

DINÂMICA BIOGEOQUÍMICA E ESTOQUE DE CARBONO ORGÂNICO EM SOLOS DA MATA ATLÂNTICA SERRANA NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Paulo Angelo Fachin¹
Ana Luiza Coelho Netto²

INTRODUÇÃO

O ciclo biogeoquímico do carbono no solo é crucial devido ao papel dos solos como sumidouros de carbono e seu impacto no aquecimento global e mudanças climáticas (HARTEMINK et al, 2014; CROWTHER et al., 2016). Florestas e solos são importantes sumidouros de carbono, mas sua capacidade de armazenamento varia com o manejo. A conversão de florestas tropicais serranas tem levado à degradação e ao esgotamento de carbono e nutrientes do solo (ROBERT, 2006; BORRELLI et al., 2017). Regiões tropicais, como a Ásia (ISLAM; SATO, 2012), África (HANDAVU et al., 2017) e América do Sul (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2010), seguem enfrentando acelerada conversão florestal para implantação de pastagens e monoculturas.

A conversão de florestas tropicais reduz o estoque de carbono orgânico no solo em média 34,7% em até 10 anos, 45,3% em 10-50 anos e 52,3% em mais de 50 anos (WEI et al., 2014). Estima-se que 30% dos solos tropicais estejam com déficit de carbono orgânico, porém, há potencial de recuperação com reflorestamento adequado (PAN et al., 2011). A Mata Atlântica, rica em biodiversidade, é um dos biomas mais ameaçados do Brasil, com apenas 12% de sua cobertura original restante e com aumento de sua degradação 66% (MAPBIOMAS, 2022).

A região serrana da Mata Atlântica no estado do Rio de Janeiro enfrenta um ciclo de degradação e recuperação, onde diferentes usos impactam a estabilidade do carbono, nutrientes e erosão do solo. O efeito dos diferentes usos pode variar, aumentando a suscetibilidade ao empobrecimento biogeoquímico, e mudando a dinâmica do carbono no solo (MCGUIRE; YOUNBERG, 2019).

Esta pesquisa em andamento está avaliando o ciclo biogeoquímico e o armazenamento de carbono no solo da Mata Atlântica, com foco nas áreas serranas e seus impactos devido a mudanças no uso do solo e restauração florestal. A pesquisa é necessária devido à falta de estudos sobre a dinâmica de carbono e nutrientes em solos

¹Professor do Departamento de Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Cabo Frio. paulo.fachin@uerj.br

²Professora do Departamento de Geografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. ananetto@acd.ufrj.br

serranos com diferentes tipos de uso. O estudo analisa florestas nativas, florestas secundárias, eucaliptos e pastagens, quantificando a depleção e o sequestro de carbono e nutrientes, por meio de medições de biomassa, análises de solo e serapilheira, e modelagem dos dados.

Além de contribuir para o entendimento do ciclo de carbono e nutrientes no solo da Mata Atlântica serrana, esta pesquisa gerará suporte para estratégias de manejo e restauração florestal, com o potencial de gerar conhecimentos valiosos para a conservação do bioma, para a mitigação das mudanças climáticas, para o desenvolvimento de políticas públicas e o avanço da ciência ecológica, alinhando-se com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e a Década da Restauração de Ecossistemas. A seguir apresentamos parte deste projeto em andamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa está sendo conduzida na região serrana (Serra do Mar) do estado do Rio de Janeiro, na bacia do Córrego D'Antas em Nova Friburgo, RJ, que é uma região com alta precipitação, média anual de aproximadamente 2.500 mm, e um histórico significativo de degradação de terras, especialmente nas áreas ocupadas por pastagens e eucalipto (Coelho Netto et al., 2013). Com altimetria próximo a 1000 metros, topografia de declives acentuados e solos pouco espessos (cambiosolos) e altamente lixiviados (latossolos vermelho-amarelos álicos) (DANTAS et al., 2005). a área em estudo é ideal para os objetivos da pesquisa devido às suas condições biofísicas, meteorológicas e geográficas.

