UNIVERSIDADE FEDERAL DO PIAUÍ

CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

MESTRADO EM AGRONOMIA

JANÁIRA ROCHA CAMPOS

PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DO SOLO DE ÁREAS DEGRADADAS SUBMETIDAS À RESTAURAÇÃO DE CURTO PRAZO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

TERESINA

2025

JANÁIRA ROCHA CAMPOS

PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DO SOLO DE ÁREAS DEGRADADAS SUBMETIDAS À RESTAURAÇÃO DE CURTO PRAZO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Agronomia - PPGA da Universidade Federal do Piauí - UFPI, na área de concentração Manejo do Solo e Água e linha de pesquisa Microbiologia e Bioquímica do Solo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Ademir Sérgio Ferreira de Araújo

Coorientador (a): Dra. Sandra Mara Barbosa Rocha

TERESINA

2025

FICHA CATALOGRÁFICA
Universidade Federal do Piauí
Biblioteca Setorial CCA
Serviço de Representação Temática da Informação

C189p Campos, Janáira Rocha.
Propriedades biológicas do solo de áreas degradadas submetidas à restauração de curto prazo no semiárido brasileiro. / Janáira Rocha Campos. -- 2025.
38 f.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Piauí, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2025.
"Orientador: Prof. Dr. Ademir Sérgio Ferreira de Araújo."

1. Bioindicadores. 2. Degradação do solo. 3. Microbiota. 4. Qualidade do solo. 5. Estabilidade temporal. I. Araújo, Ademir Sérgio Ferreira de. II. Título.

CDD 631.4

Bibliotecário: Rafael Gomes de Sousa - CRB3/1163

JANÁIRA ROCHA CAMPOS

PROPRIEDADES BIOLÓGICAS DO SOLO DE ÁREAS DEGRADADAS SUBMETIDAS À RESTAURAÇÃO DE CURTO PRAZO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Dissertação apresentada à Universidade Federal do Piauí, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, para obtenção do titulo de Mestre em Agronomia.

APROVADA em 25 de fevereiro de 2025

Comissão Julsadora:

gov.br Documento assinado digitalmente
ERIKA VALENTE DE MEDEIROS
Data: 25/02/2025 15:27:49-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Profa. Dra. Erika Valente de Medeiros — UFAPE

Prof. Dr. Luís Alfredo Pinheiro Leal Nunes — UFPI

Prof. Dr. Ademir Sérgio Ferreira de Araújo – UFPI
(Orientador)

TERESINA-PI
2025

À Deus, aos meus pais, irmãs, familiares e amigos.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, por me permitir viver esse sonho e guiar os meus passos em todos os momentos dessa jornada, por sua graça que é infinita, por todas as oportunidades e por me ajudar nos momentos difíceis, me ensinando que sem me ensinando que sem ele não sou nada, mas com ele guiando a minha vida posso todas as coisas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia (PPGA) da Universidade Federal do Piauí (UFPI), composto por um corpo docente qualificado que contribuiu para a concretização dos estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudos, que permitiu mais essa conquista na minha carreira profissional científica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ademir Sérgio Ferreira de Araújo, pelo suporte, disponibilidade, experiências, conhecimentos e ensinamentos científicos de extrema importância para realização deste trabalho.

À minha coorientadora, Dra. Sandra Mara Barbosa Rocha, pelo suporte, dedicação, disponibilidade, experiências, conhecimentos de fundamental importância para realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Melhoramento Genético de Cana-de-Açúcar da UFPI (RIDESA), por todo suporte e aparato técnico, em especial a Técnica de Laboratório Leudimar Aires Pereira, pelo auxílio constante nas Análises.

Aos meus amigos do grupo de pesquisa ecologia microbiana do solo da região meio norte, Rhaiana Aviz, Romário Martins, Sabrina Hermelino, Erica Batista, Janderson Moura, Mayanna Karlla, Thamara Kelly, Karla Annielle, agradeço imensamente por todo o carinho, companheirismo, convívio, momentos de descontração, lazer, valiosas conversas e acima de tudo pela amizade, sem vocês nada disso seria possível.

À minha família, minha mãe Ana Alice Machado Rocha e meu pai Antonio da Cruz Vasconcelos Campos, as minhas irmãs Antônia Naiana Rocha Campos e Janaina Rocha Campos, por todo apoio, amor, carinho, por serem meus maiores incentivadores e por caminharem sempre comigo, sem o apoio e educação dada por vocês, eu não teria chegado até aqui.

Aos meus tios Miguel Machado Rocha e Maria das Dores Ibiapina Rocha, por me acolherem em sua residência onde pude estar até o final da pós-graduação. Agradeço a disponibilidade, recepção e acolhida que me disponibilizaram durante esses dois anos.

Aos professores participantes da banca examinadora, pelo tempo disponível e pelas valiosas colaborações e sugestões.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a concretização de mais essa conquista. Meus sinceros agradecimentos.

“Posso todas as coisas naquele que me fortalece”

Filipenses 4.13

RESUMO

As propriedades microbiológicas do solo são de fundamental importância na funcionalidade dos ecossistemas. No entanto, processos degradativos reduzem a capacidade produtiva, podendo afetar essas propriedades, implicando diretamente na dinâmica do carbono e na atividade microbiana. O presente estudo teve como objetivo avaliar propriedades biológicas das áreas de mata nativa, degradadas e em recuperação de curto prazo em uma região do semiárido brasileiro durante as estações seca e chuvosa dos anos de 2022 e 2023. Foram avaliados o carbono da biomassa microbiana, a respiração basal do solo e a atividade enzimática (β-glicosidase, urease e fosfatase), além da estabilidade temporal avaliada por meio do coeficiente de variação entre as estações. A estabilidade da biomassa microbiana foi similar entre as áreas estudadas, enquanto a respiração basal e a atividade da β-glicosidase apresentaram menor estabilidade em áreas degradadas e em recuperação, em comparação com a floresta nativa. A urease mostrou maior estabilidade na área restaurada e o carbono orgânico total (COT) foi mais estável na área degradada, sugerindo menor variação sazonal deste parâmetro em solos degradados. Esses achados indicam que a degradação do solo afeta a dinâmica dos processos microbianos e sua resposta às mudanças sazonais. A menor estabilidade de algumas propriedades microbianas em áreas degradadas e restauradas pode refletir um ambiente menos favorável à atividade biológica. No geral conclui-se que a restauração de curto prazo (<5 anos) com uso da estratégia conservacionista cordões de pedra, não foi eficiente na recuperação das funções microbianas do solo, pois a necessidade de um período mais longo de avaliação para restaurar a estabilidade e funcionalidade do ecossistema, através desses resultados podem ser formuladas estratégias de restauração mais eficiente por um período de tempo maior e manejo sustentável do solo.

Palavras chave: Bioindicadores, Degradação do solo, Microbiota, Qualidade do solo, Restauração de áreas degradadas, Estabilidade temporal

ABSTRACT

The microbiological properties of the soil are of fundamental importance to the functionality of ecosystems. However, degradative processes reduce productive capacity, which can affect these properties, directly impacting carbon dynamics and microbial activity. The present study aimed to evaluate biological properties by comparing native forest areas, degraded areas, and areas under recovery in a region of the Brazilian semi-arid zone during the dry and rainy seasons of the years 2022 and 2023. Microbial biomass carbon, soil basal respiration, and enzymatic activity (β-glucosidase, urease, and phosphatase) were evaluated, in addition to temporal stability assessed through the coefficient of variation between the seasons. The results demonstrate that the stability of microbial biomass was similar among the studied areas, while basal respiration and β-glucosidase activity showed lower stability in degraded and recovering areas compared to the native forest. Urease showed greater stability in the restored area, and total organic carbon (TOC) was more stable in the degraded area, suggesting less seasonal variation of this parameter in degraded soils. These findings indicate that soil degradation affects the dynamics of microbial processes and their response to seasonal changes. The lower stability of some microbial properties in degraded and restored areas may reflect a less favorable environment for biological activity. Overall, it is concluded that short-term restoration (<5 years) was not effective in recovering the microbial functions of the soil, as a longer evaluation period is needed to restore the stability and functionality of the ecosystem. Through these results, more efficient restoration strategies can be formulated for a longer period and sustainable soil management.

Keywords: Bioindicators, Soil degradation, Microbiota, Soil quality, Restoration of degraded areas, Temporal stability

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Variação sazonal da temperatura média do ar (°C) e precipitação (mm) entre 2022 e 2023, indicando os períodos seco (laranja) e chuvoso (azul claro), bem como o momento das coletas de solo…….....…….……20

Figura 2. Comparação das propriedades do solo em diferentes coberturas de áreas (nativa, degradada e restauração) durante os períodos chuvoso e seco em 2022 e 2023……24

Figura 3. Comparação dos quocientes de solo entre diferentes áreas (nativa, degradada e restauração) durante os períodos chuvoso e seco em 2022 e 2023…….....25

Figura 4. Atividade enzimática de microrganismos do solo influenciada pelos níveis de degradação das áreas e estações ao longo de dois anos……...……26

Figura 5. Estabilidade temporal das propriedades microbianas do solo em áreas nativas, degradadas e em restauração durante as estações seca e chuvosa de 2022 e 2023……..26

Figura 6. Análise de componentes principais, mostrando as propriedades microbianas e sua relação com as diferentes áreas…….....…...27

LISTA DE TABELA

Tabela 1. Principais características químicas e da granulometria das áreas avaliadas……..……. 21

SUMÁRIO

1. **INTRODUÇÃO** 12
2. **REFERENCIAL TEÓRICO** 14
2.1. Degradação do solo e o semiárido brasileiro 14
2.2. Recuperação de áreas degradadas 15
2.2.1. Unidades de recuperação de áreas degradadas e vulnerabilidade climáticas (URAD) 16
2.3. Biomassa microbiana e enzimas do solo como indicadores de qualidade do solo em áreas degradadas. 18
3. **MATERIAL E MÉTODOS** 20
3.1. Área de estudo e delineamento experimental 20
3.2. Histórico da área em degradação e estratégias de restauração. 21
3.3. Amostragem de solo 22
3.4. Variáveis analisadas 22
3.4.1. Determinação da biomassa microbiana do solo e atividade enzimática 22
3.5. Análise de dados 23
4. **RESULTADOS** 24
5. **DISCUSSÃO** 28
6. **CONCLUSÕES** 30
7. **REFERÊNCIAS** 31

1. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda global por alimentos impulsionou a expansão de áreas agrícolas, apresentando desafios para a manutenção da qualidade do solo. O solo suporta funções ecológicas críticas, incluindo ciclagem de nutrientes, armazenamento de carbono e regulação de processos biológicos (Dengiz; Turan, 2023). No entanto, práticas agrícolas inadequadas, como corte e queima, contribuem para a degradação do solo, principalmente pela remoção da cobertura vegetal, o que pode ocasionar processos de erosivos (Gay-de-combes et al., 2017; Mandal et al., 2021).

