INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

CICLAGEM DE FÓSFORO E SUAS VARIAÇÕES EM UMA FLORESTA MADURA DA AMAZÔNIA CENTRAL

EMILY DARC ANDRADE DOS SANTOS

Manaus, Amazonas

Agosto, 2013

EMILY DARC ANDRADE DOS SANTOS

CICLAGEM DE FÓSFORO E SUAS VARIAÇÕES EM UMA FLORESTA MADURA DA AMAZÔNIA CENTRAL

Dr. ANTÔNIO OCIMAR MANZI

Dr. CARLOS ALBERTO NOBRE QUESADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, do Instituto de Pesquisas da Amazônia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais área de concentração em Manejo Florestal.

Manaus, Amazonas

Agosto, 2013

Relação da banca julgadora

1. Banca examinadora do trabalho de conclusão – versão escrita

2. Banca examinadora do trabalho de conclusão – defesa presencial

S237 Santos, Emily Darc Andrade dos

Ciclagem de fósforo e suas variações em uma floresta madura da Amazônia central / Emily Darc Andrade dos Santos. --- Manaus : [s.n.], 2013.

xi, 64 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) --- INPA, Manaus, 2013.

Orientador : Antônio Ocimar Manzi.

Coorientador : Carlos Alberto Nobre Quesada.

Área de concentração : Manejo Florestal.

Sinopse:

Estudou-se a ciclagem de fósforo e a correlação entre as frações presentes no solo, produção de serrapilheira, concentração de P nas folhas e o fluxo deste macronutriente em uma floresta tropical madura na Reserva Florestal Adolpho Ducke, situada na Amazônia central, Manaus, Estado do Amazonas, Brasil.

Palavras-chave: fracionamento de fósforo, formas de fósforo no solo tropical, ciclagem de fósforo.

DEDICO

As minhas avós Irací e Izanilde *in memoriam*

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ailton e Elaine pelo amor incondicional. A minha irmã Pâmela pelo carinho. Sem a força de vocês seria impossível à caminhada.

Agradeço ao Sr. Luciano de Castilho por me guiar e acompanhar pelas trilhas da Ducke.

Agradeço aos técnicos do Laboratório Temático de Solos e Plantas: Raimundo N. A. Filho, Jonas O. M. Filho, Lita Llerme pelos ensinamentos e Erison por tornar o trabalho menos árduo. E ao PIBIC Hebert Andrade pelo excelente trabalho nas análises químicas.

Ao Dr. Beto Quesada pelos ensinamentos “fosforísticos” que foram essenciais até para a evolução pessoal. Ao orientador Dr. Manzi pelo incentivo em momentos difíceis.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa e ao PNPD/ CENBAM e FAPEAM pelo financiamento do trabalho.

E a todos os amigos que fizeram parte dessa experiência única de vida amazônica.

“ E o que é que a ciência tem?

Tem lápis de calcular.

O que mais que a ciência tem?

Borracha pra depois apagar”.

Raul Seixas

Cycling of phosphorus and its variations in a mature forest in Central Amazonia

RESUMO

Pouco se sabe sobre as variações do fósforo (P) em ecossistemas tropicais devido à escassez de levantamentos e métodos padronizados na quantificação quanto a sua ciclagem. O modelo teórico de ciclagem de P (Walker and Syers, 1976) sugere que a relação entre os teores e formas deste macronutriente está intimamente ligada ao estágio de desenvolvimento do solo e na ação do intemperismo na transformação dos minerais primários (fosfatos de cálcio) em outras formas de P utilizados pela biota ou reservados no solo; adsorvidos a superfície de minerais secundários (Al e Fe); P não ocluso que se transforma lentamente em P ocluso, e finalmente havendo a saída do P total do sistema através de lixiviação. O método do fracionamento de Hedley fornece uma avaliação abrangente, sendo amplamente utilizado nas últimas décadas por diversas pesquisas relacionadas. As coletas foram realizadas na Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD), Manaus, Amazonas, Brasil, em cinco parcelas selecionadas aleatoriamente na grade RAPELD/ PPBio. Objetivando quantificar o fluxo de P, investigamos as formas presentes no solo e na serrapilheira folhosa e a demanda pela vegetação das frações de P em função da sazonalidade da precipitação. Este estudo sugere que há uma forte variação temporal entre as formas orgânicas e inorgânicas do P, sobretudo nas frações mais estáveis (NaOH). A produção de serrapilheira folhosa esteve relacionada com as formas NaOH e HCl indicando uma forte conexão entre a dinâmica das frações de P no solo e a entrada de P via serrapilheira. Este estudo representa o primeiro passo rumo ao entendimento da ciclagem do P em solos da Amazônia central. Mais estudos serão necessários para permitir um melhor entendimento da dinâmica do P nos solos e assim permitir a construção de modelos de ciclagem de P para florestas tropicais maduras.

Cycling of phosphorus and its temporal variation in a mature forest in Central Amazonia

ABSTRACT

Little is known about phosphorus (P) variations tropical ecosystems due to shortage of soil P information and standardized methods for the quantification of cycling. The theoretical model of P cycling (Walker and Syers, 1976) suggests that the relationship between the contents and form of this macronutrient is closely linked to the stage of soil weathering, with this acting on the transformation of primary minerals (calcium phosphate) in other forms of P used by the biota or occluded in the soil; such as adsorbed in the surface of secondary minerals (Fe and Al), and P lost through leaching. The Hedley fractionation method provides a comprehensive assessment that has been widely used for P research. Aiming to quantify the flow P, soil samples were collected in the Reserva Florestal Adolpho Ducke in Manaus, Amazonas, Brazil, in five randomly selected plots. We investigate the forms present in soil and litter and the production of litterfall and its relation to P fractions during the transition between wet and dry season. This study suggests that there is a strong temporal variation between inorganic and organic forms of P, especially in the more stable fractions (NaOH). Production of litterfall indicate that the more stable fractions are strongly related NaOH and HCl to the dynamics of the fractions in the soil, through the entry of P.. This study is a pioneer as the cycling of P in soils of central Amazonia. Others studies are necessary to improve our understanding of the temporal dynamics of P in tropical soils.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS xi
1 APRESENTAÇÃO 11
2 OBJETIVOS 14
2.1 Objetivo Geral 14
2.2 Objetivo Específico 14
Capítulo 1 15
Resumo 16
Abstract 17
Introdução 18
Materiais e Métodos 20
Área do estudo 20
Delineamento amostral 23
Coleta de solo 24
Coleta de serrapilheira 24
Análises laboratoriais 25
Análise de dados 28
Considerações teóricas 28
Resultados 30
Produção de serrapilheira 37
Discussão 41
Concentração do fósforo nos solos em estudo 41
Variações temporais nas frações do P 42
Produção de serrapilheira 44
Conclusão 46
Agradecimentos 47
Referências Bibliográficas 47

APÊNDICE A - Valores das médias gerais (mg kg $^{-1}$), erro padrão da média, coeficiente de variação (%) e significância (ns = não significativo. *significativo e ** altamente significativo) das frações obtidas por extração sequencial do solo, P lábil, concentração de P na serrapilheira, produção de serrapilheira e entrada de P nos solos das parcelas da RFAD de estudo, onde n é igual ao número tratamentos. 58

APÊNDICE B - Variação temporal das formas de P no solo em cada mês por ANOVA de medidas repetidas. 60

ANEXO A - Gráficos de Correlação de Pearson das frações de P em todas as parcelas. 62

ANEXO C - Ata de avaliação da aula de qualificação 63

ANEXO D - Atas de avaliação do trabalho escrito 64

ANEXO E - Ata de avaliação da defesa presencial ..... **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da Reserva Florestal Adolpho Ducke no estado do Amazonas. 21
Figura 2. Localização das parcelas permanentes utilizadas para este estudo. 21
Figura 3. Diagrama simplificado do método de fracionamento de P.....26
Figura 4. Concentração média das frações de P e em porcentagem da soma do P total para cada parcela no mês de julho, n = 5 em todas as parcelas, exceto Podzol onde n=4 para Po NaOH e P residual. 31
Figura 5. Padrões temporais das frações de fósforo obtidas através do fracionamento sequencial de P no solo das parcelas de estudo. 32
Figura 6. Variação temporal do fósforo total, residual e lábil nas parcelas de estudo.....34
Figura 7. Variação temporal da dinâmica do P em relação a concentração de P nas folhas (a), (b) deposição/ entrada de fósforo no solo pela serrapilheira; (c) produção de serrapilheira e precipitação nos meses de estudo.....35
Figura 8. Mudança relativa das diferentes formas de P durante o período de estudo.....36
Figura 9. Relação entre as diferentes formas de P no solo e a produção de serrapilheira. ...38
Figura 10. Relação entre as diferentes formas de P no solo e a concentração de P na serrapilheira. 39
Figura 11. Relação entre a entrada de P no solo via serrapilheira e as diferentes formas de P no solo.....40

1 APRESENTAÇÃO

Os estudos de ciclagem de nutrientes são de fundamental importância para o conhecimento da estrutura e do funcionamento (Jorgensen et al.1975; Charley e Richards, 1983) de qualquer ecossistema (Delitti 1984). Baseados no fato de que os estados de um ecossistema, em momentos distintos, podem ser expressos através do inventário quantitativo dos seus recursos e que as mudanças ocorrentes podem ser descritas analisando-se os processos de transferência entre compartimentos, como solo e a biomassa vegetal, de um ecossistema em questão (Araújo et al. 2010).

O fósforo (P) é um importante macronutriente essencial, limitante no ecossistema terrestre, especialmente em regiões tropicais (Elser et al. 2007; Vitousek e Howarth, 1991; Wardle et al. 2004; Yang e Post, 2011), geralmente é constituído por compostos derivados do ácido ortofosfórico e menos comumente dos pirofosfatos, considerado determinante no crescimento, produtividade das plantas, uma vez que tem considerável importância no metabolismo do carbono, através de ligações carbono fósforo, os fosfonatos são marcadamente diferentes de outros compostos de fósforo orgânicos do solo, e bem como na formação de açúcares fosfatados (Grant et al. 2001). É encontrado em componentes estruturais das células, como nos ácidos nucleicos (DNA e RNA), fosfolipídios das biomembranas, polissacarídeos, e também presente na parede celular de bactérias (Turner, et al. 2005) e em componentes metabólicos móveis armazenadores de energia, como o ATP (Gatibone 2003). A absorção de fósforo pelas plantas de um modo generalista acontece, sobretudo, na forma de ortofosfato no solo e sua abundância relativa é controlada pelo pH (Raij 1991).

A principal fonte de P para os ecossistemas terrestres é o intemperismo da rocha matriz. Portanto P tem sido considerado como um nutriente limitante nos solos (Walker e Syers, 1976). No material de formação dos solos, as apatitas são os minerais primários fosfatados mais comuns que, através da intemperização das rochas, resultam em minerais secundários mais estáveis termodinamicamente os quais são eventualmente incorporados a compostos orgânicos. A maioria dos materiais de origem contém principalmente fosfatos de cálcio que hidrolisam durante o desenvolvimento do solo para suprir P para a solução do solo.

O P encontrado na solução do solo pode se tornar adsorvido a superfícies minerais, precipitar com vários cátions, ou ser incorporado na biomassa e matéria orgânica do solo.

Nos solos altamente intemperizados, predominam as formas inorgânicas de P ligadas à fração mineral com alta energia; quando absorvidas por plantas ou por microrganismos, os quais imobilizam ou liberam os íons ortofosfato, são denominados de fosfatos lábeis representados pelo conjunto de compostos fosfatados capazes de repor rapidamente a solução do solo. A dinâmica do P e suas frações mais lábeis é dependente do grau de intemperização do solo, da mineralogia, da textura, do teor de matéria orgânica, das características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (Walker e Syers, 1976; Cross e Schlesinger, 1995). Em solos tropicais a tendência é de adsorção de maiores quantidades de P (Havlin et al. 2005), na presença de altas concentrações de ferro, alumínio e argila (caulinita) com uma consequente redução na disponibilidade de P.

Em solos ácidos, a concentração de P é bastante limitante ao crescimento (Dias Filho 1998), e o seu abastecimento às plantas ocorre por absorção via sistema radicular. O P é o nutriente essencial para a compreensão dos processos bioquímicos na fotossíntese, e emerge como o mais importante nutriente na contabilização da variação da produtividade florestal na Bacia Amazônica, (Mercado et al. 2011). Quesada et al. (2012), encontraram que o P foi o principal fator limitante na produtividade de madeira ao longo de 60 áreas de inventário florestal na Amazônia. Sendo que o fósforo foi o elemento mais importante no incremento da produtividade florestal. Dentre as 28 variáveis edáficas e climáticas analisadas, concluíram que o P era o nutriente mais provável na limitação da produtividade florestal na Amazônia.

O solo superficial é uma parte dinâmica do ecossistema; contém uma concentração total maior dos elementos essenciais, atuando em parte como um reservatório de nutrientes (Golley et al. 1978); é nessa camada que ocorre maior parte da ciclagem de P. Em florestas tropicais úmidas, densas raízes superficiais absorvem diretamente da serrapilheira grandes quantidades de nutrientes liberados após a decomposição (Jordan e Stark,1978; Went e Stark, 1968). Segundo Herrera e Jordan (1981), a presença de uma camada superficial de raízes acima do solo é um importante mecanismo de ciclagem e conservação direta de nutrientes na floresta amazônica, onde as raízes permitem a adsorção física da maioria dos nutrientes disponíveis.

Os padrões sazonais influenciam a produção de serrapilheira em função das condições climáticas ao longo do ano em florestas tropicais, Luizão (1982); Kolm (2001), e consequentemente, na retranslocação dos nutrientes da vegetação. Os maiores valores da

produção de serrapilheira, geralmente ocorrem na estação seca (Golley 1983), devido à resposta da vegetação ao estresse hídrico, já que a perda das folhas reduz a perda de água por transpiração (Martins e Rodrigues, 1999). Klinge e Rodrigues (1968), em estudo sobre a floresta de terra firme de Manaus, observaram uma máxima na produção de folhedo no período menos chuvoso de modo que pode haver uma diminuição na ciclagem interna dos nutrientes. No período chuvoso (Luizão e Luizão, 1991) verifica-se uma menor produção de serrapilheira. Devido a esta dinâmica, a maior velocidade de decomposição da serrapilheira no período mais úmido ocorre em virtude da maior atividade dos organismos que participam da quebra, decomposição e remoção de matéria orgânica acumulada sobre o solo (Luizã,1982), havendo a quebra e transformação de P microbiano, em frações de P orgânico lábil e moderadamente lábil, disponíveis a solução do solo e consequentemente às plantas, participando da ciclagem rápida de P.

Neste contexto, para um melhor entendimento sobre a ciclagem do P no solo é necessária uma interação de estudos ecológicos, envolvendo o compartimento orgânico (serrapilheira), que retrata o fluxo de entrada de P, estudo das transformações do P inorgânico e orgânico dentro do solo (Smeck 1985), relacionados à sazonalidade da precipitação. Através do estudo sobre os compartimentos (solo e serrapilheira) é possível avaliar os processos de entrada no sistema dos elementos químicos e inferir no grau de conservação das florestas e da disponibilidade dos elementos químicos para os demais compartimentos do ecossistema (Araújo 2009).

Assim, a proposta do presente estudo foi abordar a disponibilidade de P através da variação temporal correlacionando as frações com a produção de serrapilheira, a fim de compreender como as diferentes formas de P variam ao longo do tempo no solo e quais as formas são mais presentes na reciclagem do P durante o período do estudo na Amazônia central. Os resultados obtidos contribuirão para um melhor entendimento sobre a ciclagem de P em solos de floresta madura da Amazônia central, e direcionamento de novos enfoques para futuras pesquisas.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

A presente dissertação visa analisar a disponibilidade e as variações entre as frações de P em uma floresta madura situada na RFAD da Amazônia central.

