as curvas de Langmuir tiveram maior tendência à estabilização do que as curvas de Freundlich, o que torna possível uma melhor visualização dos pontos de estabilização da adsorção, quando se chega mais próximo da condição de saturação de adsorção nos colóides no solo (GUEDES et al., 2015; MELO; ALLEONI, 2016).

Além dos valores de CMAP obtidos a partir das médias de adsorção de P das parcelas em cada sistema (Tabela 7), também se determinaram os valores de CMAP, por meio do ajuste das isotermas de adsorção em cada parcela (repetição), por sistema, de forma individual, com posterior comparação de médias por Tukey entre os sistemas (Tabela 7). Na camada de 0-5 cm do PLT os valores de CMAP foram significativamente maiores que em RNV e FLO. Nas profundidades 5-10 e 10-20 cm, no entanto, a RNV não diferiu da FLO e do PLT quanto a CMAP, apesar desses últimos terem diferido significativamente entre si.

Quanto ao Pd (Tabela 8) observou-se valores significativamente maiores na FLO do que em RNV e PLT, os quais não diferiram entre si, em todas as profundidades. Esses resultados demonstram que nas áreas com menor CMAP maiores os teores de P disponível. Os resultados de CMAP e Pd demonstram a importância do conteúdo de matéria orgânica, e de práticas que favoreçam o acúmulo de biomassa na superfície do solo, tanto para diminuir a capacidade de adsorção de P quanto para aumentar sua disponibilidade (REDEL et al., 2008; MARANGUIT et al., 2017)

2.3.5. Influência de Atributos Edafocológicos na Adsorção de P

Quanto à relação entre as variáveis por meio da análise de componentes principais (ACP), houve uma elevada relação positiva entre os valores de pH, SB e V % e estes, como esperado, tiveram uma alta relação negativa com os valores de Al^{+3} , em todas as profundidades (Figura 5). Na camada de 20-40 cm, este cátion apresentou alto nível de contribuição. Sabe-se que em solos tropicais o Al^{+3} normalmente possui uma forte influência na disponibilidade de P, uma vez que ambos rotineiramente se associam formando $Al(H_2PO_4)_3$, o qual consiste em um fosfato pouco solúvel e que precipita com bastante facilidade na solução do solo (NOVAIS et al., 2007).

Houve uma alta relação positiva entre M.O. e CTC com os teores de Pd, bem como uma alta relação negativa entre estes com os valores de CMAP (Figura 5), para todas as profundidades. Tais resultados ressaltam a importância da matéria orgânica para a diminuição da adsorção deste nutriente em processos de adsorção, como constatado por Yu et al. (2012) em experimento com solos incubados com adição de materiais e submetidos a ensaios de adsorção de P. Smith et al. (2015) explicam que, a matéria orgânica pode apresentar, de fato, forte influência sobre a capacidade de adsorção de P, diminuindo tal adsorção devido à competição por complexos de troca pela formação de cargas negativas, além da liberação de ácidos orgânicos e do recobrimento dos óxidos de Fe e Al responsáveis pela adsorção de P, o que pode também ter ocorrido no solo reconstituído das áreas do presente estudo.

Vilar et al. (2010), em seu estudo, avaliaram a relação dos sistemas de manejo do solo com adsorção de P. Estes autores constataram que a adsorção do P foi altamente influenciada pelas práticas dos sistemas de manejo, com diminuição da capacidade de adsorção quando da manutenção de biomassa, corroborando com os resultados apresentados no presente estudo, o que demonstra a influência da M.O.S. e da biomassa de liteira na diminuição da adsorção de P. Resultados diferentes, no entanto, foram encontrados por Campos et al. (2016). Estes autores também avaliaram a relação da disponibilidade de P e da capacidade de adsorção de P com alguns atributos químicos do solo e encontraram alta relação entre pH e teores de Al e Fe trocáveis do solo e alta relação entre a adsorção e os teores de Al trocável.

Quanto à relação entre as variáveis e as parcelas dos três sistemas em ambos os componentes principais estudados, as parcelas da FLO, em sua grande maioria relacionaram-se ao Al^{+3} e aos componentes formados por M.O., CTCpH7 e Pd, enquanto que o PLT teve suas parcelas mais responsivas aos valores de CMAP. A RNV, por sua vez, apresentou algumas de suas parcelas mais relacionadas ao pH e às bases trocáveis (Figura 5). Especialmente na profundidade de 0-5 cm, as variáveis H' (estrato 1) e G (estratos 1 e 2) e BLit relacionaram significativamente com M.O. e Pd. Além disto, a BLit relacionou-se com estas variáveis edáficas nas camadas de 0-5 e 5-10 cm, apresentando uma relação contrária à CMAP. Isto denota a importância da manutenção da fitomassa para garantir um maior acúmulo de matéria orgânica e maior disponibilidade do P no solo.