Segundo dados obtidos pela a Convenção das Nações Unidas para Combater a Desertificação (UNCCD) estima-se que 40% das terras do mundo estão sendo degradadas (UNCCD, 2024). Parte dessas terras degradadas encontram-se em regiões tropicais, como o Brasil. A região semiárida do país tem sofrido degradação do solo devido à má distribuição de chuvas e a presença de solos frágeis (Araújo et al., 2024).

Desde a década de 2000, o Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA) do Brasil tem apoiado iniciativas para mitigar e recuperar áreas degradadas. Por exemplo, os núcleos de desertificação e recuperação localizados em Gilbués (PI) e Irauçuba (CE) são mundialmente conhecidos por seus esforços para restauração de terras. Recentemente Santo Antônio de Lisboa (PI), foi inserida como área degradada, e foi implantada Unidade de Recuperação de Áreas Degradadas e Redução da Vulnerabilidade Climática (URAD), nessa unidade é utilizada estratégia de construção de cordões de pedra visando a recuperação do solo (FAPEPI, 2024).

Nas últimas duas décadas, estratégias como terraceamento e adubação verde foram aplicadas em Gilbués, enquanto a exclusão de pastejo foi implementada em Irauçuba (Araújo et al., 2024). Essas estratégias contrastantes de longo prazo mostraram efeitos distintos nas propriedades biológicas do solo, principalmente na biomassa microbiana do solo e na atividade enzimática, contribuindo para o aumento da biodiversidade e estoque de carbono no solo (Araújo et al., 2013; Lima et al., 2024).

A biomassa microbiana do solo e a atividade enzimática são indicadores sensíveis e frequentemente utilizados para avaliar o impacto de práticas agrícolas, degradação e recuperação ambiental (Costa et al., 2024; Araújo et al., 2013). A

biomassa microbiana do solo, fração ativa da matéria orgânica, é fundamental para o funcionamento do solo (Nannipieri et al., 2017; Pereira et al., 2021). Além disso, as enzimas extracelulares do solo atuam como catalisadores em reações bioquímicas do solo, influenciando o ciclo de nutrientes, a decomposição e a formação de matéria orgânica do solo (Ndabankulu et al., 2022).

Estudos anteriores relataram alta sensibilidade da biomassa microbiana e da atividade enzimática em áreas degradadas e em processo de recuperação após mudanças no ambiente do solo (Araújo et al., 2013; Yao et al., 2023). Por exemplo, em uma terra degradada no semiárido brasileiro, um processo de restauração de longo prazo (>20 anos) mostrou uma recuperação significativa de carbono (C) e nitrogênio (N) da biomassa microbiana do solo, bem como da atividade enzimática (Araujo et al., 2013).

No entanto, estudos sobre o processo de restauração de ecossistemas são realizados em longos períodos de recuperação (~20 anos) e pouco se sabe sobre os efeitos da restauração em curto prazo. Na região semiárida brasileira, por exemplo, processos de restauração tem sido implantado há aproximadamente 5 anos como uma iniciativa das Unidades de Recuperação de Áreas Degradadas e Redução da Vulnerabilidade Climática (URAD), aplicou cordões de pedra para prevenir a erosão e promover a regeneração da vegetação nativa (MMA, 2018). Os cordões de pedras são barreiras físicas construída considerando a curva de nível do terreno, favorecendo a retenção de sedimentos e a diminui o escoamento superficial de água da chuva (Verdum; Vieira; Caneppele, 2016).

Assim, a avaliação das propriedades biológicas nesta área pode aumentar a compreensão do efeito de curto prazo da restauração. Aqui, levantou-se a hipótese de que estratégias de restauração de solo de curto prazo podem melhorar a biomassa microbiana e a atividade enzimática, apoiando descobertas de estudos de longo prazo. O presente estudo objetivou avaliar propriedades biológicas das áreas de mata nativa, degradadas e em recuperação de curto prazo em uma região do semiárido brasileiro durante as estações seca e chuvosa dos anos de 2022 e 2023.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Degradação do solo e o semiárido brasileiro

A degradação do solo é caracterizada como a redução da capacidade produtiva da terra através de mudanças na saúde do solo, afetando as propriedades físicas químicas e biológicas e reduzindo a capacidade de realizar bens e serviços no ecossistema (Abdelrahman, 2023; Araújo et al., 2024; FAO, 2015). A perda de capacidade produtiva do solo é ocasionada por diversos fatores climáticos e antropogênico, como o desmatamento, queimadas, erosão, desertificação, salinização, pastoreio excessivo e o uso desordenado do solo (Borrelli et al. 2017; Tomaselha et al., 2018).

O processo de degradação constitui-se como um problema de magnitude global que afeta aproximadamente 40% dos solos, com perda de 12 milhões de hectares ao ano em todo o mundo (IPBES, 2018; UNCCD, 2024). A consequência disso é a redução da produção de alimentos, impactando diretamente na segurança alimentar (UNCCD, 2024). De acordo com IPEBIS (2018), em todo o mundo, cerca de 3,2 bilhões de pessoas são impactadas de forma negativa pela degradação do solo, se intensificando a cada ano e afetando diversos continentes, sobretudo a América do Sul (Pereira et al., 2022).

No Brasil, cerca de 135 milhões de hectares e um percentual de 25% da vegetação nativa estão susceptíveis a degradação (MAPBIOMAS, 2024), que deixa vulnerável quase 38 milhões de brasileiros. Dentre as regiões do país, o Nordeste está entre as mais vulneráveis, com área de 1.143.491 km² susceptíveis a degradação (Bezerra et al., 2020). O clima predominante na região é o tropical semiárido, caracterizado por altas temperaturas, baixa umidade e precipitação irregular, que abrange cerca de 1.477 municípios englobando 9 estados do Nordeste e parte do estado de Minas Gerais (Marengo et al., 2022; IBGE, 2023).

Portanto, o semiárido brasileiro é região com maior vulnerabilidade à degradação do solo, devido às características climáticas e as ações desordenadas do homem, como corte e queima da vegetação nativa, sobrepastoreio, baixas precipitações e altas temperaturas (Araújo et al., 2013; Oliveira et al., 2021). A vegetação que predomina é a caatinga que abrange cerca de 70% do nordeste brasileiro e 11% da área total do país (UNCCD, 2024).

O bioma Caatinga cobre 862.818 km² da área terrestre do país (IBGE, 2019). Cerca de 27 milhões de pessoas vivem neste bioma, que inclui os estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Piauí, Sergipe e a área ao norte de Minas Gerais, a maioria dessas pessoas são de baixa renda e depende dos recursos do bioma para sobreviver (MMA, 2024; IBGE, 2023).

A Caatinga é caracterizada por uma grande variedade de árvores e arbustos espinhosos com características de sobrevivência xerófitas altamente adaptadas à escassez de água (Tomasella et al., 2018; Lacerda-Junior et al., 2019). O clima dessa região é caracterizado por baixas precipitações abaixo de 800 mm durante o ano e a distribuição das chuvas ocorre de forma irregular, tendo duas estações bem definidas: chuvosa e seca (Salgado et al., 2015).

Devido às características da região, muitas áreas sofrem degradação severa, levando a desertificação. Com isso o governo federal através de análise da degradação constatou que existem quatro principais núcleos de desertificação na região nordeste, nos quais o processo de degradação é mais intenso e preocupante, que são Gilbués (PI), Irauçuba (CE), Cabrobó (PE), Seridó (RN/PB), (Moraes et al., 2023; Vieira et al., 2015).

2.2. Recuperação de áreas degradadas

Atualmente, uma preocupação global crescente é a redução da degradação do solo. Espera-se que com o acordo de Paris e o desafio de Bonn - iniciativas globais para reduzir as mudanças climáticas e restaurar áreas degradadas - alcancem as metas de restauração de até 350 milhões de hectares até 2030 e o aumento do sequestro de carbono, buscando minimizar os impactos ambientais nessas regiões. No Brasil foi criado um plano de recuperação da vegetação nativa com meta de recuperar de 12 milhões de hectares até 2030 (MMA, 2017; Dave et al., 2018).

A recuperação de áreas degradadas visa reduzir os processos de degradação do solo, tendo como estratégia o uso de práticas de conservação do solo com o objetivo de tornar o ambiente mais equilibrado melhorando os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, com intuito de evitar perdas de solo por erosão e consequentemente melhorar a cobertura vegetal proporcionando maior disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes (Lal, 2015).

Embora o processo de recuperação de áreas degradadas seja um desafio devido ao longo tempo lento (Svejcar; Kildisheval, 2017), tal prática permite melhorar o potencial produtivo do solo e das plantas, favorecendo o sequestro do carbono e a recuperação da biodiversidade do solo (Lal, 2015). Estudos recentes mostraram que resultados positivos são obtidos a longo prazo para recuperar áreas em todo o mundo, destacando o papel fundamental na promoção de ecossistemas saudáveis e sustentáveis (Huang et al., 2023; Pereira et al., 2022).

Dessa forma é importante fazer uso de diversas estratégias para manter um equilíbrio do ecossistema sempre considerando as características do ecossistema e a causa da degradação da área (Araújo et al., 2024). As principais estratégias utilizadas são práticas conservacionistas como reflorestamento, exclusão do pastoreio, terraceamento, plantio de adubos verdes (Araújo et al., 2022).

Além dessas estratégias, o uso de cordões de pedras, reduzem os processos erosivos e a deposição de solo evitando assim perda de solo (Albuquerque et al., 2020). Os cordões de pedras consistem em barreiras físicas dispostas ao longo das curvas de nível, atuando na retenção de sedimentos e na desaceleração do escoamento superficial das águas pluviais (Verdum; Vieira; Caneppele, 2016). Estudo realizado em unidade de recuperação de áreas degradadas, confirmam que o uso de cordões de pedra reduz os processos erosivos, matém matéria orgânica e umidade do solo e promove a revegetação (Silva et al.,2024).

Nesse cenário é importante fazer uso de métodos e estratégias de recuperação, visando melhoria na qualidade do solo tornando o mesmo mais produtivo de forma sustentável, priorizando a conservação dos recursos naturais com água, com finalidade de reduzir os efeitos da degradação do solo e promover a recuperação do ambiente.

2.2.1. Unidades de recuperação de áreas degradadas e vulnerabilidade climáticas (URAD)

A recuperação de áreas degradadas é importante, pois favorece melhorias na qualidade do solo, promovendo aumento no teor de matéria orgânica, fertilidade do solo e nas propriedades microbianas melhorando assim os serviços ecossistêmicos. Entretanto, esse processo de implantação dessas práticas tem custo alto de

investimento. Diante dessa realidade torna-se necessário fazer uso de práticas alternativas e viáveis que contribuam no processo de regeneração natural do ecossistema.