2.2 Objetivo Específico

Compreender as relações entre a entrada de P pela serrapilheira e a dinâmica de reciclagem do P no solo.

Capítulo 1

Santos, E. D. A. dos. Transformação de fósforo no solo e sua variação temporal em uma floresta madura da Amazônia central. Manuscrito formatado para Acta Amazônica.

Transformação de fósforo no solo e sua variação temporal em uma floresta madura da Amazônia central

SANTOS, Emily Darc Andrade dos[1]; QUESADA, Carlos Alberto[1]; MANZI, Antônio Ocimar[1].

[1]Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, emily@inpa.gv.br; quesada.beto@gmail.com; manzi@inpa.gov.br

Resumo

Pergunta: Qual a conexão entre as formas de P no solo, entrada de P no solo e sua disponibilidade através da na dinâmica temporal? **Área de estudo:** floresta madura da Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD) localizada a 25 km da cidade de Manaus, Amazonas, Brasil, em cinco parcelas permanentes da grade padronizada PPBio. Foi utilizado o método modificado do Fracionamento de Hedley et al. 1982, o método de digestão ácida Tiessen e Moir, (1993) e a leitura do extrato final através de colorimetria no método azul de molibdênio Murphy e Riley (1962) para as amostras de solo e folhas. O P quantificado nas amostras de serrapilheira seguiu o método de análise de tecidos vegetais do Laboratório Temático de Solos e Plantas do INPA, adaptado EMBRAPA (1997). Resultados e discussão: A variação do uso das frações de P da Amazônia central são diretamente relacionadas com a entrada de serrapilheira no solo. P inicialmente entra no sistema predominantemente sob formas orgânicas estáveis, principalmente Po NAOH, sendo posteriormente drenado e estabilizado sob formas inorgânicas estáveis, Pi NAOH. Estas duas formas são responsáveis pela maior parte da ciclagem temporal de P no solo. A produção de serrapilheira esteve também associada a disponibilidade de P em suas formas mais estáveis.

Palavras-chave: Fósforo lábil, transformação de fósforo, extração sequencial de fósforo, solos tropicais.

Transformation of phosphorus in soil and its temporal variation in a mature forest of central Amazonia

Abstract

Question: What is the connection between the forms of soil P, the input of P via litterfall and its availability across time? Study area: mature forest of Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD) located 25 km from the city of Manaus, Amazonas, Brazil, in five permanent plots. Methods: We used the modified Hedley Fractionation method, the total acid digestion method and colorimetric blue method of Murphy e Riley (1962) for samples of soils and leaves. Samples of litter followed the method of analysis for plant tissues adapted from EMBRAPA (1997). Litterfall, P inflow into the soil, annual rainfall were also recorded. The variation in the use of P fractions in central Amazonia are directly related to the entry of litter on the ground. P initially enters the system mostly as stable organic forms, especially Po NaOH, being subsequently mineralized and transformed to stable inorganic, Pi NaOH. These two are responsible for most of the temporal cycling of P in soil. Litterfall production was in turn associated with the availability of P in more stable forms. Temporal variations in litterfall influence the temporal dynamics of soil P transformations, with a predominance of more stable forms.

Keywords: phosphorus cycling, sequential extraction of phosphorus, tropical soils.

Introdução

O fósforo (P) é um macronutriente essencial no desenvolvimento das plantas, e é considerado o nutriente limitante nos solos em ecossistemas tropicais terrestres (Walker e Syers, 1976), por ser quase que exclusivamente fornecido através do intemperismo da rocha matriz. Os minerais fosfatados primários são a fonte de P nos sistemas naturais, com predomínio de fosfato ligados à cálcio (Tiessen et al. 1984), as apatitas. O rompimento desses minerais ocorre mediante a intemperização, através de processos de perdas de bases, sílica e carbonatos, redução de pH e aumentos na atividade de alumínio e ferro, levando a transformação dos minerais primários em óxidos. Assim processos de liberação e readsorção de P são dependentes dos processos de formação do solo. No início de formação dos solos, ocorre uma maior disponibilidade de P, já que os colóides inorgânicos são pouco intemperizados e a quantidade de sítios adsorventes é pequena; por isso, ele é retido com baixa energia, facilitando seu retorno à solução do solo. Sob o ponto de vista de fertilidade do solo, o P é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo e tem mostrado que suas frações orgânicas e inorgânicas podem atuar como fonte ou dreno.

O P total presente no solo possui diferentes formas de disponibilidade através de transformações químicas e biológicas. O P do solo é definido operacionalmente em dois grandes grupos, fósforo inorgânico (Pi) e fósforo orgânico (Po), que depende da natureza do composto a que está ligado. Cada fração de P é composta por uma infinidade de compostos de P. Os teores e as formas presentes no solo dependerão do material de formação do solo e dos processos biogeoquímicos que controlam o ciclo de fósforo e sua disponibilidade às plantas.

O P é fornecido aos solos quase que exclusivamente através do material de origem, quase sem nenhuma deposição posterior. Ao longo do desenvolvimento do solo ocorrem perdas contínuas de P, através de processos de perdas de P dessorvido (frações orgânicas e inorgânicas), precipitação de formas insolúveis ou quimicamente/ fisicamente protegidas além de perdas através de erosão. Concomitante a este processo, ocorrem transformações nas formas de P no solo, as quais tendem a se tornar indisponíveis com o passar do tempo (Walker e Syers, 1976; Quesada et al. 2010; Smeck, 1985).Este processo foi demonstrado no trabalho de Walker e Syers, (1976) o qual apresenta o modelo teórico da disponibilidade de P através da pedogênese.

O grupo do Pi é separado em duas partes, o fósforo dos minerais primários e o fósforo adsorvido. Ele compõe o grupo intrínseco de fosfatos inorgânicos, formando diferentes

compostos e com diferentes graus de estabilidade química. Este pode ser adsorvido à matéria orgânica do solo através de pontes de cátions. A adsorção do fosfato aos oxihidróxidos de ferro e alumínio ocorre, principalmente, nas formas de baixa cristalinidade e com alto desbalanço de cargas (Sanyal e Datta, 1991), resultando em baixos teores para a solução do solo. Nos solos de regiões tropicais e subtropicais, os óxidos de ferro mal cristalizados, alumínio substituindo ferro, óxidos bem cristalizados em menores quantidades, e a caulinita; são os principais responsáveis por maior estabilidade e menor possibilidade de dessorção de íons ortofosfato.

O Pi do solo pode ocorrer em várias formas dependendo do grau de intemperização do solo incluindo duas formas lábeis, o P resina (ortofosfatos primários) e Pi bicarbonato (moderadamente lábil), uma forma menos lábil, Pi hidróxido (ocluso), e duas formas não-lábeis, sendo o P HCl (ligado a cálcio) e o P residual, ambas as formas de indisponíveis em pequenos intervalos de tempo. As formas P resina (Raij 1991) e Pi bicarbonato (Tiessen et al. 1992; Rheinheimer et al. 2000) são consideradas imediatamente disponíveis às plantas (Hedley et al. 1982 e Tiessen et al. 1984) porém representaram muito pouco do P total. Tiessen et al. (1992) e Rheinheimer et al. (2000) observaram que, em solos tropicais, o Pi hidróxido é uma fração mais dinâmica do que geralmente tem sido relatado na literatura.

O fósforo orgânico (Po) pode constituir de 20 a 80% do fósforo total do solo (Dalal 1977; Quesada et al. 2010), nos solos tropicais atua ativamente na disponibilidade de fósforo às plantas (Walker e Syers, 1976; Tiessen et al. 1984; Cross e Schlesinger, 1995; Quesada et al. 2010), por possuírem dinâmica de ciclagem rápida. O Po é originário de resíduos vegetais depositados sobre o solo e dos produtos de sua decomposição (Rheinheimer et al. 2000; Conte et al. 2002; Martinazzo et al. 2007). A grande variedade de compostos orgânicos no solo faz com que a maior parte das formas de Po ainda não tenha sido identificada. Informações sobre o Po do solo são essenciais para a compreensão dos ciclos biogeoquímicos e ecologia do ecossistema, porque os organismos possuem uma variedade de mecanismos complexos para acessar essa fração no solo, (Tuner, et al. 2005). A estabilidade dos compostos orgânicos depende de sua natureza e de sua interação com a fração mineral e são utilizados como fonte de carbono e elétrons pelos microrganismos, resultando na sua mineralização e disponibilização do fósforo. Alguns compostos, como ácidos nucléicos e fosfolipídios, possuem estrutura química que facilita sua decomposição, sendo facilmente mineralizáveis, por isso, as quantidades armazenadas no solo são pequenas. Esta é provavelmente parte da forma orgânica Po bicarbonato, a fração mais lábil entre as formas orgânicas, e apresentam

menores teores em relação ao Po hidróxido, de acordo com observações de Tiessen et al. (1992) e Ball-Coelho et al. (1993). Já a fração Po hidróxido, estes apresentam alta energia de ligação com a estrutura química da molécula e alta carga residual, o que lhes confere facilidade de interação com os constituintes inorgânicos do solo, dificultando a mineralização e favorecendo o acúmulo de Po hidróxido no solo (Rheinheimer et al. 1999 e 2002) o que confere baixa labilidade e baixa disponibilidade às plantas. Essa fração está associada a formas de fósforo menos disponíveis e envolvem transformações a longo prazo, entretanto visto que em solos tropicais essa fração pode ser mais dinâmica em relação ao Pi bicarbonato (Tiessen et al. 1992), mas este assunto ainda está longe de ser consenso.

O P residual representa o P inorgânico e orgânico em suas formas estáveis (Stewart et al. 1980); quimicamente e fisicamente protegidas e de ciclagem bastante lenta. É o fósforo retido por minerais estruturalmente livres de fósforo, como hematita, goethita e gibbsita (Smeck 1985). Trabalhos anteriores consideram o fósforo apatita, incluído no fósforo residual, com a possibilidade de aumento da fixação de fósforo com o tempo em escala temporal geológica. Assim dependendo do nível pedogenético, o fósforo residual pode conter tanto fósforo secundário quanto fósforo primário ocluso.

Até o momento, não há estudos que avaliaram a variação temporal na magnitude das frações de fósforo em áreas da Amazônia central. Neste estudo, quantificamos ao longo do tempo as frações de fósforo em uma floresta densa da Amazônia central situada na Reserva Florestal Adolpho Ducke. O objetivo principal foi investigar as variações na disponibilidade de P no solo, sua ciclagem entre suas diferentes formas e a reciclagem via serrapilheira em um ecossistema tropical natural maduro.

Materiais e Métodos

Área do estudo

O estudo foi conduzido em parcelas de floresta densa tropical da Reserva Florestal Adolpho Ducke (RFAD) área de estudo e está localizada a 25 km da cidade de Manaus, Amazonas, Brasil, entre as coordenadas 59°52’40" e 59°58’00" de longitude Oeste e 03°00’00’ e 03°08’00" de latitude Sul (Alencar, 1994).

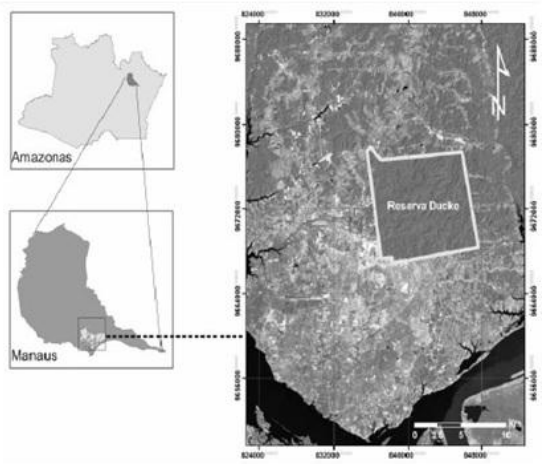

Figura 1. Localização da Reserva Florestal Adolpho Ducke no estado do Amazonas.
Fonte: <http://siglab.inpa.gov.br>. Acesso em 03/mar/2011.

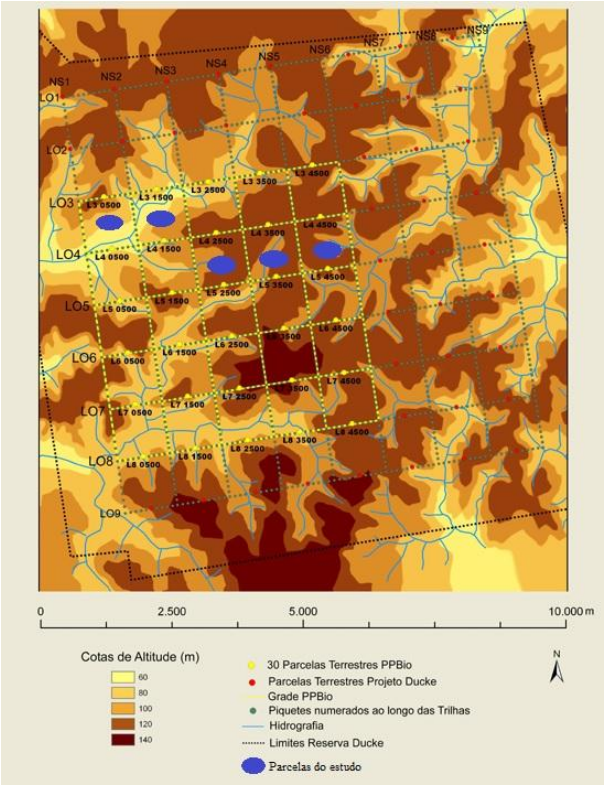

Figura 2. Localização das parcelas permanentes utilizadas para este estudo.
Fonte: Adaptado PPBio.

A altitude média é de 50-110 m acima do nível do mar. A precipitação anual varia de 1.800 a 2.800 mm (Leopoldo et al. 1987), com uma estação chuvosa de dezembro a maio e uma estação seca de junho a novembro; os meses mais chuvosos são março e abril (> 300 mm de chuva) e os mais secos, julho, agosto e setembro (< 100 mm). A temperatura média anual é

de 26ºC com mínima 19ºC e máxima 39ºC, e segundo a classificação de Köppen (1948) o clima é do tipo Afi (Araújo 1970). A condição isotérmica da temperatura é consequência do vapor d'água sempre alto na atmosfera: a umidade relativa do ar varia de 77 a 88 %, com média anual de 84 % (Leopoldo et al. 1987).

Localmente, a planície sedimentar Terciária, na área da RFAD, é bastante dissecada por sua rede de drenagem, resultando em partes de platô, colinas de topos arredondados, vales amplos circundados por vertentes íngremes, retas e convexas A base geológica da Bacia Amazônica é formada por rochas cristalinas do Pré-Cambriano. As parcelas de coleta são caracterizadas por longos platôs ocupados por Ferralsols, encostas dominadas por Acrisol e vales formados por Podzols arenosos mal drenados (Chavel et al. 1987). Os sedimentos encontrados nessa região são muito antigos, provavelmente tendo a sua origem no período terciário-cretáceo (aproximadamente 100 milhões de anos; Quesada et al. 2011).

