

INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREA DEGRADADA NA AMAZÔNIA: um estudo na Volta Grande do Xingu

Kerciane Pedro da Silva

Engenheira Florestal, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação,
Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil¹

kercianesilva@gmail.com

Fábio Miranda Leão

Doutor em Ciências Florestais, Professor da Faculdade de Engenharia Florestal e do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação, Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil¹

fabioleao@ufpa.br

Jaime Barros dos Santos Junior

Doutor em Ciência do Solo, Professor da Faculdade de Engenharia Florestal, Coordenador do Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal, Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil¹

jaime@ufpa.br

Emil José Hernández-Ruz

Doutor em Genética e Biologia Molecular, Professor da Faculdade de Ciências Biológicas e do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação, Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil²

emilhjh@ufpa.br

Cleber da Silva Ribeiro

Engenheiro Florestal, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação, Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil¹

clebeercouti@gmail.com

Gustavo Gomes Lima

Agrônomo, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Conservação, Universidade Federal do Pará, Altamira, Pará, Brasil¹

gustavosp7940@gmail.com

RESUMO: A qualidade do solo é essencial para a biodiversidade e a resiliência das florestas às mudanças climáticas. A degradação causada por práticas insustentáveis prejudica a regeneração da vegetação nativa, ressaltando a importância da restauração ecológica para garantir a sustentabilidade dos ecossistemas. Este estudo teve como objetivo avaliar o impacto da vegetação nativa e da pecuária sobre a qualidade do solo em diferentes compartimentos da paisagem na região da Volta Grande do Xingu. Amostras de solo foram coletadas em áreas de floresta e degradadas, em três faixas de altitude (120-130 m, 130-140 m e 140-150 m), para determinar os atributos físicos e químicos e o Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES). A análise revelou diferenças significativas entre as áreas de floresta e as áreas degradadas, refletindo o impacto das práticas de manejo. As áreas de floresta apresentaram melhor qualidade física do solo em comparação com as áreas degradadas. A Floresta teve maiores concentrações de carbono orgânico, fósforo assimilável e potássio, além de um pH mais ácido, devido ao acúmulo de matéria orgânica. Em contraste, as faixas altitudinais degradadas apresentaram uma tendência de compactação. Esses resultados confirmam que a vegetação nativa melhora a qualidade do solo e sustenta processos ecológicos benéficos, enquanto práticas inadequadas comprometem a funcionalidade ecológica do solo.

Palavras-chave: Regeneração Florestal; Manejo do Solo; Restauração ecológica.

¹ Endereço para correspondência: Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal - Faculdade de Engenharia Florestal - UFPA, Rua Cel. José Porfírio, 2515, CEP: 68.372-040, Altamira, Pará, Brasil.

² Endereço para correspondência: Laboratório de Zoologia - Faculdade de Ciências Biológicas - UFPA, Rua Cel. José Porfírio, 2515, CEP: 68.372-040, Altamira, Pará, Brasil.

SOIL QUALITY INDICATORS IN A DEGRADED AREA IN THE AMAZON: a study in the Volta Grande do Xingu

ABSTRACT: The soil quality is essential for biodiversity and forest resilience to climate change. Degradation caused by unsustainable practices impairs the regeneration of native vegetation, highlighting the importance of ecological restoration to ensure ecosystem sustainability. This study aimed to evaluate the impact of native vegetation and livestock on soil quality in different landscape compartments in the Volta Grande do Xingu region. Soil samples were collected in forested and degraded areas across three altitude ranges (120-130 m, 130-140 m, and 140-150 m) to determine physical and chemical attributes and the Soil Structural Quality Index (SSQI). The analysis revealed significant differences between forested and degraded areas, reflecting the impact of management practices. Forest areas showed better physical soil quality compared to degraded areas. The forest had higher concentrations of organic carbon, available phosphorus, and potassium, as well as a more acidic pH due to the accumulation of organic matter. In contrast, degraded altitude ranges showed a tendency towards compaction. These results confirm that native vegetation improves soil quality and supports beneficial ecological processes, while inadequate practices compromise soil ecological functionality.

Keywords: Forest regeneration; Soil management; Ecological restoration.

INDICADORES DE CALIDAD DEL SUELO EN ÁREA DEGRADADA EN LA AMAZONÍA: un estudio en la Volta Grande do Xingu

RESUMEN: La calidad del suelo es esencial para la biodiversidad y la resiliencia de los bosques frente al cambio climático. La degradación causada por prácticas insostenibles perjudica la regeneración de la vegetación nativa, resaltando la importancia de la restauración ecológica para garantizar la sostenibilidad de los ecosistemas. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el impacto de la vegetación nativa y la ganadería sobre la calidad del suelo en diferentes compartimentos de paisaje en la región de Volta Grande do Xingu. Se recolectaron muestras de suelo en áreas forestales y degradadas, en tres rangos de altitud (120-130 m, 130-140 m y 140-150 m), para determinar los atributos físicos y químicos y el Índice de Calidad Estructural del Suelo (IQES). El análisis reveló diferencias significativas entre las áreas forestales y las áreas degradadas, reflejando el impacto de las prácticas de manejo. Las áreas forestales presentaron una mejor calidad física del suelo en comparación con las áreas degradadas. El bosque tuvo mayores concentraciones de carbono orgánico, fósforo disponible y potasio, así como un pH más ácido debido a la acumulación de materia orgánica. En contraste, las zonas degradadas mostraron una tendencia hacia la compactación. Estos resultados confirman que la vegetación nativa mejora la calidad del suelo y sostiene procesos ecológicos beneficiosos, mientras que las prácticas inadecuadas comprometen la funcionalidad ecológica del suelo.

Palabras clave: Regeneración Forestal; Manejo de Suelos; Restauración ecológica.