Delineamento Experimental

A coleta de amostras de solo foi realizada em quatro uso do solo no mesmo conjunto geomorfopedológico: floresta nativa, floresta secundária, eucalipto, pastagem. As áreas estão em terrenos declivoso ($\sim 20^\circ$). O solo é classificado como Cambissolo franco-argilo-arenoso (argila 31%; areia 55%; silte 13%). Em cada área, foram amostrados aleatoriamente 10 pontos nas seguintes profundidades: 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm. As amostras coletas foram analisadas quanto ao carbono orgânico e nutrientes. A matéria orgânica do solo foi determinada pelo método Walkley & Black (1934) e a conversão para carbono orgânico, utilizo-se um fator de conversão específico (Van Bemmelen, 1890).

Além disso, os nutrientes do solo, como pH, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e alumínio, são analisados por métodos químicos estabelecidos. O pH é medido em CaCl₂, o fósforo disponível é extraído com uma solução ácida, e o potássio é analisado por fotometria de chama. O cálcio, magnésio e alumínio são extraídos com KCl, e a capacidade de troca de cátions é determinada com KCl-N. Os métodos seguem padrões brasileiros semelhantes aos internacionais (EMBRAPA, 1997). A textura do solo foi analisada após dispersão química e peneiramento (Day, 1965). Para cada área foram coletadas amostras do horizonte A e B para determinar a textura.

Análises Estatísticas

Os dados foram analisados usando os softwares Excel e Bioestat. A análise estatística descritiva (média, porcentagem, variância, desvio padrão) foi aplicada, além de teste ANOVA para comparar os valores entre as áreas. Foi realizada análise de correlação e análise multivariada conforme necessário. O teste não paramétrico Mann-Whitney U foi utilizado para comparar perfis e camadas de solo entre os locais com significância em $p < 0,05$ ou $p < 0,10$. Análise de correlação simples foi empregada para testar a relação entre as variáveis e o estoque de carbono e nutrientes do solo. Por fim, análise de cluster multivariada (método Ward) foi usada para calcular a distância entre geral entre as áreas no conjunto total de dados (MCGARIGAL et al., 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A floresta secundária apresentou valores superiores às demais áreas em 45% das propriedades químicas avaliadas (carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, alumínio e CTC), indicando uma ativação do ciclo biogeoquímico maior que as demais áreas (figura 1). A pastagem apresentou os menores valores para 45% das propriedades (carbono orgânico, nitrogênio, alumínio e CTC). Floresta nativa e eucalipto ficaram com compartimentos intermediários entre áreas. Em relação às profundidades os maiores valores ficaram restritos aos 10 cm iniciais dos solos, com acentuação forte entre 10 e 20 cm e posterior acentuação moderada entre 20 e 40 cm.