Os solos Acrisol e Ferralsols (World Reference Base WRB, IUSS Working Group WRB, 2006), predominantes na Amazônia Central, são resultantes da intemperização de materiais cauliníticos do Terciário, derivados do antigo escudo das Guianas, (Fittkau et al. 1975). Apresentam níveis baixos de micro e macronutrientes em especial o cálcio (Fittkau 1971). Na RFAD há também Podzol hidromórficos, inundados, com textura arenosa de cor cinza escuro, com lençol freático superficial, muito ácidos (pH 4,11 a 4,7), com baixos teores de fósforo (1 a 7 mg/ dm^3), Potássio (8 a 34 mg/dm^3); os teores de bases trocáveis são baixos (Rodriguez 1995; Chavel et al. 1987).

A área é predominantemente coberta por floresta tropical úmida de terra firme não perturbada da Amazônia, ou Floresta Densa Tropical segundo a classificação RADAMBRASIL 1978; Sotta et al. 2004). O dossel da floresta mede cerca de 35 a 40 metros de altura, com poucas árvores emergentes por volta dos 45 m de altura (Ribeiro et al. 1999). A região é característica da Amazônia central e possui influências florísticas e faunísticas tanto da região do escudo guianense quanto da região ao sul do Rio Amazonas. As distintas comunidades vegetais, com uma sobreposição surpreendentemente baixa de espécies, estão ligadas à topografia local e ao tipo de solo onde ocorrem (Guillaumet 1987).

Delineamento amostral

O presente estudo teve como sítio de amostragem a grade do Programa de Pesquisa em Biodiversidade (PPBio – www.ppbio.inpa.gov.br). A área correspondente à grade é de 25 km^2 (5 X 5 km) e está dividida em um sistema de 12 trilhas de 5 km, sendo 6 trilhas no sentido leste-oeste e 6 trilhas no sentido norte-sul (paralelas entre si e espaçadas por 1 km) (Figura 2). São 30 parcelas permanentes de 250 x 40 m a cada 1 km ao longo dessas trilhas, metodologia RAPELD (Diagnóstico Rápido e Pesquisa de Longa Duração, Magnusson et al. 2005). O alocação das parcelas em nível altimétrico faz com que as condições ambientais dentro das parcelas sejam mais homogeneas, permitindo um maior controle dos fatores atuantes em cada unidade amostral (Magnusson et al. 2005).

Tabela 1. Localização das parcelas e características dos solos das parcelas de estudo.

Parcela	Solo	Altitude (m)	Classe de drenagem	Granulometria (%)		
				argila	silte	areia
L03 500	Acrisol	81.8	boa	54.5	7.4	32.1
L03 1500	Podzol	61.7	ruim	5.5	0.1	94.3
L04 2500	Ferralsols 1	100.1	boa	78.0	9.8	12.2
L04 3500	Ferralsols 2	105.1	boa	80.0	9.0	11.0
L04 4500	Ferralsols 3	98.9	boa	81.0	9.8	9.2

Para este estudo, foram selecionadas cinco das trinta parcelas terrestres permanentes do Programa, nas linhas L3: 500, 1500 e L4: 2500, 3500 e 4500 (Figura 2, Tabela 1) sendo neste trabalho identificadas pelo tipo de solo a que cada uma pertence. Em cada das cinco parcelas foram sistematizadas subparcelas e instaladas três zonas de exclusão de serrapilheira/ área de exclusão a entrada e deposição de serrapilheira no solo, a distância de trinta e sete metros e meio entre si. Os coletores de serrapilheira estão dispostos na área em zigue-zague

na distância de vinte e cinco metros, seguindo a faixa de altitude presente em cada parcela, método RAPELD, (Magnusson, et al.2005).

As amostras de solo em condições naturais com entrada de serrapilheira foram coletadas sempre ao lado esquerdo de cada coletor de serrapilheira. E as amostras de solo com exclusão de serrapilheira foram coletadas no centro de cada caixa de exclusão e não serão analisadas neste estudo.

Coleta de solo

As amostras de solo foram coletadas durante o período de um ano, de abril de 2012 a maio de 2013. Devido às dificuldades operacionais, apenas as amostras coletadas entre abril e agosto de 2012, compreendendo a transição da estação seca para a chuvosa foram analisadas para esta dissertação. Com o intuito de compreender as variações do P nos solos sob condições naturais e sua relação com fluxo de entrada de P pela serrapilheira e sazonalidade da precipitação, foram coletadas amostras dentro de cada subparcela, em pontos permanentes de coleta mensal. A profundidade amostrada foi de 0-5 cm. As coletas mensais em cada parcela representaram os padrões sazonais. Maiores detalhes sobre a metodologia de coleta de solo estão disponíveis em PPbio – www.ppbio.inpa.gov.br.

Coleta de serrapilheira

As amostras de serrapilheira foram coletadas simultaneamente a coleta de solo, nos coletores de serrapilheira que estão dispostos na área em zigue-zague na distância de vinte e cinco metros entre si, seguindo a faixa de altitude presente em cada parcela (método RAPELD). Foram coletadas e colocadas em saco plástico e encaminhadas ao Laboratório de Triagem do INPA Campus III, V8, para posterior triagem das folhas, não sendo analisadas as outras partes constituintes da serrapilheira. As folhas passaram por processo de remoção de qualquer resíduo de solo, com o auxílio de pincel e pinça colocadas em saco de papel kraft e secas em estufa por 72 horas até atingir peso seco constante. Pesadas em balança de precisão de 3 casas Série Mar “S” para posterior cálculo de produção de serrapilheira e em seguida levadas para trituração em moinho do tipo Willye em peneira de 2 mm e armazenadas em sacos plásticos até o momento do processo laboratorial de digestão do material vegetal.

Análises laboratoriais

O fracionamento de P do solo foi obtido a partir da extração sequencial de duzentas amostras simples coletadas com trado tipo caneco (Eijkelkamp Agrisearch Equipment BV, Giesneek, Holanda) para coleta de amostras indeformadas. O solo foi seco ao ar e a sombra, destorroado e peneirado em peneira malha de 2mm de abertura. O preparo e as análises foram realizados na casa de preparo de solo, anexo do Laboratório Temático de Solos e Plantas (LTSP) do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Foram pesados 0,5 gramas do solo em tubo centrífuga tipo Falcon de 50 ml.

Para a obtenção das frações de P utilizou-se o método modificado do fracionamento de Hedley et al. 1982, modificado por Tiessen e Moir (1993), separando o P em frações com base na solubilidade química e força crescente das soluções extratoras. As formas de P do solo extraídas foram: Pi disponível – P resina, Pi e Po - $NaHCO_3$ 0,5 mol L^{-1} a pH 8,5, que são sorvidos em sesquióxidos e associados a outros elementos, sendo esta uma fração prontamente disponível; formas moderadamente lábeis, associadas as formas cristalinas e amorfas de fosfato ligado a óxidos de Fe e Al, pelo processo de adsorção e o Po ligado a compostos húmicos e fúlvicos, Pi e Po - NaOH 0,1 mol L^{-1} e formas pouco lábeis ou seja oclusas, de P ligado a Ca onde o Pi advindo do material de origem apresenta minerais pouco solúveis, HCl 1 mol L^{-1} de P associado a apatita, mineral primário. Como os solos estudados são altamente intemperizados, a fração HCl é necessariamente uma pequena parte do P total. O P total (extraído por H_2SO_4 concentrado + H_2O_2) foi determinado pelo processo de digestão, (Tiessen e Moir, 1993) e por último o P residual determinado através da diferença entre o P total e o somatório de todas as frações lábeis, (Quesada et al. 2010).

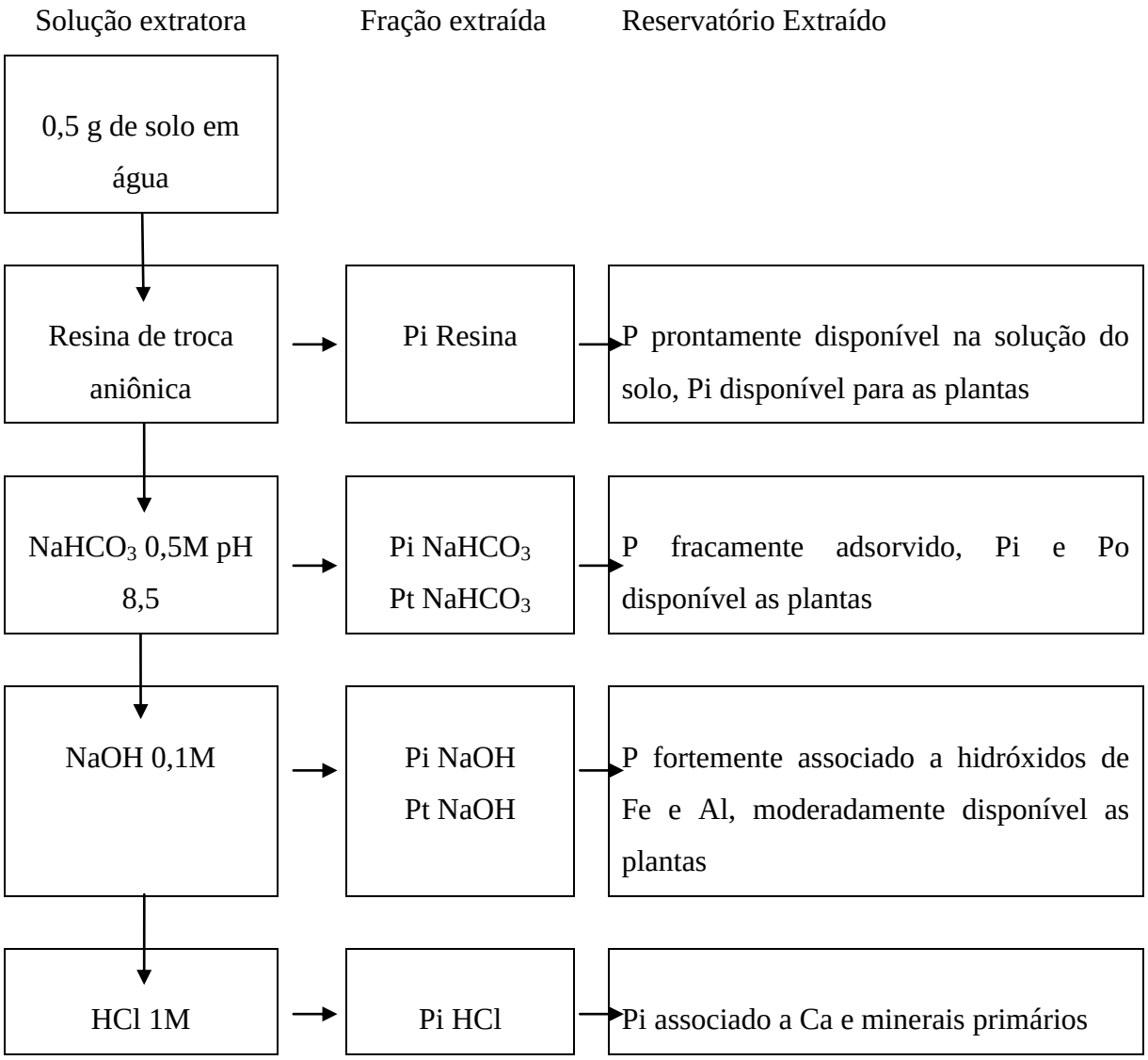

Figura 3. Diagrama simplificado do método de fracionamento de P
Fonte: Tiessen e Moir (1993), adaptado.

A sequência de extração do Fracionamento está sumarizada na Figura 3. Este procedimento consistiu em pesar 0,5 g de solo, em tubo cônico de centrífuga de 50 ml. Adicionou-se 30 ml de água ultra-pura desionizada e duas membranas de resina (2 x 7 cm) pré-ativadas com $NaHCO_3$ 0,5 molar. Em seguida agitou-se o material por 16 horas em agitador mecânico de mesa horizontal (modelo HF 501 D, Janke e Kunkel) em 160 oscilações por minuto. No final desta etapa, as resinas foram lavadas com pequenos jatos de água ultra-pura / desionizada, afim de recuperar qualquer resíduo de solo para o tubo centrífuga e foram transferidas para um novo tubo centrífuga com 20 ml de HCl 0,5 molar. As resinas permaneceram nesta solução por 30 minutos com a tampa dos frascos entreabertas, sendo

posteriormente agitadas por 16 horas. Após a agitação as amostras foram centrifugadas na velocidade de 10.000 rpm, na temperatura de 0º C, (Tiessen e Moir, 1993) (EPPENDORF, modelo centrífuga 5810 R), por 10 minutos. Os extratos foram filtrados em filtro com poros de 0,45 mm de abertura e armazenados em frascos para posterior determinação da concentração de P. Qualquer resíduo de solo presente no papel filtro foi transferido para dentro do tubo de centrífuga inicial utilizando uma pequena quantidade da próxima solução extratora a ser utilizada e completando o volume para 30 ml com a mesma. Repete-se os procedimentos de agitação e centrifugação após cada filtragem para todas as soluções descritas acima.

As frações P resina e P HCl possuem apenas a forma inorgânica do P enquanto as frações de P $NaHCO_3$ e P NaOH, possuem as formas orgânicas e inorgânicas que são separadas por precipitação ácida da matéria orgânica, que é calculada entre a diferença da concentração de total de P no extrato menos a concentração da fração inorgânica destes extratos, obtido por oxidação úmida com ácido sulfúrico e persulfato de amônio, que tem o princípio de converter Po em Pi (Tiessen e Moir, 1993).

O P total foi determinado em uma amostra a parte da utilizada no fracionamento. Este método é conveniente e confiável, com valores muito próximos (r^2 = 0,99) entre P total e a soma de todas as frações, incluindo o P residual (Quesada et al. 2010). Como indicador de pH de todos os extratos foi utilizado 4 nitrofenol (C6H5NO3) diluído em etanol (C_2H_6O) e para o ajuste gotas de NaOH 4 mol L^{-1} até atingir a cor amarelo forte brilhante e gotas H_2SO_4 0,25 mol L^{-1} até obtenção de amarelo fraco opaco.

A análise final de todas as alíquotas foram realizadas seguindo o método de desenvolvimento de cor conforme descrito por Murphy e Riley (1962), adicionando-se 8 ml da solução contendo molibdato de amônio, tartarato antimônio potássio e ácido ascórbico, completando o volume do balão de 50 ml com água ultra-pura desionizada. As leituras da absorbância, isto é, absorção de luz pelo complexo formado, é detectado em um comprimento de onda específico, foram realizadas no espectofotômetro de UV visível (modelo 1240, Shimadzu, Kyoto, Japão) em 712 nm de comprimento de onda.

A concentração de P da serrapilheira - [P] serrapilheira, foi obtida a partir da digestão de cento e vinte e cinco amostras contendo somente folhas, coletadas durante os cinco meses do estudo. As folhas coletadas no campo foram levadas para laboratório de Triagem do INPA onde foram secas em estufa a 60ºC por 72 horas até peso constante (Protocolo Laboratório de

Triagem/ INPA), onde foi feito o peso seco, e em seguida trituradas em moinho tipo Willey, e armazenadas em sacos plásticos para subsequente análise química.

O material vegetal foi oxidado a quente no bloco digestor com ácido perclórico e ácido nítrico, através da digestão úmida de sistema aberto em tubos digestores de 100 ml, no anexo do LTSP, sendo este o método de digestão nitro-perclórica. Os extratos diluídos em água ultra-pura desionizada, foram diluídos em balão de 50 ml, e posteriormente armazenados em frascos de vidro. A análise química do tecido vegetal foi realizada através de alíquotas de 0,25 ml de cada extrato e acrescentando solução de ácido perclórico a 2 %, e solução de ácido ascórbico 3% e molibdato de amônio para o desenvolvimento de cor (Olsen e Sommers, 1982). As leituras da absorbância foram realizadas no espectofotômetro de UV visível em 725 nm de comprimento de onda.

