

IMPACTOS DO MANEJO FLORESTAL NA CICLAGEM DO NITROGÊNIO: IMPLICAÇÕES PARA A CONSERVAÇÃO DE FLORESTAS TROPICAIS

FOREST MANAGEMENT IMPACTS ON THE NITROGEN CYCLING: IMPLICATIONS FOR THE RAINFORESTS CONSERVATION

Rodrigo de Jesus Silva^{1*}, Pedro Henrique Santin Brancalion², Ricardo Ribeiro Rodrigues³

1. Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Tomé Açu, PA, Brasil.
2. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Laboratório de Silvicultura Tropical (LCF), Piracicaba, SP – Brasil.
3. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Laboratório de Silvicultura Tropical (LCF), Piracicaba, SP – Brasil.

*Autor correspondente: rodrigo.silva@ufra.edu.br

Recebido: 03/10/2017; Aceito 24/10/2017

RESUMO

A despeito da ampla generalização de recuperação do nitrogênio (N) com a maturação sucessional, as consequências das atividades madeireiras na ciclagem do N e do fósforo (P) em florestas tropicais ainda permanecem pouco estudadas. O estudo sobre a dinâmica do N pode auxiliar a entender os impactos das atividades humanas em florestas tropicais e a subsidiar políticas públicas sobre o aproveitamento econômico de modo sustentável da Reserva Legal (RL). Assim, por meio de revisão de literatura o objetivo deste trabalho é avaliar como que a variação na dinâmica do N, principalmente, é alterada pelos impactos decorrentes da exploração madeireira em áreas de manejo florestal de nativas. A tendência é de recuperação gradativa do ciclo do N em direção às áreas mais conservadas, com menor intervenção e exploração madeireira, no caso de áreas de manejo de impacto reduzido e florestas primárias. Em última instância, a discussão sobre os impactos das atividades madeireiras nas funções biogeoquímicas espera subsidiar a definição de indicadores de referência para a recuperação dos processos ecossistêmicos em florestas tropicais sob concessão para o manejo.

Palavras-chave: Biogeoquímica, funções ecossistêmicas e exploração madeireira.

ABSTRACT

The consequences of logging in the N and phosphorus (P) cycling of tropical forests remain poorly studied, despite broad generalization of nitrogen recovery (N) with forest succession. The study about N dynamics may help to understand the impacts of human activities on rainforests and support public policies regarding sustainable economic use of the Legal Reserve (RL). Through literature review the aim of this paper is to evaluate how the variation of N dynamics is changed by the impacts of logging on forest management areas. From this, the trend is for gradual recovery of the N cycle towards the more conserved areas with less intervention and logging, areas of reduced impact management and primary forests. Ultimately, the discussion about the impacts of logging on the biogeochemical function of the rainforests expects support the definition of reference patterns for the recovery of ecosystem processes in tropical forests under logging concession.

Keywords: Biogeochemical, ecosystem functions and logging.

1. INTRODUÇÃO

As atividades de extração de madeira têm aumentado significativamente nas últimas décadas. Segundo Viana et al. [1], a produção de toras maciças aumentou de 4,5 milhões de m³ em 1976 para 28 milhões em 1997. Além da extração de madeira proveniente do manejo florestal, o desflorestamento geral na Amazônia segue a um ritmo aproximado de 1,3 milhões de ha/ano, acumulando até 1997 um total de 53 milhões de hectares ou 13 % da área original da floresta [2]. Enquanto que o desflorestamento cresce anualmente 0,8 % o corte seletivo aumenta na proporção de 3,1% [3], gerando mais efeito de borda e fragmentação da floresta como um todo.