Guedes et al. (2015) desenvolveram um estudo avaliando a adsorção de P em solos da Amazônia Oriental e concluíram a importância de se lançar mão do aumento da matéria orgânica e do controle do pH para diminuir a adsorção de P, corroborando com o exposto pelo presente estudo. Os resultados encontrados por Fink et al. (2014) também estão de acordo com os resultados encontrados pelo presente estudo. Estes autores reiteram a importância que a escolha de sistemas de manejo possui para garantir a disponibilidade de P no solo e a diminuição da adsorção do mesmo. Os mesmos consideram ainda que a manutenção da biomassa vegetal sobre o solo é fundamental para garantir a menor perda de P, inclusive para garantir a maior eficiência dos fertilizantes fosfatados quando de sua aplicação.

3.4. Conclusões

1. As áreas sob processo de recuperação com plantio de mudas, nas condições estudadas, ainda apresentam os maiores índices de adsorção de P, o que dificulta a maior disponibilidade desse elemento;
2. Os dados de adsorção de P em solo sob recuperação após mineração de bauxita se ajustam com mais eficiência a isoterma de Langmuir;
3. O processo de recuperação utilizando RNV aproximou-se mais da área com remanescente de floresta (FLO), especialmente no que concerne aos teores de M.O., CTCpH7, Pd e CMAP;
4. Em solos minerados, a liteira depositada e a matéria orgânica devem ser consideradas como fatores importantes na diminuição da adsorção e aumento da disponibilidade de P no solo;
5. Mais estudos são necessários com enfoque em atributos mineralógicos e suas influências na dinâmica do P na área estudada.

TABELAS

Tabela 1. Estratos dos indivíduos inventariados nas parcelas.

Estratos	Critério	Área da Parcela
Superior (Estrato 1)	DAP>15 cm	10 x 20 m (200 m ²)
Médio (Estrato 2)	3,2 cm< DAP≤15 cm	10 x 10 m (100 m ²)

Tabela 2. Lista das cinco espécies florestais mais relevantes, com base no Índice de Valor de Importância (IVI), em duas áreas pós mineração de bauxita (RNV e PLT) sob recuperação em comparação a uma área de floresta (FLO), em cada estrato vertical.

FLO		RNV		PLT	
Estrato 1					
Espécie	IVI	Espécie	IVI	Espécie	IVI
<i>Apeiba albiflora</i> Ducke	21,51	<i>Croton matorensis</i> Aubl.	14,31	<i>Homalium sp.</i> (P)	33,67
<i>Inga thibaudina</i> DC.	21,46	<i>Cecropia sp.</i>	25,94	<i>Inga thibaudina</i> DC. (P)	23,07
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	19,09	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	54,99	<i>Acacia polyphylla</i> DC. (P)	22,83
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	17,54	<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	25,93	<i>Talisia microphylla</i> Uittien. (P)	16,25
<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	17,06	<i>Casearia javitensis</i> Kunth	14,32	<i>Homalium guianense</i> Warb. (RN)	12,93
Estrato 2					
Espécie	IVI	Espécie	IVI	Espécie	IVI
<i>Rinorea flavescens</i> (Aubl.) Kuntze	32,35	<i>Croton matorensis</i> Aubl.	144,89	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth (RN)	27,66
<i>Talisia microphylla</i> Uittien.	31,30	<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy	33,65	<i>Vismia guianensis</i> (Aubl.) Choisy (RN)	27,46
<i>Amphiodon effusus</i> Huber	22,02	<i>Casearia javitensis</i> Kunth	27,81	<i>Bauhinia sp.</i> (RN)	6,99
<i>Eschweilera coriacea</i> (DC.) S.A.Mori	21,52	<i>Guatteria poeppigiana</i> Mart.	26,52	<i>Homalium guianense</i> Warb. (RN)	6,89
<i>Chrysophyllum prieurii</i> A.DC.	18,65	<i>Byrsonima crassifolia</i> (L.) Kunth	24,19	<i>Inga thibaudina</i> DC. (P)	4,75

(P): Espécie plantada na área de plantio de mudas (PLT); (RN): Espécie oriunda da vegetação espontânea na área de plantio (PLT).

Tabela 3. Área Basal (G) e Índice de Diversidade (H') pelo método de Shannon-Weaver em duas áreas pós mineração de bauxita (RNV e PLT) sob recuperação em comparação a uma área de floresta (FLO).

Sistema	Área Basal m ² ha ⁻¹	Índice de Diversidade
Estrato 1		
FLO	22,16±5,89 a	2,49±0,25 a
RNV	7,10±6,47 b	0,61±0,41 c
PLT	19,25±14,58 a	1,70±0,30 b
Estrato 2		
FLO	1,16±0,51 a	2,37±0,32 a
RNV	1,31±1,60 a	0,89±0,45 b
PLT	0,14±0,11 b	0,90±0,70 b

Tabela 4. Massa seca de liteira (BLit) em duas áreas pós mineração de bauxita (RNV e PLT) sob recuperação em comparação a uma área de floresta (FLO).

Sistemas	Massa Seca de Liteira kg m ⁻²
FLO	2,289±0,40 a
RNV	2,150±0,46 a
PLT	1,114±0,43 b

Tabela 5. Atributos químicos do solo, em diferentes profundidades, de duas áreas pós mineração de bauxita sob recuperação (RNV e PLT) em comparação uma área de floresta (FLO).