Introdução

A Amazônia, a maior floresta tropical do mundo, desempenha um papel vital na regulação do clima global e na preservação da biodiversidade. Este bioma abriga uma imensa variedade de espécies vegetais e animais, muitas das quais são endêmicas e ainda pouco conhecidas pela ciência (VIEIRA et al., 2005; SILVA DIAS et al., 2005). Além disso, a Amazônia exerce uma função crucial na manutenção do ciclo hidrológico, influenciando padrões de precipitação não apenas na América do Sul, mas em outras partes do mundo (DAVIDSON et al., 2012). No entanto, esse patrimônio natural enfrenta crescentes ameaças devido às mudanças climáticas e à ação humana, que estão comprometendo sua integridade e resiliência (IPCC, 2023).

As mudanças climáticas têm provocado alterações significativas nos padrões de temperatura e precipitação na Amazônia, aumentando a frequência e a intensidade de eventos extremos, como secas e enchentes. Esses fenômenos têm um impacto direto na saúde dos ecossistemas, afetando desde o crescimento das plantas até a distribuição das espécies animais (NOBRE et al., 2009; IPCC, 2023). O desmatamento e as queimadas, que muitas vezes são realizados para a expansão agrícola e pecuária, exacerbam esses efeitos ao destruir a cobertura

florestal e expor o solo, tornando-o mais vulnerável à erosão e à perda de nutrientes. A degradação do solo, por sua vez, agrava a crise climática ao reduzir a capacidade de sequestro de carbono das florestas (BOTTA; FOLEY, 2002; BEVAN et al., 2009; NOBRE et al., 2009; DAVIDSON et al., 2012; FAO; ITPS, 2015; IPCC, 2023).

O solo é o alicerce dos ecossistemas terrestres, fornecendo os nutrientes necessários para o crescimento das plantas, regulando o ciclo da água e armazenando carbono. Solos saudáveis são essenciais para a manutenção da biodiversidade, pois suportam uma vegetação densa e diversa, que por sua vez sustenta uma ampla gama de espécies animais. Além disso, a estrutura e a composição química do solo influenciam diretamente a capacidade das florestas de resistirem às mudanças climáticas e de recuperarem-se de distúrbios, como desmatamentos e queimadas (BLUM, 2005; FAO; ITPS, 2015; DROBNIK et al., 2018; VOGEL et al., 2018). Neste contexto, a qualidade do solo na Amazônia se torna um fator central na discussão sobre a sustentabilidade e a conservação desse bioma.

Mesmo desempenhando um papel crucial nos serviços ecossistêmicos, especialmente na produção de água e no sequestro de carbono, sendo um componente vital dos ecossistemas terrestres (DOMINATI et al., 2010; CAMILO-COTRIM et al., 2022), cerca de 33% dos solos do mundo estão degradados, o que faz com que seja vital compreender e mitigar os danos decorrentes de sua degradação (FAO; ITPS, 2015). As trajetórias atuais das condições do solo têm o potencial de causar consequências catastróficas, impactando milhões de pessoas nas regiões mais vulneráveis nas próximas décadas (MONTANARELLA et al., 2016). As decisões de gestão dos recursos naturais devem adotar estratégias de uso sustentável que priorizem a resiliência dos solos, garantindo a produção contínua de serviços ecossistêmicos (BONILLA-BEDOYA et al., 2017).

A degradação do solo, causada por práticas agrícolas insustentáveis, como o uso excessivo de fertilizantes e pesticidas, a monocultura e o pastoreio intensivo, resulta na perda de matéria orgânica, na compactação e na contaminação do solo. Esses processos comprometem a fertilidade do solo e sua capacidade de sustentar a vida vegetal, levando à redução da produtividade agrícola e florestal. Além disso, a degradação do solo contribui para a perda de biodiversidade e para o aumento da emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono e o metano, exacerbando os efeitos das mudanças climáticas (FAO; ITPS, 2015).

Diante desse cenário, a restauração ecológica surge como uma estratégia crucial para recuperar áreas degradadas, promover a conservação das espécies e mitigar os impactos das mudanças climáticas, contribuindo para a sustentabilidade (HOBBS et al., 2011; BENINI; ADEODATO, 2017; HOLL, 2020; ROSENFELD; MÜLLER., 2020). A restauração de ecossistemas florestais é crucial para melhorar a qualidade do solo, especialmente na recuperação de suas propriedades físicas e químicas, mantendo a qualidade ambiental, assegurando a produtividade agrícola e florestal, protegendo a biodiversidade e garantindo importantes serviços ecossistêmicos (ALLEK et al., 2023).

Embora a floresta amazônica tenha grande importância global, ainda são escassos os estudos que avaliam os indicadores de qualidade do solo, os quais são fundamentais para avaliar a saúde do solo em áreas com diferentes estágios de restauração (VIANA et al., 2014). A avaliação de indicadores de qualidade do solo é uma ferramenta crucial para o monitoramento e a adaptação das práticas de manejo em áreas de restauração, sendo fundamentais para avaliar a saúde do solo e o sucesso das iniciativas de restauração (VIANA et al., 2014; MUÑOZ - ROJAS et al., 2016; MUÑOZ-ROJAS, 2018). Esses indicadores permitem identificar áreas críticas que necessitam de intervenções específicas e ajustar suas estratégias de manejo para maximizar os benefícios ecológicos e sociais da restauração (MUÑOZ-ROJAS, 2018; RAIESI; SALEK - GILANI, 2020).