Com enfoque na Amazônia, diante do aumento exploração madeireira e da quantidade de remanescentes florestais ainda presentes na região, em torno de 72 % [4], as atividades de conservação e manejo florestal devem primar por ações e estratégias que possibilitem uso sustentável dos recursos naturais em áreas de Reserva Legal [5]. De acordo com o Código Florestal Brasileiro, Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012, 80 % de um imóvel rural situado em área de floresta na Amazônia Legal devem ser destinados à RL, com fins de conservação, reabilitação dos processos ecológicos e uso econômico sustentável dos recursos naturais por meio de atividades de baixo impacto ambiental. Dentre tais, o manejo florestal sustentável se destaca ao longo do Novo Código como uma das

principais alternativas de uso econômico da RL.

No contexto da Amazônia brasileira, mesmo com o maior planejamento e regulamentação das técnicas de corte seletivo do manejo florestal sustentável em relação ao sistema convencional [6], a exploração madeireira de impacto reduzido (EIR) tem gerado aumento do efeito de borda e fragmentação da floresta amazônica [7,3]. Além disso, as alterações provocadas pelas atividades de manejo na composição e estrutura da floresta podem gerar mudanças significativas e de longa duração na fenologia florestal, retardando o desenvolvimento da estrutura de copa durante os períodos de seca, o que progressivamente resseca o dossel da floresta, gerando tanto déficits de umidade quanto de produção de folhas verdes [8].

Em larga escala, as alterações fenológicas podem ocasionar impactos a outros processos ecossistêmicos, como nas funções hidrológicas e na dinâmica de nutrientes da floresta [8]. Assim, embora a produção madeireira seja projetada para ser rentável e sustentável em áreas de EIR, com a repetição dos ciclos de corte a composição da floresta nativa tende a mudar de espécies primárias perenes para pioneiras de tempo de vida curto [6], o que pode acarretar impactos de ordem econômica e ambiental de dilapidação dos atributos ecológicos de estrutura, composição e funções ecossistêmicas da floresta.

De tal forma, por meio de revisão de literatura o presente ensaio pretende discutir os impactos das diferentes modalidades de manejo florestal na ciclagem de nutrientes, com enfoque principalmente na dinâmica do nitrogênio em áreas de exploração madeireira na Amazônia. Além disso, a intenção secundária é: 1) ampliar o conhecimento sobre os impactos ecológicos dos diferentes modelos de exploração madeireira de florestas tropicais nativas e 2) estabelecer indicadores de referência dos processos biogeoquímicos relacionados à ciclagem do N para avaliação dos impactos das diferentes modalidades de manejo florestal, a fim de orientar atividades silviculturais de avaliação e monitoramento florestal.

2. MANEJO FLORESTAL E A REABILITAÇÃO DOS PROCESSOS ECOLÓGICOS

Apesar do potencial econômico de manutenção da produtividade madeireira em áreas de EIR, existem poucos estudos sobre processos biogeoquímicos e dinâmica de nutrientes em áreas de manejo florestal. Em relação ao manejo florestal, poucos estudos contemplam os impactos da atividade a longo prazo e se os ciclos normais de corte, da exploração madeireira (30-35 anos), são suficientes para a recuperação das condições naturais e funções ecossistêmicas [9,10]. Dentre os poucos, Macpherson et al. [11]

ressaltam que de acordo com as práticas usuais de manejo convencional da floresta – corte e deixe – empregadas no Brasil seriam necessários mais de 120 anos para a recuperação das condições volumétricas iniciais e aproximadamente 40 anos naquelas com EIR.

Assim, a avaliação dos impactos da exploração madeireira por meio da implementação de indicadores biogeoquímicos de referência, pode contribuir com o entendimento sobre dinâmica de reabilitação ecológica e sustentabilidade das práticas silviculturais empregadas no manejo florestal de nativas na Amazônia. Somado à demanda do novo Código Florestal de exploração econômica sustentável das áreas de Reserva Legal (RL), uma abordagem que permita avaliar os impactos biogeoquímicos da exploração madeireira na Amazônia além de ter implicações para a restauração de ecossistemas tropicais pode auxiliar a examinar os preceitos científicos da Lei Nº 12.651.