Sistema	Profundidade cm	pH	pH	Δ pH	Al ⁺³	SB	CTC _{pH7}	M.O.S.	V%
		H ₂ O	KCl		-----cmol _c dm ⁻³ -----	-----%			
FLO	0-5	4,73±0,4b*	4,37±0,3a	-0,36	0,406±0,4a	3,56±3,1a	11,57±5,8a	5,15±2,2a	26,3±11,4b
RNV		5,15±0,3a	4,49±0,3a	-0,66	0,213±0,2a	3,75±1,7a	8,87±2,1ab	3,06±0,8b	41,1±11,1a
PLT		4,68±0,2b	4,10±0,1b	-0,58	0,438±0,1a	1,04±0,5b	6,12±1,7b	1,89±0,4b	18,9±11,5b
FLO	5-10	4,50±0,2b	4,15±0,1b	-0,35	0,575±0,4a	1,41±1,22ab	8,33±3,3a	2,76±0,7a	14,6±7,6b
RNV		4,80±0,3a	4,33±0,2a	-0,47	0,225±0,1b	2,11±1,0a	6,51±1,4ab	2,29±0,7a	31,1±11,6a
PLT		4,62±0,1b	4,06±0,1b	-0,56	0,481±0,2a	0,64±0,4b	4,71±1,5b	1,58±0,5b	14,5±11,4b
FLO	10-20	4,43±0,2c	4,10±0,1b	-0,33	0,613±0,4a	0,91±0,7b	7,01±2,4a	2,24±0,5a	11,8±6,7b
RNV		4,96±0,1a	4,38±0,1a	-0,58	0,200±0,1b	1,71±0,8a	5,23±0,9b	2,08±0,7a	31,1±12,6a
PLT		4,61±0,1b	4,14±0,1b	-0,47	0,375±0,1ab	0,54±0,3b	4,21±1,1b	1,29±0,4b	13,3±9,1b
FLO	20-40	4,36±0,3b	4,07±0,1b	-0,29	0,719±0,4a	0,62±0,4ab	5,76±2a	1,79±0,3a	10,4±5,2b
RNV		4,96±0,2a	4,62±0,4a	-0,34	0,144±0,2b	0,89±0,5a	3,73±0,8b	1,08±0,1b	22,7±9,4a
PLT		4,89±0,1a	4,53±0,2a	-0,36	0,119±0,1b	0,35±0,1b	2,89±0,6b	0,85±0,2b	12,3±3,4b

pH em H₂O e KCl: pH do solo em água e solução de KCl 1 mol L⁻¹; Ca⁺², Mg⁺², K⁺, Al⁺³: teores de cálcio, magnésio, potássio e alumínio trocáveis, respectivamente; CTC_{pH7}: capacidade de troca catiônica potencial; M.O.S.: matéria orgânica do solo; V%: saturação por bases. *: Médias seguidas da mesma letra e na mesma profundidade não diferiram estatisticamente entre si de acordo com o método de Tukey, à 5% de significância.

Tabela 6. Teores de P adsorvido em amostras de solo de duas áreas sob recuperação (RNV e PLT) pós mineração de bauxita em comparação a uma área de floresta (FLO), submetidas à aplicação de crescentes doses de P na forma de fosfato de potássio (KH₂PO₄).

Sistema	Profundidade (cm)	Doses de P (mg dm ⁻³)									
		5	10	15	20	30	40	50	70	90	110
FLO	0-5	4,70±0,14b	8,68±0,34b	10,78±1,80c	13,87±3,45c	22,40±1,62b	24,77±4,09c	31,12±5,64c	35,87±5,25c	40,50±5,49b	44,44±7,06c
RNV		3,90±0,20c	8,47±0,17b	13,49±0,37b	18,05±0,37b	24,12±1,38b	29,89±3,25b	36,78±2,87b	41,87±4,51b	47,26±5,36ab	49,14±7,23b
PLT		4,96±0,02a	9,90±0,02a	14,84±0,03a	19,647±0,08a	28,59±0,25a	36,39±0,78a	43,52±1,84a	51,65±5,17a	52,85±3,43a	67,39±3,77a
FLO	5-10	4,77±0,10b	8,81±0,42b	11,18±1,87b	14,87±2,82b	23,82±1,71b	26,79±4,10c	34,37±4,91c	38,82±2,93c	44,07±4,06b	47,79±1,96c
RNV		3,94±0,14c	8,56±0,19b	13,74±0,29ab	18,41±0,29a	24,83±2,10b	32,21±2,67b	39,07±2,70b	43,99±4,74b	51,72±6,41a	55,16±8,64b
PLT		4,91±0,02a	9,84±0,02a	14,80±0,03a	19,60±0,08a	28,60±0,24a	36,78±0,73a	43,70±1,55a	51,83±4,87a	53,14±3,32a	67,77±3,10a
FLO	10-20	4,82±0,11a	9,05±0,31b	11,79±1,37c	15,47±2,63b	24,31±1,67b	27,77±3,47c	34,03±2,00b	42,79±3,74c	47,85±5,19b	54,19±5,12c
RNV		4,03±0,15b	8,68±0,20c	13,87±0,27b	18,59±0,26a	25,48±2,08b	34,59±2,98a	40,74±2,80a	46,93±4,01b	55,68±6,63a	60,51±8,95b
PLT		4,91±0,02a	9,84±0,02a	14,79±0,03a	19,60±0,08a	28,59±0,23a	36,90±0,74a	43,87±1,37a	52,08±4,57a	53,45±3,50a	68,05±3,10a
FLO	20-40	4,81±0,11a	9,10±0,33b	11,954±1,27b	16,22±1,78b	25,30±1,78b	29,42±4,04b	36,36±2,613b	45,82±3,52a	52,21±3,60b	57,97±4,12b
RNV		4,13±0,18b	8,83±0,24b	14,060±0,18a	18,76±0,29ab	26,66±2,0ab	35,81±2,75a	42,80±3,39a	50,52±5,96a	60,54±8,04a	67,07±10,9a
PLT		4,92±0,02a	9,84±0,02a	14,799±0,02a	19,60±0,08a	28,59±0,24a	36,92±0,73a	43,99±1,40a	51,99±4,59a	53,70±3,33a	68,31±3,15a