As análises de granulometria foram realizadas utilizando o método da pipeta. Foi utilizado 10 g de terra fina e adicionado dispersante químico (pirofosfato de sódio a 6%) e agitação em agitador de mesa por 15 minutos sendo que, através da sedimentação do material foi separado de acordo com o tamanho de partículas, areia (0,05 a 2mm), silte (0,002 a 0,05 mm) e argila (< 0,002 mm). As amostras foram deixadas de repouso em 200 ml de água e 20 ml de solução dispersante por 18 horas (metodologia completa no trabalho de Quesada et al. 2010). Tendo as amostras previamente tratadas por processo de queima da matéria orgânica.

Análise de dados

Neste estudo as frações de P, foram agrupadas em P lábil que constituiu no somatório de todas as frações de P, P total no solo e em P na serrapilheira folhosa (Apêndice A) baseado em estudos anteriores (Cross e Schlesinger, 1995; Hedley e Stewart, 1982; Smeck 1985; Tiessen e Cole, 1984; Beck e Sanchez, 1994). Além disso, o P lábil total, ou seja, passível de ciclagem, é definido como a soma de Pi resina e Pi e Po em bicarbonato de sódio e hidróxido de sódio e Pi em ácido clorídrico a 1M.

Os padrões de variação temporal das frações de P foram utilizados para estabelecer relações entre a produção de serrapilheira e as formas de P no solo. Para a ANOVA de medidas repetidas foram utilizados critérios sugeridos por Cardoso, et al. (2003), onde as amostras individuais são consideradas como repetições independentes, não testando a interação entre as frações de fósforo. Se a razão entre a significância (F) e a raiz quadrada da média entre as frações for dividida pela raiz quadrada da média dentro das frações e o

resultado for menor que 1, é valido que as amostras individuais sejam consideradas como repetições. As variáveis do fracionamento foram normalizadas usando a a ferramenta Johnson Transformation (MINITAB 16) após checagem da distribuição normal através do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Considerações teóricas

As análises que envolvem ciclagem de nutrientes com enfoque ecológico são complexas em termos de independência dos dados e subestimadas quanto ao grau de liberdade. A variação temporal neste estudo, se tratando de análises químicas que requerem trabalho laboratorial intenso e minucioso, foi analisada somente para cinco meses. Devido a isso a autocorrelação temporal resultou em estratégias complexas nas análises dos dados passando por diversas análises a fim de predizer o comportamento das frações de fósforo ao longo do tempo. A precisão de estimar a correlação é afetada pelo tamanho da amostra principalmente quando pequena, sendo o caso deste estudo n= 25.

Para auxiliar a variação temporal e detectar variação espacial foram realizadas ANOVA de medidas repetidas entre os meses de coleta e entre as parcelas. Optamos por analisar somente as mudanças temporais seguidas de análise mais elaborada e completa quando algumas frações não apresentavam significância na estatística clássica, não descartando estas do processo de análise.

a) Modelagem multivariada

A seleção do modelo foi realizada em todas as parcelas com base no Critério de Informação de Akaike (AIC) e AIC corrigido (AICc), Hurvich e Tsai, (1989), sendo indicado para amostras de tamanho pequeno e distribuição normal. Davison (2001) afirma que o critério AICc pode aumentar consideravelmente a probabilidade de se escolher um modelo adequado, particularmente na seleção de modelos de regressão e de séries temporais.

Foram realizadas simulações baseadas na teoria da informação para a obtenção de informações a respeito da ciclagem indicadas pelas principais frações sem se ater as parcelas independentes. Para a seleção dos modelos foi examinada uma base de dados com 5 meses de coleta (n=25) através de todas as combinações possíveis entre as frações de fósforo e a produção de serrapilheira nas áreas de estudo. Foram analisados todos os modelos com valores de Δ AICc < 2. Esta análise descreve frações de P que podem ser as principais

atuantes no processo da ciclagem e detectando as prováveis frações fontes ou drenos de P, responsáveis pela ciclagem. Nós também fornecemos o nível de significância das covariáveis independentes selecionadas através do procedimento de AICc, observando que em algumas vezes as variáveis selecionadas foram aquelas não significativas na estatística convencional $p \leq 0{,}05$. Isto é porque a informação teórica pró-procedimentos tais como Akaike AICc proporcionam uma abordagem holística para a ordenação e seleção entre os modelos concorrentes (Quesada et al. 2012). Fizemos a seleção do melhor modelo, dentre aqueles que foram ajustados para entender a ciclagem de P.

Resultados

As áreas de estudo estão localizadas em três posições topográficas dentro da bacia do igarapé Acará: baixio, vertente, e platô (Tabela 1), com Podzol ocupando a área de baixio, Acrisol na vertente e Ferralsols no platô. A classe de drenagem destes solos varia de mal a bem drenada em função da posição topográfica. Há ainda um amplo gradiente textural associado à variação do lençol freático e posição topográfica, onde o baixio apresenta solo arenoso e o platô solos muito argilosos, com a área de vertente contendo uma textura um pouco menos argilosa (54,5%). Estes fatores determinam em grande parte as diferentes variações nas concentrações das frações de P.

Solos altamente intemperizados são muito profundos e geralmente possuem boas condições físicas como resultado do intemperismo intenso por milhares de anos (Sanchez, 1987; Quesada et al. 2011) em função de sua idade geológica.

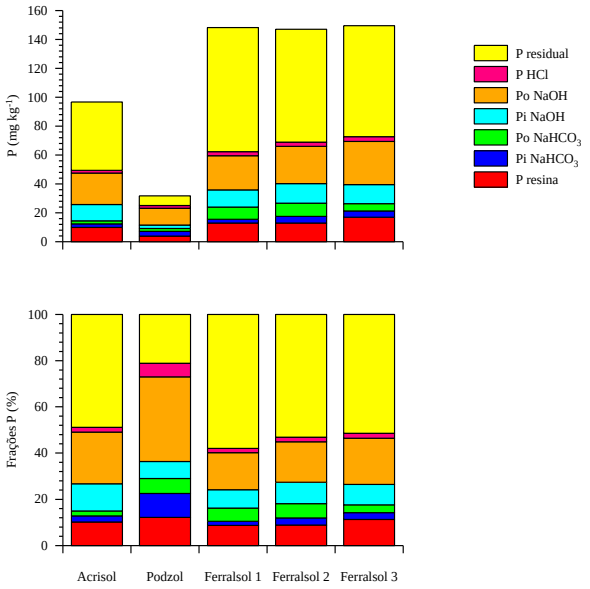

Figura 4. Concentração média das frações de P e em porcentagem da soma do P total para cada parcela no mês de julho, n = 5 em todas as parcelas, exceto Podzol onde n=4 para Po NaOH e P residual.

Observa-se que a distribuição das frações de P e a proporção relativa de cada fração em relação ao P total do solo varia em função da topografia e o tipo de solo das parcelas de estudo. O Podzol possui baixa concentração de P, enquanto que os Ferralsols apresentam concentrações e proporções das frações de P bem similares entre si. O Acrisol possui concentração de P total intermediária em relação aos outros solos estudados, porém com concentração e distribuição de suas frações estando mais próxima aquela dos Ferralsols (Figura 4, Tabela 1). As parcelas sobre Acrisol e Podzol possuem concentrações de P total na ordem de 96 e 32 mg kg^{-1} respectivamente, com Acrisol contendo em torno de 51 % de sua reserva P nas frações lábeis e o Podzol 80%. Esta diferença está refletida na concentração de P residual, com o Podzol contendo menor concentração (apenas 7 mg kg^{-1}, 21% do P total) enquanto que no Acrisol o P residual é de 47 mg kg^{-1} (48,9%). Em contraste os Ferralsols possuem P total variando entre 147 e 150 mg kg^{-1}, e com uma maior proporção de P residual com valores em torno de 50 %.

Em todas as parcelas as frações orgânicas de P possuem proporções maiores do que as frações inorgânicas. Formas orgânicas de NaOH correspondem a maior proporção de P total em todas as parcelas (Figura 4 e Tabela 2). Em contraste, as frações inorgânicas são as de menor predominância no P total e formas consideradas muito lábeis como o P resina apresentaram baixas concentrações, variando de 8 a 12 % do P total, sendo que o Podzol apresenta a maior proporção desta fração. Como esperado, a concentração de P HCl foi muito

baixa em todas as parcelas. No Acrisol e Podzol P HCl ocorreu em proporções de 2 a 6%, enquanto que os Ferralsols apresentaram valores em torno de 2 a 3%. O P lábil que constitui do somatório das frações de P passíveis de estarem disponíveis na solução do solo, durante o período de vida das árvores (P Total – P residual), aumenta na ordem: Podzol, Acrisol, Ferralsol 2, Ferralsol 1 e Ferralsol 3. A proporção de P residual, por outro lado, diminui gradativamente no Ferralsol 1, Ferralsol 2, Ferralsol 3, Acrisol e Podzol (Tabela 2).

Tabela 2. Valores médios das concentrações e amplitude de variação em mg kg^{-1} de fósforo total, residual e lábil, no mês de julho nas parcela de estudo da RFAD.

Parcelas	P total		P residual		P lábil	
	Méd	DPM	Méd	DPM	Méd	DPM
Acrisol	96.70	± 4.48	47.30	± 7.31	49.41	± 5,38
Podzol	31.19	± 1,68	6.72	± 2,12	24.87	± 1,27
Ferralsol 1	148.20	± 10,10	85.89	± 10,07	62.31	± 7,03
Ferralsol 2	147.06	± 7,36	78.11	± 5,24	68.95	± 5,35
Ferralsol 3	149.54	± 6,52	76.87	± 2,77	72.66	± 4,64

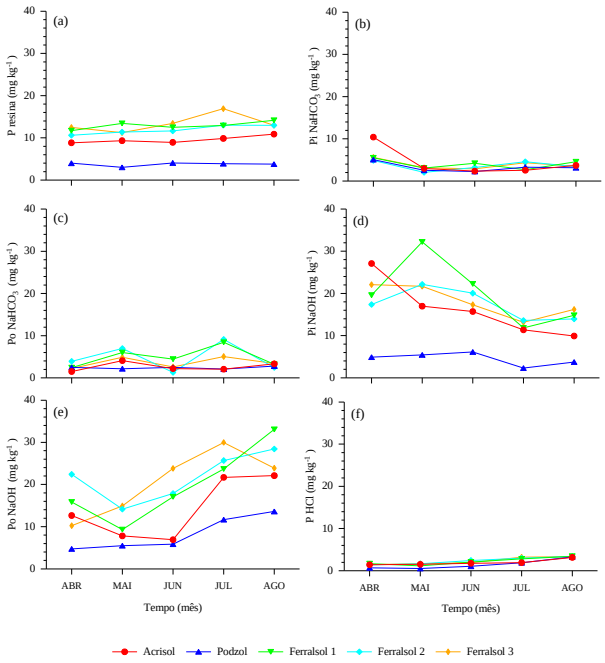

Figura 5. Padrões temporais das frações de fósforo obtidas através do fracionamento sequencial de P no solo das parcelas de estudo.

Foi observada uma variação temporal clara e significante em algumas frações entre os meses de estudo, entretanto os padrões de variação temporal para cada parcela foram distintos para as diferentes formas de P (Figura 5). Análises de ANOVA de medidas repetidas foram aplicadas em todas as frações do fracionamento sequencial de P no solo (Apêndice A e Apêndice B). Observa-se que a fração resina não variou sua concentração durante os meses (Figura 5.a) não tendo variação temporal significativa entre os meses em todas as áreas de estudo. A concentração da forma Pi $NaHCO_3$ apresentou variação significativa entre os meses em todas as parcelas (Apêndice B), porém apenas apresentando um leve incremento em concentração ao longo do período de estudo (Figura 5.b). A fração Po $NaHCO_3$, variou significativamente no Acrisol e no Ferralsol 2 (Apêndice B), entretanto não apresentou um padrão claro entre as áreas (Figura 5.c). Nas concentrações de Pi NaOH, observou-se uma ampla e significativa variabilidade temporal para os Ferralsols 1, 2 e 3 e no Podzol, onde observa-se uma significante diminuição das concentrações desta fração nas parcelas no mês de julho (Figura 5.d). Na área Acrisol, observa-se um comportamento similar, porém com diferentes magnitudes mas não significativo. Em um padrão inverso ao do Pi NaOH, a forma orgânica de P NaOH, apresentou um aumento considerável na concentração desta fração no mês de julho (Figura 5.e), sendo isto observado em todas as parcelas de estudo. O padrão observado entre as formas orgânica e inorgânica da fração NaOH sugere que a maior parte da reciclagem anual de P nestes solos se dá entre estas formas. A fração P HCl (Figura 5.f) variou significativamente durante os meses em todas as parcelas do estudo, embora apenas uma pequena mudança de concentração tenha sido observada.

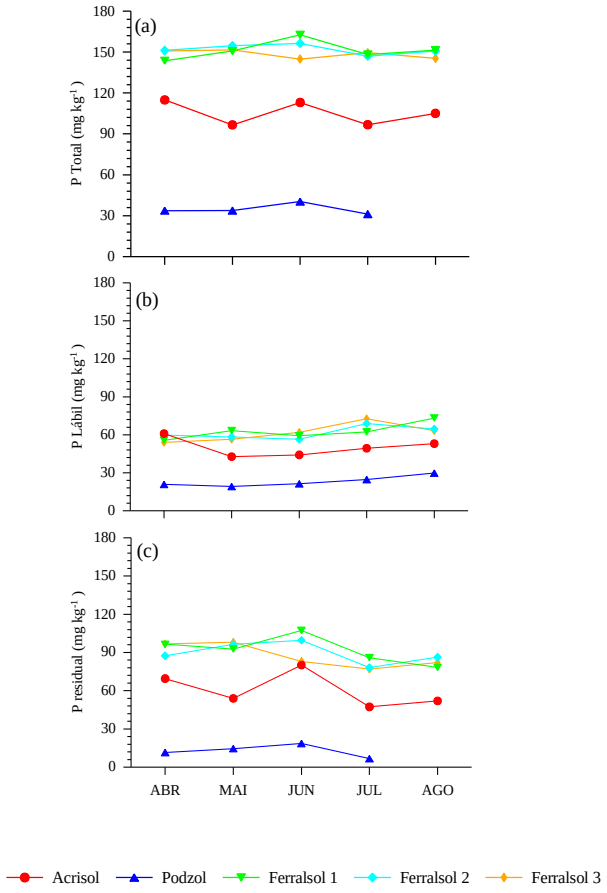

Figura 6. Variação temporal do fósforo total (a), residual (b) e lábil (c) nas parcelas de estudo.

A Figura 6 apresenta a variação temporal do P total, residual e lábil para as áreas de estudo. As concentrações na reserva de P total (Figura 6.a) variam pouco, não havendo variação significativa na distribuição temporal do P total (Apêndice B). A concentração de P total atinge valor máximo de 178 mg kg^{-1} no Ferralsol 1 e no Podzol mínima de 25 mg kg $^{-1}$. A fração lábil (Figura 6.b) apresentou em geral pouca variabilidade no período de estudo, sugerindo que em grande parte as mudanças observadas nas frações devem estar relacionadas a reciclagem interna de formas de P. Embora aparente, ampla variação durante o período de estudo (Figura 6.c), as diferenças temporais na concentração do P residual foram em geral não significativas (Apêndice B).