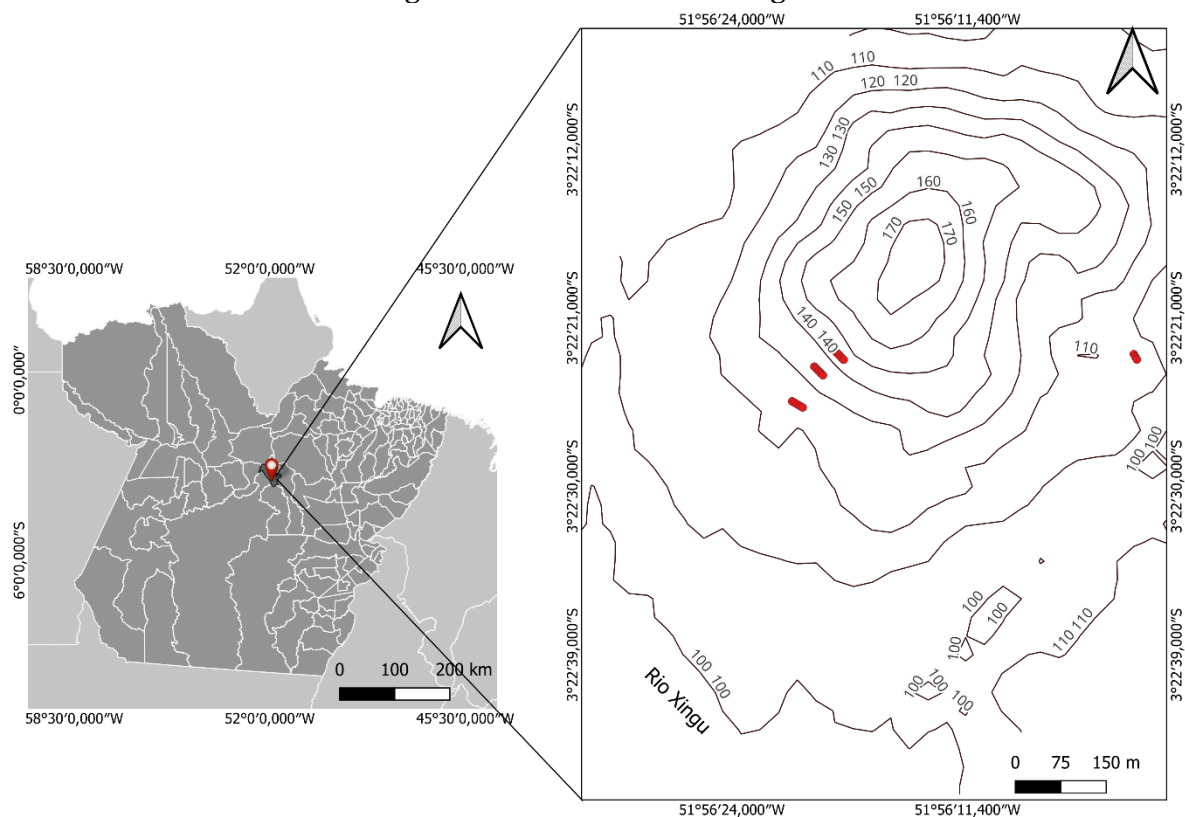
Os objetivos deste trabalho foram avaliar como a vegetação nativa e a degradação influenciam a qualidade do solo, caracterizando as diferenças entre áreas de floresta e faixas degradadas em termos de atributos físicos e químicos. O estudo buscou entender o impacto da

altitude na qualidade do solo, determinar o efeito das práticas de manejo nos atributos do solo, e comparar o Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES) em diferentes compartimentos. Além disso, o trabalho visa aprofundar o conhecimento sobre como diferentes condições ambientais e práticas de manejo afetam a qualidade do solo e, por consequência, a funcionalidade dos ecossistemas na região da Volta Grande do Xingu.

Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada no Centro de Estudos Ambientais (CEA) da Norte Energia S.A., localizado no município de Vitória do Xingu, PA, na região da Volta Grande do Xingu, próximo à Barragem de Belo Monte, na margem do rio Xingu (figura 1). As coordenadas geográficas centrais da área de estudo são: 3°22'24.088"S e 51°56'24.5"W, 3°22'28.799"S e 51°56'21.376"W, 3°22'24.701"S e 51°56'13.629"W, 3°22'20.822"S e 51°56'15.5"W. A área foi utilizada para pecuária entre 1995 e 2005, após sua vegetação ter sido suprimida, conforme imagens de satélite Landsat 5 TM, cena 225062, por proprietários anteriores. Posteriormente, a área foi adquirida pela empresa Norte Energia S.A. como parte do projeto hidrelétrico de Belo Monte. Desde então, a área permanece sem uso agrícola, sendo dominada principalmente por gramíneas exóticas, remanescentes das antigas pastagens, com apenas um pouco de regeneração natural. Essas gramíneas dificultam e retardam significativamente o processo de regeneração natural da floresta.

Figura 1: Mapa de Localização da Área de Estudo e Distribuição dos Pontos de Amostragem nas Faixas Altitudinais e na Floresta de Referência no Centro de Estudos Ambientais na região da Volta Grande do Xingu



Fonte: Elaborado pelos autores com base na Malha Municipal Digital do Brasil, Unidades da Federação, IBGE (2022) e Copernicus Global Digital Elevation Model da European Space Agency (2024).

Nesta localidade, o rio Xingu, que é o terceiro maior tributário do rio Amazonas, percorre um trajeto sinuoso sobre fraturas em rochas do embasamento do cráton amazônico, pouco antes de entrar na bacia sedimentar do Amazonas, na região conhecida como "Volta Grande do Xingu," moldada por estruturas tectônicas (COSTA *et al.*, 1996; ZUANON *et al.*, 2019). A geologia do local de estudo compreende granitóides da Suíte Anorogênica Bacajaí, do Paleoproterozóico (PAULA *et al.*, 2016). A vegetação é classificada como Floresta Ombrófila Densa (SALOMÃO *et al.*, 2007) e o clima, na classificação de Köppen, é o Aw, clima tropical de monção (ALVARES *et al.*, 2013).

O solo local apresenta uma sequência de horizontes A-AEc-Ec-Btfc-Cfc, com concreções ferruginosas (petroplintita) ocupando mais de 50% da massa do solo em todos os horizontes, com exceção do A que apresenta uma espessura de 4 cm. Estas condições caracterizam, respectivamente, o horizonte diagnóstico subsuperficial concrecionário e o horizonte diagnóstico superficial A fraco, de acordo com os critérios do Sistema Brasileiro de Classificação de Solo (SANTOS *et al.*, 2018), portanto o solo pode ser classificado como Plintossolo Pétrico Concrecionário.