*: Médias seguidas da mesma letra e na mesma profundidade não diferiram estatisticamente entre si de acordo com o método de Tukey, a 5% de significância.

Tabela 7. Coeficientes e parâmetros de qualidade das equações ajustadas de Langmuir e de Freundlich para adsorção de P em solo de duas áreas pós mineração de bauxita sob recuperação (RNV e PLT) em comparação a uma área de floresta (FLO).

Isotermas de Langmuir								
Sistema	Profundidade (cm)	CMAP	Energia de Ligação	B ₀	B ₁	QMR	EP	R ²
		mg g ⁻¹	L mg ⁻¹					
FLO	0-5	55,866	0,1414	0,1266	0,0169	0,004	0,106	0,902
RNV		58,480	0,1829	0,0935	0,0171	0,002	0,047	0,990
PLT		61,551	0,6815	0,0238	0,0163	0,002	0,043	0,976
FLO	5-10	57,770	0,1328	0,1303	0,0173	0,006	0,075	0,950
RNV		59,172	0,1807	0,0935	0,0169	0,005	0,055	0,962
PLT		61,886	0,6856	0,0236	0,0162	0,002	0,043	0,976
FLO	10-20	58,106	0,1291	0,1333	0,0172	0,006	0,079	0,944
RNV		60,241	0,2638	0,0629	0,0166	0,001	0,040	0,983
PLT		62,228	0,6872	0,0234	0,0161	0,002	0,042	0,977
FLO	20-40	58,824	0,1245	0,1361	0,0170	0,007	0,082	0,939
RNV		60,606	0,3073	0,0234	0,0160	0,001	0,030	0,981
PLT		62,475	0,6840	0,0537	0,0165	0,002	0,042	0,977
Isotermas de Freundlich								
Sistema	Profundidade (cm)	Constante k	Constante n	B ₀	B ₁	QMR	EP	R ²
FLO	0-5	6,3241	1,8901	0,8010	0,5291	0,004	0,063	0,977
RNV		9,0655	2,2307	0,9574	0,4483	0,013	0,115	0,907
PLT		21,5450	3,1154	1,3333	0,3210	0,010	0,104	0,928
FLO	5-10	8,9790	2,1413	0,9532	0,4670	0,004	0,068	0,967
RNV		10,7250	2,1639	1,0304	0,4621	0,009	0,095	0,943
PLT		21,6710	3,1089	1,3359	0,3217	0,010	0,103	0,930
FLO	10-20	9,0034	2,1548	0,9544	0,4641	0,005	0,072	0,963
RNV		12,175	2,1661	1,0855	0,4617	0,008	0,090	0,953
PLT		15,617	2,3716	1,1936	0,4217	0,002	0,042	0,974
FLO	20-40	12,571	2,3720	1,0994	0,4220	0,006	0,077	0,958
RNV		10,481	2,0958	1,0204	0,4771	0,007	0,084	0,959
PLT		21,820	3,0940	1,3389	0,3232	0,010	0,101	0,933

CMAp: Capacidade Máxima de Adsorção de P; B₀ e B₁: Coeficientes linear e angular, respectivamente, das equações linearizadas de Langmuir e Freundlich; QMR: Quadrado Médio Residual da estimativa da equação linearizada; EP: Erro Padrão da Estimativa da equação linearizada; R²: Coeficiente de Determinação da equação linearizada.

Tabela 8. Teores de P disponível (Pd) e capacidade máxima de adsorção de P (CMAP) em amostras de solo de duas áreas pós mineração de bauxita sob recuperação (RNV e PLT) em comparação a uma área de floresta (FLO), submetido à aplicação de diferentes doses de P na forma de fosfato de potássio (KH₂PO₄).

Sistema	Profundidade cm	Pd mg dm ⁻³	CMAP mg g ⁻¹
FLO	0-5	3,12±1,1a*	47,62±8,3b
RNV		1,73±0,6b	49,16±5,2b
PLT		1,34±0,3b	56,81±2,1a
FLO	5-10	2,22±0,5a	52,95±3,9b
RNV		1,23±0,4b	54,60±8,2ab
PLT		1,04±0,1b	60,15±2,5a
FLO	10-20	1,29±0,5a	57,27±6,8b
RNV		0,70±0,3b	61,84±8,7ab
PLT		0,73±0,2b	64,20±2,7a
FLO	20-40	0,61±0,2a	62,62±6,7a
RNV		0,37±0,1b	64,83±9,6a
PLT		0,38±0,2b	64,20±2,7a

*: Médias seguidas da mesma letra (na coluna) e na mesma profundidade não diferiram estatisticamente entre si de acordo com o método de Tukey, a 5% de significância.