Uma vez que a restauração dos serviços ecossistêmicos vem emergindo como um dos principais objetivos da área [12], a avaliação da dinâmica do N se configura como uma alternativa estratégica para a avaliação das práticas silviculturais do manejo florestal como modalidade sustentável de aproveitamento econômico das áreas de RL. Apesar do menor impacto ambiental do manejo sustentável em relação ao convencional, pouco se sabe ainda dos efeitos

em longo prazo nas funções ecossistêmicas, na ciclagem de nutrientes, dentre outros. Diante disso, em que medida as propostas de uso sustentável realmente tem possibilitado a reabilitação dos processos ecológicos como preceitua o novo Código Florestal?

Considerando que as perdas de N durante as mudanças de uso da terra podem alterar o balanço estequiométrico (N/P) da ciclagem de nutrientes [13,14], estudos sobre a dinâmica do N em áreas de manejo florestal como aproveitamento econômico da RL pode auxiliar no entendimento dos impactos de atividades antrópicas em ecossistemas tropicais e, consecutivamente, na proposição de medidas mitigadoras. Relacionado às condições ecossistêmicas de fertilidade e regeneração florestal, a perspectiva é que o N pode ser um bom indicador de sustentabilidade ecológica das formas de uso da terra na Amazônia, haja vista a tendência de recuperação da abundância natural de N com o abandono das atividades humanas.

Em um estudo com diferentes cronosequências na Amazônia, Davidson et al.,[13] observaram que a dinâmica do N estabilizava somente 70 anos após o abandono das atividades agrícolas. No entanto, qual seria o tempo necessário para a recuperação do N em áreas de manejo florestal? Quais seriam os indicadores e valores de referência para estas atividades em florestas tropicais? Estudos futuros em uma linha mais experimental serão necessários para atender a estas demandas; porém, a partir da presente discussão já é

possível inferir que o período de corte entre 30 e 35 anos, normalmente empregado, não é suficiente para o restabelecimento das condições ecossistêmicas.

3. DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM FLORESTAS TROPICAIS

Estudos sobre mudanças no uso da terra e dinâmica de nutrientes em áreas manejadas da Amazônia reforçam a importância de se entender os impactos ecológicos da conversão florestal como um todo [15,16]. Dada à complexidade natural de funcionalidade dos processos ecossistêmicos - ciclagem de nutrientes, interação biológica, etc. - normalmente dependentes de outros atributos ambientais, a sua reabilitação adquire um papel chave para a restauração de áreas degradadas e avaliação de impactos de atividades antrópicas [17]. A ciclagem de nutrientes, por exemplo, que controla o fluxo de materiais de um ambiente, ou seja, a disponibilização de componentes orgânicos e inorgânicos necessários para o crescimento de biomassa e microrganismos [18], é um fator de grande importância para o entendimento da resiliência de um ecossistema [19].

De forma geral, os ecossistemas terrestres inicialmente costumam ser pobres em N e ricos em fósforo, pois enquanto que o P é derivado principalmente da intemperização de rochas ígneas e metamórficas o N provém da fixação biológica e em menor proporção da

deposição atmosférica [20]. Em relação à abundância natural do N, com o abandono das atividades humanas e o desenvolvimento sucessional da floresta os níveis de nitrato orgânico do solo tendem a aumentar [21, 13].

Embora o N e o P sejam os principais elementos limitantes do crescimento vegetal e da produtividade primária [20], a vegetação pioneira de florestas tropicais normalmente é mais conservativa e eficiente no uso do N do que do P [13], sendo o retorno do N ao solo mais demorado nos estágios iniciais de sucessão do que nos finais [22]. Várias são as razões para isso, uma delas tem ligação com o metabolismo vegetal mais acelerado em florestas secundárias, o que faz com que nutrientes menos dispendiosos em termos de assimilação fisiológica sejam mais bem absorvidos e assim menos limitantes, o que é o caso do P [22]. Portanto, de acordo com o estágio de desenvolvimento sucessional dos ecossistemas florestais, inicialmente o N é o principal limitador do crescimento vegetal [23; 18].

