



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS DA SAÚDE
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS
CURSO DE FARMÁCIA

AMANDA ONDURAS DE ANDRADE

**MICROORGANISMOS NATIVOS DOS SOLOS DA CAATINGA: UMA REVISÃO
NARRATIVA SOBRE SUA DIVERSIDADE E POTENCIAL ECOLÓGICO**

RECIFE
2024

AMANDA ONDURAS DE ANDRADE

**MICROORGANISMOS NATIVOS DOS SOLOS DA CAATINGA: UMA REVISÃO
NARRATIVA SOBRE SUA DIVERSIDADE E POTENCIAL ECOLÓGICO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Farmácia da
Universidade Federal de Pernambuco,
como requisito parcial para obtenção do
título de bacharel.

Orientador: Prof. Dr. José Lamartine
Soares-Sobrinho

Coorientadora: Antônia Carla de Jesus
Oliveira

RECIFE
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Andrade, Amanda Onduras de.

Microrganismos nativos dos solos da caatinga: uma revisão narrativa sobre sua diversidade e potencial ecológico. / Amanda Onduras de Andrade. - Recife, 2024.

35p. : il.

Orientador(a): Jose Lamartine Soares Sobrinho

Coorientador(a): Antonia Carla de Jesus Oliveira

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Ciências da Saúde, Farmácia - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Caatinga. 2. Microrganismos do solo. 3. Mudanças climáticas. 4. Degradação do solo. 5. Agricultura regenerativa. I. Sobrinho, Jose Lamartine Soares. (Orientação). II. Oliveira, Antonia Carla de Jesus. (Coorientação). IV. Título.

610 CDD (22.ed.)

ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO –
TCC – DO CURSO DE BACHARELADO EM FARMÁCIA
DO DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS FARMACÊUTICAS DO CENTRO
DE CIÊNCIAS DA SAÚDE DA UNIVERSIDADE FEDERAL
DE PERNAMBUCO, NO DIA 02 DE DEZEMBRO DE 2024.

Aos dois dias do mês de dezembro de dois mil e vinte e quatro, às oito horas, via Google Meet, em sessão remota, teve início a defesa do TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO - TCC intitulado **“MICRORGANISMOS NATIVOS DOS SOLOS DA CAATINGA: UMA REVISÃO NARRATIVA SOBRE SUA DIVERSIDADE E POTENCIAL ECOLÓGICO”**, do(a) aluno(a) Amanda Onduras de Andrade sob a orientação do(a) Prof. Dr. José Lamartine Soares Sobrinho. O(a) aluno(a) cumpriu todos os demais requisitos regimentais para a obtenção do grau de Farmacêutico(a). Após cumpridas as formalidades, o(a) candidato(a) foi convidado(a) a discorrer sobre o conteúdo do seu Trabalho de Conclusão do Curso. Concluída a explanação, o(a) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora que, em seguida, reuniu-se para deliberar e conceder ao(à) mesmo(a) a menção (Aprovado(a) ou Reprovado(a)) Aprovado Nota: 9,5 do referido Trabalho de Conclusão do Curso. E, para constar, lavrei a presente Ata que vai por mim assinada, Coordenador do Curso de Bacharelado em Farmácia, e pelos membros da Banca Examinadora.

Recife, 02 de dezembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

Professor Doutor Jose Lamartine Soares Sobrinho

Documento assinado digitalmente
 JOSE LAMARTINE SOARES SOBRINHO
Data: 06/12/2024 12:00:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Mestra Jucielma Silva de Lima

Documento assinado digitalmente
 JUCIELMA SILVA DE LIMA
Data: 06/12/2024 09:23:13-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutora Joandra Maísa da Silva Leite

Documento assinado digitalmente
 JOANDRA MAISA DA SILVA LEITE
Data: 06/12/2024 09:49:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Doutora Amanda Damasceno Leão

Ao Senhor Jesus que me deu forças e oportunidades para que isso pudesse se tornar realidade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar este trabalho expressando a minha profunda gratidão a Deus, pois ao longo de toda minha vida sempre senti a sua presença ao meu lado, me dando força para alcançar os objetivos que Ele mesmo coloca em meu coração. Gostaria de agradecer a todos que estiveram ao meu lado durante esse processo, pois sem a presença de cada um certamente eu não teria chegado tão longe.