Material e Métodos

Amostragem, análises e outras determinações

A amostragem foi realizada em quatro compartimentos distintos, sendo três em diferentes faixas altitudinais em área degradada, em um pequeno morro na porção nordeste do CEA e um em floresta que passou por processo de enriquecimento utilizada como referência. As faixas de altitude foram: faixa 1 (120-130 m), faixa 2 (130-140 m) e faixa 3 (140-150 m), além da Floresta (110 m). Em cada compartimento da área degradada foram abertas cinco mini trincheiras e na área de floresta foram abertas três mini trincheiras com dimensões de 40 cm de comprimento, 30 cm de largura e 30 cm de profundidade para a coleta de solo.

Em cada ponto de amostragem, calculou-se o índice de qualidade estrutural do solo da amostra (IQEA) e, através de suas médias, foi calculado o índice de qualidade estrutural do solo da gleba (IQES), conforme fórmulas abaixo, de acordo com Ralisch *et al.* (2017):

$$IQEA = (E_{c1} \times Qe_{c1}) + (E_{c2} \times Qe_{c2}) + (E_{c3} \times Qe_{c3}) / E_{total}$$

Onde:

IQEA = índice de qualidade estrutural do solo da amostra;

E_c = espessura de cada camada, em cm (o número de camadas pode variar de 1 a 3);

Qe_c = nota de qualidade estrutural atribuída à cada camada;

E_{total} = espessura/profundidade total da amostra (25 cm).

$$IQES = (IQEA_1 + IQEA_2 + \dots + IQEA_n) / n$$

Onde:

IQES = índice de qualidade estrutural do solo na gleba avaliada;

n = número total de amostras;

IQEA = nota de qualidade estrutural atribuída às amostras, de 1 até a n.

As demais análises e determinações do solo, descritas a seguir, foram realizadas conforme metodologias apresentadas em Teixeira *et al.*, (2017).

As amostras de solo coletadas na profundidade de 0-20 cm foram secas em estufa a 40 °C, moídas e peneiradas para separar as frações com diâmetro menor que 2,0 mm. A análise granulométrica foi realizada por meio de dispersão em solução de NaOH 1 mol.L⁻¹. A fração de areia foi determinada por peneiramento, enquanto a argila foi quantificada por densimetria, com base no método do densímetro e na lei de Stokes e o silte foi calculado por diferença.

Amostras indeformadas de solo foram coletadas utilizando cilindros metálicos volumétricos para determinação da densidade do solo e posteriormente para análise da

densidade de partículas (Dp) pelo método do balão volumétrico. A porosidade total (Pt) foi calculada pelo método indireto pela fórmula: $Pt = (Dp - Ds)/Dp$.

Na fração menor que 2,0 mm foram realizadas análises de pH em H₂O, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, Al³⁺, H⁺+Al³⁺, P assimilável, N total, carbono orgânico (C org) e calculado os valores de soma de bases trocáveis (SB), capacidade de troca de cátions (T), saturação por bases (V).

Análise de dados

Após a realização dos testes de Shapiro-Willk e Bartlett, para a verificação da normalidade e homogeneidade dos resíduos da variância, foi verificado que os pressupostos não puderam ser assumidos, mesmo quando transformados para log₁₀ e box cox. Desta forma para testar os efeitos altitudinais sobre os atributos físicos e químicos do solo foi realizado o teste estatístico não paramétrico de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). As diferenças quando significativas foram submetidas ao teste post-hoc (Dunn), com ajuste no valor de p pelo método de Bonferroni. As análises estatísticas foram realizadas na linguagem R 4.4.1 (R Foundation for Statistical Computing, Viena, AT).

Resultados e discussão

Os dados dos atributos físicos e químicos do solo nos compartimentos da paisagem, que incluem três faixas altitudinais da área degradada e a área de floresta utilizada como referência, estão apresentados nas tabelas 1 e 2. A análise granulométrica revela que areia, silte e argila apresentaram valores relativamente homogêneos em todos os compartimentos, com uma composição textural que se enquadra na classe franco-argilo-arenosa. Não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os compartimentos em relação às frações granulométricas, indicando uma uniformidade nas características texturais ao longo da paisagem estudada.

Tabela 1 – Médias dos atributos físicos e qualidade estrutural do solo em diferentes compartimentos da paisagem no Centro de Estudos Ambientais na região da Volta Grande do Xingu

Área	Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	Pt	IQES
	g kg ⁻¹			Mg m ⁻³		m ³ m ⁻³	
Faixa 1	592	56	351	1,31a	2,41a	0,46a	4,6a
Faixa 2	582	81	337	1,43b	2,43a	0,41b	4,5a
Faixa 3	588	76	335	1,46b	2,43a	0,40b	4,2a
Floresta	582	67	351	1,10a	2,28b	0,52a	6,0b

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; Pt: porosidade total; IQES: Índice de Qualidade Estrutural do Solo. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem estatisticamente pelo teste de Kruskal Wallis a 5% de probabilidade de erro.