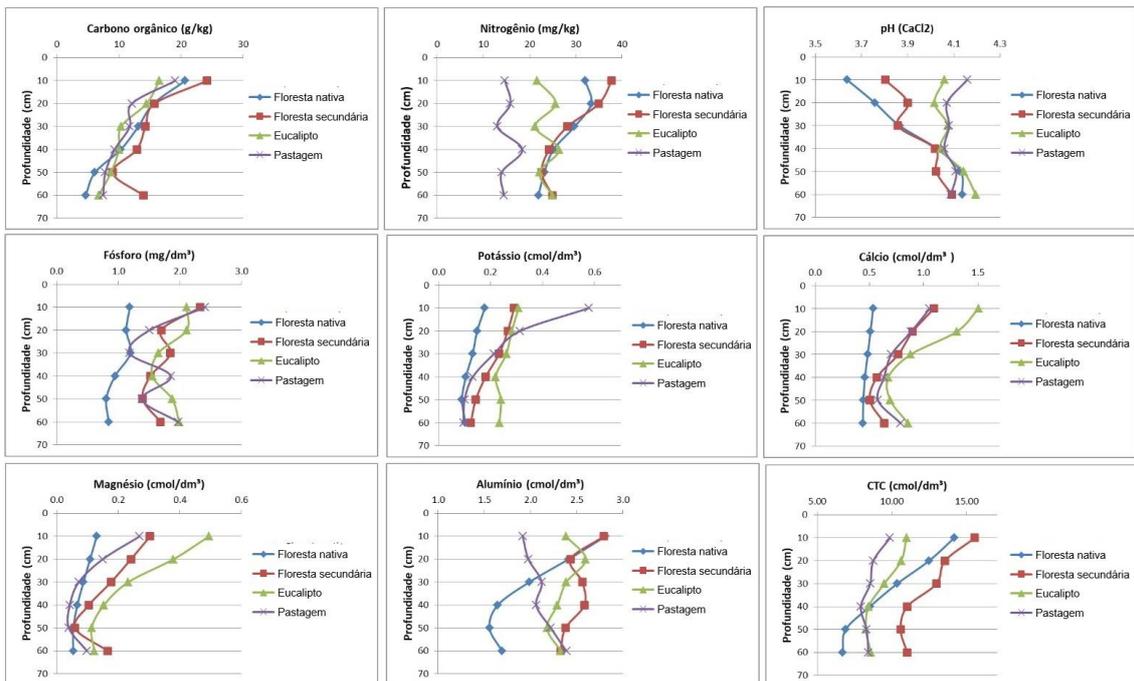


Figura 1 – Propriedades químicas do solo em profundidade de acordo com o tipo de uso.

Em florestas secundárias em regeneração, a rotatividade de raízes finas é maior do que em florestas primárias. Essas raízes são fundamentais na dinâmica dos nutrientes do solo e na biogeoquímica florestal, afetando o ciclo de nutrientes, a fertilidade e a estrutura do solo (ARYAL et al., 2024; LEI et al., 2022). Nas florestas secundárias, a dinâmica das raízes contribui para o sequestro de carbono orgânico do solo ao liberar exsudatos, como açúcares e ácidos orgânicos, e pela maior decomposição de raízes mortas substituídas durante a sucessão ecológica. (LI et al., 2024). Além disso, o alto rendimento de raízes novas reduz a competição pelo nitrogênio do solo, além das plantas em desenvolvimento formarem simbioses com bactérias fixadoras de nitrogênio, contribuindo para aumento de nitrogênio no solo (JAMONT et al., 2013).

Florestas tropicais geram muita matéria orgânica que libera ácidos orgânicos, como húmicos e fúlvicos, acidificando o solo. Além disso, os solos tropicais serranos, geralmente lateríticos, têm baixa capacidade de troca catiônica e de tamponamento (LOHBECK et al., 2012). Esses solos são menos eficazes em neutralizar a acidez e a acidificação desses solos aumenta a disponibilidade de nutrientes como ferro e fósforo, mas também pode liberar íons tóxicos como o alumínio (SATDICHANH et al., 2023).

A absorção de potássio, cálcio e magnésio pelas raízes altera a troca de cátions e o equilíbrio iônico do solo, afetando sua fertilidade. As raízes também ajudam a

mobilizar o alumínio, potencialmente tóxico, ao acidificar o solo e liberar substâncias que ajustam o pH e reduzem a toxicidade. Essas interações são cruciais para a fertilidade do solo e a sustentabilidade dos ecossistemas florestais, mantendo o equilíbrio dos ciclos biogeoquímicos (BAUTISTA-CRUZ; DEL CASTILLO, 2005).

Aqui, a matriz de correlação (figura 2) mostra uma correlação negativa forte entre pH e nitrogênio. O pH baixo (ácido) reduz a atividade microbiana reduzindo a nitrificação e transformação do nitrogênio (MENZIES; GILLMAN, 2003), no entanto, aqui a relação indica o oposto. Provavelmente isto esteja condicionado ao bom equilíbrio entre fósforo e potássio, os quais tiveram forte correlação positiva, garantindo o bom desenvolvimento das plantas e fixação de carbono orgânico no solo, principalmente na floresta secundária.

A forte correlação positiva do potássio com o cálcio (figura 2) indica equilíbrio entre estes nutrientes. O cálcio pode reduzir a disponibilidade de fósforo no solo ao formar fosfatos de cálcio menos solúveis, especialmente em solos alcalinos (BERWANGER et al., 2008). Já o potássio e o cálcio têm uma interação menos direta, mas altos níveis de potássio podem prejudicar a absorção de cálcio e magnésio se a relação entre esses nutrientes estiver desbalanceada (JUO; MANU, 1996).

Aqui, o pH ácido no solo reduziu o carbono orgânico e mostrou uma correlação negativa com o nitrogênio. O pH do solo é importante para a disponibilidade de nutrientes como fósforo, cálcio e magnésio, que são mais acessíveis em pH neutro a ligeiramente ácido. Em pH muito baixo (ácido) ou muito alto (alcalino), a disponibilidade desses nutrientes diminui. (GAMA; KIEHL, 1999). Solos ácidos podem levar à perda de nitrogênio por volatilização de amônia e lixiviação de nitratos, e reduzir a atividade de nitrificação, diminuindo a disponibilidade de nitrogênio para as plantas (PRIMAVESI, 1979; RONQUIN, 2010).