Expresso a minha gratidão ao Nicolas, meu esposo, que está sempre ao meu lado, me dando apoio em minhas decisões e me ajudando a pensar com clareza. Agradeço a Joseli e Mariana, minha mãe e irmã, que sempre estiveram ao meu lado, dando força, me escutando e me estimulando a nunca desistir. Gostaria de agradecer ao meu padrasto Antônio pelo cuidado que ele tem por mim e pela disponibilidade de ter sempre me buscado tarde da noite no cursinho.

É com profundo reconhecimento que agradeço e homenageio a minha finada tia Edilma, que foi um grande apoio ao longo de toda a minha vida, financiou os meus estudos, sempre acreditou que eu terei um futuro brilhante e me acolheu em sua casa, que era mais próxima da universidade, para que eu pudesse estudar mais.

Dirijo meus agradecimentos aos amigos e amigas que fiz ao longo do curso, pois foram felicidade em momentos de tristeza e tornaram a experiência da universidade ainda mais especial. Agradeço às minhas amigas Áquila, Heloísa e Lavínia que estiveram ao meu lado na finalização do curso, sempre me incentivando a continuar.

Agradeço à minha primeira orientadora de PIBIC, Priscila Gubert, que me ensinou tudo que sei sobre escrita científica e desenho experimental, que têm sido tão importantes ao longo de minha formação. Também agradeço ao Conrado, que alegrou os meus dias em meio ao enfrentamento da Covid-19. Agradeço a todos os integrantes do Núcleo de Controle de Qualidade de Medicamentos Correlatos (NCQMC), que me aceitaram e me acolheram no laboratório.

Reconheço e agradeço aos meus orientadores Lamartine, Mônica e especialmente à minha co-orientadora Carla Oliveira, que sempre teve muita paciência e cuidado comigo. Gostaria de reforçar que sem o apoio de vocês eu não teria tantas conquistas, por isso manifesto a minha sincera gratidão.

“A natureza é o médico de Deus. O ar puro, a radiosa luz solar, as flores e árvores, os pomares e vinhas e o exercício ao ar livre nessa atmosfera são salutareis e vivificantes”.

(Ellen White, Ciência do bom viver, p. 264.)

RESUMO

O Semiárido Brasileiro é uma região rica em biodiversidade que tem como principal bioma a Caatinga. A flora e a fauna possuem comportamentos adaptativos para se protegerem das temperaturas extremas. O clima da região conta com a irregularidade das chuvas e elevadas taxas de evapotranspiração, causando longos períodos de estiagem. A economia consiste na agropecuária e extrativismo, prevalecendo a agricultura de subsistência. E os solos variam de argilosos e ricos em nutriente a arenosos com baixa fertilidade. Porém, apesar da diversidade, a Caatinga sofre intensamente com as consequências das mudanças climáticas e do mau uso dos recursos naturais, se tornando o bioma mais susceptível a desertificação do Brasil. O solo é composto por milhões de microrganismos, sendo as bactérias e fungos os mais importantes para a sua manutenção. Esses seres têm papel fundamental na fixação e liberação do carbono atmosférico, sendo as perturbações dessas comunidades causadoras de alterações no ciclo do carbono, intensificando as mudanças climáticas. O conhecimento das espécies microbianas nativas é essencial para o desenvolvimento de tecnologias que possam aplicá-las para a recuperação ambiental. Com esse propósito, essa revisão investiga o papel dos microrganismos na manutenção da qualidade do solo e na adaptação às mudanças climáticas, tendo como enfoque o bioma Caatinga. Assim, realizou-se uma análise crítica da literatura acadêmica acerca da importância dos microrganismos para o solo e para a conservação do bioma Caatinga, na forma de uma revisão narrativa, visando estimular o aprofundamento na temática e a implementação técnicas e tecnologias sustentáveis. A partir disso, os seguintes resultados foram encontrados: a) as espécies microbianas são essenciais para a manutenção do solo; b) são necessárias análises genéticas para a identificação das espécies nativas do bioma; c) análises metabolômicas são importantes para determinar quais os mecanismos bacterianos causados pelas mudanças ambientais; d) a orientação dos agricultores na implementação de técnicas de agricultura ecologicamente corretas são necessárias para minimizar os impactos ao solo; e) é indispensável a implementação de ferramentas biotecnológicas utilizando microrganismos nativos, a fim de minimizar a desertificação dos solos do bioma Caatinga. Por fim, este trabalho reconhece a importância dos microrganismos nativos da Caatinga para a manutenção do bioma e

pretende estimular o desenvolvimento de novas ferramentas biotecnológicas que possam ser aplicadas para a mitigação das alterações climáticas.