Tabela 9. Dados de autovalores e porcentagem de contribuição da variância para componentes principais formados a partir dos dados de amostras de solo pós mineração de bauxita sob recuperação florestal.

Componente	Autovalores	Porcentagem de Variância -----%-----	Variância Acumulada
Componentes Principais-Profundidade de 0-5 cm			
1	16,759	38,090	38,090
2	10,961	24,911	63,001
3	4,434	10,078	73,079
Componentes Principais-Profundidade de 5-10 cm			
1	5,084	36,321	36,321
2	4,022	27,209	63,530
3	1,385	9,893	73,423
Componentes Principais-Profundidade de 10-20 cm			
1	4,999	35,710	35,710
2	3,55	25,710	61,077
3	1,417	10,122	71,199
4	1,309	9,350	80,549
Componentes Principais-Profundidade de 20-40 cm			
1	5,929	42,351	42,351
2	2,828	20,196	62,548
3	1,628	11,631	74,179
4	1,131	8,081	82,260

FIGURAS



Figura 1. Processo de extração de bauxita na Amazônia e restauração de áreas degradadas. Fonte: Adaptado de Hydro (2015).

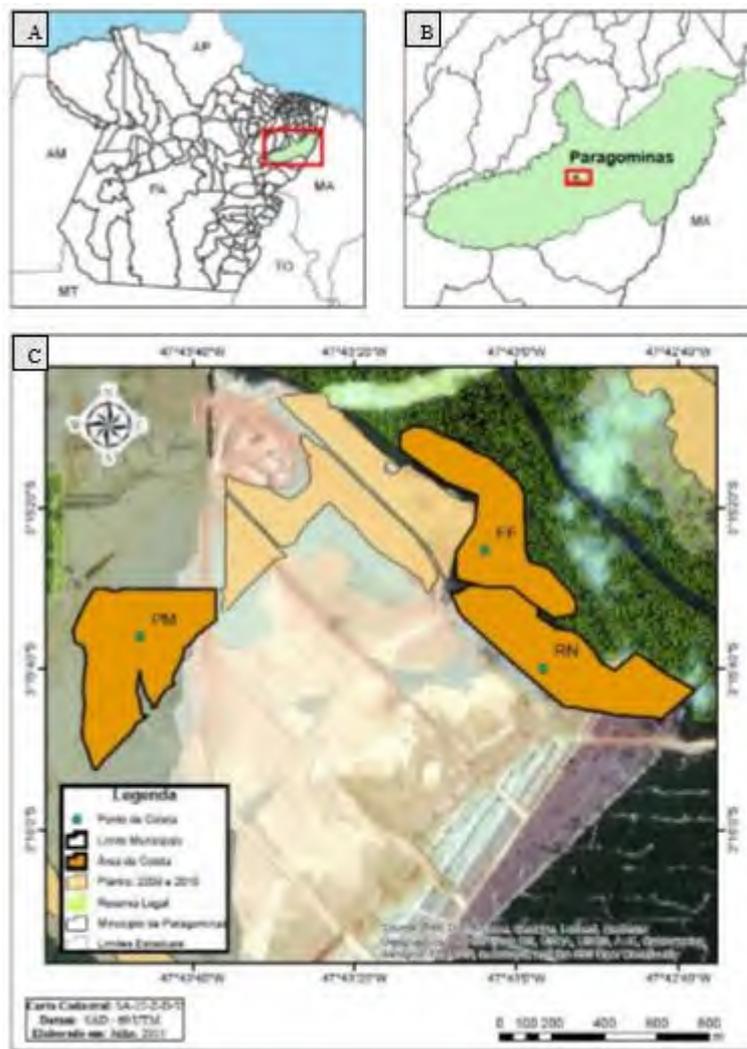


Figura 2. Mapa com posição dos três sistemas em avaliação, Plantio (PM), Floresta (FF) e Regeneração Natural (RN).

Fonte: MARTINS, 2015.

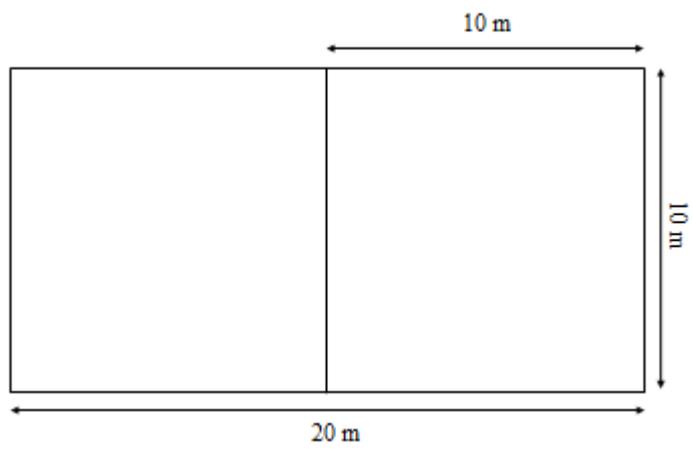


Figura 3. Dimensões das parcelas de amostragem dispostas aleatoriamente nas áreas em avaliação.