O nitrogênio é fortemente influenciado pela quantidade de carbono orgânico disponível, pois a decomposição da matéria orgânica é um processo que libera nitrogênio. No entanto, a relação entre carbono e nitrogênio pode ser modulada pelo pH do solo, que afeta a eficiência da decomposição e a atividade microbiana (HART et al., 1999; STEVENS, 2000).

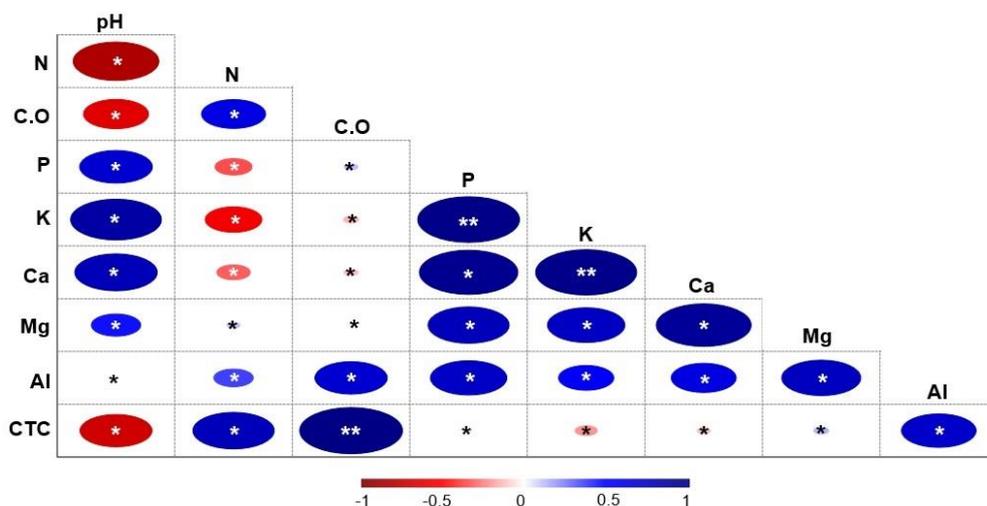


Figura 2 - Matriz de correlação de Pearson entre propriedades químicas dos solos nos diferentes tipos de uso. *indica $p < 0.05$ de significância e **indica $P < 0.01$ de significância.

A análise de cluster (figura 3) tornou possível agrupar e identificar as áreas mais semelhantes dentro do conjunto de dados. Isso permitiu a leitura da visão geral da pesquisa e dos limites nas mudanças químicas do solo entre as quatro áreas. De forma geral o agrupamento indicou que a pastagem foi a que mais se distanciou das demais, com maior deficiência química e com ciclo biogeoquímico menos ativo. Curiosamente a floresta nativa e o eucalipto ficaram no mesmo grupo, indicando semelhança entre os valores dos elementos químicos e na variação de produtividade.

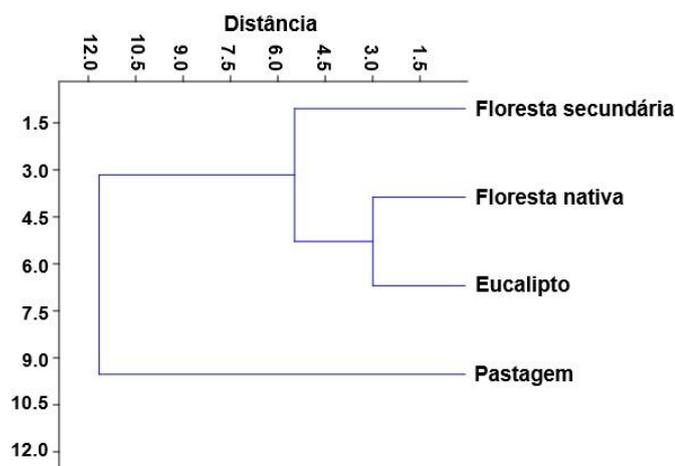


Figura 3 - Agrupamento de propriedades químicas do solo de acordo com o tipo de uso.