Diante disso, no ano de 2015 foi realizada uma Assembleia Geral das Nações Unidas com intuito de reconhecer a importância dos solos para a segurança alimentar e a agricultura, visando mitigar as mudanças climáticas e promover o desenvolvimento sustentável (Araújo et al., 2023). A recuperação de terras degradadas é a chave para alcançar os objetivos nacionais de desenvolvimento e para atingir vários objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) (Sylvester et al.,2020).

Na região semiárida brasileira o governo federal visando a recuperação de áreas degradadas estabeleceu a Política Nacional de Combate à Desertificação e Mitigação dos Efeitos da Seca (Silva et al., 2024). Baseado nisso foram criadas estratégias de recuperação de área degradadas as Unidades de Recuperação de Áreas Degradadas e Redução da Vulnerabilidade Climática (URAD), uma iniciativa que tem como objetivo a utilização de práticas que promovam a melhoria da qualidade do solo e desenvolvimento da vegetação nativa buscando o equilíbrio do ecossistema e recuperação do bioma Caatinga. (UNCCD,2018).

Para implantação da URAD foram investidos cerca de 10 milhões de dólares para uso em práticas de recuperação de áreas degradadas e melhoria da comunidade afetadas, bem como construção de barragens de pedras para armazenamento de água no período seco como realização de práticas conservacionistas (UNCCD,2018). A execução das Unidades de recuperação faz uso de diversas estratégias, dentre estas a construção cordões de pedras nas áreas degradadas agindo com uma barreira física reduzindo os processos erosivos e manter a umidade do solo, geralmente são construídos em áreas com altas declividades muito acentuada (MMA, 2018; Silva et al., 2024).

Essa prática pode contribuir para a recuperação da atividade biológica do solo e melhorar as condições ambientais. Estudos realizados na área de URAD em Santo Antônio de Lisboa avaliando a comunidade e diversidade microbiana, mostraram que é necessário um tempo maior para que se possa obter resultados positivos da recuperação da qualidade do solo e melhoria da atividade do microrganismo no solo. (Silva et al.,2024).

2.3. Biomassa microbiana e enzimas do solo como indicadores de qualidade do solo em áreas degradadas.

A biomassa microbiana do solo constitui uma pequena fração da matéria orgânica, representando a parte viva composta por fungos, bactérias e outros microrganismos, que desempenha papel fundamental nos processos de decomposição da matéria orgânica atuando no ciclo do carbono, ciclagem de nutrientes disponibilizado fósforo e potássio (Araújo et al., 2012; Ribeiro et al., 2022). Os microrganismos atuam como principais mediadores dos ciclos biogeoquímicos dos nutrientes e respondem rapidamente às alterações no ambientais (Dobrovol´shaya et al., 2015).

Os microrganismos são altamente sensíveis e eficazes a ampla gama de funções ecológicas, portanto, podem servir como indicadores de qualidade do solo (Fierer et al.,2021; Schloter et al., 2018). Os principais indicadores microbiológicos são carbono da biomassa microbiana, a respiração do solo, a atividade enzimática e a taxa de decomposição da matéria orgânica (Nikitin et al., 2022). Conforme Lima et al. (2024) resultado obtido comprovam eficiência dos indicadores microbiológicos, uma vez que o carbono da biomassa e atividade enzimática em conjunto desempenham papel fundamental na restauração da saúde, promovendo melhoria nas propriedades biológicas do solo.

A atividade microbiana do solo é afetada pelo conteúdo de carbono (C), pois o C é a fonte de energia para o desenvolvimento das atividades dos microrganismos no solo. O carbono da biomassa microbiana (CBM) é considerado com a parte mais ativa e dinâmica, representa de 3-5% da matéria orgânica (Nikitin et al., 2022). Nas áreas degradadas a redução do carbono ocorre devido ao desmatamento e consequente redução da serapilheira (Araújo et al., 2022).

A respiração basal do solo reflete as funções metabólicas em que o CO_2 é produzido por meio da decomposição da matéria orgânica, sendo componente fundamental nos processos realizados pelos microrganismos no solo (Kudeyarov, 2018). A taxa de respiração basal do solo é um excelente indicador da qualidade do solo, devido a sensibilidade às mudanças ambientais com temperatura, umidade e manejo do solo Barbieri et al. (2019). Bazzo et al. (2018) destaca que o aumento da taxa de respiração pode relacionar-se à maior eficiência da utilização do carbono

pelos microrganismos. Entretanto, o aumento da taxa de respiração pode ser indicativo de estresse dos microrganismos em função das condições do ambiente e da redução dos nutrientes (Liu et al., 2021; Silva et al., 2022).

No solo os microrganismos são os principais responsáveis pela produção das enzimas através do processo de decomposição da matéria orgânica. A produção dessas enzimas ocorre em locais intracelulares ou extracelulares (Chettri et al., 2021). As enzimas extracelulares como ß-glicosidase, urease e fosfatase são fundamentais no ciclo do carbono (C), nitrogênio (N) e fósforo (F) (Bayranvand et al., 2021). A atividade enzimática é primordial para o funcionamento dos solos, pois atua em diversos processos no solo, bem como a decomposição de resíduos e mineralização dos nutrientes (Araújo et al., 2022; Meena; Rao, 2021).

Conforme estudos a degradação do solo é considerada um grande desafio ambiental a nível global, pois afeta a produção agrícola, reduz a biodiversidade e os ciclos biogeoquímicos (Pereira et al., 2022; Wu et al., 2018). Dentre as estratégias que são utilizadas para monitorar e recuperar as áreas degradadas, os indicadores microbiológicos se destacam por apresentar sensibilidade às mudanças que ocorrem no manejo devido às condições ambientais (Lima et al., 2024; Yao et al., 2023). Neste contexto, a biomassa microbiana e as enzimas do solo mostram ferramentas promissoras na avaliação da qualidade do solo.

Estudos demonstram que a degradação reduz fortemente a biomassa microbiana do solo, devido redução no conteúdo da matéria orgânica provocando mudanças nas propriedades biológicas do solo diminuindo a atividade microbiana, no entanto a recuperação a curto e longo prazo promove a recuperação (Nunes et al., 2012; Araújo et al., 2013).

Na região semiárida foram avaliadas áreas degradadas e o seu impacto na microbiota do solo, quando comparadas áreas de mata nativa degradadas e em recuperação, contatou-se que as funções do microrganismo foram prejudicadas, levando a perda do potencial de serviço dentro do ecossistema, no entanto as áreas em recuperação demonstraram que as funções poderiam ser melhoradas (Pereira et al., 2022).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo e delineamento experimental

O estudo foi realizado na cidade de Santo Antônio Lisboa, Piauí, Brasil (6° 58' 51"S 41° 14' 02"W), entre fevereiro de 2022 e agosto de 2023. A região apresenta clima semiárido, com duas estações distintas (seca e chuvosa; Figura 1). A vegetação nativa é composta principalmente por angico (*Anadenanthera colubrina)*, cumaru (*Amburana cearensis)*, faveleira (*Cnidoscolus phyllacanthus) e sabiá (Mimosa caesalpiniaefolia)*. O solo é classificado como Neossolo Litólicos com declividades acima de 8%.

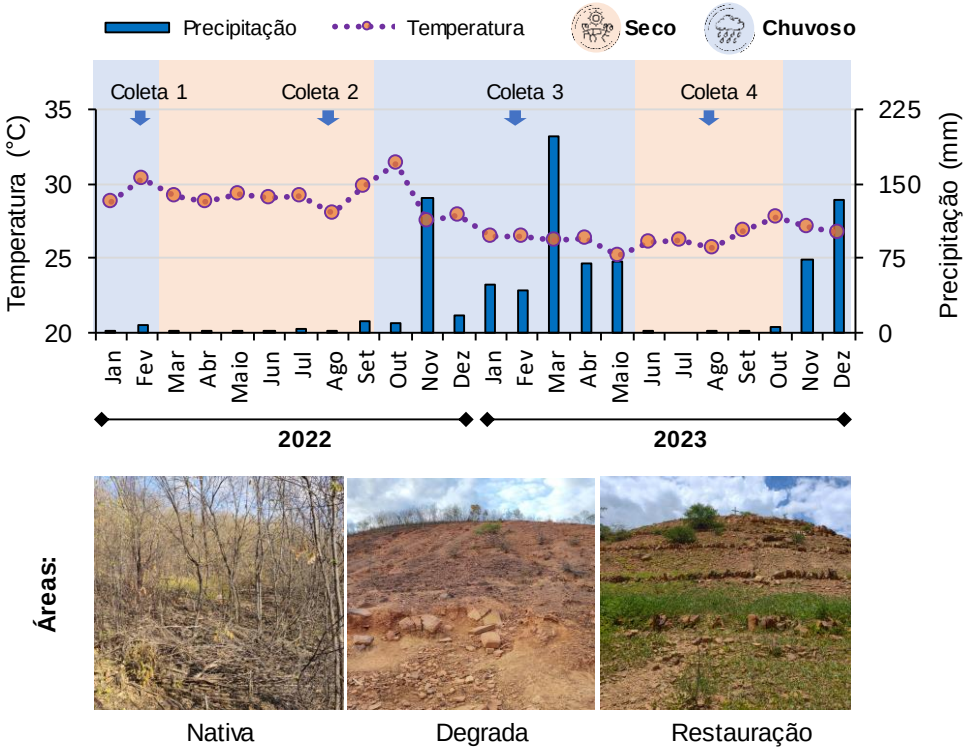


Figura 1. Variação sazonal da temperatura média do ar (°C) e precipitação (mm) entre 2022 e 2023, indicando os períodos seco (laranja) e chuvoso (azul claro), bem como o momento das coletas de solo. Abaixo, imagens representativas das áreas avaliadas: área nativa degradada e restauração.

O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado (DIC), com quatro repetições, em esquema fatorial de parcelas subsubdivididas (3x2x2), sendo a parcela representada pelas três de áreas principais do estudo (área de floresta nativa, área degradada e em recuperação (construção de cordões de pedra), duas épocas de amostragem (estações chuvosa e seca) como subparcela e o ano das coletas (2022 e 2023) como subsubparcelas.

Cada área foi caracterizada quanto às propriedades química e física do solo (Tabela 1) conforme a metodologia da Texeira et al. (2017). Resumidamente, o pH do solo foi determinado em extrato solo/água 1:2,5. O P disponível e o K trocável foram estimados por fotometria e colorimetria, respectivamente, e a MOS foi determinada pelo método de combustão úmida (Tabela 1).