Palavras-chave: Caatinga; microrganismos do solo; degradação do solo; ciclo do carbono; agricultura regenerativa; mudanças climáticas.

ABSTRACT

The Brazilian semi-arid region is rich in biodiversity and its main biome is the Caatinga. The flora and fauna have adaptive behaviors to protect themselves from extreme temperatures. The region's climate is characterized by irregular rainfall and high evapotranspiration rates, causing long periods of drought. The economy consists of agriculture and extractives, with subsistence farming prevailing. The soils vary from clayey and nutrient-rich to sandy with low fertility. However, despite its diversity, the Caatinga is suffering intensely from the consequences of climate change and the misuse of natural resources, making it the biome most susceptible to desertification in Brazil. The soil is made up of millions of microorganisms, the most important of which are bacteria and fungi. These beings play a fundamental role in fixing and releasing atmospheric carbon, and disturbances to these communities cause alterations in the carbon cycle, intensifying climate change. Knowledge of native microbial species is essential for the development of technologies that can be applied to environmental recovery. To this end, this review investigates the role of microorganisms in maintaining soil quality and adapting to climate change, focusing on the Caatinga biome. Thus, a critical analysis of the academic literature on the importance of microorganisms for the soil and the conservation of the Caatinga biome was carried out, in the form of a narrative review, to stimulate further research into the subject and the implementation of sustainable techniques and technologies. From this, the following results were found: a) microbial species are essential for soil maintenance; b) genetic analyses are needed to identify species native to the biome; c) metabolomic analyses are important to determine which bacterial mechanisms are caused by environmental changes; d) guidance for farmers in implementing ecologically correct farming techniques is needed to minimize impacts on the soil; e) it is essential to implement biotechnological tools using native microorganisms to minimize the desertification of soils in the Caatinga biome. Finally, this work recognizes the importance of native Caatinga microorganisms for maintaining the biome. It aims to stimulate the development of new biotechnological tools that can be applied to mitigate climate change.

Key-words: Caatinga; soil microorganisms; degraded soil; carbon cycle; regenerative agriculture; climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: A dança dos ventos inexistentes.	17
Figura 2: Montes ressecados.	18
Figura 3: O lar da dona Maria.....	19
Figura 4: grupo de Implementação da Cajucultura Regenerativa, Caraúbas, Apodi, RN.	20
Figura 5: A estrada da monocultura.	21
Figura 6: Ciclo do carbono com os principais processos realizados pelos microrganismos do solo.....	23
Figura 7: Sobrevivência.....	25

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. METODOLOGIA.....	15
3.1 QUESTÕES NORTEADORAS	15
3.2 BUSCA NA LITERATURA.....	15
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	16
4.1 CARACTERÍSTICAS DA CAATINGA NORDESTINA	16
4.2 TÉCNICAS PARA MELHORIA DO CULTIVO E MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	19
4.3 IMPORTÂNCIA DOS MICRORGANISMOS NO CICLO DO CARBONO	22
4.4 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AÇÃO NOS MICRORGANISMOS	24
4.5 COMUNIDADES FÚNGICAS EM SOLOS DO BIOMA CAATINGA	26
4.6 COMUNIDADES BACTERIANAS EM SOLOS DO BIOMA CAATINGA.....	28
5. CONCLUSÃO.....	31

1. INTRODUÇÃO

A Caatinga é um bioma exclusivamente brasileiro, caracterizado por ser o bioma semiárido mais rico em biodiversidade do mundo (Brasil, 2022). O bioma conta com temperaturas extremas e longos períodos de estiagem, chuvas irregulares e elevadas taxas de evapotranspiração. A principal atividade econômica da região é a agropecuária, que pode ocorrer em propriedades rurais de grande, médio e pequeno porte, prevalecendo a familiar de subsistência (Embrapa territorial, 2022). Os solos da região podem apresentar diferentes características, como ser argilosos e fértil, ou arenosos com baixa fertilidade. As espécies animais e vegetais possuem mecanismos adaptativos para os climas extremos. Apesar das suas características de resistência o bioma Caatinga enfrenta sérios desafios que ameaçam sua preservação, como a suscetibilidade significativa à desertificação.