Por último, a floresta secundária formou um grupo distinto, porém mais próximo da floresta nativa e do eucalipto que a pastagem. Os valores superiores da floresta secundária em às demais nos elementos: carbono orgânico, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio, indicam maior e melhor ativação do ciclo biogeoquímico nesta área.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo revelou diferenças significativas nas propriedades químicas do solo entre os diferentes usos. A floresta secundária apresentou melhores resultados em metade das propriedades avaliadas, como carbono orgânico, nitrogênio, alumínio e capacidade de troca catiônica (CTC), indicando uma ativação mais intensa dos ciclos biogeoquímicos. Em contraste, a pastagem teve os menores valores para essas propriedades, refletindo menor fertilidade e atividade biogeoquímica. As florestas nativas e áreas de eucalipto mostraram características intermediárias.

Observou-se que as maiores concentrações de propriedades químicas estão nas camadas superiores do solo (0-10 cm), com uma diminuição nas camadas mais profundas (10-40 cm), sugerindo maior atividade das raízes e dinâmica de nutrientes nas camadas superficiais. A floresta secundária se destacou pela maior disponibilidade de nutrientes e potenciais para sequestro e estoque de carbono. A análise de correlação mostrou que a acidez do solo afeta negativamente a disponibilidade de nitrogênio, e a interação entre fósforo, potássio e cálcio influencia a fertilidade. A pastagem apresentou a menor fertilidade química, enquanto a floresta nativa e o eucalipto foram agrupados devido a semelhanças nas propriedades químicas.

De maneira geral, nossos resultados sugerem que as florestas secundárias em processo de restauração têm um potencial mais elevado de ativação dos ciclos biogeoquímicos e de sequestro e armazenamento de carbono orgânico no solo, quando comparadas às florestas nativas, às plantações de eucalipto e às pastagens.

Palavras-chave: Mata atlântica; solo tropical; restauração florestal; dinâmica química do solo.

REFERÊNCIAS

ARYAL, D. R et al. Fine root production and turnover along a forest succession after slash-and-burn agriculture. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, 27, n. 2, p. 1-17. 2024.

BERWANGER, A. L. et al. fósforo no solo com aplicação de dejetos líquidos de suínos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2525-2532, 2008.

COELHO NETTO, A. L., et al. The extreme landslide disaster in brazil. **Landslide Science And Practice**. p. 377 - 384. 2013.

DANTAS, M. E. et al. **Diagnóstico geoambiental do estado do Rio de Janeiro**. 2005.

GAMA, J. R. N. F.; KIEHL, J. C. Influência do alumínio de um podzólico vermelho-amarelo do acre sobre o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23 p. 475-482, 1999.

HART, R. J, et al. Microbial regulation of nitrogen availability in soils: The role of organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, 31(12), 1919-1928. 1999.

JAMONT, M, et al. Sharing N resources in the early growth of rapeseed intercropped with faba bean: Does N transfer matter? **Plant Soil**, 371 (1–2), 641–653. 2013.

JUO, A.S.R., MANU, A. Chemical dynamics in slash-and-burn agriculture. **Agric. Ecosyst. Environ.** 58, 49–60. 1996.

LEI, M, et al. Temporal evolution of the hydromechanical properties of soil-root systems in a forest fire in China. **Science of the Total Environment**. 809, 151165. 2022.

LI, Y et al. Responses of Soil Organic Carbon Fractions and Stability to Forest Conversion in the Nanling Nature Reserve, China. **Forests**, 15, 8, p. 1330, 2024.

LOHBECK, M, et al. Functional diversity changes during tropical forest succession. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, 14, 89–96. 2012.

MCGUIRE, L. A.; YOUNBERG, A. M. Impacts of successive wildfire on soil hydraulic properties: implications for debris flow hazards and system resilience. **Earth Surface Processes and Landforms**, 44, 11, 2236-2250. 2019.

MCGARIGAL, K et al. **Multivariate Statistics for Wildlife and Ecology Research**. Springer, New York, NY. 2000.

MENZIES, N., GILLMAN, G. Plant growth limitation and nutrient loss following piled burning in slash and burn agriculture. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** 65, 23–33. 2003.

PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo**. São Paulo: Livraria Nobel, 1979. 549 p.

RONQUIN, C. C. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. **Boletim de pesquisa e desenvolvimento**, 8. Embrapa. 2010, 27p.

STEVENS, J. M. C. The carbon-nitrogen ratio of soil organic matter as a determinant of microbial activity. **Soil Science Society of America Journal**, 64(5), 1500-1509. 2000.