Tabela 1. Principais características químicas e da granulometria das áreas avaliadas.

Características	Nativa	Degradada	Recuperação
pH solo	6,24	4,82	6,26
COT[a] (g kg^{-1})	35,3	3,5	14,8
Ca ($cmol_c$ dm^3)	6,47	3,95	5,67
Mg ($cmol_c$ dm^{-3})	6,03	3,45	4,63
K (mg dm^{-3})	219	55	187
P (mg dm^{-3})	7,5	2,1	2,08
Argila (g kg^{-1})	184	379	189
Silte(g kg^{-1})	164	258	150
Areia (g kg^{-1})	651	363	661

[a]Carbono orgânico total

3.2. Histórico da área em degradação e estratégias de restauração

A degradação do solo teve início com o desmatamento destinado à produção de carvão, um processo que, ao longo do tempo, expôs o solo à erosão e comprometeu sua estabilidade. Diante desse cenário, em 2019, foram implementadas as primeiras práticas voltadas para mitigar os impactos dessa degradação e promover a restauração ambiental.

As estratégias de restauração da área compreenderam na construção de barragens de pedra sucessivas (30 cm de altura e largura) ao longo do nível das curvas e espaçadas 25 m entre linhas que permitiram a retenção de água da chuva, minimizando o efeito da erosão e aumentando a umidade do solo. Além disso, foram adotadas práticas adicionais, incluindo a restauração de florestas ribeirinhas por meio da reintrodução de espécies nativas, aliada ao cultivo de culturas anuais locais, como milho e feijão.

Após 5 anos da implantação das práticas de restauração, foram selecionados três locais principais (~1,0 ha) para realização da amostragem do solo em cada condição, a saber: a) área degradada; b) área restaurada; c) área nativa.

3.3. Amostragem de solo

Cada área principal foi dividida em quatro transectos (~2.500 m ^{2}) e três pontos por transecto foram usados para coletar amostras de solo (0-10 cm de profundidade) e reunidas para obtenção de uma amostra composta em cada transecto. A amostragem de solo foi conduzida nas estações seca (agosto) e chuvosa (fevereiro) em 2022 e 2023. As amostras de solo foram armazenadas em sacos plásticos lacrados, adicionadas em caixa térmica e transportadas para o laboratório. As amostras úmidas de campo foram peneiradas (2 mm) e armazenadas em sacos plásticos lacrados a 3 °C para análises microbianas.

3.4. Variáveis analisadas

3.4.1. Determinação da biomassa microbiana do solo e atividade enzimática

A biomassa microbiana do solo (C) foi determinada conforme o método de FERREIRA et al. (1999), utilizando a extração de carbono de amostras fumigadas e não fumigadas com $K_2 SO_4$. A respiração do solo foi estimada com base na quantidade de dióxido de carbono liberado durante a incubação, realizada por um período de 7 dias a 28 °C, de acordo com Alef (1995). O quociente metabólico (qCO_2) foi calculado como a razão entre a respiração do solo e o carbono da biomassa microbiana (ANDERSON & DOMSCH, 1985). Já o quociente microbiano foi determinado pela relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico do solo.

A atividade de β-glicosidase foi medida de acordo com o método proposto por Eivazi e Tabatabai (1988). Essa atividade é determinada por o p - nitrofenol lançado depois incubando o solo com p- nitrofenil -β-D- glicosídeo (PNG) por 1 hora a 37 °C. Um solo de 0,5 g da amostra foi pesado e misturado com extraindo soluções de tampão universal modificado (MUB, pH 6,0) e solução PNG em tubos Falcon de 15 mL. As amostras eram agitadas e incubadas em água banho por 1 hora a 37 °C. Posteriormente, 0,5 mL de Solução de $CaCl_2$ e 2 mL de tampão Tris (pH 12) foram adicionados. A mistura era agitada, filtrada e o absorbância era medido usando um espectrofotômetro a 410 nm.

Já a atividade da fosfatase ácida foi estimada seguindo o método de Tabatabai e Bremner (1969). Para isso, amostras de solo de 0,5 g foram colocados em tubos Falcon (15 mL) e incubados com 2 mL de tampão universal modificado (MUB, pH 6,5) e 0,5 mL de p- nitrofenil fosfato (0,115 M) por 1 hora a 37 °C. Após incubação, foram adicionados 0,5 mL de $CaCl_2$ (0,5 M) e 2 mL de NaOH (0,5 M). O extrato foi então filtrado em frascos Erlenmeyer (25 mL), e a intensidade da cor foi medida usando um espectrofotômetro a 410 nm.

A atividade da urease foi determinada seguindo o método de Kandler e Gerber (1988). Dessa forma, 2,5 g das amostras foram pesados e misturadas com soluções extratoras contendo ureia e tampão borato. As amostras foram incubadas em banho maria por 2 horas a 37 °C. Após incubação, 15 mL de solução de KCl foi adicionado, e a mistura foi agitada por 30 minutos. Por fim, o extrato foi filtrado, e a absorbância foi medida usando espectrometria UV-Vis a 690 nm. Vale ressaltar que para todas as análises enzimáticas foi preparada amostra branca para cada tratamento.

3.5. Análise de dados

Todas as medições foram realizadas para quatro repetições por área e período de amostragem. A análise de variância (ANOVA) de parcelas subdivididas foi usada para testar o efeito das áreas (nativa, degradada e restaurada), período (estação seca e chuvosa em 2022 e 2023) e a interação entre áreas x período nas propriedades microbianas do solo. Diferentes estações (seca e chuvosa) foram consideradas como 'subparcelas' e diferentes anos (2022 e 2023) como 'sub-subparcelas' (Eisenhauer et al., 2009).

A estabilidade temporal das propriedades microbianas do solo foi estimada como $\log^{10}$ coeficiente de variância $^{-1}$ (coeficiente de variância = desvio padrão / média × 100; e os efeitos do tratamento foram testados usando ANOVA unifatorial (Eisenhauer et al., 2011). Todas as análises foram realizadas usando Rstudio versão 4.4.0. A análise de componentes principais (PCA) foi realizada para explorar a influência das áreas avaliadas nas propriedades microbianas do solo. Esta análise foi conduzida usando os pacotes " FactoMiner " e " factoextra " no RStudio.

4. RESULTADOS

O carbono da biomassa microbiana do solo (CBM), a respiração basal do solo (RS) e as atividades enzimáticas foram maiores na estação chuvosa do que na estação seca em 2022 e 2023, enquanto que os quocientes microbianos e metabólicos não mostraram um padrão claro. Comparando os locais, no ano de 2022, o carbono da biomassa microbiana foi estatisticamente maior na área nativa quando comparado com a área degradada e em recuperação (Figura 2A).

No entanto, nenhuma diferença no carbono microbiano foi observada entre área degradada e restaurada em ambos os períodos avaliados (chuvoso e seco). Enquanto, que a área nativa em 2023, manteve-se superior às demais áreas, e a área em recuperação mostrou um aumento no carbono da biomassa microbiana em comparação com a degradada durante a estação chuvosa, mostrando resposta positiva ao se aproximar do valor de CBM da área nativa e diferindo estatisticamente da área degradada.

Quanto à respiração do solo, foi observado maior valor na área nativa e degradada do que na área de recuperação durante a estação chuvosa do primeiro ano. Contudo, na estação seca, a RS da área degradada sofreu uma redução, igualando-se a área em recuperação. No ano seguinte, durante a estação chuvosa, a RS manteve-se semelhante a 2022 em todas as áreas de estudo. No entanto, no período seco, houve uma redução na taxa, sendo que a área degradada apresentou o maior valor nesse período.

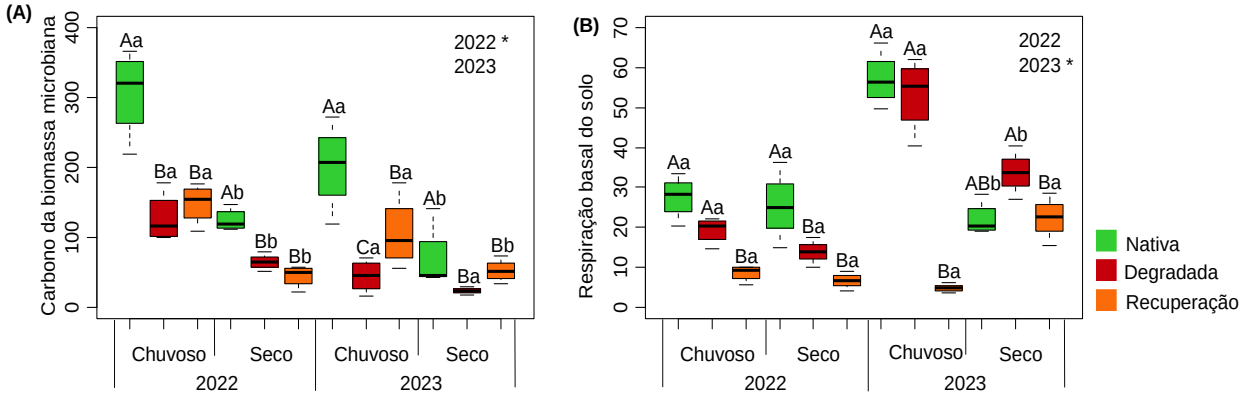


Figura 2. Comparação das propriedades do solo em diferentes áreas (nativa, degradada e restauração) durante os períodos chuvoso e seco em 2022 e 2023. (a) Carbono da biomassa microbiana (mg C kg^{-1} solo) e (b) Respiração do solo (mg C-CO_2 kg^{-1} solo dia^{-1}). Letras maiúsculas indicam diferenças entre áreas dentro da mesma estação; letras minúsculas representam diferenças dentro da mesma área entre as duas estações do mesmo ano; * = indica a maior média entre os anos; ns = nenhuma diferença significativa entre as médias dos dois anos.

O quociente metabólico foi maior na área degradada quando comparado a nativa e em restauração (Figura 3A), diferindo estatisticamente das demais áreas nos dois períodos de coleta. Já em 2023, o quociente metabólico em área degradada foi semelhante ao de mata nativa (durante a estação chuvosa). Os menores valores de quociente microbiano foram encontrados em locais nativos. Durante a estação chuvosa, o quociente microbiano não variou entre os locais em 2022, mas aumentou e na área de recuperação na estação chuvosa em 2023 (Figura 3B). Em 2023, valores maiores de quociente microbiano foram encontrados em área degradada na estação seca.