Nesta linha, vários trabalhos mostram que a produtividade vegetal, a capacidade fotossintética, é fortemente correlacionada à razão N: P nas folhas [24, 25, 14]. Uma vez que as enzimas fotossintéticas são responsáveis por uma grande proporção de N nas folhas, variações ambientais ou ecológicas podem influenciar na concentração de N foliar e, consecutivamente, na própria capacidade fotossintética [26]. Resultado do ganho de energia por fotossíntese e perda por respiração

e mortalidade, a produção de biomassa vegetal é uma propriedade chave de ecossistemas naturais e diretamente ligada à dinâmica do N [26, 27].

Em áreas degradadas abandonadas a sucessão secundária frequentemente inicia com baixa disponibilidade de N nos extratos naturais, acumulando-se gradativamente durante o processo de regeneração natural através do acúmulo e reciclagem de biomassa senescente das partes aéreas da floresta [23, 18, 28]. Portanto, embora seja necessário bastante tempo para a recuperação do ciclo do N alguns trabalhos apontam que com o abandono das atividades humanas e do desmatamento os índices podem retornar próximo ao normal [29, 23, 13].

No entanto, pouco se sabe ainda a respeito da dinâmica de nutrientes em áreas de manejo florestal, sendo que as consequências do desmatamento e das mudanças de uso da terra na ciclagem de florestas tropicais também não está muito clara [13]. Apesar do padrão estequiométrico de riqueza de N e pobreza de P nos estágios sucessionais mais avançados, a robustez desta generalização para florestas primárias pode acabar mascarando a heterogeneidade de fatores que exercem influência na fertilidade e desenvolvimento de ecossistemas tropicais [14, 30, 31].

Embora o reconhecido padrão de abundância do N em florestas de terra-firme na Amazônia brasileira [32], os processos biogeoquímicos podem variar de acordo com a escala de avaliação. Assim, enquanto que na

escala regional a precipitação é um dos principais fatores de influência na disponibilidade de N, em escalas locais ou da paisagem, sob o mesmo regime de chuva, o tipo de solo parece ser um dos determinantes principais do ciclo do N em áreas de floresta nativa na Amazônia [33].

Considerando que o entendimento sobre o papel conjunto do N e do P na regulação dos processos ecossistêmicos está longe de completo [31], a relação subjacente destes nutrientes com outros atributos ecológicos pode auxiliar na implementação de indicadores de sustentabilidade das práticas de manejo e recomposição florestal e no entendimento da ciclagem de nutrientes durante maturação de florestas tropicais. Uma vez que as mudanças de uso da terra podem reduzir os estoques de N e P para as plantas [16], a tendência é que o estoque e disponibilidade de nutrientes, N principalmente, seja menor em áreas de manejo florestal mais intensivo, parcelas com superexploração madeireira e manejo convencional, do que em áreas de manejo sustentável de impacto reduzido e florestas primárias de referência.

4. INDICADORES DE REFERÊNCIA PARA RECUPERAÇÃO DO NITROGÊNIO

Estudos sobre biogeoquímica e funcionamento de ecossistemas florestais

ainda são escassos [13], o que pode inviabilizar tanto o monitoramento das atividades de recomposição florestal através de indicadores de referência [34], quanto à implementação dos métodos mais apropriados de acordo com a realidade de degradação local [19].