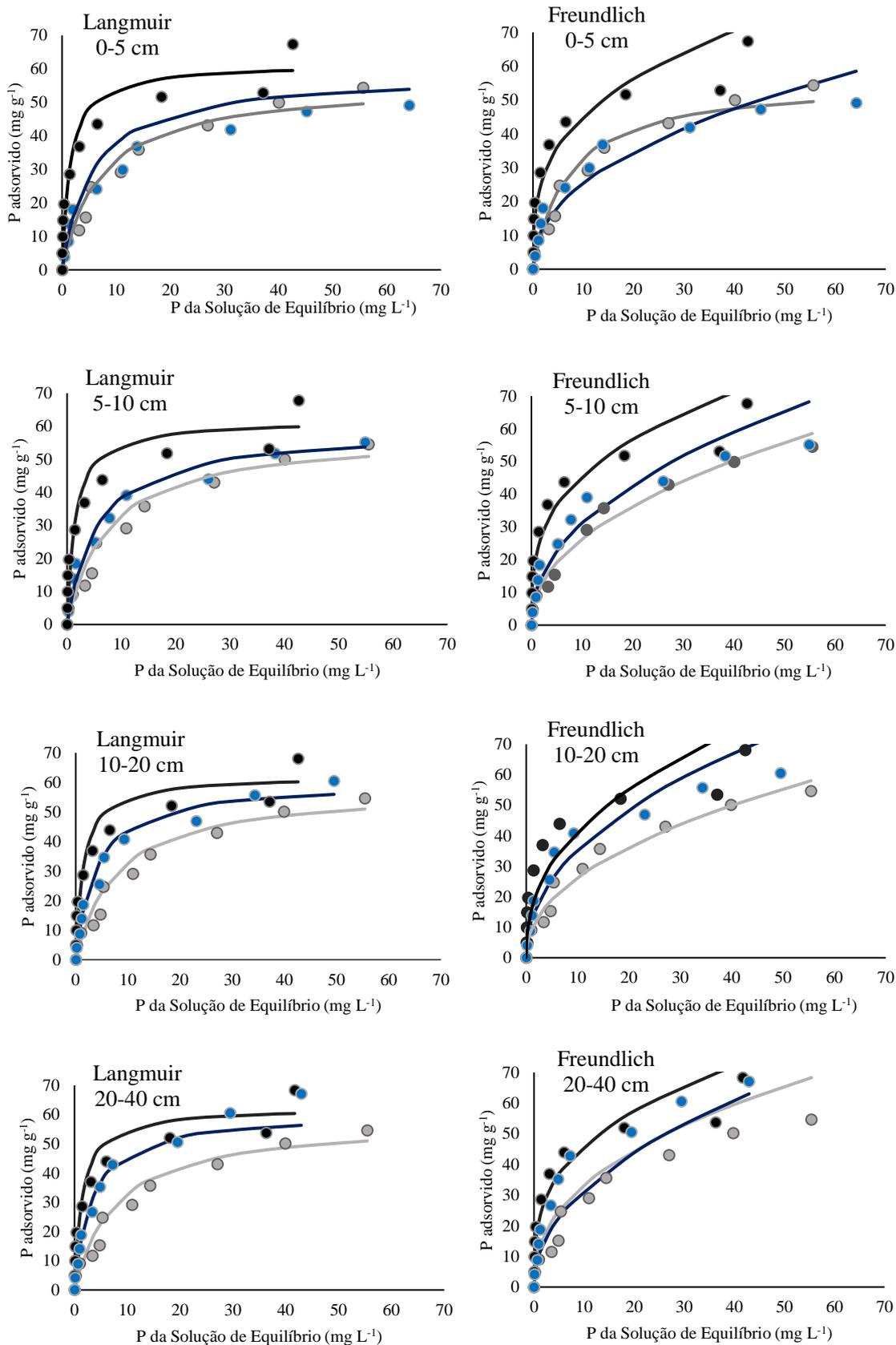


Figura 4. Teores de P adsorvido (mg g^{-1}) em função de P da solução de equilíbrio (mg L^{-1}) em amostras de solo reconstituído sob recuperação florestal. Dados estimados de FLO (—), de RNV (—) e de PLT (—) e dados reais de FLO (●), de RNV (●) e de PLT (●).

2.5. Referências

Almeida. EJ, Luizão F, Rodrigues DJ. Produção de serrapilheira em florestas intactas e exploradas seletivamente no sul da Amazônia em função da área basal da vegetação e da densidade de plantas. A. Amaz. 2015; 45(2):157-166.

Alvarez V, Novais RF, Dias LE, Oliveira JA. Determinação e uso do P remanescente. Soc. Bras. Ci. S – Boletim Informativo, 2000; 25(1):27-32.

Anikwe MAN, Ibudialo JCAN. Influence of lime and gypsum application on soil properties and yield of cassava (*Manihot esculenta* Crantz.) in a degraded Ultisol in Agbani Enugu Southeastern Nigeria. S. Till. Res. 2016; 158:32-38.