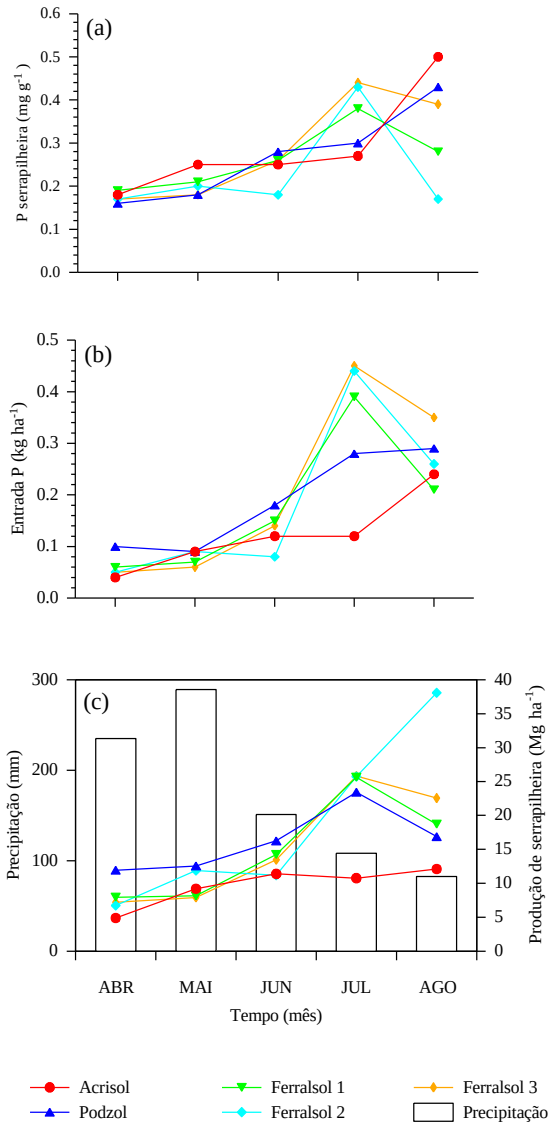

Figura 7. Variação temporal da dinâmica do P em relação a concentração de P nas folhas (a), (b) deposição/ entrada de fósforo no solo pela serrapilheira; (c) produção de serrapilheira e precipitação nos meses de estudo.

A Figura 7 apresenta a variação temporal na concentração de P na serrapilheira coletada no período (Figura 7.a), e também a entrada de P (Figura 7.b) como uma função da concentração de P na serrapilheira e sua produção mensal (Figura 7.c). A figura 7.c apresenta ainda a relação entre a produção mensal de serrapilheira e a quantidade de precipitação no período. Apesar de uma aparente variação temporal nas concentrações de P na serrapilheira, a mesma não resultou significativa na análise por ANOVA de medidas repetidas em nenhuma das parcelas analisadas. A entrada de fósforo que consiste da transferência de P da serrapilheira para o solo, variou significativamente durante o período de estudo, aumentando consideravelmente durante os meses mais secos em função de uma maior entrada de

serrapilheira. As diferenças entre os meses foram significativas no Acrisol, Podzol e no Ferralsol 2 e 3, entretanto não foram significativas no Ferralsol 1, apesar do mês de julho apresentar um grande aumento da entrada de P no solo para todas as parcelas exceto no Acrisol que teve um incremento menor em função de uma menor produção de serrapilheira no período. Foi observado que após grande incremento no mês de julho todas as parcelas Ferralsols foram seguidas de decréscimo na concentração e as parcelas Acrisol e Podzol se mantiveram constantes. Diferenças na produção de serrapilheira foram significativas no Podzol, Ferralsol 2 e 3 em associação com os meses com menores quantidades de precipitação (Figura 7.c).

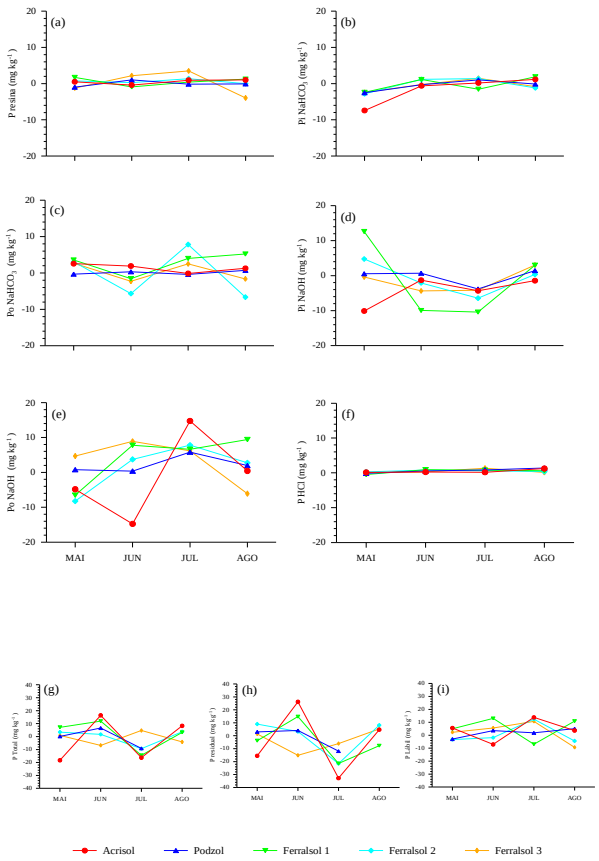

Figura 8. Mudança relativa das diferentes formas de P durante o período de estudo.

A figura 8 apresenta a mudança relativa das frações do P durante o período de estudo, tomando-se como referência a concentração do mês imediatamente anterior. Observa-se que as formas consideradas mais estáveis (Pi e Po NaOH), figuras 8.d e 8.e, foram as que apresentaram maior variação durante o período, seguidas do P em $NaHCO_3$, enquanto que as formas resina e HCl se mantiveram praticamente constantes durante o período. Entretanto, é

importante observar que apesar de não se detectar variação entre os meses na fração resina é possível que sua ciclagem seja mais rápida do que nosso intervalo de amostragem, portanto sendo impossível de captar a variação da mesma. Isso sugere que as frações orgânicas e inorgânicas de bicarbonato e hidróxido de sódio devem ser as principais fontes de P para a vegetação, com as formas orgânicas aparecendo como as mais prováveis fontes de P. A fração residual apresentou forte variação durante o período de estudo, o que poderia ser interpretado como indicativo de que esta fração participe ativamente na reciclagem de P. Entretanto a ANOVA de medidas repetidas indica que não há diferença significativa entre os meses nesta fração.

Produção de serrapilheira

A Tabela 3 apresenta resultados de correlações entre as frações de P no solo e a produção de serrapilheira no período, sua [P] na serrapilheira e a entrada de P pela deposição. Devido à similaridade nas respostas entre os solos, as correlações foram feitas agrupando-se os resultados dos diferentes solos. As correlações entre as frações de P no solo e a produção de serrapilheira estão expressas graficamente na Figura 9 enquanto que as relações entre P no solo e [P] serrapilheira estão apresentadas na Figura 10. A relação entre a entrada de P via serrapilheira e a concentração de P nas diferentes frações estão expressas na Figura 11.

Tabela 3. Correlação de Pearson, seguido da probabilidade (þ) das formas de P no solo entre produção de serrapilheira, concentração de P na serrapilheira e entrada de P no solo através da deposição de serrapilheira.

	Produção serrapilheira	[P] serrapilheira	Entrada P
P resina	0.075	0.075	0.111
(þ)	0.408	0.413	0.225
Pi $NaHCO_3$	-0.085	-0.100	-0.099
(þ)	0.348	0.276	0.280
Po $NaHCO_3$	0.134	0.033	0.164
(þ)	0.162	0.733	0.092
Pi NaOH	-0.237	-0.224	-0.283
(þ)	0.008	0.014	0.002

Po NaOH	0.226	0.133	0.225
(þ)	0.013	0.149	0.014
P HCl	0.405	0.228	0.339
(þ)	0.000	0.012	0.000
P Total	-0.034	-0.052	0.085
(þ)	0.713	0.577	0.365
P residual	-0.131	-0.230	-0.266
(þ)	0.188	0.021	0.007
P lábil	0.097	0.029	-0.631
(þ)	0.316	0.771	0.000
P residual: P total	-0.263	-0.180	-0.341
(þ)	0.007	0.071	0.000
Entrada P	0.588	0.694	----
(þ)	0.000	0.000	
[P] serrapilheira	-0.070	----	----
(þ)	0.448		

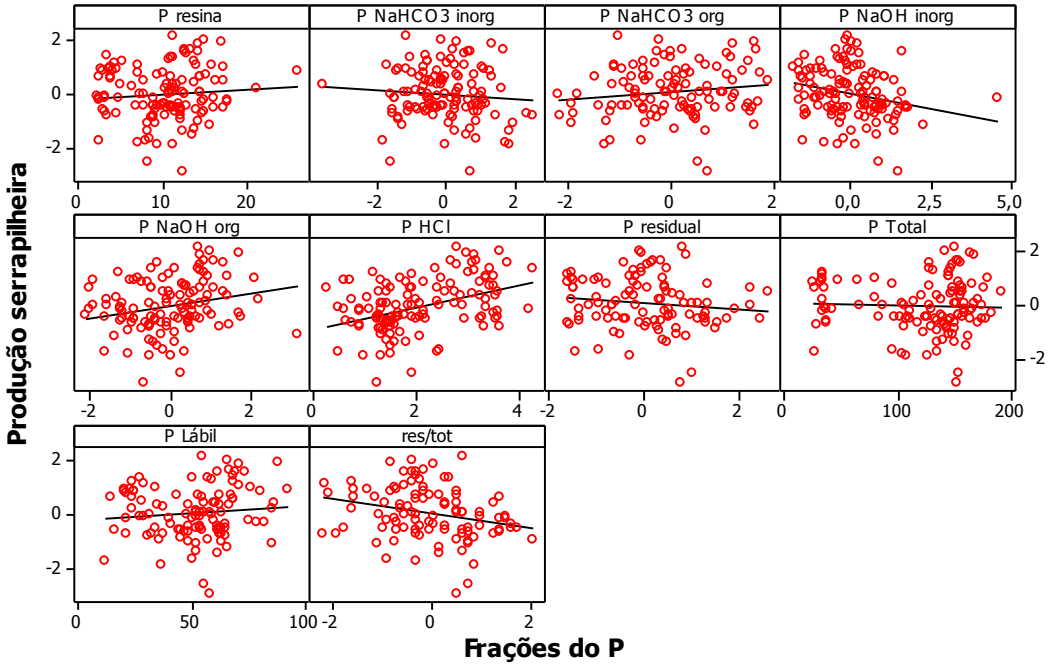

Figura 9. Relação entre as diferentes formas de P no solo e a produção de serrapilheira.

Observa-se que a produção de serrapilheira esteve significativamente correlacionada com as frações Pi e Po NaOH (-0,237 e 0,226, respectivamente) e com a fração P HCl (0,405). Observou-se também uma relação significativa e negativa com a razão entre P residual e P total (proporção de P residual; res/total), sugerindo menor produção de serrapilheira em solos com maior proporção da fração residual. Quanto a [P] na serrapilheira, observou-se que esta está significativamente correlacionada apenas com formas inorgânicas de P, como o P HCl (0,228, p=0,012), Pi NaOH (-0,224, p=0,014) e P residual (-0,230, p=0,021). Em relação à entrada de P via serrapilheira, observou-se correlações significativas e positivas com as frações Po NaOH e P HCl, e correlações significativas e negativas com as frações Pi NaOH, P residual e res/total. Isto parece sugerir que os padrões observados com a fração P HCl podem ocorrer em função da entrada de P no sistema via serrapilheira, principalmente sob forma de P associado ao cálcio no tecido foliar. Observa-se ainda que a entrada de P via serrapilheira parece estar mais relacionada com a variação na concentração de P na serrapilheira (0,694 p<0.001) do que com a produção de serrapilheira no período (0,588 p<0,001).

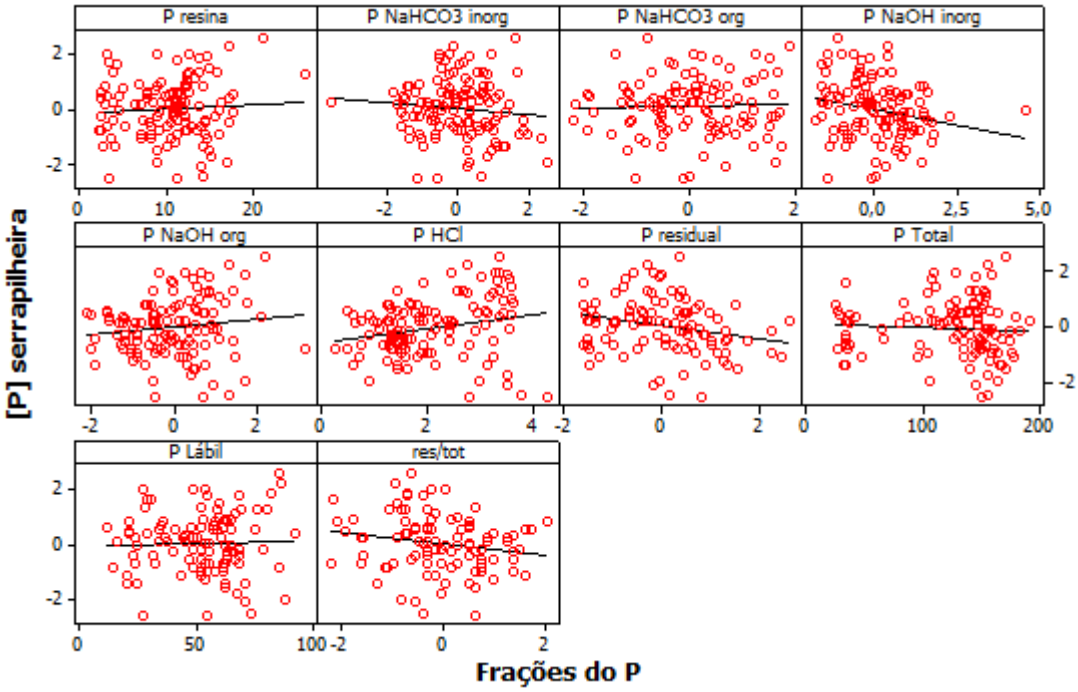

Figura 10. Relação entre as diferentes formas de P no solo e a concentração de P na serrapilheira.

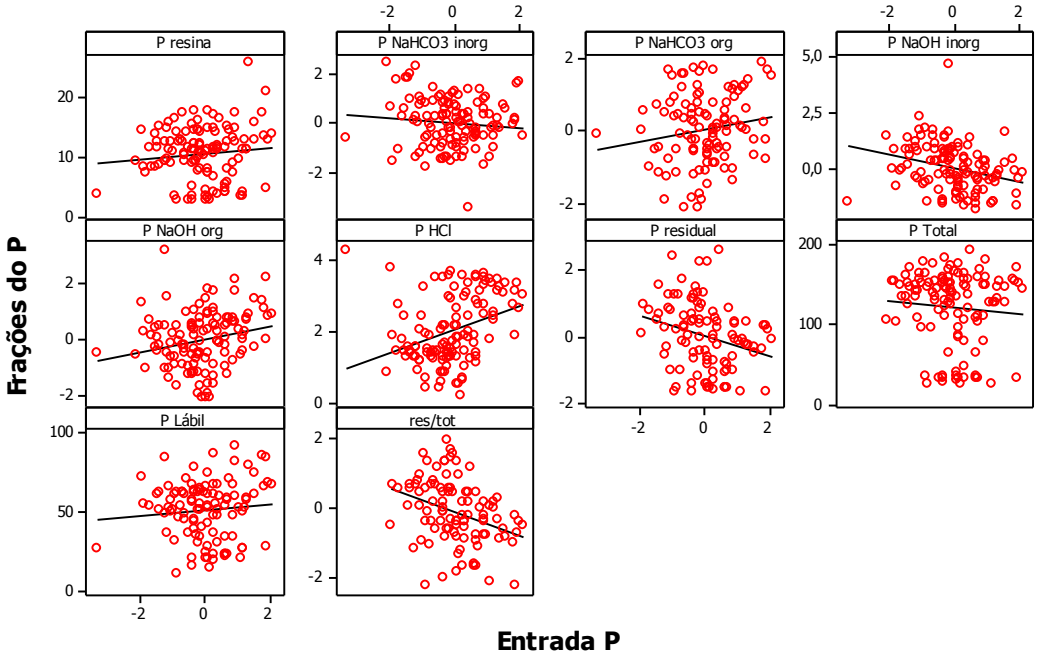

Figura 11. Relação entre a entrada de P no solo via serrapilheira e as diferentes formas de P no solo.