As atividades humanas como a agricultura de baixa tecnologia, pecuária extensiva e extrativismo insustentável, já alteraram 80% da cobertura original da Caatinga, provocando a degradação desse bioma e processos de desertificação (Brasil, 2022). As mudanças climáticas como redução das chuvas prejudicam mais intensamente o bioma Caatinga, gerando impactos socioeconômicos, causando insegurança entre os agricultores familiares (IPCC, 2022). Além disso, grande parte da comunidade envolvida na agricultura de subsistência carece de orientações adequadas sobre o preparo da terra, frequentemente realizando o revolvimento do solo e queimadas após a colheita (Pereira, *et al.*, 2022). A monocultura, os agrotóxicos e o preparo da terra estão associados a transformações e incompatibilidades entre os microrganismos do solo (Ruan *et al.*, 2023; Walkup; Morrissey, 2024).

As comunidades microbianas do solo são compostas por milhões de bactérias, arqueas, fungos, vírus e microeucariotos. Sendo as bactérias e fungos os microrganismos mais presentes e importantes para a manutenção do solo (Kuzikov e Pausch, 2018; Mason *et al.*, 2022). As bactérias ou Eubactérias são seres pertencentes ao Reino Monera, que são organismos procariontes, unicelulares, autótrofos ou heterótrofos. Já os fungos são classificados como Reino Fungi, composto por seres eucariontes unicelulares ou pluricelulares (Carvalho, 2010).

As comunidades microbianas do solo são essenciais para desenvolvimento saudável das terras e sua alteração podem causar impactos negativos ao solo como a improdutividade, modificações na fixação dos gases de efeito estufa (GEEs), aumento da incidência de doenças nas plantas e intensifica os efeitos das mudanças climáticas. A transferência do carbono atmosférico para o solo é um processo dependente da ação dos microrganismos, que produzem substâncias essenciais para sua estabilização. Um exemplo é a glicoproteína glomalina que é produzida pelos fungos micorrízicos arbusculares e que funcionam fixando a matéria orgânica aos minerais do solo. Apesar desses microrganismos terem grande importância, o conhecimento sobre as espécies nativas da Caatinga ainda é limitado, tornando essencial a realização de estudos de identificação das espécies e de sua importância para o bioma no contexto das mudanças climáticas (Totsche *et al.*, 2018).

Os agrotóxicos, fungicidas e as práticas agrícolas que revolvem o solo o tornam um ambiente inadequado para o desenvolvimento dos microrganismos. Essa condição está diretamente associada às modificações na população microbiana e à consequente liberação de GEEs, como o dióxido de carbono, do solo para a atmosfera (Mason *et al.*, 2022).

Portanto, são necessárias medidas para evitar danos irreversíveis a essa região. A prática da agricultura regenerativa emerge como uma solução eficaz para mitigar danos ao solo e promover um maior sequestro de emissões de dióxido de carbono. Este método inclui a adoção de práticas como cultivo sucessivo de diferentes plantas, cobertura do solo ao longo do ano para prevenir a erosão, redução do arado, diminuição do uso de inseticidas e a valorização dos microrganismos (Costa, *et al.*, 2023). Além disso, a implementação de ferramentas biotecnológicas, como a adição de microrganismos nas sementes, folhas, raízes e solo, pode atuar como biofertilizante, bioestimulante e no controle de pragas (Rezende, *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, torna-se fundamental o estudo dos microrganismos nativos da Caatinga, de sua diversidade e potencial ecológico, com o objetivo de direcionar pesquisas que ampliem o conhecimento sobre essas espécies e permitam sua aplicação em tecnologias voltadas para a sustentabilidade, recuperação ambiental e mitigação das mudanças climáticas.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar o papel dos microrganismos na manutenção da qualidade do solo e na adaptação às mudanças climáticas, tendo como enfoque o bioma Caatinga.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Analisar a importância dos microrganismos para o solo e no ciclo do carbono;
- b) Investigar os impactos das mudanças climáticas no microbioma do solo da Caatinga;
- c) Identificar as características ambientais da Caatinga, bem como sua diversidade biológica e importância ecológica;
- d) Apresentar os desafios de preservação e conservação do bioma Caatinga.