Antoniadis V, Koliniati R, Efstratiou E, Golia E, Petropoulos S. Effects of soils with varying degree of weathering and pH values on phosphorus adsorption. Cat.2016; 139:214-219.

Banning NC, Grant CD, Jones DL, Murphy DV. Recovery of soil organic matter, organic matter turnover and nitrogen cycling in a post-mining forest rehabilitation chronosequence. S. Bio. Biochem. 2008; 40:2021-2031.

Barlow J, Gardner TA, Ferreira LV, Peres CA. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. For. Ecol. Manag. 2007; 247(1): 91-97.

Braga RM, Sousa FF, Venturin N, Braga FA. Biomassa e atividade microbiana sob diferentes coberturas florestais. Cer. 2016; 22(2):137-144.

Bizuti, DTG. É possível reverter a degradação do solo provocada pela mineração de bauxita por meio da recuperação florestal? [Tese]. Piracicaba: Universidade de São Paulo-Campus ESALQ; 2017.

Borges, S. R. Qualidade do solo em áreas em recuperação com forrageiras e cafeeiro e pós-mineração de bauxita [Tese]. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 2013.

Boruvka L, Kosak J, Mühlhanselová M, Donátová H, Nikodem A, Nemecek K, Drábek O. Effect of covering with natural “topsoil” as a reclamation measure on brown-coal mining dumpsites. *Jour. Geochem. Exp.* 2012; 113: 118-123.

Bortoluzzi EC, Pérez CAS, Ardisson JD, Tiecher T, Caner L. Occurrence of iron and aluminum sesquioxides and their implications for the P sorption in subtropical soils. *App. C. Sci.* 2015; 104:196–204.

Brady NC, Weil RR. *Elementos da Natureza e Propriedades dos Solos*. 3rd ed. Porto Alegre: Editora Bookman; 2013.

Campos M, Antonangelo A, Alleoni LRF. Phosphorus sorption index in humid tropical soils. *S. Till. Res.* 2016; 156:110-118.

Casagrande JC. Avaliação de um modelo de complexação de superfície para adsorção de fosfato em solos ácidos no norte paulista [Tese]. Piracicaba: Universidade de São Paulo-Campus ESALQ; 1993.

Daws MI, Standish RJ, Koch JM, Morald TK, Tibbett M, Hobbs RJ. Phosphorus fertilization and large legume species affect jarrah forest restoration after bauxite mining. *For. Eco. Manag.* 2015;354:10-17.

Falcão NPS, Silva JRA. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. *A. Amaz.* 2004; 34(3):337-342.

Fink JR, Inda AV, Bayer C, Torrent J, Barrón V. Mineralogy and phosphorus adsorption in soils of south and central-west Brazil under conventional and no-tillage systems. *Ac Scient.* 2014; 36(3):379-387.

Franchini JC, Borkert CM, Ferreira MM, Gaudêncio CA. Alterações na fertilidade do solo em sistemas de rotação de culturas em semeadura direta. *R. Bras. Ci. S.* 2000 24:459-467.

Guedes RS, Fernandes, AR, Souza ES, Silva JRR. Maximum Phosphorus Adsorption Capacity Adjusted to Isotherm Models in Representative Soils of Eastern Amazon. *Comm. S. Sci. P. Anal.* 2015; 46:2615–2627.

Hall, SL, Barton CD, Baskin CC. “topsoil” Seed Bank of an Oak–Hickory Forest in Eastern Kentucky as a Restoration Tool on Surface Mines. *Res. Eco.* 2010;18(6):834-842.

Hydro. Hydro Paragominas: Mina de bauxita [internet]. Paragominas-PA: Mineração Paragominas; 2015 [accessed on: 10 Jul 2017]. Available at:

<http://www.hydro.com/pt/A-Hydro-no-Brasil/Operacoes-no-Brasil/Hydro-Paragominasmina/>

Huang R, Tang Y. Evolution of phosphorus complexation and mineralogy during (hydro)thermal treatments of activated and anaerobically digested sludge: Insights from sequential extraction and P K-edge XANES. *W. Res.* 2016;100(1):439-447.

Hu B, Yang B, Pang X, Bao W, Tian G. Responses of soil phosphorus fractions to gap size in a reforested spruce forest. *Geod.* 2016;279:61-69.

IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração. Informações e Análise da Economia Mineral Brasileira [internet]. Brasília-DF: IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração; [accessed on: 02 Mar 2017]. Available at:

Kaiser HF. The Varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psyc*. 1958; 23:187-200.

Lima ACSM. Avaliação de áreas degradadas pela mineração de bauxita, Paragominas – PA. [Dissertação]. Belém-PA: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2015.

Lu C, Yan D, Jiang H, Zhou B, Li L, Zheng Q. Environmental geochemistry significance of organic phosphorus: An insight from its adsorption on iron oxides. *App. Geochem*. 2017; 84:52-60.

Maranguit D, Guillaume T, Kuzyakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *Cat*. 2017; 149:385-393.

Martins SV. Recuperação de áreas degradadas: ações em áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e de mineração. 1st ed. Viçosa: Aprenda Fácil Editora; 2009.