Tabela 2 – Médias dos atributos químicos do solo em diferentes compartimentos da paisagem no Centro de Estudos Ambientais na região da Volta Grande do Xingu

Área	pH H ₂ O	Corg	N	P assimilável	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SB	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	T	V
		--- g kg ⁻¹ ---		mg dm ⁻³	----- cmol _c dm ⁻³ -----								%
Faixa 1	5,1a	14,5a	1,34	5,4a	0,11a	0,02	1,4ab	0,4	1,9a	0,2a	3,3a	5,3a	35,6a
Faixa 2	5,2a	14,2a	1,47	5,6a	0,09ab	0,02	1,4a	0,4	1,8a	0,1a	3,1a	5,0a	37,6a
Faixa 3	5,1a	13,3a	1,44	4,2b	0,08b	0,02	0,8bc	0,3	1,2b	0,2a	2,6a	3,8b	31,6a
Floresta	4,4b	28,2b	1,64	11,0c	0,26c	0,02	0,7c	0,5	1,5ab	1,6b	6,9b	8,4c	17,7b

SB: Soma de bases = somatório dos cátions trocáveis (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ e Na⁺); T: Capacidade de troca de cátions total = SB+(H⁺+Al³⁺); V: Porcentagem de saturação por bases = 100xSB/T. Médias seguidas pela mesma letra não se diferem estatisticamente pelo teste de Kruskal Wallis a 5% de probabilidade de erro.

No que diz respeito à densidade do solo (Ds) e à porosidade total (Pt), os resultados mostram que não houve diferenças significativas entre a Faixa 1 e a Floresta, nem entre a Faixa 2 e a Faixa 3. No entanto, a Ds e a Pt da Floresta e da Faixa 1 diferiram significativamente das demais faixas. A densidade de partículas (Dp) foi significativamente menor na Floresta em comparação com as outras áreas, sem variação significativa entre as faixas. O Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES) foi significativamente maior na Floresta, enquanto as faixas apresentaram valores mais baixos, com uma tendência de diminuição do IQES com o aumento da altitude.

A menor densidade do solo e a maior porosidade total observadas na Floresta sugerem uma estrutura menos compactada, com maior capacidade de retenção de água e melhor aeração (WENDLING *et al.*, 2012). Esses atributos, associados à maior presença de matéria orgânica, conforme evidenciado pelo teor de carbono, favorecem uma infiltração de água mais eficiente e um desenvolvimento radicular mais robusto (FIGUEIREDO *et al.*, 2018; SILVA *et al.*, 2022). Nas faixas altitudinais degradadas, a densidade do solo tende a aumentar com a elevação, enquanto a porosidade total diminui, indicando uma compactação progressiva. Essa compactação pode ser atribuída a processos erosivos e à maior exposição do solo, intensificados pela perda da cobertura vegetal e pelo uso anterior da área para pecuária.

O IQES mais alto na Floresta confirma a melhor condição física do solo nessa área, em comparação com as faixas degradadas. Estudos anteriores, como os de Silva *et al.* (2018), Zebalos *et al.* (2018), Ribeiro *et al.* (2019), mostram variações nos valores de IQES em diferentes sistemas de uso do solo. Na Floresta, o IQES foi de 5,7, o que se aproxima dos valores mais altos observados nesses estudos, enquanto nas faixas, o IQES foi significativamente mais baixo, refletindo uma perda de qualidade do solo, especialmente nas altitudes mais elevadas.

Os atributos químicos do solo, interpretados conforme Brasil e Cravo (2020) e Santos *et al.* (2018), revelam diferenças significativas entre a Floresta e as faixas altitudinais. Os teores de nitrogênio (N), sódio (Na⁺) e magnésio (Mg²⁺) não diferiram significativamente entre as áreas, indicando certa uniformidade desses parâmetros. Em contraste, o carbono orgânico (Corg), o fósforo assimilável (P), o potássio (K⁺), o alumínio trocável (Al³⁺) e a acidez potencial (H⁺+Al³⁺) foram significativamente maiores na Floresta em comparação com as faixas. O fósforo, o potássio, a soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (T) apresentaram diferenças significativas em pelo menos dois compartimentos, enquanto o pH do solo foi consistentemente baixo em todos os compartimentos, sendo o mais ácido registrado na Floresta.

O pH mais baixo na Floresta sugere um solo mais ácido, provavelmente devido ao acúmulo de matéria orgânica e à decomposição de folhas que liberam ácidos orgânicos. Em contraste, as faixas altitudinais exibem um pH mais elevado, possivelmente como resultado da mineralização mais intensa de nutrientes associada à degradação e à perda da cobertura vegetal. Estudos realizados na Amazônia, como os de Viana *et al.* (2014) e Fiel *et al.* (2022),

corroboram esses achados, mostrando pH mais baixos em áreas florestais em comparação com áreas degradadas.

A acidez potencial, a capacidade de troca de cátions e os cátions K^+ e Mg^{2+} foram mais elevados na Floresta, enquanto a saturação por bases e o Ca^{2+} foram menores, o que pode indicar que as faixas altitudinais sofreram com a ação do fogo, conforme corroborado por trabalhos anteriores (JACQUES, 2003; FERREIRA et al., 2010; REDIN et al., 2011; COMTE et al., 2012; TAKAHASHI et al., 2018; BERTOLINO et al., 2022). A maior concentração de Corg na Floresta reflete a capacidade da vegetação florestal de acumular matéria orgânica, essencial para a fertilidade do solo e a retenção de umidade. A matéria orgânica também contribui para a estrutura do solo, melhorando a agregação e aumentando a porosidade, facilitando a infiltração de água e promovendo condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas e a atividade microbiana (LEITE, 2004).

Em contraste, a diminuição da matéria orgânica nas faixas degradadas pode comprometer esses processos, levando à formação de solos compactados com baixa infiltração de água e maior suscetibilidade à erosão. Isso afeta negativamente a regeneração natural e as espécies implantadas, conforme discutido por Brancalion *et al.* (2015). Os atributos do solo que apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre a Floresta e pelo menos uma das faixas foram Ds, Dp, Pt, IQES, pH, Corg, N, P, K^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} , H^++Al^{3+} , T e V. Entre as diferentes faixas altitudinais, apenas Ds, Pt, P assimilável, K^+ , Ca^{2+} , SB e T mostraram variações significativas.