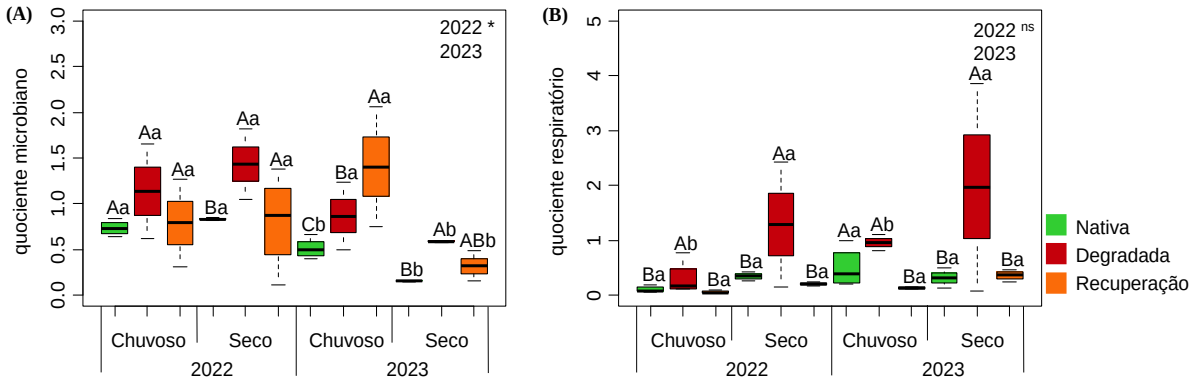


Figura 3. Comparação dos quocientes de solo entre diferentes áreas (nativa, degradada e restauração) durante os períodos chuvoso e seco em 2022 e 2023. (a) Quociente microbiano (%) e (b) Quociente respiratório (mg CO-2 C g-1 MBC). Letras maiúsculas indicam diferenças significativas entre áreas dentro da mesma estação; letras minúsculas representam diferenças dentro da mesma área entre as duas estações do mesmo ano; * = indica a maior média entre os anos; ns = indica nenhuma diferença significativa entre as médias dos dois anos ($p < 0,05$).

A atividade enzimática extracelular foi geralmente maior na mata nativa tanto em 2022 quanto em 2023, sem variação significativa entre áreas degradadas e em recuperação (Figura 4). A atividade da fosfatase ácida foi maior na estação chuvosa do que na estação seca, enquanto a atividade da β-glicosidase e da urease não variou entre as estações.

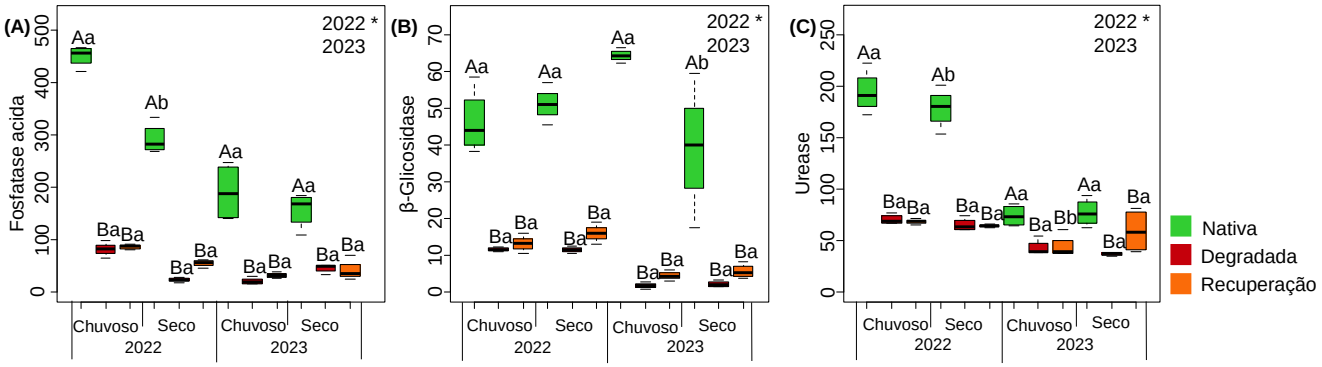


Figura 4. Atividade enzimática de microrganismos do solo influenciada pelos níveis de degradação das áreas e estações ao longo de dois anos. (a) Fosfatase ácida (µg PNP g^{-1} solo h^{-1}), (b) β-glicosidase (µg PNP g^{-1} solo h^{-1}), (c) Urease (µg N-NH_4 g^{-1} solo h^{-1}), durante as estações chuvosa e seca de 2022 e 2023. Parcelas subdivididas foram submetidas ao teste LSD ($p < 0,05$). Letras maiúsculas indicam diferenças entre áreas dentro da mesma estação; letras minúsculas representam diferenças dentro da mesma área entre as duas estações do mesmo ano; * = indica a maior média entre os anos; ns = nenhuma diferença significativa entre as médias dos dois anos.

A estabilidade temporal do carbono da biomassa microbiana, e ambos os quocientes metabólicos e microbianos, bem como a fosfatase ácida, não mostraram diferenças entre os locais (Figura 5). Em contraste, a respiração do solo, β-glicosidase e urease apresentaram variações. A maior estabilidade da respiração do solo e β-glicosidase foi observada em áreas nativas, enquanto a estabilidade da superfície foi maior em áreas restauradas.

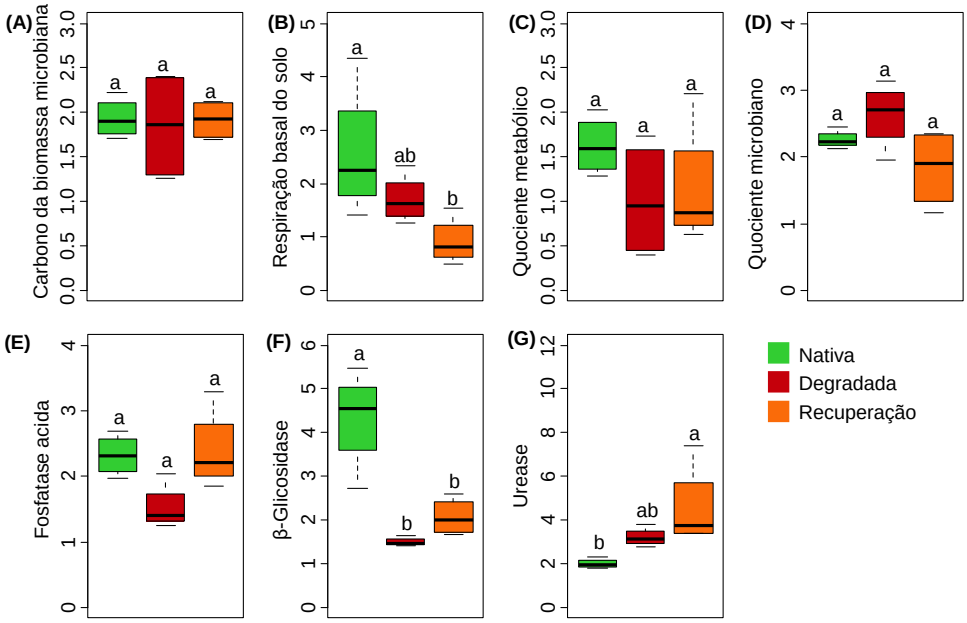


Figura 5. Estabilidade temporal das propriedades microbianas do solo em áreas nativas, degradadas e em restauração durante as estações seca e chuvosa de 2022 e 2023. Médias com as mesmas letras minúsculas não diferem entre si pelo teste LSD ($p < 0,05$).

A análise de componentes principais explicou 68,7% da variância total e agrupou distintamente a área nativa separadamente da área degradada (Figura 6). As áreas em recuperação não se separaram claramente de outros locais. Os drivers microbianos específicos da área foram identificados, com quocientes metabólicos e microbianos agrupados com área degradada, enquanto a biomassa microbiana C, respiração e enzimas agruparam-se com a mata nativas.

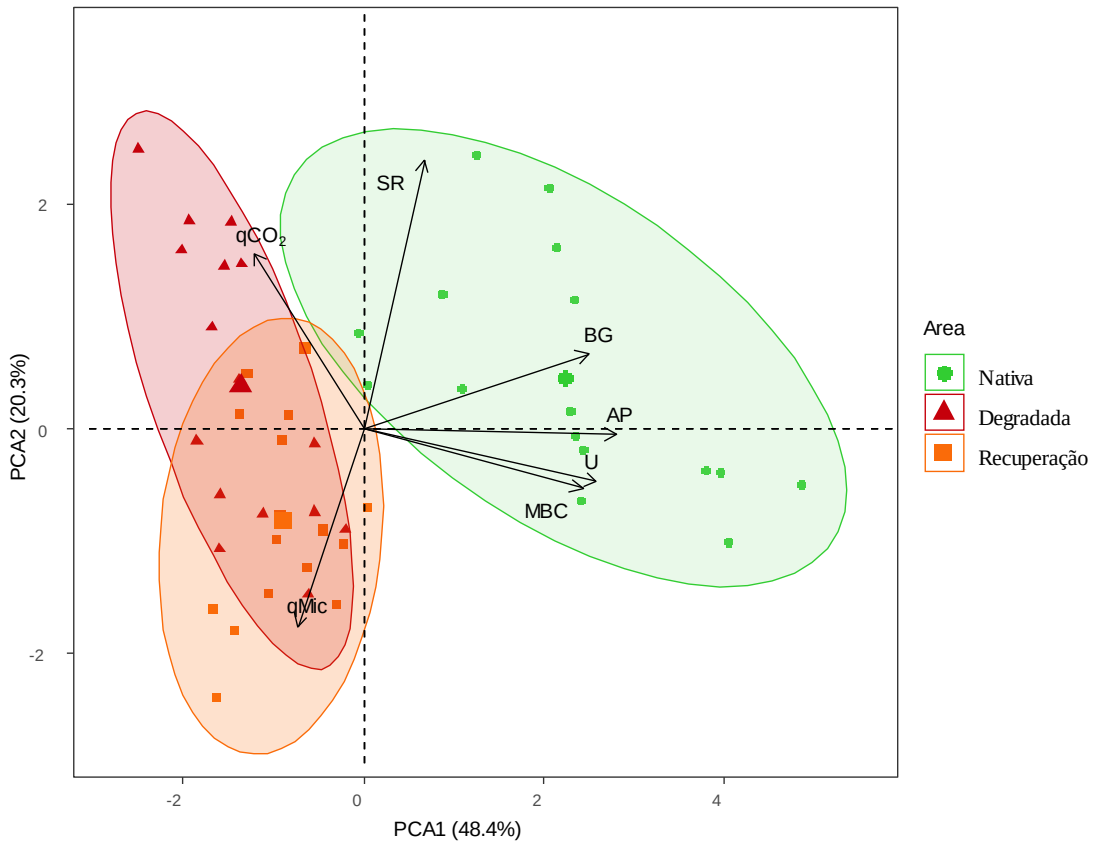


Figura 6. Análise de componentes principais, mostrando as propriedades microbianas e sua relação com as diferentes áreas. Respiração basal do solo (SR), carbono da biomassa microbiana (MBC), quociente microbiano (qMic), quociente metabólico (qCO_2), fosfatase ácida (AP), β-glicosidase (BG) e urease (U).