Perante a escassez de pesquisas sobre os processos biogeoquímicos em florestas tropicais [13], da heterogeneidade de fatores de influência na dinâmica de nutrientes destes ecossistemas [14, 30, 31], o desafio científico será entender as consequências da exploração madeireira nas funções ecossistêmicas de ciclagem do N e a sua relação com os atributos de diversidade e estrutura florestal na Amazônia. A partir disso, deverão ser utilizados parâmetros biogeoquímicos e vegetacionais para avaliar a recuperação dos atributos funcionais - biogeoquímicos relacionados ao balanço do N com o P - de composição e estrutura florestal, respectivamente. Por serem considerados atributos ecossistêmicos vitais [19], o levantamento destes permitirá uma avaliação acurada das condições ecológicas em áreas de manejo florestal na Amazônia.

Em resumo, para inferência dos parâmetros biogeoquímicos de avaliação da ciclagem do N trabalhos futuros deverão se concentrar na análise dos extratos de folhas verdes, do estoque de serapilheira e dos perfis de solo coletados. Em detalhes, os indicadores ou parâmetros biogeoquímicos avaliados deverão ser: 1) o $\delta^{15}\text{N}$ foliar, que representa o fracionamento ou perda de N ao longo do

tempo [35], varia entre $-0,5\%$ em áreas degradadas ou estágio inicial de sucessão e $3,7\%$ em florestas maduras, 2) a concentração de N foliar, normalmente variável entre 13 e 26 (g kg^{-1}) com o desenvolvimento sucessional, 3) a razão estequiométrica N:P da serapilheira, normalmente ≥ 20 e ≤ 70 de acordo com a maturação florestal, 4) a razão entre a massa de serapilheira e a concentração do N, a qual normalmente decresce com a idade ou estado de preservação da floresta, 5) a concentração de nitrato (NO_3^-) do solo, a qual aumenta com a maturação da floresta até 20 (mg N kg^{-1}) e 6) a concentração de amônio (NH_4^+), o qual tende a diminuir na proporção inversa ao do nitrato (NO_3^-) com a idade e maturação da floresta.

Com base nestes indicadores de referência, cabe salientar que diferenças na proporção de isótopos de nitrogênio ($^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$) ocorrem naturalmente, sendo que ao variar de uma forma previsível ao ser incorporado por plantas, o sinal isotópico integrado nos tecidos vegetais, no caso, permite inferir, dentre outras coisas, os efeitos do uso da terra na estrutura dos ecossistemas naturais [13]. Neste sentido, principalmente por meio dos isótopos de N é possível entender a dinâmica de regeneração da vegetação e desenvolvimento de ecossistemas florestais [34].

Os valores isotópicos do nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) refletem, portanto, a ciclagem do nitrogênio, o que por sua vez remete à fertilidade e regeneração florestal, sendo que

quanto mais antigas e preservadas maiores são os valores de $\delta^{15}\text{N}$ dos compartimentos naturais [34]. Considerando o caráter oligotrófico dos solos da Amazônia em que a maior parte da fertilidade concentra-se na biomassa vegetal e serapilheira, a avaliação da dinâmica do N a partir de amostras de folhas tem grande potencial como indicador de impactos e mudanças em ecossistemas florestais [36]. De tal forma, o $\delta^{15}\text{N}$ tem sido utilizado em alguns casos para inferir a abundância natural de nitrogênio no solo [37] e investigação do padrão global de ciclagem de N [35, 39].

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da pressuposição de impactos biogeoquímicos da exploração madeireira em florestas tropicais, a tendência é que haja um aumento gradativo dos valores de N das áreas: 1) com superexploração madeireira, 2) manejo convencional sem planejamento, 3) manejo florestal sustentável ou de impacto reduzido 4) em direção àquelas com florestas primárias sem exploração alguma. Assim sendo, por meio do presente ensaio infere-se que a disponibilidade de N varia de acordo com a forma de exploração madeireira - manejo predatório, convencional e de impacto reduzido – em ecossistemas florestais tropicais.