Apesar das diferenças estatísticas, observa-se uma tendência de diminuição nos atributos de Argila, Pt, IQES, Corg, K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SB, H^++Al^{3+} e T com o aumento da altitude. Essa diminuição ocorre principalmente devido às contribuições que as áreas de menor altitude recebem das áreas mais altas por meio do processo de lixiviação. Essas diferenças refletem o impacto do uso do solo e da degradação, ressaltando a importância da conservação da vegetação nativa e da adoção de práticas de manejo sustentável para restaurar a qualidade do solo e promover a funcionalidade dos ecossistemas. A compreensão dessas variações é essencial para a implementação de estratégias eficazes de restauração e manejo, visando a recuperação da qualidade do solo e a sustentabilidade ambiental na região da Volta Grande do Xingu.

Conclusão

A análise dos atributos físicos e químicos do solo nos diferentes compartimentos da paisagem na região da Volta Grande do Xingu revelou diferenças significativas entre as áreas de floresta e as faixas altitudinais degradadas, refletindo o impacto das práticas de manejo e o uso do solo. A granulometria homogênea em todos os compartimentos indicou uma consistência na composição textural do solo, enquanto as diferenças na densidade do solo, porosidade total, densidade de partículas e Índice de Qualidade Estrutural do Solo (IQES) destacaram a Floresta como a área com melhor condição física do solo.

Os atributos químicos, incluindo o carbono orgânico, fósforo assimilável, potássio, alumínio trocável e acidez potencial, foram significativamente mais elevados na Floresta, corroborando a importância da vegetação florestal na manutenção da fertilidade do solo e na retenção de umidade. A Floresta apresentou o pH mais ácido, indicando uma maior acidez, atribuída ao acúmulo de matéria orgânica. Em contraste, as faixas altitudinais exibiram pH mais elevado e uma tendência de compactação do solo com o aumento da altitude, refletindo o impacto da degradação e a perda da cobertura vegetal.

Os resultados confirmam a influência significativa da vegetação nativa na qualidade do solo e na sua capacidade de sustentar processos ecológicos benéficos. A maior concentração de matéria orgânica na Floresta melhorou a estrutura do solo, sua porosidade e a capacidade de retenção de água, em comparação com as áreas degradadas. As variações nos atributos do solo

ao longo da altitude nas faixas degradadas indicam que práticas de manejo inadequadas, como a pecuária e a exposição do solo, contribuem para a deterioração da qualidade do solo e a diminuição da sua funcionalidade ecológica.

A compreensão dessas diferenças é de grande importância para o desenvolvimento de estratégias eficazes de restauração e manejo sustentável. A implementação de práticas de conservação e recuperação da vegetação nativa pode melhorar a qualidade do solo e promover a sustentabilidade ambiental na região. Este estudo reforça a necessidade de um manejo integrado que leve em consideração as características específicas dos diferentes compartimentos da paisagem, visando a restauração da qualidade do solo e a preservação dos ecossistemas locais.

Agradecimentos

À Norte Energia pelo financiamento do projeto PD-07427- 0622/2022, através do Programa de PDI ANEEL.

Referências

- ALLEK, A.; VIANY PRIETO, P.; KORYS, K. A.; RODRIGUES, A. F.; LATAWIEC, A. E.; CROUZEILLES, R. How does forest restoration affect the recovery of soil quality? A global meta-analysis for tropical and temperate regions. **Restoration Ecology**, v. 31, n. 3, p. e13747, 2023. <https://doi.org/10.1111/rec.13747>
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- BENINI, R. M.; ADEODATO, S. O desafio econômico de recobrir o Brasil In: BENINI, R. M.; ADEODATO, S. (Org.). **Economia da Restauração Florestal**. São Paulo: The Nature Conservancy, 2017. 8-19 p.
- BERTOLINO, A. V. F. A.; MATTOS, B. S.; BERTOLINO, L. C. A influência do fogo nas propriedades de um solo sob manejo de agricultura de corte e queima em ambiente serrano no bioma de Mata Atlântica. **Sociedade & Natureza**, v. 34, n. 1, 2022. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63656>
- BEVAN, S. L.; NORTH, P. R. J.; GREY, W. M. F.; LOS, S. O.; PLUMMER, S. E. Impact of atmospheric aerosol from biomass burning on Amazon dry-season drought. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 114, n. D9, p. 2008JD011112, 2009. <https://doi.org/10.1029/2008JD011112>
- BONILLA-BEDOYA, S.; LÓPEZ-ULLOA, M.; VANWALLEGHEM, T.; HERRERA-MACHUCA, M. Á. Effects of Land Use Change on Soil Quality Indicators in Forest Landscapes of the Western Amazon. **Soil Science**, v. 182, n. 4, p. 128–136, 2017. <https://doi.org/10.1097/ss.000000000000203>
- BOTTA, A.; FOLEY, J. A. Effects of climate variability and disturbances on the Amazonian terrestrial ecosystems dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 16, n. 4, 2002. <https://doi.org/10.1029/2000GB001338>

BRANCALION, P. H. S.; GANDOLFI, S.; RODRIGUES, R. R. **Restauração Florestal**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S. Interpretação dos resultados da análise do solo In: BRASIL, E. C.; CRAVO, M. S.; VIEGAS, I. J. M. (Ed.). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2020. 145p.

CAMILO-COTRIM, C. F.; SÁ, A. S. F.; ALVES, D. P. S.; GONÇALVES, E. V.; TEIXEIRA, F. B.; SILVA, J. A. P.; BRANCO, M. H. S.; ALMEIDA, L. M.; CARAMORI, S. S. Qualidade do solo: relevância e uso de indicadores para o monitoramento. **Revista Agrotecnologia**, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 46-65, 2022.