A Tabela 4 apresenta resultados de seleção de modelos de regressão múltipla para a relação entre as diferentes formas de P no solo e a produção de serrapilheira utilizando-se o critério de informação de Akaike como ferramenta de seleção de modelos. Esta análise considera que todos os modelos com Δ AICc < 2 representam relações similares em importância, independente do nível de significância das variáveis preditoras. Os resultados dos modelos selecionados foram concordantes com as correlações encontradas na Figura 9. As frações P HCl e Pi NaOH foram selecionadas em todos os modelos AICc < 2, sendo sempre significativas e compondo o melhor modelo selecionado (AICc = 0). A fração residual foi selecionada em 2 modelos (Δ AICc 1,23 e 1,42) sendo sempre não significativa. Outras frações selecionadas em um único modelo foram Pi e Po NaHCO3, resina e Po NaOH, sendo que estas não apresentaram relações significativas. A probabilidade de ser selecionado em todos os modelos AICc é um indicativo da importância da variável (Richards 2005).

Tabela 4. Seleção de modelos com critério de informação de AIKAIKE (AICc). Relação entre as diferentes formas de P no solo e a produção de serrapilheira nas áreas de estudo. Modelos com Δ AICc < 2 são considerados similares.

Modelo	R^2 ajust	AICc	Δ AICc	þ
-Pi NaOH** + P HCl***	0.25	260.10	0	<0.001
Po $NaHCO_3^{NS}$ - Pi NaOH** + P HCl***	0.26	260.82	0.72	<0.001
-Pi NaOH^{NS}+ P HCl*** - P residual^{NS}	0.26	261.33	1.23	<0.001
P HCl***- P residual**	0.24	261.52	1.42	<0.001
Pi $NaHCO_3^{NS}$ - Pi NaOH** + P HCl***	0.25	261.93	1.82	<0.001
P resina^{NS} - Po NaOH** + P HCl***	0.25	261.98	1.88	<0.001
-Pi NaOH**- Po NaOH** + P HCl***	0.25	262.07	1.97	<0.001

Onde:* < 0.05, ** < 0.01 , *** <0.001 , ^{NS} não significativo

Discussão

Concentração do fósforo nos solos em estudo

Características geomorfológicas típicas da área ao norte de Manaus como a presença de baixios arenosos e mal drenados e de platôs argilosos bem drenados (Chauvel et al. 1987) tiveram forte influência sobre a distribuição das frações de P nas parcelas de estudo (Figura 4, Tabela 2). Os solos da região são extremamente intemperizados, estando expostos ao intemperismo contínuo por aproximadamente 100 milhões de anos (Quesada et al. 2011) o que se reflete na baixa concentração de P nestes solos. Em particular, os Podzols apresentam concentrações muito baixas de P uma vez que estes solos são dominados por um material de origem muito pobre (quartzo), e possuem baixa densidade de cargas na superfície de suas partículas e, portanto baixa capacidade de adsorção de P (Cross e Schlesinger, 1995; Uehara e Gilman, 1981). Os Ferralsols e Acrisols desta região por outro lado, possuem alta concentração de argilas, predominantemente do grupo das caulinitas e óxidos de Fe e Al o que os confere uma maior manutenção de P em circulação no sistema e também uma grande capacidade de adsorção de P em formas não disponíveis ou residuais (Chauvel et al. 1987; Cross e Schlesinger, 1995). A concentração e distribuição das formas de P no solo também estão de acordo com os padrões médios para estes tipos de solo na Amazônia conforme reportado por Quesada et al. (2010). Estes autores reportam concentrações médias de P total

na Amazônia para Ferralsols, Acrisols e Podzols (0-30 cm) na ordem de 122, 118 e 29 mg kg^{-1} respectivamente, sendo que destes, 67, 60 e 21% encontram-se em forma residual estando estes números bem próximos do observado em nosso estudo. De forma similar, os dados apresentados aqui demonstraram que formas orgânicas de P predominam em nossa área de estudo, o que está de acordo com o observado por Quesada et al. (2010) para os mesmos tipos de solo. Os autores reportaram que o P orgânico varia entre 30 a 65% do P total nos Ferralsols, e entre 40 a 60% nos Acrisols, sendo que nos Podzols a proporção varia entre 25 e 50%. Além da concordância entre os dados reportados neste estudo e dados da literatura, soma-se o fato de que as observações feitas nos solos em estudo tem grande relevância geográfica uma vez que os três tipos de solos estudados aqui representam quase a totalidade dos solos da região de Manaus, e em escala da Bacia Amazônica estes representam aproximadamente 62% da área coberta por floresta (Quesada et al. 2011).

Variações temporais nas frações do P

Foi observada uma variação temporal clara e significante em algumas frações entre os meses de estudo, com padrões distintos de variação temporal para as diferentes formas de P (Figura 5). Entretanto, nossos resultados sugerem um papel preponderante das frações NaOH (orgânico e inorgânico), com uma clara indicação de incremento de P orgânico por entrada de serrapilheira (Figura 7) e posterior transformação do P NaOH orgânico em Pi NaOH ao longo do tempo. Estes resultados sugerem que estas formas de P sejam responsáveis por uma grande parte da reciclagem interna do P em seus diferentes reservatórios. Esta relação entre as formas orgânica e inorgânica de P, onde o Pi NaOH apresenta um aumento claramente controlado pela entrada de P orgânico e decréscimo ao longo do tempo sugere que o Pi NaOH seja uma importante fonte de P inorgânico para o sistema, transferindo boa parte de seu P à outras frações ou mesmo indiretamente para as plantas através de transformações para ortofosfatos. É importante salientar que a fração resina é a única que apresenta em seu conteúdo formas de P que são prontamente absorvíveis pelos consumidores (Cross e Schlesinger 1995; Johnson et al. 2003). A fração resina representa o P disponível na solução do solo e também àquele fracamente retido de forma iônica na matéria orgânica e na superfície dos colóides (Cross e Schlesinger 1995; Johnson et al. 2003). Assim, esta forma de P representa um reservatório transiente de P, alimentado pela liberação de P por outras formas mais estáveis (Smeck, 1985; Tiessen et al. 1984). Usualmente esta fração contém apenas 1% do P total (Cross e

Schlesinger, 1995). Neste estudo não foi possível detectar uma variação significante na fração resina. Isto provavelmente está relacionado com uma dinâmica temporal rápida nesta fração, implicando que a absorção de formas disponíveis seja rápida e que a concentração observada na fração resina seja uma função de equilíbrio entre a solução do solo e outras formas mais estáveis de P (por exemplo Pi NaOH).

O P ligado a fração NaOH tem sido apresentado na literatura como uma fração de baixa disponibilidade e transformações muito lentas (Cross e Schlesinger, 1995; Johnson 2003), entretanto existe crescente evidência de que formas consideradas mais estáveis de P possam ser na verdade mais lábeis do que antes pensado, principalmente em circunstâncias de baixa disponibilidade de P (Nziguheba e Bünemann, 2005). Diversos estudos tem reportado que formas NaOH e HCl 1M podem liberar grandes quantidade de P (Hedley et al. 1994; Saleque e Kirk, 1995; Hinsinger e Gilkes, 1996; Trolove et al. 1996; Bertrand et al. 1999), e outros reportam transformações e uso de P NaOH em solos cultivados (Adepetu e Corey, 1976; Sattell e Morris, 1992; Guo e Yost, 1998; Nziguheba e Bünemann, 2005). Outro aspecto distinto em nosso estudo foi a observação de que P HCl variou significativamente no tempo, apesar de ser em pequenas quantidades. Solos tropicais muito intemperizados como é o caso deste estudo normalmente possuem apenas traços de P HCl, uma vez que praticamente todo o P associado com material de origem (apatitas, Ca-P) já foi transformado em outras formas (Walker e Syers, 1976; Smeck 1985). Nós especulamos que os incrementos observados na fração HCl ocorram em função da entrada de fósforo e cálcio através da serrapilheira (Ca é um elemento estrutural nas folhas) o qual pode estar levando a um processo de complexação do P com Ca no solo, entretanto mais estudos são necessários para compreender melhor a dinâmica do P HCl nestes sistemas. Outro aspecto que merece discussão é a observação de que o P residual parece variar ao longo do tempo (Figura 6.c), o que poderia ser interpretado como indicativo de que esta fração participe ativamente na reciclagem de P. Entretanto isso pode estar relacionado com uma alta variabilidade espacial nas áreas de estudo e com o pequeno, porém inevitável universo amostral ($n < 30$) já que a ANOVA de medidas repetidas indica que não há diferença significativa entre os meses nesta fração. Entretanto é possível que o P residual (usualmente não disponível) seja reciclado a partir da interação desta fração com exudatos de raízes e também por associação entre raízes e micorrizas para a disponibilização de P desta fração (Alexander 1989), sobretudo em solos superficiais (0-5 cm) como é o caso deste estudo.

A observação de que o P orgânico é a principal fonte de P no sistema é concordante com outros estudos na literatura. Por exemplo, Tiessen et al. (1984) sugerem que em solos mais intemperizados a principal fonte seria o P orgânico. Em outro estudo de longo prazo realizado em áreas cultivadas na Amazônia Peruana, Beck e Sanchez (1994) acompanharam a dinâmica anual das formas de P do solo em parcelas fertilizadas e não fertilizadas ao longo de 18 anos. Os autores demonstraram que frações de P inorgânico, considerado de moderada disponibilidade (NaOH), atuaram como reservatório no sistema fertilizado, sendo capazes de liberar P rapidamente e de manter um nível adequado de disponibilidade ao longo do tempo. No sistema não fertilizado (capoeira), os autores demonstraram que o P orgânico, proveniente da matéria orgânica do solo, foi a principal fonte de P para a vegetação. Finalmente, em seu estudo sobre a dinâmica do P nos solos, Walker e Syers (1976) postulam que solos altamente intemperizados tem sua economia de P baseada fortemente em transformações de P orgânico, o que em casos extremos de intemperismo (como em Podzols) a fração orgânica torna-se praticamente a única fonte de P para o sistema.

Produção de serrapilheira

Os resultados de correlações entre produção de serrapilheira e as frações de P no solo corroboram com as observações de variação temporal nas formas de P do solo apresentados na seção anterior. As correlações sugerem evidência adicional de que as formas Po NaOH e P HCl estejam positivamente relacionadas com a variação na produção de serrapilheira, enquanto que a produção de serrapilheira estaria negativamente associada à quantidade de P residual. Entretanto, é possível que não exista uma simples relação direta e causal entre estas formas de P e a produção de serrapilheira, e que estas formas de P no solo na verdade variem em função da entrada de P no sistema via serrapilheira (relação circular). Conforme apresentado na seção anterior, nossa interpretação é de que este seja o caso do P HCl, baseado nos seguintes argumentos. 1) P HCl é encontrado em minerais primários (apatitas e fosfatos de cálcio) os quais são instáveis em solos altamente intemperizados, daí a ocorrência de P HCl ser muito pequena nestes solos (Smeck 1985). Assim, qualquer variação encontrada em P HCl nestes solos deve necessariamente estar relacionada com a entrada destas formas no sistema. 2) Concentrações de Ca e P nas folhas e serrapilheira estão correlacionadas (Quesada et al. 2008), implicando que ambos os elementos entram juntos no solo via serrapilheira. 3) Cálcio é um elemento estrutural da folha, e entra em grande quantidade através da

serrapilheira (Luizão, 1989). Com relação ao Po NaOH, nos parece obvio que a serrapilheira seja a fonte de P orgânico, entretanto sugerimos que o Po NaOH seja a fonte que alimenta o sistema, e que as transformações desta forma de P (mineralização) deve ser responsável pela manutenção na disponibilidade de P e através disso tendo a capacidade de influenciar a produção primária da floresta. A interpretação de que as frações mudam em decorrência da entrada de P no solo está de acordo com as relações observadas na Figura 11, onde a variação nas frações de P no solo estão plotadas em função da entrada de P no sistema (calculada a partir da produção de serrapilheira e de sua concentração de P). Observa-se uma significativa relação entre a entrada de P no sistema e as frações HCl e Po NaOH (Tabela 3), de acordo com o argumento apresentado acima.

As relações descritas acima foram evidenciadas nos modelos de regressão múltipla selecionados pelo critério de informação de Akaike (AICc). A seleção do melhor modelo sugere maior importância para as formas P HCl e Pi NaOH em influenciar a produção de serrapilheira, entretanto ressalta-se que a interpretação do AICc é diferente daquela usualmente empregada em regressões múltiplas, sendo que níveis de significância das variáveis nos modelos não são a única evidência de importância da variável, e que a frequência de seleção de cada variável pode ser interpretada com indicação de sua importância (Richards, 2005). A teoria da informação considera ainda que todos os modelos com ΔAICc < 2 tem igual importância, sendo estatisticamente indistinguíveis uns dos outros. Entretanto nossa interpretação é que de fato, o AICc indica importância das formas P HCl e Pi NaOH sendo que a adição de outras frações aos modelos não resultou em incrementos no R^2 dos demais modelos quando comparados ao modelo com ΔAICc = 0. A seleção do Pi NaOH em detrimento do Po NaOH que foi uma das variáveis mais importantes na análise de correlação, nos parece estar associada a relação inversa que o Pi NaOH tem com o Po NaOH, sugerindo que exista uma relação de dreno entre Pi e Po nestas frações. Observa-se que quando Po NaOH aumenta o Pi está baixo, e quando o Po diminui (mineraliza) o Pi aumenta, indicando uma forte relação mecanística entre estas formas de P no solo e uma possível rota de entrada do P no sistema.