Enfim, a discussão sobre os impactos biogeoquímicos das atividades de manejo

florestal pretende contribuir para a definição de indicadores de referência para avaliação das condições ecossistêmicas em florestas alteradas pelo uso. Vale destacar que por se tratar de um trabalho de revisão de literatura, o qual tem por finalidade contribuir com a discussão sobre os impactos da produção econômica e manejo florestal aos processos ecossistêmicos e fertilidade de florestas tropicais, trabalhos futuros deverão focar na ampliação do conhecimento científico sobre a relação entre estrutura/composição florestal e balanço biogeoquímico de nutrientes. Noutras palavras, no entendimento sobre a influência específica dos tipos de espécies arbóreas e tipologia florestal na ciclagem de nutrientes e fertilidade vegetal.

Adicionalmente, os trabalhos deverão avaliar a influência da heterogeneidade de fatores, tipo de manejo e sazonalidade, na relação estequiométrica entre o N e o P das áreas estudadas, a fim de testar a variabilidade do padrão “N rich e P poor” de florestas tropicais nativas de acordo com a modalidade de manejo florestal empregada. Nesta linha, outro campo de estudo que se abre é para a avaliação da relação entre os grupos ecológicos (espécies pioneiras, secundárias e tardias) e espécies leguminosas (com potencial de fixação de N) com a abundância natural do N; como forma de subsidiar protocolos de manejo que potencializem a dinâmica de nutrientes de acordo com os recursos florestais locais.

Em resumo, o entendimento da relação das funções ecossistêmicas com outros atributos ecológicos, composição e estrutura florestal, será de grande valia para uma avaliação holística e integrada da sustentabilidade das práticas de manejo e uso econômico da RL e, inclusive, para se testar os preceitos científicos do Novo Código Florestal.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) que por meio do processo FAPESP 2011/08686-3 (bolsa de doutorado) possibilitou o desenvolvimento deste trabalho e ao prof. Dr. Luiz Antônio Martinelli pelas orientações durante o período de doutorado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] VIANA, V.; MAY, P.; LAGO, L.; DUBOIS, O.; GRIEG-GRAN, M. Instruments for sustainable private sector forestry in Brazil: an analysis of needs, challenges and opportunities for natural forest management and small-scale plantation forestry. **International Institute for Environment and Development**, p. 1-95. 2002
- [2] LELE, U.; VIANA, V.; VERISSIMO, A.; VOSTI, S.; PERKINS, K.; HUSAIN, S. A. **Brazil, Forests in the Balance: challenges of conservation with development**. Washington, D.C.: World Bank Operations Evaluation Department, p. 195, 2000.
- [3] BROADBENT, E. N.; ASNER, G. P.; KELLER, M.; KNAPP, D. E.; OLIVEIRA, P. J. C.; SILVA, J. N. Forest fragmentation and edge effects from deforestation and selective