5. DISCUSSÃO

Neste estudo, avaliamos várias propriedades biológicas, como biomassa microbiana do solo e atividade enzimática, para monitorar o impacto de curto prazo (<5 anos) das estratégias de restauração de solos em áreas degradadas. Ao contrário da nossa hipótese, nossos resultados não mostraram alterações na biomassa microbiana do solo e atividade enzimática após cinco anos de práticas de restauração. Isso sugere que as estratégias de restauração com cordões de pedra e o tempo de avaliação não foram eficiente para produzir efeitos significativos nas propriedades biológicas a curto prazo. Por exemplo, estudos anteriores na região semiárida brasileira observaram alterações significativas na biomassa microbiana do solo somente após vinte anos de restauração (Pereira et al., 2021; Silva et al, 2024).

No entanto, nossos resultados mostraram um efeito sazonal significativo nas propriedades biológicas do solo. Geralmente, valores mais altos para biomassa microbiana do solo e atividade enzimática foram observados durante a estação chuvosa. Isso é esperado, pois a maior umidade e menor temperatura do solo durante a estação chuvosa resulta em maiores valores de biomassa microbiana e atividade enzimática (Costa et al., 2024; Ma et al., 2024).

Diante disso, observamos um efeito mais forte ao comparar locais em 2023 do que em 2022, sugerindo uma possível mudança na biomassa microbiana e atividade enzimática, especialmente ao comparar locais nativos e degradados, e indicando que a degradação da terra deteriora rapidamente as propriedades microbianas. As diferenças no Carbono biomassa microbiana entre as áreas revelam que a remoção da vegetação acelera a perda de C (Tabela 1) e diminui o carbono microbiana enquanto aumenta o quociente respiratório (Gao et al., 2024).

Em áreas degradadas, observou-se uma diminuição significativa no C orgânico do solo devido ao desmatamento e erosão, o que impacta negativamente as comunidades microbianas. Manter a cobertura vegetal em solos semiáridos é essencial para preservar a matéria orgânica do solo por meio da entrada contínua de serapilheira (Mureva et al., 2018; Xun et al.,2018). Esta observação se alinha com nossa descoberta de maior CBM em locais nativos. Enquanto isso, a área de restauração mostra melhora gradual na biomassa microbiana do solo em comparação

com áreas degradadas, confirmando a importância de mitigar a degradação e promover práticas de restauração (Araújo et al.,2024).

A respiração do solo foi maior em locais nativos e degradados. Na mata nativa, essa respiração maior resulta da decomposição acelerada de resíduos orgânicos devido à umidade do solo durante a estação chuvosa. Em áreas degradadas, no entanto, a alta respiração do solo pode ser um indicativo de populações microbianas sob estresse metabólico que resulta em perca de C na forma de CO_2. No caso desse estudo ocorreu em função do desmatamento, o que resultou numa maior temperatura do solo e menor umidade do solo. Portanto, embora a biomassa microbiana tenha diminuído em áreas degradadas, o quociente respiratório aumenta, e sugere estresse microbiano entre microrganismos do solo (Walkiewicz et al., 2021).

Nossos resultados também mostraram matéria orgânica mais estável em locais nativos, indicado por um quociente microbiano menor, enquanto os locais restaurados e degradados exibiram menor estabilidade da matéria orgânica. Conforme também observado por Liu et al. (2021) essa instabilidade provavelmente resulta da perda de matéria orgânica original e da formação inicial de uma nova, porém instável, matéria orgânica.

Em relação à atividade enzimática relacionada à ciclagem de C, N e P (Bayranvand et al.,2021; Araújo et al., 2022), nossos resultados mostraram que a degradação do solo reduziu as atividades de β-glicosidase, urease e fosfatase em comparação a área nativa. Isso confirma que a degradação do solo reduz a capacidade da biomassa microbiana de participar da ciclagem de nutrientes, afetando a fertilidade e a produtividade do solo (Chang et al., 2023; Wu et al., 2020).

Na mata nativa, a cobertura vegetal e a matéria orgânica do solo sustentam a atividade enzimática, enquanto sua remoção promove uma diminuição nas enzimas extracelulares devido à menor disponibilidade de substratos para o metabolismo microbiano (Gao et al., 2014; WANG et al., 2019). As práticas de restauração ainda não aumentaram a atividade enzimática, confirmando que a restauração de curto prazo não altera o estado biológico dos solos degradados.

O carbono da biomassa microbiana e seus índices associados, bem como a fosfatase ácida, demonstraram estabilidade temporal semelhante em todos as áreas, estações e anos. Em contraste, a respiração do solo, a β-glicosidase e a urease

variaram na estabilidade temporal, com a respiração do solo e a β-glicosidase permanecendo estáveis na mata nativa, e a urease mostrando mais estabilidade em área restaurada.

Esses resultados sugerem uma maior resiliência da CBM e da fosfatase na adaptação às mudanças nas condições do solo. Enquanto isso, a respiração do solo e a β-glicosidase são influenciadas por fontes de C que promovem maior estabilidade (Shi et al., 2020), particularmente em locais nativos. Em contraste, a área em recuperação, com a adição inicial de cobertura vegetal e matéria orgânica fresca, contribui para manter os níveis de enzimas relacionadas ao N (Serrano-Grijalva et al., 2024).

No geral, nossos resultados de PCA revelaram uma separação clara entre áreas nativas e degradadas, confirmando o impacto da degradação nos parâmetros biológicos do solo. Assim, a mata nativa suporta indicadores microbianos positivos, como maior carbono biomassa microbiana, respiração e atividade enzimática, enquanto a area degradada apresenta indicadores de estresse microbiano, como alto quociente respiratório. A área em processo de recuperação mostra uma fase de transição, ainda influenciada pelas condições nativas e degradadas.

6. CONCLUSÕES

Este estudo indica que a restauração com uso de cordões de pedra a curto prazo (<5 anos) é insuficiente para restaurar propriedades microbianas em áreas degradadas. Houve um leve padrão na melhoria das propriedades microbianas pela recuperação em comparação com áreas degradadas. Os principais indicadores microbianos, como carbono da biomassa microbiana, respiração do solo e atividade enzimática, apresentaram valores próximo aos das áreas nativas. Esses resultados sugerem que a recuperação de longo prazo pode ser necessária para observar melhorias substanciais nas propriedades microbianas do solo.

7. REFERÊNCIAS

ABDELRAHMAN, M. A. An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, v. 34, n. 3, p. 767-808, 2023. https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3.

ALBUQUERQUE, D. S.; SOUZA, S. D. G. de; SOUZA, A. C. N. de; SOUSA, M. L. M. Desertificationscenario in Brazilian territory and actions to combat the problem in the State of Ceará, Brazilian Northeast. **Sociedade e ambiente no Semiárido**, v. 55, p. 673-696, 2020.

ALEF, K.; NANNIPIERI, P. Methods in applied soil microbiology and biochemistry. (Academic Press, London, 1995).

ANDERSON, T-H.; DOMSCH, K. H. Maintenance carbon requirements of actively metabolizing microbial populations under in situ conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 17, p. 197- 203, 1985.

ARAÚJO, A. S. F.; BONIFACIO, A.; PEREIRA, A. P. A.; MEDEIROS, E. V.; ARAUJO, F. F.; MENDES, L. W. Enzymatic stoichiometry in soils from physiognomies of Brazilian Cerrado. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, n. 2, p. 2735-2742, 2022. https://doi.org/10.1007/s42729-022-00840-w.

ARAÚJO, A. S. F.; CESARZ, S.; LEITE, L. F. C.; BORGES, C. D.; TSAI, S. M.; EISENHAUER, N. Soil microbial properties and temporal stability in degraded and restored lands of Northeast Brazil. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 66, p. 175-181, 2013. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.07.013.

ARAÚJO, A. S. F.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; PEREIRA, A. P. A.; MENDES, L. W. From desertification to restoration in the Brazilian semiarid region: Unveiling the potential of land restoration on soil microbial properties. **Journal of Environmental Managemen**t, v. 351, p. 119746, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119746.

ARAÚJO, A. S. F.; PEREIRA, A. P. A.; MELO, V. M. M.; MEDEIROS, E. V.; MENDES, L. W. Environmental DNA sequencing to monitor restoration practices on soil bacterial and archaeal communities in soils under desertification in the Brazilian semiarid. **Microbial ecology**, v. 85, n. 3, p. 1072-1076, 2023.

ARAÚJO, A.S. F.; DE MEDEIROS, E. V.; COSTA, D. P.; MENDES, L. W.; CHERUBIN, M. R.; ALCANTARA NETO, F.; BEIRIGO, R. M.; LAMBAIS, G. R.; MELO, V. M. M.; NÓBREGA, G. N.; BARBOSA, H. A.; MOTA, J. C. A.; SANTANA, R. M.; KAVAMURA, V. N.; BORGES, W. L.; PEREIRA, A. P. A. Caatinga Microbiome Initiative: disentangling the soil microbiome across areas under desertification and restoration in the Brazilian drylands. **Restoration Ecology**, p. e14298, 2024. https://doi.org/10.1111/rec.14298.

BARBIERI, M., DOSSIM, M. F., DALLA NORA, D., DOS SANTOS, W. B., BEVILACQUA, C. B., DE ANDRADE, N., BOENI, M.; DEUSCHLE, D.; JACQUES, R. J. S.; ANTONIOLLI, Z. I. Ensaio sobre a bioatividade do solo sob plantio direto em sucessão e rotação de culturas de inverno e verão. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 122-134, 2019.

BAYRANVAND, M.; AKBARINIA, M.; SALEHI JOUZANI, G.; GHARECHAHI, J.; BALDRIAN, P. Distribution of soil extracellular enzymatic, microbial, and biological functions in the C and N-cycle pathways along a forest altitudinal gradient. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 660603, 2021. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.660603.

BAZZO, J. C.; SILVA, M. L. N.; FREITAS, D. F.; SOARES, C. R. F. S.; GOMIDE, P. H. O.; SANTOS, S. A.; CARDOSO, E. L. Biomassa e atividade microbiana do solo em diferentes fitofisionomias do Pantanal da Nhecolândia-MS, Brasil.2018.

BEZERRA, F. G. S.; AGUIAR, A. P. D.; ALVALÁ, R. C. D. S.; GIAROLLA, A.; BEZERRA, K. R. A., LIMA, P. V. P. S.; NASCIMENTO, F. R.; ARAI, E. Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. **Ecological Indicators**, v. 117, p. 106579, 2020. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106579.