Este estudo foi pioneiro em tentar determinar a dinâmica do P nos solos na Amazônia. Até o presente, nos é conhecido que apenas outros dois estudos seguiram esta trilha no mundo, em parte devido a complexidade e demanda de trabalho necessárias. O trabalho de Fabre et al. (1996) em áreas ripárias da França, demonstrou que existe um padrão claro de variação temporal nas diferentes formas de P no solo, e que o mesmo estava associado à

eventos de inundação e a variações ambientais decorrentes das diferentes estações do ano. Enquanto que num estudo similar na Nova Zelândia, Chen et al. (2003) sugerem que em alguns casos a taxa de reposição de P (quantidade de P anualmente ciclada / estoque de P) é provavelmente mais importante como fonte de P para o ecossistema do que a simples quantidade de formas biodisponíveis. Finalmente, Quesada et al. (2012) em um estudo envolvendo medições de propriedades químicas e físicas dos solos e dados provenientes de parcelas permanentes de inventário florestal, demonstraram que o P foi o principal fator limitante da produtividade de biomassa na Amazônia. Apesar do P ser o elemento com maior probabilidade de limitar a produtividade primária liquida em ecossistemas tropicais (Vitousek, 1984; Aerts e Chapin, 2000), até o momento a maioria dos modelos biogeoquímicos globais não simulam ciclos biogeoquímicos que incluem o P (Wang et al. 2010). Isso porque a parametrização realista do ciclo do P nestes modelos é em grande parte limitada pela falta de conhecimento da distribuição do P nos solos, e pelo limitado conhecimento da disponibilidade e dinâmica das diversas formas do P. Mais dados como os apresentados nesta dissertação são necessários para a parametrização do ciclo de P na Amazônia e sua inclusão em estudos de modelagem. O impacto da inclusão de limitação por P em modelos dinâmicos de vegetação reflete a importância deste processo nos ecossistemas. Wang et al. (2010), trabalhando com o modelo CASACNP, reporta que as estimativas de produtividade primária líquida da maioria das florestas e savanas tropicais são reduzidas em 20% em média devido à limitações por P, enquanto outros biomas seriam limitados por N. Além disso, a má representação dos processos influenciados por limitação nutricional pode levar a predições incorretas em cenários climáticos futuros. Por exemplo, Conroy et al. (1990) demonstrou que a reposta relativa da fotossíntese à condições elevadas de CO_2 é menor em plantas limitadas por P, mesmo quando comparadas à plantas limitadas por N. Assim, fica evidente que mais trabalhos sobre a dinâmica de P são necessários na Amazônia.

Conclusão

Os resultados apresentados neste estudo sugerem que a manutenção da disponibilidade do P em florestas da Amazônia Central está fortemente relacionada com a entrada de P via serrapilheira, e que a via de transformação deste elemento esteja ligada a formas de P com ciclagem relativamente lenta. Por exemplo, observa-se que meses se passam durante o processo de transformações P orgânico em P inorgânico nas formas NaOH, o qual acredita-se

ser a principal rota de entrada de P no sistema. Isto implica em lentas e contínuas transformações de P no solo, provavelmente controlando a produtividade destas florestas.

Agradecimentos

Agradecemos ao Dr. João Ferraz pelo empréstimo de vidraria. Ao Dr. Flávio Jesus Luizão por orientação no início do trabalho, ambos do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia.

Referências Bibliográficas

Adepetu, J. A. and Corey, R. B.: Organic phosphorus as a predictor of plant-available phosphorus in soils of Southern Nigeria, *Soil Sci*., 122, 159–164, 1976.

Aerts, R. e Chapin, F. S. III (2000). The mineral nutrition of wild plants revisited: a reevaluation of processes and patterns. *Advances in Ecological Research* 30:67.

Alencar, J. C. 1994. Fenologia de cinco espécies arbóreas tropicais de sapotaceae correlacionada a variáveis climáticas na Reserva Ducke, Manaus - Am. *Acta Amazonica*, 24(3/4):161-182.

Alexander, I.: Mycorrhizas in tropical forests, in: Mineral nutrients in tropical forests and savanna ecosystems, *Blackwell, Oxford*,1989.

Araújo, A.L.L. *Complexidade de elementos químicos por árvores nativas da Mata Atlântica.* 2009. 133p. Dissertação mestrado em Ecologia Aplicada. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

Araújo, M.S.B., Sampaio, E.V.S. (2010). Distribuição e caracterização de fósforo em solos de ecossistemas nativos úmidos e semi-árido. *Revista de Geografia.* Recife: UFPE – DCG/NAPA, v. 27, n. 2, mai/ago, 2010. p.141-154.

Araújo, V. C. 1970. Fenologia de essências florestais amazônicas. I. *Boletim Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia*, (4):1-25.

Ball-Coelho, B.; Salcedo, I. H.; Tiessen, H.; Stewart, J. W. B. Short and long term phosphorus dynamic in a fertilized under sugarcane. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 57, n. 4, p. 1027-1034, July/Aug. 1993.

Beck, M.A. e Sanchez, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1424-1431, 1994.

Bertrand, I, Hinsinger, P, Jaillard, B and Arvieu, J C (1999) Dynamics of Phosphorus in the rizhosphere of maize and rape grown on synthetic, phosphated calcite and goethite. *Plant Soil* 211: 111-119.

Braga, J. M.; Defelipo, B. V. Determinação espectrofotométrica de fósforo em extrato de solo e material vegetal. *Revista Ceres*, v.21, n.1, p.73-85, 1974.

Cardoso, I. M. ; Janssen, B. ; Oenema, O. ; Kuyper, T. Phosphorus pools in Oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers'fields in Brazil. *Agroforestry Systems*, Holanda, v. 58, p. 55-64, 2003.

Charley, J.L., Richards, B.N; 1983. Nutrient allocation in plant communities: Mineral cycling in terrestrial ecosystems. In: Lange, O.L., NOBEL, P.S., OSMOND, C.B., ZEIGLER, H. (eds.) Physiological plant ecology. *Springer-Verlag*. 646p.

Chauvel, A., Lucas, Y. and Boulet, R (1987) On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brazil.

Condron , L.M.; Goh, K.M. e Newman, R.H. Nature and distribuction of soil phosphorus as revealed by sequential extraction method followed by ^{31}P nuclear magnetic resonance analysis. *J. Soil Sci.*, 36: 1999-207, 1985.

Conte, E.; Anghinoni, I. e Rheinheimer, D.S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida após aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.26, p.925-930, 2002.

Cross, A.F.; Schlesinger, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, v.64, p.197-214, 1995.

Cuevas, E.; Medina, E. (1986). Nutrient dynamics within Amazonian forest ecosystems, *Oecologia*, 68, 466–472.

Dalal, R. C. Soil organic phosphorus. *Advances in Agronomy*. v.29, p. 83-117,1977.

Davison, A.C., 2001. Biometrika centenary: theory and general methodology. *Biometrika* 88, 13 – 52.

Delitti, W.B.C., 1995. Estudos de Ciclagem de Nutrientes: Instrumentos Para A Análise Funcional De Ecossistemas Terrestres. *Oecologia Brasiliensis*, Vol I: Estrutura, Funcionamento e Manejo de Ecossistemas Brasileiros, p.469-486.

Dias Filho, M.B. 1998. Pastagens cultivadas na Amazônia oriental brasileira: processos e causas de degradação e estratégias de recuperação. *In*: Dias, L.E.; Mello, J.W.V. (Eds). *Recuperação de áreas degradadas*. Viçosa: DSO-UFV/SOBRADE. p. 135-147.

Elser, J. J., Bracken, M. E. S., Cleland, E. E., Gruner, D. S., Harpole, W.S., Hillebrand, H. Ngai, J. T., Seabloom, E. W. Shurin, J. B., and Smith, J. E.: Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems, *Ecol. Lett*., 10 (12), 1135-1142, 2007.

EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solos. 2ed. rev. e atual. Rio de Janeiro. EMBRAPA, 1997. 212 p.

Fabre, A., Pinay, G., & Ruffinoni, C. (1996). Seasonal changes in inorganic and organic phosphorus in the soil of a riparian forest. *Biogeochemistry*,*35*(3), 419-432.

Fittkau, E., Esboço de uma divisão ecológica da região amazônica. *Proc. Symp. Biol. Trop. Amaz.*, Florencia y Leticia, 1969, 363-372, 1971.

Fittkau, E. J., Irmler, U., Junt, W. J., Reis, F. and Schmidt, G. W.: Productivity, biomass and population dynamics in Amazonian water bodies, in: Tropical ecological systems. Trends in

terrestrial and aquatic and research (ed G. B. Golley and E. Medina), *Springer*, New York, Berlin, 289-311, 1975.

Gatibone, L.C. *Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas*. 2003. 247f. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) - Faculdade de Agronomia -UFSM, Santa Maria.

Golley, F.B. Tropical Rain Forest Ecosystems: structure and fuction. Amsterdam: *Elsevier*, 1983. 392p.

Golley, F.B.; McGinnis, J.T.; Clements, R.G.; Child, G.I.; Duever, M.J. *Ciclagem de minerais em um ecossistema de floresta tropical úmida.* São Paulo: EDUSP, 1978. 256p.

Grant, C.A.; Flaten, D.N.; Tomasiewicz, D.J.; Sheppard, S. C. 2001. *A importância do fósforo no desenvolvimento inicial da planta.* Potafós - Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. *Informações Agronômicas*, 95: 1-5.

Guillaumet, J.L. 1987. Some structural and floristic aspects of the forest. *Experientia* 43:241-251.

Guo, F. e Yost, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Sci*., 163:822-833, 1998.

Havlin, J.L.; Werner, L.N.; Tisdale, S.L.; Beaton, J.D. *Phosphorus*. Soil fertility and fesrtilizers an introduction to nutrient management. New Jersey, 2005. P. 160-169.

Hedley, M J, Kirk, G J R and Santos, M B (1994) Phosphorus efficiency and the forms of soil phosphorus utilized by upland rice cultivars. *Plant and Soil* 158: 53-62.

Hedley, M J, Stewart, J W B and Chauhan, B S (1982). Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of America* 46: 970-976.

Herrera, R.; Jordan, C.F., 1981. Nitrogen cycle in a tropical Amazonia rain forest: the The caatinga of low mineral nutrient status. *Ecology Bulletin (Stockholm)* 33, 493-505.

Hinsinger and Gilkes (1996) Mobilization of phosphate from phosphate rock and alumina-sorbed phosphate by the roots of ryegrass and clover as related to rhizosphere pH. *European Journal Soil Science* 47:533-544.

Hobbie, S. E. and Gough, L. (2002) Foliar and soil nutrients in tundra on glacial landscapes of contrasting ages in northern Alaska. *Oecologia* 131: 453-462.

Hox, J.J. e Bechger, T.M. (1998). An introduction to structural equation modeling. *Family Science Review*, 11, 354-373.

Hurvich, C. M., & Tsai, C. L. (1989). Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, *76*(2), 297-307.

IUSS Working Group, W. R. B. (2006). World reference base for soil resources. *World Soil Resour. Rep*, *103*.

Johnson, A.H.; Frizano J.; Vann, D.R. Biogeochemical implications of labile phosphorus in forest soils determined by the Hedley fractionation procedure. *Oecologia*, 2003. V.135, N.4, p.487-499.

Jordan, C. J. e N. Stark. 1978. Retención de nutrientes em la estera de raices de um bosque pluvial amazónico. *Acta Científica Venezuelana. 29*: 263-267.

Jorgensen, J. R., Wells, C. G., Mettz, L. J., 1975. The nutrients cycle: key to continuos forest production. *J. Forestry*, 73(7):400-3.

Klinge, H. and Rodrigues, W.A. 1968. Litter Production in an Area of Amazonian Terra Firme Forest. Part I. Litter-fall Organic Carbon and Total Nitrogen Contens of Litter. *Amazoniana I:* 287-302.

Kolm, L. Ciclagem de nutrientes e variação do microclima em plantações de Eucalyptus grandis Hill ex Maiden manejadas através de desbastes progressivos. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 62p. 2001.

Leopoldo, P.R.; Franken, W.; Salati, E. e Ribeiro, M.N.G. 1987. Towards a water balance in Central Amazonian region.*Experientia* 43:222-233.

Luizão, F. J. Produção e decomposição da serrapilheira em floresta de terra firme da Amazônia Central: aspectos químicos e biológicos da lixiviação e remoção dos nutrientes da serrapilheira. INPA/UFAM, Manaus, 1982. 107p.

Luizão, R.C.C.; Luizão, F.J. Serrapilheira e biomassa microbiana do solo no ciclo da matéria orgânica e nutrientes em terra-firme na Amazônia central. (A.L. Val, R. Figlivolo e E. Fedberg, eds.). *In Bases Científicas para Estratégias de Preservação e Desenvolvimento da Amazônia.* Secretaria de Ciência e Tecnologia, INPA, Manaus, v. 1, p.65-75, 1991.

Luizão, F. J. 1989. Litter production and mineral element nutrient input to the forest floor in a central Amazonian forest. *GeoJournal* 19:407–417.

Magid J., Tiessen H. and Condron L.M. 1996. Dynamics of organic phosphorus in soils under natural and agricultural ecosystems. In: Piccolo A. (ed.), Humic Substance in Terrestrial Ecosys-tems. *Elsevier*, Amsterdam, pp. 429–466.

Magnusson, W.E.; Lima, A.P.; Luizão, R.; Luizão, F.; Costa, F.R.C.; Castilho, C.V. e Kinupp, V.F. RAPELD: uma modificação do método de Gentry para inventários de biodiversidade em sítios para pesquisa ecológica de longa duração. Biota Neotrop. Jul/Dez 2005, vol. 5, nº. 2.

Martinazzo, R. et al**.** Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio direto afetado pela adição de fosfato solúvel. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, n.3, p.563-568, 2007.

Martins, S.V.; Rodrigues, R. R. Produção de serapilheira em clareiras de uma floresta estacional semidecidual no município de Campinas, SP. *Revista Brasileira de Botânica*. São Paulo, V.22, n.3, p.405-412, 1999.

Mercado, L.M.; Patiño, S.; Domingues, T.F.; Fyllas, N.M.; Weedon, G.P.; Sitch, S.; Quesada, C. A; Phillips, O.L.; Aragão, L.E.O.C.; Malhi, Y.; Dolman, A.J.; Coupe, N.R.; Saleska, S.R.; Baker, T.R.; Almeida, S.; Higuchi, N.; Lloyd, J. (2011). Variations in Amazon forest productivity correlated with foliar nutrients and modelled rates of photosynthetic carbon supply. *The Royal Society*. ISSN: 1471-2970.

Murphy, J. e J. P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphorus in natural water. *Anal . Chim. Acta* . , 27: 31-36.

Nortcliff, S. e Thornes, J.B. 1981. Seasonal variations in the hydrology of a small forested catchment near Manaus, Amazonas, and its implication for management. In: Lal, R. e Russel, E.W. (eds.). Tropical Agricultural Hydrology. John Wiley e Sons, Chichester and New York. 482p.

Nziguheba, G and Bünemann, E K (2005) Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: Organic Phosphorus in the Environment(eds. B L Turner, E Frossard and D S Baldwin), pp 243-268. *CABI Publishing*.

Olsen, S. e Sommers, L. (1982) *Phosphorus. In: Methods of Soil Analysis 2nd Edition* (ed.A Page), p 403-427. American Society of Agronomy/Soil Science Society of America, Madison.

Quesada, C. A., Phillips, O. L., Schwarz, M., Czimczik, C. I., Baker, T. R., Patiño, S., Fyllas, N. M., Hodnett, M. G., Herrera, R., Almeida, S., Alvarez D´avila, E., Arneth, A., Arroyo, L., Chao, K. J., Dezzeo, N., Erwin, T., di Fiore, A., Higuchi, N., Honorio Coronado, E., Jimenez, E. M., Killeen, T., Lezama, A. T., Lloyd, G., López-González, G., Luizão, F. J., Malhi, Y., Monteagudo, A., Neill, D. A., Núñez, Vargas, P., Paiva, R., Peacock, J., Peñuela, M. C., Peña Cruz, A., Pitman, N., Priante Filho, N., Prieto, A., Ramírez, H., Rudas, A., Salomão, R., Santos, A. J. B., Schmerler, J., Silva, N., Silveira, M., Vásquez, R., Vieira, I., Terborgh, J., and Lloyd, J.. Basin-wide variations in Amazon forest structure and function are mediated by both soils and climate. *Biogeosciences*, 9, 2203–2246, 2012.