COMTE, I.; DAVIDSON, R.; LUCOTTE, M.; DE CARVALHO, C. J. R.; DE ASSIS OLIVEIRA, F.; DA SILVA, B. P.; ROUSSEAU, G. X. Physicochemical properties of soils in the Brazilian Amazon following fire-free land preparation and slash-and-burn practices. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 156, p. 108-15, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.05.004>

COSTA, J. B. S.; BEMERGUY, R. L.; HASUI, Y.; BORGES, M. D. S.; FERREIRA JÚNIOR, C. R. P.; BEZERRA, P. É. L.; COSTA, M. L. D.; FERNANDES, J. M. G. Neotectônica da região amazônica: aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. **Geonomos**, v. 4, n. 2, p. 2-44, 1996. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v4i2.199>

DANIEL, J. A.; POTTER, K.; ALTOM, W.; ALJOE, H.; STEVENS, R. Longterm grazing density impacts on soil compaction. **Transactions of the ASAE**, v. 45, n. 6, 2002.
<http://doi.org/10.13031/2013.11442>

DAVIDSON, E. A.; DE ARAÚJO, A. C.; ARTAXO, P.; BALCH, J. K.; BROWN, I. F.; C. BUSTAMANTE, M. M.; COE, M. T.; DEFRIES, R. S.; KELLER, M.; LONGO, M.; MUNGER, J. W.; SCHROEDER, W.; SOARES-FILHO, B. S.; SOUZA, C. M.; WOFSEY, S. C. The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.
<http://doi.org/10.1038/nature10717>

DOMINATI, E.; PATTERSON, M.; MACKAY, A. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. **Ecological Economics**, v. 69, n. 9, p. 1858-1868, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.002>

DROBNIK, T.; GREINER, L.; KELLER, A.; GRÊT-REGAMEY, A. Soil quality indicators – From soil functions to ecosystem services. **Ecological Indicators**, v. 94, p. 151-169, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.06.052>

ELMORE, A. J.; ASNER, G. P. Effects of grazing intensity on soil carbon stocks following deforestation of a Hawaiian dry tropical forest. **Global Change Biology**, v. 12, n. 9, p. 1761-72, 2006. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01198.x>

EUROPEAN SPACE AGENCY. **Copernicus Global Digital Elevation Model**. Distribuído por OpenTopography. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acessado em 19 de agosto de 2024.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION; ITPS. **Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report**. Rome, Italy: Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, 2015. 607p.

FERREIRA, A. D.; COELHO, C.; SILVA, J. S.; ESTEVES, T. Efeitos do fogo no solo e no regime hidrológico In: MOREIRA, F.; CATRY, F. X.; SILVA, J. S.; REGO, F. (ed.). **Ecologia do fogo e gestão de áreas ardidas**. Lisboa: ISAPress, 2010. P. 21-48.

FIEL, L. G.; MARQUES, J. D.; DIAS, V. H. R.; SAMPAIO, I. M. G.; RODRIGUES, S. J. S. C.; MELO, V. S.; RUIVO, M. L. P.; SILVA, M. L. J. Atributos químicos do solo sob diferentes usos e coberturas no contexto da agricultura familiar. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v.13, n.4, p.24-35, 2022. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2022.004.0003>

FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; TOSTES. Propriedades físicas e matéria orgânica de um latossolo vermelho sob sistemas de manejo e cerrado nativo. **Bioscience Journal**, v. 24, n.3, p.24-30, 2008.

HOBBS, R. J.; HALLETT, L. M.; EHRLICH, P. R.; MOONEY, H. A. Intervention Ecology: Applying Ecological Science in the Twenty-first Century. **BioScience**, v. 61, n. 6, p. 442–450, 2011. <https://doi.org/10.1525/bio.2011.61.6.6>

HOLL, K. D. **Primer of ecological restoration**. Washington: Island Press, 2020. 243 p. IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Malha Municipal: Unidades da Federação 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>. Acesso em 14 de agosto de 2024.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) (org.). **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change: Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed.: Cambridge University Press, 2023. <https://doi.org/10.1017/9781009157926>

JACQUES, A. V. A. A queima das pastagens naturais: efeitos sobre o solo e a vegetação. **Ciência Rural**, v. 33, n. 1, p. 177–181, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000100030>

LEITE, L. F. C. **Matéria Orgânica do Solo** – Teresina, PI : Embrapa, 2004.

MONTANARELLA, L.; PENNOCK, D. J.; MCKENZIE, N.; BADRAOUI, M.; CHUDE, V.; BAPTISTA, I.; MAMO, T.; YEMEFACK, M.; SINGH AULAKH, M.; YAGI, K.; YOUNG HONG, S.; VIJARNSORN, P.; ZHANG, G.-L.; ARROUAYS, D.; BLACK, H.; KRASILNIKOV, P.; SOBOCKÁ, J.; ALEGRE, J.; HENRIQUEZ, C. R.; DE LOURDES MENDONÇA-SANTOS, M.; TABOADA, M.; ESPINOSA-VICTORIA, D.; ALSHANKITI, A.; ALAVIPANAH, S. K.; ELSHEIKH, E. A. E. M.; HEMPEL, J.; CAMPS ARBESTAIN, M.; NACHTERGAELE, F.; VARGAS, R. World's soils are under threat. **SOIL**, v. 2, n. 1, p. 79–82, 2016. <https://doi.org/10.5194/soil-2-79-2016>

MORAES, J. F. L.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C.; BERNOUX, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63–81, 1996. [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00072-0](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00072-0)

MUÑOZ-ROJAS, M. Soil quality indicators: critical tools in ecosystem restoration. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 5, p. 47–52, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.04.007>

MUÑOZ-ROJAS, M.; ERICKSON, T. E.; DIXON, K. W.; MERRITT, D. J. Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 24, n. S2, 2016. <https://doi.org/10.1111/rec.12368>

NEVES, C. S. V. J.; FELLER, C.; KOUAKOUA, E. Efeito do manejo do solo e da matéria orgânica solúvel em água quente na estabilidade de agregados de um latossolo argiloso. **Ciência Rural**, v. 36, n. 5, p. 1410-15, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000500010>

NOBRE, C. A.; MARENGO, J. A.; ARTAXO, P. Understanding the climate of Amazonia: Progress from LBA. *Em*: KELLER, Michael; BUSTAMANTE, Mercedes; GASH, John; SILVA DIAS, Pedro (org.). **Geophysical Monograph Series**. Washington, D. C.: American Geophysical Union, 2009. v. 186, p. 145-47. <http://doi.wiley.com/10.1029/2009GM000903>

PAULA, E. M. S.; GORAYEB, A.; SILVA, E. V.; MEIRELES, A. J. A. Compartimentação Geocológica da Sub-Bacia do Baixo Rio Xingu - Amazônia Centro-Oriental, Brasil. **Revista Equador**, Teresina, v. 5, n. 4, p. 128-50, 2016. <https://doi.org/10.26694/equador.v5i4.5192>
R Development Core Team. **R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística**; Fundação R para computação estatística: Viena, Austria, 202.; <http://www.R-project.org>.