BORRELLI, P.; ROBINSON, D. A.; FLEISCHER, L. R.; LUGATO, E.; BALLABIO, C.; ALEWELL, C.; MEUSBURGER, C.; MODUGNO, S.; SCHÜTT, B.; FERRO, V.; BAGARELLO, V.; OOST, K. V.; PANAGOS, P. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion. **Nature communications**, v. 8, n. 1, p. 1-13, 2017. https://doi.org/10.1038/s41467-017-02142-7.

CHANG, W.; MA, W.; SONG, L.; TANG, Y.; LONG, Y.; XU, G.; YUAN, J. Responses of soil N-cycle enzyme activities to vegetation degradation in a wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. **Frontiers in Ecology and Evolution**, v. 11, p. 1210643, 2023. https://doi.org/10.3389/fevo.2023.1210643.

CHETTRI, D.; SHARMA, B.; VERMA, A. K.; VERMA, A. K. (2021). Significance of Microbial Enzyme Activities in Agriculture. In: SONI, R., SUYAL, D. C., BHARGAVA, P., GOEL, R. (eds) Microbiological Activity for Soil and Plant Health Management. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2922-8_15.

COSTA, R. M., ARAUJO, E. M. B., SILVA, D. E. O., ROCHA, S. M. B., BONIFACIO, A., SOUSA, R. S., PEREIRA, A. P. A.; MEDEIROS, E. V.; SAGRILO, E.; OLIVEIRA JUNIOR, J. O. L.; SOUZA, H. A.; ARAUJO, A. S. F. Seasonal responses of soil microbial biomass C and enzymatic activity comparing no-tillage and integrated crop-livestock systems. **European Journal of Soil Biology**, v. 121, p. 103628, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2024.103628.

DAVE, R.; SAINT-LAURENT, C.; MORAES, M.; SIMONIT, S.; RAES, L.; KARANGWA, C. (2018) Barómetro de progresso do Desafio de Bonn: Relatório de foco de 2017. Gland, Suíça UICN, 36 p. Disponível em: https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2017-060-Pt.pdf. Acessado em 24 de dezembro de 2024.

DENGIZ, O.; TURAN, D. I. Soil quality assessment for desertification based on multi-indicators with the best-worst method in a semi-arid ecosystem. **Journal of Arid Land**, v. 15, n. 7, p. 779-796, 2023.https://doi.org/10.1007/s40333-023-0020-9.

DOBROVOL'SKAYA, T. G.; ZVYAGINTSEV, D. G.; CHERNOV, I. Y.; GOLOVCHENKO, A. V.; ZENOVA, G. M.; LYSAK, L. V.; MANUCHAROVA, N. A.; POLIANSKAYA, L. M.; UMAROV, M. M. The role of microorganisms in the ecological functions of soils. **Eurasian soil science**, v. 48, p. 959-967, 2015. https://doi.org/10.1134/S1064229315090033.

EISENHAUER, N.; MILCU, A., ALLAN, E.; NITSCHKE, N.; SCHERBER, C., TEMPERTON, V.; WEIGELT, A.; WEISSER, W. W. SCHEU, S. Impacto de invertebrados acima e abaixo do solo na estabilidade temporal e espacial de pastagens de diversidade diferente. **Journal of Ecology**, v. 99, n. 2, p. 572-582, 2011. https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2010.01783.x.

EISENHAUER, N.; MILCU, A.; SABAIS, A. C.; BESSLER, H.; WEIGELT, A.; ENGELS, C.; SCHEU, S. Plant community impacts on the structure of earthworm communities depend on season and change with time. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 12, p. 2430-2443, 2009. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.09.001.

EIVAZI, F.; TABATABAI, M. A. Glucosidases and galactosidases in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 20, n. 5, p. 601-606, 1988.https://doi.org/10.1016/0038-0717(88)90141-1.

FAPEPI- Fundação de Amparo a Pesqusa. FAPEPI investe em projeto de revitalização no semiárido piauiense para recuperação da Biodiversidade do Solo. (2024). Disponível em: https://www.fapepi.pi.gov.br/fapepi-investe-em-projeto-de-revitalizacao-no-semiarido-piauiense-para-recuperacao-da-biodiversidade-do-solo/. Acessado em:11 de dezembro de 2024.

FAO. Alerta sobre degradação de um terço dos solos do planeta. United Nations News (2021).Disponivel em: https://news.un.org/pt/story/2021/12/1773222. Acessado em: 11 de dezembro de 2024.

FAO-Food and Agriculture Organization of the United Nation. Status of the World's Soil Resources (2015). Disponível em: https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/b632616f-b998-4f35-b657-e6919f4afe89/content. Acessado em: 11 de dezembro de 2024.

FERREIRA, A. S.; CAMARGO, F. A. O.; VIDOR, C. Utilização de micro-ondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 23, p. 991-996, 1999.

FIERER, N.; WOOD, S. A.; MESQUITA, C. P. B. How microbes can, and cannot, be used to assess soil health. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 153, p. 108111, 2021. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108111.

GAO, H. N.; ZHANG YONG, Z. Y.; QIN JIAHAI, Q. J.; WANG ZHIJIANG, W. Z. Organic carbon distribution and enzyme activities of different degraded meadows soil in upstream of Heihe of Qilian Mountains. **Acta Agrestia Sinica** v. 22, p. 283, 2014.

GAO, W.; MA, T.; SHI, B.; YANG, Z.; LI, Y.; ZHU, J.; HE, J. S. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the mineralization potential of soil organic carbon and the corresponding regulations in the Tibetan alpine grassland. **Applied Soil Ecology**, v. 196, p. 105314, 2024. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105314.

GAY-DES-COMBES, J. M.; SANZ CARRILLO, C.; ROBROEK, B. J. M.; JASSEY, V. E. J.; MILLS, R. T. E.; ARIF, M. S.; FALQUET, L.; FROSSARD, E.; BUTTLER, A. Tropical soils degraded by slash-and-burn cultivation can be recultivated when amended with ashes and compost. **Ecology and evolution**, v. 7, n. 14, p. 5378-5388, 2017. https://doi.org/10.1002/ece3.3104.

HUANG, W.; HE, Y.; WANG, H.; ZHAO, X.; ZHU, Y. Efeitos de longo prazo da restauração nas ligações entre a biodiversidade acima e abaixo do solo em pastagens arenosas degradadas de Horqin, norte da China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1128187, 2023. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1128187.

IBGE- instituto brasileiro de geografia e estatística. IBGE atualiza recortes geográficos de referência para divulgação dos resultados do Censo 2022. (2023) Disponivel em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/37430-ibge-atualiza-recortes-geograficos-de-referencia-para-divulgacao-dos-resultados-do-censo-2022. Acessado em 20 de dezembro de 2024.

Instituto brasileiro de geografia e estatística (IBGE) Biomas e Sistema Costeiro-Marinho do Brasil (2019). Disponível em: https://www.ibge.gov.br/apps/biomas/pdf/Lim08_BiomSist.pdf. Acessado em 23 de dezembro de 2024.

IPBES (2018). Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services – The Assessment Report on Land Degradation and Restoration. IPBES secretariat, Bonn, Germany. 44p. Disponivel em: https://files.ipbes.net/ipbes-web-prod-public-files/spm_3bi_ldr_digital.pdf. Acessado em: 10 janeiro de 2025.

KANDELER, Ellen; GERBER, H. Short-term assay of soil urease activity using colorimetric determination of ammonium. **Biology and fertility of Soils**, v. 6, p. 68-72, 1988. https://doi.org/10.1007/BF00257924.

KUDEYAROV, V. N. Soil respiration and biogenic carbon dioxide sink in the territory of Russia: an analytical review. **Eurasian soil science**, v. 51, p. 599-612, 2018. https://doi.org/10.1134/S1064229318060091.

LACERDA-JÚNIOR, G. V.; NORONHA, M. F.; CABRAL, L.; DELFORNO, T. P.; DE SOUSA, S. T. P.; FERNANDES-JÚNIOR, P. I.; MELO, I. S. OLIVEIRA, V. M. (2019). Land use and seasonal effects on the soil microbiome of a Brazilian dry forest. **Frontiers in microbiology**, v. 10, p. 648, 2019. https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.00648.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, n. 5, p. 5875-5895, 2015. https://doi.org/10.3390/su7055875.

LIMA, A. Y. V.; CHERUBIN, M. R.; SILVA, D. F.; MOTA, J. C. A.; SILVA, F. G. M.; ARAUJO, A. S. F.; MELO, V. M. M.; VERMA, J. P.; PEREIRA, A. P. A. Grazing exclusion restores soil health in Brazilian drylands under desertification process.

Applied Soil Ecology, v. 193, p. 105107, 2024. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105107.

LIU, B.; BEI, Q.; WANG, X.; LIU, Q.; HU, S.; LIN, Z.; ZHANG, Y.; LIN, X.; JIN, H.; HU, T.; XIE, Z. Microbial metabolic efficiency and community stability in high and low fertility soils following wheat residue addition. **Applied Soil Ecology**, v. 159, p. 103848, 2021. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103848.

MA, N.; JI, Y.; DONG, H.; ZHU, J.; PENG, Y.; YUE, K.; ZHANG H.; MA, Y.; ZHENG, T.; WU, Q.; LI, Y. Effects of seasonal precipitation regimes on microbial biomass and extracellular enzyme activity during shrub foliar litter decomposition in a subtropical forest. **Science of The Total Environment.**, v. 932, p. 173098, 2024. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.173098.

MANDAL, D.; CHANDRAKALA, M.; ALAM, N. M.; ROY, T.; MANDAL, U. Assessment of soil quality and productivity in different phases of soil erosion with the focus on land degradation neutrality in tropical humid region of India. **Catena**, v. 204, p. 105440, 2021. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105440.

MAPBIOMAS (2024). MapBiomas lança plataforma inédita que pela primeira vez avalia a degradação em todos os biomas brasileiros. Disponivel em: https://brasil.mapbiomas.org/2024/07/05/ate-25-da-vegetacao-nativa-do-brasil-pode-estar-degradada/. Acessado em: 20/12/2024.

MARENGO, J. A.; GALDOS, M. V.; CHALLINOR, A.; CUNHA, A. P.; MARIN, F. R.; VIANNA, M. D. S.; ALVALA, R. C. S.; ALVES, L. M.; MORAES, O. L.; BENDER, F. Drought in Northeast Brazil: A review of agricultural and policy adaptation options for food security. **Climate Resilience and Sustainability**, v. 1, n. 1, p. e17, 2022. https://doi.org/10.1002/cli2.17.