Quesada, C.A. 2008. *Soil vegetation interactions across Amazonia*. PhD Thesis. School of Geography, University of Leeds. 241 pp.

Quesada, C.A., Lloyd, J., Anderson, L.O., Fyllas, N.M., Schwarz, M., and Czimczik, C.I. (2011) Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites.*Biogeosciences*, 8 (6). pp. 1415-1440.

Quesada, C.A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T.R., Czimczik, C., Fyllas, N.M., Martinelli, L., Nardoto, G.B., Schmerler, J., Santos, A.J.B., Hodnett, M.G., Herrera, R., Luizão, F.J., Arneth, A., Lloyd, G., Dezzeo, N., Hilke, I., Kuhlmann, I., Raessler, M., Brand, W.A., Geilmann, H., Moraes Filho, J.O., Carvalho, F.P., Araujo Filho,

RADAMBRASIL (1978) *Levantamento dos Recursos Naturais.* (Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro).

Raij, B. van. *Fertilidade do solo.* São Paulo: Ceres/Potafos, 1991. 343 p.

Rheinheimer, D.S. et al. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, n.3, p.589-597, 2000.

Rheinheimer, D.S. et al. Fósforo orgânico do solo. In: Santos, G.A.; Camargo, F.A.O. (Eds). Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: *Gênesis*, 1999. P.139-157.

Rheinheimer, D.S. et al. Organic and inorganic phosphorus as characterized by phosporus-31 nuclear magnetic resonance in subtropical soils under management systems. Communicattions in Soil Science anda Plant Analysis, v.33, n.13e14, p.1853-1871, 2002.

Ribeiro, J.E.L., Hopkins, M.J.G., Vincentini, A., Sothers, C.A., Costa, M.A., Brito, J.M., Souza, M.A.D., Martins, L.H.P., Lohmann, L.G., Assunção, P.A.C.L., Pereira, E.C., da Silva, C.F., Mesquita, M. e Procópio, L.C. 1999. *Flora da Reserva Ducke* – Guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central. Manaus, INPA, 816p.

Richards, S. A.: Testing ecological theory using the information-theoretic approach: Examples and cautionary results, *Ecology*,86, 2805–2814, 2005.

Rodriguez, J. C. 1995. *Aspectos fitossociológicos das comunidades vegetais de uma toposseqüência da Reserva Florestal Ducke do INPA, Manaus - AM.* Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia / Fundação Universidade do Amazonas, Manaus, Amazonas. 284p.

Sanchez, P. A. (1987) Soil productivity and sustainability in Agroforestry systems. In: Agroforestry: a decade of development(eds. H A Steppler and P K R Nair), pp 205-223. *International Council for Research in Agroforestry,Nairobi*.

Saleque, M A and Kirk, G J D (1995) Root-induced solubilization of phosphate in the rhizosphere of lowland rice. *New Phytologist* 129:325-336.

Sanyal, S. K. & Datta, S. K. *Chemistry of phosphorus transformations in soil.* In: Stewart, B. A. (ed) Advances in soil science, New York, v16, p. 01-120, 1991.

Sattell, R R and Morris, R A (1992) Phosphorus fractions and availability in Sri Lankan alfisols. *Soil Science Society of America* 56:1510-1515.

Silver, W. L. (1994). Is nutrient availability related to plant nutrient use in humid tropical forests? *Oecologia*, 98, 336–343.

Smeck, N E (1973) Phosphorus: An indicator of pedogenetic weathering processes. *Soil Science* 115: 199-206.

Smeck, N. E. Phosphorus dynamics in soils and landscapes. *Geoderma*, Amsterdam, v. 36, n. 2, p. 185-189, Nov. 1985.

Sotta, E. D., P. Meir, Y. Malhi, A. D. Nobre, M. Hodnett, and J. Grace 641(2004) Soil CO2 efflux in a tropical forest in the central Amazon, *Change Biol*., 10, 601 – 617.

Stewart, J. W. B.; Hedley, M. J.; Chauhan, B. S. The immobilization, mineralization and redistribution of phosphorus in soils. In: WESTERN CANADA PHOSPHATE SYMPOSIUM, 1980, Edmonton. Proceedings. *Edmonton: Alberta Soil Science Society*, 1980. p. 276-306.

Tiessen, H. e Moir, J.O., 1993. *Characterization of available P by sequential extracion. Soil Sampling and Methods of Analysis.* Lewis Publishers, Ann Arbor, p 75-86.

Tiessen, H., Stewart, J. W. B., and Cole, C. V.: Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 48, 853–858, 1984.

Tiessen, H.; Salcedo, I. H.; Sampaio, E. V. S. B. Nutrients and soil organic matter dynamic under shifting cultivation in semi-arid northeastern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environments*, Amsterdam, v. 38,p. 139-159, 1992.

Tiessen, H.; Stewart, J. W. B.; Cole, C. V. Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis. *Soil Science Society of American Journal, Madison*, v 48, p. 853-858, 1984.

Trolove, S N, Hedley, M J, Caradus, J R and Mackay,A D (1996) Uptake of phosphorus from different sources by Lotus pedunculatus and three genotypes of Trifolium repens 2. Forms of phosphate utilised and acidification of the rhizosphere. *Australian Journal of Soil Research* 34:1027-1040.

Turner B. L.; Cade-Menun B. J.; Condron L. M.; Newman S.: Extraction of soil organic phosphorus. *Talanta* 66 (2005) 294–306.

Vitousek, P. M. 1984. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. *Ecology* 65: 285-298.

Vitousek, P. M. and R. W. Howarth. 1991. Nitrogen limitation on land and in the sea: How can it occur? *Biogeochemistry* 13:87-115.

Vitousek, P. M. and Sanford, R. L. (1986). Nutrient cycling in moist tropical forest, Ann. Rev. Ecol. Syst., 17, 137–167.

Walker, T.W. and Syers, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, v.15, p.01-19, 1976.

Wardle, D., Walker, L., and Bardgett, R.: Ecossystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences, *Science*, 305 (5683), 509, 2004.

Went, F. W. e N. Stark. 1968. *Mycorrhize*. *BioScience 18*: 1035-1039.

Went, F. W. e N. Stark. 1968. *The biological and mechanical role of soil fungi***.** *Proc. Nat. Acad. Sci. USA 60*: 497-504.

Yang, X. and Post, W. M. 2011. Phosphorus transformations as a function of pedogenesis: a synthesis of soil phosphorus data using Hedley fractionation method. *Biogeosciences* Discuss., 8, 5907–5934.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Valores das médias gerais (mg kg -¹), erro padrão da média, coeficiente de variação (%) e significância (ns = não significativo. *significativo e ** altamente significativo) das frações obtidas por extração sequencial do solo, P lábil, concentração de P na serrapilheira, produção de serrapilheira e entrada de P nos solos das parcelas da RFAD de estudo, onde n é igual ao número tratamentos.

	P resina	Pi $NaHCO_3$	Po $NaHCO_3$	Pi NaOH	Po NaOH	P HCl	P total	P residual	P lábil	[P] serrapilheira	Prod. serrapilheira	Entrada P
Acrisol	-0.02 ± 0.45 ns (n=5)	0.27 ± 0.43 321.37 * (n=4)	2.74 ± 0.37 19.27 * (n=2)	-0.11 ± 0.43 ns (n=4)	13.29 ± 2.74 41.21 ** (n=4)	1.97 ± 0.22 25.08 ** (n=5)	105.25 ± 8.27 17.58 ns (n=5)	- (n=1)	- (n=1)	-0.02 ± 0.43 ns (n=4)	0.07 ± 0.41 ns (n=5)	0.13 ± 0.31 479.32 ** (n=4)
Podzol	-0.05 ± 0.56 ns (n=5)	3.26 ± 0.53 36.30 * (n=5)	2.20 ± 0.51 40.22 ns (n=3)	4.14 ± 0.77 41.45 * (n=5)	8.26 ± 1.20 32.37 ** (n=5)	0.04 ± 0.20 ** (n=5)	-0.04 ± 0.44 ns (n=4)	-0.17 ± 0.48 ns (n=3)	22.69 ± 1.65 12.61 ** (n=3)	-0.09 ± 0.50 ns (n=4)	17.99 ± 4.05 44.99 ns (n=4)	22.69 ± 1.65 12.61 ** (n=3)

APÊNDICE A - Valores das médias gerais (mg kg -¹), erro padrão da média, coeficiente de variação (%) e significância (ns = não significativo. *significativo e ** altamente significativo) das frações obtidas por extração sequencial do solo, P lábil, concentração de P na serrapilheira, produção de serrapilheira e entrada de P nos solos das parcelas da RFAD de estudo, onde n é igual ao número tratamentos.

(continuação)

	P resina	Pi $NaHCO_3$	Po $NaHCO_3$	Pi NaOH	Po NaOH	P HCl	P total	P residual	P lábil	[P] serrapilheira	Prod. serrapilheira	Entrada P
Ferralsol 1	12.94	4.00	5.77	0.01	0.15	-0.05	151.35	-	-	-0.002	-0.003	0.20
	± 1.42	± 0.54	± 2.09	± 0.25	± 0.65	± 0.25	± 8.88			± 0.45	± 0.36	± 0.36
	24.55	30.08	51.25		598.34		13.12					
	*	**	ns	**	ns	**	ns			ns	*	*
	(n=5)	(n=5)	(n=2)	(n=5)	(n=2)	(n=5)	(n=5)	(n=1)	(n=1)	(n=5)	(n=5)	(n=5)
Ferralsol 2	13.11	3.62	-0.22	17.41	0.05	0.03	152.04	90.50	60.54	0.25	0.04	0.05
	± 2.57	± 0.55	± 0.34	± 1.89	± 0.36	± 0.29	± 6.31	± 8.66	± 4.86	± 0.52	± 0.32	± 0.57
	43.78	33.94		24.35			9.28	19.13	16.10	349.82		
	ns	*	**	*	*	**	ns	ns	ns	ns	**	ns
	(n=5)	(n=5)	(n=4)	(n=5)	(n=5)	(n=5)	(n=5)	(n=4)	(n=4)	(n=3)	(n=5)	(n=3)

APÊNDICE A - Valores das médias gerais (mg kg -¹), erro padrão da média, coeficiente de variação (%) e significância (ns = não significativo. *significativo e ** altamente significativo) das frações obtidas por extração sequencial do solo, P lábil, concentração de P na serrapilheira, produção de serrapilheira e entrada de P nos solos das parcelas da RFAD de estudo, onde n é igual ao número tratamentos.

(continuação)

	P resina	Pi $NaHCO_3$	Po $NaHCO_3$	Pi NaOH	Po NaOH	P HCl	P total	P residual	P lábil	[P] serrapilheira	Prod. serrapilheira	Entrada P
Ferralsol 3	0.03	3.89	3.66	18.09	20.55	0.06	148.43	87.14	61.63	0.16	0.14	0.06
	± 0.40	± 0.53	± 0.85	± 1.93	± 3.67	± 0.22	± 5.89	± 3.94	± 5.14	± 0.49	± 0.35	± 0.27
			46.75	23.89	39.98	752.46	8.87	9.05	16.69	664.93	552.68	937.65
	ns	*	ns	*	**	**	ns	**	ns	ns	**	**
	(n=5)	(n=5)	(n=4)	(n=5)	(n=5)	(n=5)	(n=5)	(n=4)	(n=4)	(n=5)	(n=5)	(n=5)

APÊNDICE B - Variação temporal das formas de P no solo em cada mês por ANOVA de medidas repetidas.

	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	F
	P resina					
Acrisol	a	a	a	a	a	0.56^{ns}
Podzol	a	a	a	a	a	1.14^{ns}
Ferralsol 1	a	a	a	a	a	4.01^{ns}
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	1.73^{ns}
Ferralsol 3	a	a	a	a	a	1.44^{ns}

	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	F
	P Total					
Acrisol	a	a	a	a	a	1.10^{ns}
Podzol	a	a	a	a	a	0.91^{ns}
Ferralsol 1	a	a	a	a	a	0.63^{ns}
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	1.24^{ns}
Ferralsol 3	a	a	a	a	a	0.28^{ns}

						F
	Pi $NaHCO_3$					
Acrisol	a	ab	b	ab	ab	3.24^{*}
Podzol	a	b	b	ab	ab	4.32^{*}
Ferralsol 1	a	b	ab	b	ab	4.53^{**}
Ferralsol 2	a	b	ab	a	ab	4.32^{*}
Ferralsol 3	a	b	b	ab	ab	4.24^{*}

						F
	P residual					
Acrisol	-	a	-	a	a	0.23^{ns}
Podzol	a	a	a	a	a	2.11^{ns}
Ferralsol 1	-	-	-	-	-	-
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	1.24^{ns}
Ferralsol 3	a	ab	bc	c	c	6.85^{**}

						F
	Po $NaHCO_3$					
Acrisol	c	ab	abc	bc	a	10.75^{*}
Podzol	a	a	a	a	a	0.57^{ns}
Ferralsol 1	a	a	a	a	a	1.81^{ns}
Ferralsol 2	ab	a	b	a	ab	5.06^{**}
Ferralsol 3	a	a	a	a	a	3.01^{ns}

						F
	[P] serrapilheira					
Acrisol	a	a	a	a	a	2.03^{ns}
Podzol	a	a	a	a	a	0.57^{ns}
Ferralsol 1	a	a	a	a	a	0.41^{ns}
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	1.83^{ns}
Ferralsol 3	a	a	a	a	a	6.85^{ns}

						F
	Pi NaOH					
Acrisol	a	a	a	a	a	2.56^{ns}
Podzol	ab	ab	a	b	ab	3.51^{*}
Ferralsol 1	ab	a	ab	c	bc	10.10^{**}
Ferralsol 2	ab	a	ab	b	b	3.87^{*}
Ferralsol 3	a	a	ab	b	ab	3.84^{*}

						F
	Produção serrapilheira					
Acrisol	a	a	a	a	a	1.30^{ns}
Podzol	a	a	a	a	a	0.83^{ns}
Ferralsol 1	b	b	ab	a	ab	4.08^{*}
Ferralsol 2	c	bc	bc	ab	a	8.58^{**}
Ferralsol 3	ab	b	ab	a	a	5.02^{**}

	Po NaOH					F
Acrisol	ab	b	b	ab	a	5.95**
Podzol	b	b	b	a	a	11.51**
Ferralsol 1	a	a	a	a	a	1.73ns
Ferralsol 2	ab	b	ab	ab	a	3.11*
Ferralsol 3	b	ab	ab	a	ab	4.60**

	Entrada de P					F
Acrisol	b	ab	a	a	a	7.64**
Podzol	a	a	a	a	a	1.10 ns
Ferralsol 1	b	ab	ab	a	ab	2.80*
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	2.31ns
Ferralsol 3	b	b	ab	a	a	8.31**

	P HCl					F
Acrisol	b	b	b	b	a	10.26**
Podzol	cd	d	bc	ab	a	24.72**
Ferralsol 1	bc	c	bc	ab	a	10.94**
Ferralsol 2	c	bc	ab	ab	a	8.15**
Ferralsol 3	b	b	b	a	a	16.84**

	P Lábil					F
Acrisol	-	a	-	a	a	1.61ns
Podzol	ab	b	ab	a	a	8.08**
Ferralsol 1	-	-	-	-	-	-
Ferralsol 2	a	a	a	a	a	0.93 ns
Ferralsol 3	a	a	a	a	a	2.47 ns

ANEXO A - Ata de avaliação da aula de qualificação

ANEXO B – Atas de avaliação do trabalho escrito

ANEXO C - Ata de avaliação da defesa presencial