- logging in the Brazilian Amazon. **Biological Conservation**, v. 141, p. 1745-1757, 2008.
- [4] INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). **Projeto Prodes: Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite. 2013.** Disponível em: <<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.php>> Acesso em: 13 de março de 2014.
- [5] BRANCALION, P.H.S.; VIANI, R.A.G.; RODRIGUES, R.R.; CESAR, R.G. Estratégias para auxiliar na conservação de florestas tropicais secundárias inseridas em paisagens alteradas. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, v. 7, p. 219-234, 2012.
- [6] MACPHERSON, A. J.; CARTER, D. R.; SCHULZE, M. D.; VIDAL, E.; LENTINI, M. W. The sustainability of timber production from Eastern Amazonian forests. **Land Use Policy**, v. 29, p. 339-350, 2012.
- [7] ASNER, G.P., KNAPP, D.E.; BROADBENT, E.N.; OLIVEIRA, P.J.C.; KELLER, M.; SILVA, J. N. Selective logging in the Brazilian Amazon. **Science**, v. 310, n. 5747, p. 480-482, 2005.
- [8] KOLTUNOV, A.; USTIN, S. L.; ASNER, G. P.; FUNG, I. Selective logging changes forest phenology in the Brazilian Amazon: Evidence from MODIS image time series analysis. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 2431-2440, 2009.
- [9] GARRIDO-FILHA, I. Manejo Florestal: questões econômico-financeiras e ambientais. **Estudos Avançados (USP)**, v. 16, n. 45, p. 92-106, 2002.
- [10] GÓMEZ, J. W. L. Regeneración natural de nueve especies maderables en un bosque intervenido de la Amazonia Boliviana. **Acta Amazonica**. v. 41, n. 1, 135-142, 2011.
- [11] MACPHERSON, A. J.; SCHULZE, M. D.; CARTER, D. R.; VIDAL, E. A Model for comparing reduced impact logging with conventional logging for an Eastern Amazonian Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 2002-2011, 2010.
- [12] SUDING, K. N. Toward an Era of Restoration in Ecology: Successes, Failures, and Opportunities Ahead. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 42, p. 465-487, 2011.
- [13] DAVIDSON, E.A., CARVALHO, C.J., FIGUEIRA, A.M., ISHIDA, F.Y., OMETTO, J.P., NARDOTO, G.B., SABÁ, R.T., HAYASHI, S.N., LEAL, E.C., VIEIRA, I.C., MARTINELLI, L.A. Recuperation of nitrogen cycling in Amazonian forests following agricultural abandonment. **Nature**, v. 447, p. 995-998, 2007.
- [14] TOWNSEND, A. R., CLEVELAND, C. C., ASNER, G. P.; BUSTAMANTE, M. M. C. 2007. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests. **Ecology**, v. 88, p. 107-118, 2007.
- [15] UHL, C.; JORDAN, C. F. Succession and Nutrient Dynamics Following Forest Cutting and Burning in Amazonia. **Ecology**, v. 65, p.1476-1490, 1984.
- [16] MCGRATH, D. A.; SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. A. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazônia. **Ecosystems**, v. 4, p. 625-645, 2001.
- [17] RHOADES, C.C.; ECKERT, G.E.; COLEMAN, D. C. Effect of Pasture Trees on Soil Nitrogen and Organic Matter: Implications for Tropical Montane Forest Restoration. **Restoration Ecology**. v. 6, n. 3, p. 262-270, 1998.
- [18] DAVIDSON, E.A., CARVALHO, J.R., VIEIRA, I.C.G., FIGUEIREDO, P.M., ISHIDA, F.Y., SANTOS, M.T.P., GUERRERO, J.B., KALIF, K., SABÁ, R.T. Nitrogen and phosphorus limitation of biomass growth in a tropical secondary forest. **Ecological Applications**, v. 14, p. 154-163, 2004.
- [19] RUIZ-JAEN, M. C.; AIDE, T. M. Restoration success: How is it being measured? **Restoration Ecology**, v.13, p. 569-577, 2005.
- [20] VITOUSEK, P. M.; PORDER, S.; HOULTON, B. Z.; CHADWICK, O. A. Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. **Ecological Applications**, v. 20, p. 5-15, 2010.
- [21] MARTINELLI, L.A.; PICCOLO, M.C.; TOWNSEND, A.R.; VITOUSEK, P.M.;