MEENA, A.; RAO, K. S. Assessment of soil microbial and enzyme activity in the rhizosphere zone under different land use/cover of a semiarid region, India. **Ecological Processes**, v. 10, p. 1-12, 2021. https://doi.org/10.1186/s13717-021-00288-3.

Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima (MMA), 2024.Caatinga.disponivel em: https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/biodiversidade-e-biomas/biomas-e-ecossistemas/biomas/caatinga. Acessado em 23 de dezembro de 2024.

MMA- Ministério do Meio Ambiente. MMA recupera áreas degradadas no Piauí: Estratégia de combate à desertificação e redução da vulnerabilidade climática começará a ser implantada no estado a partir desta segunda (2018). Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/informma/item/14778-noticia-acom-2018-05-3007.html. Acessado em 23 de dezembro de 2024.

MMA-Ministério do meio ambiente. Acordo de Paris 2017. Disponível em: https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html.

MMA-Ministério Meio Ambiente. Unidades de Recuperação de Áreas Degradadas e Redução da Vulnerabilidade Climática (URAD) na região semiárida brasileira. https://sema.ce.gov.br/wp-ontent/uploads/sites/36/2017/08/PROJETO-URAD (2017).

MORAES, J. B.; WANDERLEY, H. S.; DELGADO, R. C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 116, n. 2, p. 1463-1483, 2023. https://doi.org/10.1007/s11069-022-05724-x.

MUREVA, A.; WARD, D.; PILLAY, T.; CHIVENGE, P.; CRAMER, M. Soil organic carbon increases in semi-arid regions while it decreases in humid regions due to woody-plant encroachment of grasslands in South Africa. **Scientific reports**, v. 8, n. 1, p. 15506, 2018. https://doi.org/10.1038/s41598-018-33701-7.

NANNIPIERI, P.; ASCHER-JENULL, J.; CECCHERINI, M. T.; GIAGNONI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. NANNIPIERI, P.; ASCHER, J.; CECCHERINI, MT, LANDI, L.; PIETRAMELLARA, G.; RENELLA, G. 2003. Microbial diversity and soil functions. **European Journal of Soil Science**, 54, 655-670. European Journal of Soil Science, v. 68, n. 1, 2017.

NDABANKULU, K.; EGBEWALE, S. O.; TSVUURA, Z.; MAGADLELA, A. Soil microbes and associated extracellular enzymes largely impact nutrient bioavailability in acidic and nutrient poor grassland ecosystem soils. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 12601, 2022.

NIKITIN, D. A.; SEMENOV, M. V.; CHERNOV, T. I.; KSENOFONTOVA, N. A.; ZHELEZOVA, A. D.; IVANOVA, E. A.; KHITROV, N. B.; STEPANOV, A. L. Microbiological indicators of soil ecological functions: a review. **Eurasian Soil Science**, v. 55, n. 2, p. 221-234, 2022. https://doi.org/10.1134/S1064229322020090.

NUNES, J. S.; ARAÚJO, A. S. F.; NUNES, L. A. P. L.; LIMA, L. M.; CARNEIRO, R. F. V.; SALVIANO, A. A. C.; TSAI, S. M. Impact of land degradation on soil microbial biomass and activity in Northeast Brazil. **Pedosphere**, v. 22, n. 1, p. 88-95, 2012. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60194-X.

OLIVEIRA, A. F. N.; DE SOUSA, L. I. S.; COSTA, V. A. S.; ANDRADE, J. V. T.; LIMA, L. A. L.; SALES, P. A. F.; SILVA, D. F.; PEREIRA, A. P. A.; MELO, V. M. M. Long-term effects of grazing on the biological, chemical, and physical soil properties of the Caatinga biome. **Microbiological Research**, v. 253, p. 126893, 2021. https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126893.

PEREIRA, A. P. A.; LIMA, L. A. L.; BEZERRA, W. M.; PEREIRA, M. L.; NORMANDO, L. R. O.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, J. G. B.; ARAÚJO, A. S. F.; MELO, V. M. M. Grazing exclusion regulates bacterial community in highly degraded semiarid soils from the Brazilian Caatinga biome. **Land Degradation & Development**, v. 32, n. 6, p. 2210-2225, 2021.https://doi.org/10.1002/ldr.3893.

PEREIRA, A. P. A.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, F. A. S.; ANTUNES, J. E. L.; MELO, V. M. M.; ARAUJO, A. S. F. Land degradation affects the microbial communities in the Brazilian Caatinga biome. **Catena**, v. 211, p. 105961, 2022. https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105961.

RIBEIRO, L. L. O.; CADENA, A. L. S.; WEBER, E. S.; SPOHR, E.; ALMEIDA, K. F. D. Considerações sobre os indicadores biológicos de qualidade do solo. In: OPEN SCIENCE RESEARCH III. Editora Científica Digital, p. 86-91, 2022.

SALGADO, E. V.; ANDRADE, E. M.; HEVIA, J. N.; NUNES, E. P.; RODRIGUES, M. M. A. Padrões de precipitação e contribuição da serapilheira na floresta tropical seca da caatinga. **Revista Ciência Agronômica**, v. 46, p. 299-309, 2015. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150009.

SCHLOTER, M.; NANNIPIERI, P.; SORENSEN, S. J.; ELSAS, J. D. V. Microbial indicators for soil quality. **Biology and Fertility of Soils**, v. 54, p. 1-10, 2018. https://doi.org/10.1007/s00374-017-1248-3.

SERRANO-GRIJALVA, L.; PUTTEN, W. H. V. D.; OCHOA-HUESO, R.; MARGENOT, A. J.; RIJSSEL, S. Q. V.; KOORNEEF, G. J.; VEEN, G. C. Soil extracellular enzyme activity increases during the transition from conventional to organic farming. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 375, p. 109202, 2024. https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.109202.

SHI, P.; QIN, Y.; LIU, Q.; ZHU, T.; LI, Z.; LI, P.; REN, Z.; LIU, Y.; WANG, F. Soil respiration and response of carbon source changes to vegetation restoration in the Loess Plateau, China. **Science of the Total Environment**, v. 707, p. 135507, 2020. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135507.

SILVA, D. E. O.; COSTA, R. M.; CAMPOS, J. R.; ROCHA, S. M. B.; PEREIRA, A. P. A.; MELO, V. M. M.; OLIVEIRA, F. A. S.; ALCÂNTARA NETO, A.; MENDES, L. W.; ARAUJO, A. S. F. Short-term restoration practices change the bacterial community in degraded soil from the Brazilian semiarid. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 6845, 2024. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57690-y.

SILVA, D. F.; ARAUJO, A. S. F.; LIMA, A. Y. V.; MOTA, J. C. A.; NASCIMENTO, Í. V.; QUEIROZ, A. S.; MEDEIROS, E. V.; COSTA, P. D.; MELO, V. M.M.; CARDOSO, E. J. B. N.; VERMA, J. P.; SMITH, G. R.; MENDES, L. W. PEREIRA, A. P. A. Enzymatic stoichiometry in degraded soils after two decades of restoration in a Brazilian semiarid region. **Catena**, v. 236, p. 107768, 2024. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107768.

SILVA, D. F.; MOREIRA, J. V.; DE SOUSA, L. I. S.; SANTANA, M. C.; MOTA, J. C. A.; QUEIROZ, A. S.; PEREIRA, A. P. A. Arbuscular mycorrhizal fungi community in soils under desertification and restoration in the Brazilian semiarid. **Microbiological Research**, v. 264, p. 127161, 2022.

SVEJCAR, L. N.; KILDISHEVA, O. A. The age of restoration: Challenges presented by dryland systems. **Plant Ecology**, v. 218, p. 1-6, 2017. https://doi.org/10.1007/s11258-016-0694-6.

SYLVESTER, J., VALENCIA, J.; VERCHOT, L. V.; CHIRINDA, N.; SANCHEZ, M. A. R.; QUINTERO, M.; CASTRO-NUNEZ, A. A. rapid approach for informing the prioritization of degraded agricultural lands for ecological recovery: A case study for Colombia. **Journal for Nature Conservation**, v. 58, p. 125921, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2020.125921.

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil biology and biochemistry**, v. 1, n. 4, p. 301-307, 1969.

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012.

UNCCD - United Nations Convention to Combat Desertification (2018). Brazil sets up a novel model to reverse desertification. Disponível em: https://www.unccd.int/news-events/brazil-sets-novel-model-reverse-desertification.

UNCCD- United Nations Convention to Combat Desertification In this triple COP year, leaders must align efforts to ensure planetary health (2024). Disponivel em: https://www.unccd.int/news-stories/stories/triple-cop-year-leaders-must-align-efforts-ensure-planetary-health. Acessado em: 02 de janeiro de 2025.

VANCE, E. D.; BROOKES, Peter C.; JENKINSON, D. S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil biology and Biochemistry**, v. 19, n. 6, p. 703-707, 1987. https://doi.org/10.1016/0038-0717(87)90052-6.

VERDUM, R.; VIEIRA, C. L.; CANEPPELE, J. C. G. Métodos e técnicas para o controle da erosão e conservação do solo. IGEO/UFRGS, 2016. 50 p.

VIEIRA, R. D. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; OLIVEIRA, S. B. P.; SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, n. 1, p. 347-360, 2015. https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015.

WALKIEWICZ, A.; BIEGANOWSKI, A.; RAFALSKA, A.; KHALIL, M. I.; OSBORNE, B. Contrasting effects of forest type and stand age on soil microbial activities: An analysis of local scale variability. **Biology**, v. 10, n. 9, p. 850, 2021. https://doi.org/10.3390/biology10090850.

WANG, Y.; YIN, Y.; LI, S. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees. **Ecology and Environment**, v. 28, n. 6, p. 1108, 2019. https://doi.org/10.16258/j.cnki.1674-5906.2019.06.005.

WU, J.; WANG, H.; LI, G.; MA, W.; WU, J.; GONG, Y.; XU, G. Vegetation degradation impacts soil nutrients and enzyme activities in wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. **Scientific reports**, v. 10, n. 1, p. 21271, 2020. https://doi.org/10.1038/s41598-020-78182-9.

XUN, W.; YAN, R.; REN, Y.; JIN, D.; XIONG, W.; ZHANG, G.; CUI, Z.; XIN, X.; ZHANG, R. Grazing-induced microbiome alterations drive soil organic carbon turnover and productivity in meadow steppe. **Microbiome**, v. 6, p. 1-13, 2018. https://doi.org/10.1186/s40168-018-0544-y.

YAO, B.; WANG, X.; LI, Y.; LIAN, J.; LI, Y.; LUO, Y.; LI, Y. Soil extracellular enzyme activity reflects the change of nitrogen to phosphorus limitation of microorganisms during vegetation restoration in semi-arid sandy land of northern China. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, p. 1298027, 2023. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1298027.