Martins WB. Dinâmica da serapilheira em áreas de mineração submetidas a métodos de restauração florestal, nordeste do Pará [Dissertação]. Belém-PA: Universidade Federal Rural da Amazônia, 2015.

Mckeague JA, DAY JH. Dithionite and oxalate extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. *Can Jour S Sci*, 1966; 46:13-22.

Melo VF, Alleoni LRF. Química e Mineralogia do Solo. 2 ed. 2009; Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Murphy J, Riley JPA. A modified single solution method for the determination of phosphorus in natural waters. *Anal Ch A*. 1962; 27:31-36.

Novais RF, Álvarez VH, Barros NF, Fontes RLF, Cantarutti RB, Neves JCL. Fertilidade do Solo. 3rd ed. 2007; Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

Oliveira CMB, Gatiboni LB, Miquelluti DJ, Smyth TJ, Almeida JA. Capacidade máxima de adsorção de fósforo e constante de energia em Latossolo Bruno em razão de diferentes ajustes do modelo Langmuir. *Rev Bras Ci S.* 2014; 38(6):2014.

Olsen SR, Dean LA. Phosphorus. In: Black, C. A. *Methods of soil analysis*. Madison. Am Soc Agro. 1965.

Olsen SR, Watanabe FSA. A method to determine a phosphorus adsorption maximum of soils as measured by the Langmuir isotherm. *S Sci Soc Am.* 1957; 21:144-149.

Paulucio VO, Silva CF, Martins MA, Pereira MG, Schalvo JA, Rodrigues LA. Reforestation of a Degraded Area with Eucalyptus and Sesbania: Microbial Activity and Chemical Soil Properties. *R Bras Ci S.* 2017; 41:1-14.

Prober SM, Wiehl G. Relationships among soil fertility, native plant diversity and exotic plant abundance inform restoration of forb-rich eucalypt woodlands. *Div Distr,* 2012; 18:795–807.

Redel Y, Rubio R., Godoy R, Borie F. Phosphorus fractions and phosphatase activity in an Andisol under different forest ecosystems. *Geod.* 2008; 145:216-221.

Resende JCF Markewitz D Klink CA Bustamante MMC, Davidson EA. Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequente burning. *Biogeochem.* 2011; 105(3): 105-118.

Salomão, RP, Brienza Júnior S, Rosa NA. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. *Rev. Árv.* 2014; 38(1):1-24.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumbreras JF, Coelho MR, Almeida JA, Cunha TJJ, Oliveira JB. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 3rd. ed. Brasília: Embrapa Solos; 2013.

Shono K, Cadaweng EA, Durst PB. Application of Assisted Natural Regeneration to Restore Degraded Tropical Forestlands. *Rest. Ecol.* 2007; 15(4):620–626.

Silva Júnior CA, Boechat CL, Carvalho LA. Atributos químicos do solo sob conversão de floresta amazônica para diferentes sistemas na região Norte do Pará, Brasil. *Biosc. Jour.* 2012; 28(4):566-572.

Silva FC. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2nd ed. Brasília: Embrapa Solos; 2009.

Silva EN, Santana AC. Modelos de regressão para estimação do volume de árvores comerciais, em florestas de Paragominas. *Rev Cer.* 2014; 61(5):631-636.

Vasconcelos SS, Zarin DJ, Araújo MM, Rangel-Vasconcelos LGT, Carvalho CJR, Staudhammer, CL, Oliveira FA. Effects of seasonality, removal and dry-season irrigation on litterfall quantity and quality in eastern Amazonian forest regrowth, Brazil. *Jour. Trop. Ecol.* 2008; 24(1):27-38.

Vilar CC, Costa ACS, Hoepers A, Souza Junior IG. Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. *Rev Bras Ci S.* 2010; 34:1059-1068.

Vincent AG, Schleucher J, Gröbner G, Vestergren J, Persson P, Jansson M, Giesler R. Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: the role of iron and aluminium. *Biogeochem.* 2012; 108:485–499.

Townsend AR, Porder S. Agricultural legacies, food production and its environmental consequences. *Proc. Nat. Acad. Sci.* 2012; 109:5917-5918.

Wolschick NH, Barbosa FT, Bertol I, Santos KF, Werner RS, Bagio B. Cobertura do solo, produção de biomassa e acúmulo de nutrientes por plantas de cobertura. *Rev Ci Agrovet.* 2016; 15(2):134-143.

Yu W, Ding X, Xue S, Li S, Liao X, Wang R. Effects of organic-matter application on phosphorus adsorption of three soil parent materials. *Jour S Sci Pl Nut.* 2012; 12:1-15.

Yan X, Wei Z, Hong Q, Lu Z, Wu J. Phosphorus fractions and sorption characteristics in a subtropical paddy soil as influenced by fertilizer sources. *Geod.* 2017; 295:80-85.

Zaia CF, Gama-Rodrigues AC, Gama-Rodrigues EF, Machado RCR. Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. *Rev Bras Ci S.* 2008; 5(32): 1987-1995.

Zhou J, Fu B, Gao G, Lü Y, Liu Y, Lü N, Wang S. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China. *Cat.* 2016; 137: 1-11.