- CUEVAS, E.; MCDOWELL, W.; ROBERTSON, G.P.; SANTOS, O.C.; TRESEDER, K. Nitrogen stable isotopic composition of leaves and soil: tropical versus temperate forests. **Biogeochemistry**, v. 46, n. 1–3, p. 45–65, 1999.
- [22] BROWN, S.; LUGO, A. E. Tropical secondary forests. *Journal of Tropical Ecology*, v. 6, n. 1–32, 1990.
- [23] VITOUSEK, P.M.; MATSON, P.A.; CLEVE, K.V. Nitrogen availability and nitrification during succession: Primary, secondary, and old-field series. **Plant and Soil**, v. 115, p. 229–239, 1989.
- [24] REICH, P. B.; WALTERS, M. B.; ELLSWORTH, D.S. From tropics to tundra: Global convergence in plant functioning. **Proceedings of the National Academy of Sciences USA**, v. 94, p. 13730–13734, 1997.
- [25] REICH, P. B.; ELLSWORTH, D.S.; WALTERS, M. B. Leaf structure (specific leaf area) modulates photosynthesis–nitrogen relations: Evidence from within and across species and functional groups. **Funct. Ecol.** v. 12, p. 948–958, 1998.
- [26] CHAPIN III, F. S.; MATSON, P. A.; HAROLD, A. **Mooney Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology**. Springer-Verlag New York, Inc, 2002. 392p.
- [27] KEELING, H.C., PHILLIPS, O.L. The global relationship between forest productivity and biomass. **Global Ecology and Biogeography**, v. 16, p. 618–631, 2007
- [28] LEDUC, S.D., ROTHSTEIN, D.E. Plant-available organic and mineral nitrogen shift in dominance with forest stand age. **Ecology**, v. 91, p. 708–720, 2010.
- [29] VITOUSEK, P. M. Litterfall, nutrient cycling, and nutrient limitation in tropical forests. **Ecology**, v. 65, p. 285–98, 1984.
- [30] TOWNSEND, A. R., ASNER, G. P.; CLEVELAND, C. C. The biogeochemical heterogeneity of tropical forests. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 23, p. 424–431, 2008.
- [31] CLEVELAND, C. C.; TOWNSEND, A. R.; TAYLOR, P.; ALVAREZ-CLARE, S.; BUSTAMANTE, M. M. C.; CHUYONG, G.; et al. Relationships among net primary productivity, nutrients and climate in tropical rain forest: a pan-tropical analysis. **Ecology Letters**, v. 14, p. 939–947, 2011.
- [32] OMETTO, J.P.H.B; EHLERINGER, J.R.; DOMINGUES, T.F.; BERRY, J.A.; ISHIDA, F.Y.; MAZZI, E.; et al. The stable carbon and nitrogen isotopic composition of vegetation in tropical forests of the Amazon region, Brazil. **Biogeochemistry**, v. 79, p. 251–274, 2006.
- [33] NARDOTO, G. B.; OMETTO, J. P.H.B.; EHLERINGER, J. R.; HIGUCHI, N.; BUSTAMANTE, M. M. C.; MARTINELLI, L. A. Understanding the Influences of Spatial Patterns on N Availability Within the Brazilian Amazon Forest. **Ecosystems**, v. 11, p. 1234–1246, 2008.
- [34] AMAZONAS, N. T.; MARTINELLI, L. A.; PICCOLO, M. C.; RODRIGUES, R. R. Nitrogen dynamics during ecosystem development in tropical forest restoration. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1551–1557, 2011.
- [35] AMUNDSON, R.; AUSTIN, A.T.; SCHUUR, E. A. G.; YOO, K.; MATZEK, V.; KENDALL, C.; UEBERSAX, A.; BRENNER, D.; BAISDEN, W. T. Global patterns of the isotopic composition of soil and plant nitrogen. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 17, n. 1, p. 1031, 2003.
- [36] MCLAUCHLAN, K. K.; CRAINE, J. M.; OSWALD, W.W.; LIKENS, G. E. Changes in nitrogen cycling during the past century in a northern hardwood forest. **Proceedings of the National Academy of Sciences, USA**, v. 104, p. 7466–7470, 2007. [
- [37] ROBINSON, D. Delta15N as an integrator of the nitrogen cycle. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 16, p. 153–162, 2001.
- [38] CRAINE, J.M.; ELMORE, A.J.; AIDAR, M.P.M.; BUSTAMANTE, M.; DAWSON, T.E.; HOBBI, E.A. Global patterns of foliar nitrogen isotopes and their relationships with climate, mycorrhizal fungi, foliar nutrient concentrations, and nitrogen availability. **New Phytologist**, v. 183, p. 980–992, 2009.