RAIESI, F.; SALEK-GILANI, S. Development of a soil quality index for characterizing effects of land-use changes on degradation and ecological restoration of rangeland soils in a semi-arid ecosystem. **Land Degradation & Development**, v. 31, n. 12, p. 1533-1544, 2020. <https://doi.org/10.1002/ldr.3553>

REDIN, M.; SANTOS, G. D. F. D.; MIGUEL, P.; DENEGA, G. L.; LUPATINI, M.; DONEDA, A.; SOUZA, E. L. D. Impactos da queima sobre atributos químicos, físicos e biológicos do solo. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 381-392, 2011. <https://doi.org/10.5902/198050983243>

ROSENFELD, M. F.; MÜLLER, S. C. Ecologia funcional como ferramenta para planejar e monitorar a restauração ecológica de ecossistemas. **Oecologia Australis**, v. 24, n. 03, p. 550-565, 2020. <https://doi.org/10.4257/oeco.2020.2403.02>

SALOMÃO, R. P.; VIEIRA, I. C. G.; SURMITSU, C.; ROSA, N. A.; AMARAL, D. D.; MENEZES, M. P. M. As florestas de Belo Monte na grande curva do rio Xingu, Amazônia Oriental. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais**, Belém, v. 2, n. 3, p. 57-153, 2007. <https://doi.org/10.46357/bcnaturais.v2i3.696>

SILVA, P. R. R.; SANTOS, F. A. S.; ROMÃO, Y. S. F.; ISQUIERDO, E. P. Avaliação de velocidade de infiltração do solo em diferentes sistemas de produção. **Revista Agrária Acadêmica**, v. 5, n. 3, p. 172-183, 2022. <http://doi.org/10.32406/v5n3/2022/172-183/agrariacad>

SILVA-DIAS, M. A. F. D.; COHEN, J. C. P.; GANDÚ, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 35, n. 2, p. 215-222, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0044-59672005000200011>

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; WECKNER, F. C.; BRITO FILHO, E.; MANTOVANELI, B. C.; LEITE, A. F. L. Variabilidade espacial da estabilidade dos agregados

e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. **Gaia Scientia**, v. 12, n. 2, p. 125-133, 2018. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n2.34416>

SOUZA, Z. M. D.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 5, p. 491-99, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000500012>

SOUZA-BRAZ, A. M.; FERNANDES, A. R.; ALLEONI, L. R. F. SOIL ATTRIBUTES AFTER THE CONVERSION FROM FOREST TO PASTURE IN AMAZON. **Land Degradation & Development**, v. 24, n. 1, p. 33-38, 2013. <https://doi.org/10.1002/ldr.1100>

TAKAHASHI, R. A.; CAMARGOS, A. C. P.; BATISTA, S. P.; SANTOS, P. B.; LIMACHE, D. E. S.; CASTELO, L. R.; VIEIRA, L. T. A. Efeito das queimadas nos parâmetros abióticos do solo em áreas de Cerrado no Parque Estadual de Juquery, Franco da Rocha, SP, **Vita scientia**, v. 1, n. 1, p. 17-20, 2018. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4726272>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIREIXA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo** / - 3. ed. rev. e ampl. - Brasília, DF : Embrapa, 2017.

VIANA, R. M.; FERRAZ, J. B. S.; NEVES, A. F.; VIEIRA, G.; PEREIRA, B. F. F. Soil quality indicators for different restoration stages on Amazon rainforest. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 1-7, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.still.2014.01.005>

VIEIRA, I. C. G.; SILVA, J. M. C. D.; TOLEDO, P. M. D. Estratégias para evitar a perda de biodiversidade na Amazônia. **Estudos Avançados**, v. 19, n. 54, p. 153-164, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000200009>

VOGEL, H.-J.; BARTKE, S.; DAEDLOW, K.; HELMING, K.; KÖGEL-KNABNER, I.; LANG, B.; RABOT, E.; RUSSELL, D.; STÖSSEL, B.; WELLER, U.; WIESMEIER, M.; WOLLSCHLÄGER, U. A systemic approach for modeling soil functions. **SOIL**, v. 4, n. 1, p. 83-92, 2018. <https://doi.org/10.5194/soil-4-83-2018>

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M.; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 1, P. 256-265, 2012.

ZUANON, J.; SAWAKUCHI, A.; CAMARGO, M.; WAHNFRIED, I.; SOUSA, L.; AKAMA, A.; MURIEL-CUNHA, J.; RIBAS, C.; D'HORTA, F.; PEREIRA, T.; LOPES, P.; MANTOVANELLI, T.; LIMA, T. S.; GARZÓN, B.; CARNEIRO, C.; REIS, C. P.; ROCHA, G.; SANTOS, A. L.; DE PAULA, E. M.; PENNINO, M.; PEZZUTI, J. Condições para a manutenção da dinâmica sazonal de inundação, a conservação do ecossistema aquático e manutenção dos modos de vida dos povos da volta grande do Xingu. **Papers do NAEA**, v. 1, n. 2, 2019. <https://doi.org/10.18542/papersnaea.v28i2.8106>

Recebido em: 13/09/2024.
Aprovado para publicação em: 30/12/2024.