3. METODOLOGIA

3.1 QUESTÕES NORTEADORAS

O estudo se trata de uma revisão narrativa que visa investigar o papel dos microrganismos na manutenção da qualidade do solo e na adaptação às mudanças climáticas, tendo como enfoque o bioma Caatinga. Para isso, essa revisão envolveu os seguintes passos: seleção de um tema de revisão; pesquisa na literatura; seleção/recolha, leitura e análise da literatura; redação da revisão; e referências. A metodologia buscou reunir informações qualitativas relevantes, a fim de proporcionar o debate da temática e contribuir para a compreensão do assunto abordado. Para a formulação do problema foram utilizadas as perguntas norteadoras: “Como equilibrar a utilização da terra para plantio com a preservação do bioma Caatinga?”, “Como as mudanças climáticas influenciam a microbiota do solo da Caatinga?”, “Como o conhecimento da microbiota da Caatinga pode garantir a preservação do bioma?”.

3.2 BUSCA NA LITERATURA

Os artigos foram selecionados utilizando as bases de dados de bibliotecas científicas, incluindo a Web of Science, Scopus, Pubmed (National Library of Medicine) e Scielo (Scientific Electronic Library Online). Os descritores utilizados foram usados neste trabalho foram: *microbiota*, *carbon cycle*, *rhizosphere organisms*, *soil microorganisms*, *soil factors*, *Caatinga*, *drylands*, *desertification*, *Semiarid*, *AM fungi*, *climate change*, *regenerative agriculture*.

3.3 CRITÉRIOS DE ELEGIBILIDADE

Os critérios utilizados para a inclusão dos materiais foram artigos científicos originais, revisões bibliográficas, teses, capítulos de livros, livros e textos *on-line* relacionados ao tema. As referências das fontes bibliográficas também foram consideradas. Além disso, foram priorizados os artigos publicados dos anos de 2018 a 2025, em inglês e português. Ainda, foram excluídos os artigos que não se enquadraram nos critérios de inclusão, ou seja, materiais publicados antes do ano de 2018, em idiomas diferentes do inglês e português e que não se relacionavam com o tema. A partir desses critérios, foram identificados e selecionados 35 estudos, que foram utilizados para a produção deste trabalho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS DA CAATINGA NORDESTINA

O Semiárido Brasileiro é uma área composta por nove estados do Nordeste e pelo norte de Minas Gerais, abrangendo 10,1% do território nacional e abrigando aproximadamente 27 milhões de habitantes (IBGE, 2019). A Caatinga é o bioma predominante na região, contando com 4.963 espécies vegetais e 1.182 espécies animais catalogadas. Entre as espécies vegetais apenas 17% possuem o estado de conservação conhecido, sendo 30,1% classificadas em algum nível de ameaça de extinção. No caso das espécies animais, 10,57% estão incluídas em categorias de risco de extinção (CTFB, 2024; BFG, 2021).

As condições climáticas da Caatinga proporcionam adaptações específicas em animais e plantas. Os vegetais desenvolvem caules capazes de armazenar água e nutrientes, ciclos de vida curtos e a queda das folhas durante a seca. Os animais, por sua vez, criam estratégias adaptativas, como buscar abrigo embaixo das árvores para se protegerem das temperaturas extremas. A partir disso, conseguem sobreviver a longos períodos de estiagem. A flora predominante da região possui a presença de caules tortuosos, espinhos e folhas pequenas, com destaque para cactos, bromélias e leguminosas. A fauna inclui mamíferos, como preás e roedores, além de sapos, cobras e lagartos. Entre as espécies que mais representam o bioma estão o veado catatingueiro, a raposa, os lagartos, os tatus, a jararaca-da-seca, a ararinha-azul, as avoantes e a asa-branca (Embrapa Informação Tecnológica, 2007).

As plantas da Caatinga possuem múltiplas finalidades, como o uso na medicina tradicional, para o preparo de chás, lambedores e xaropes, utilizando espécies como aroeira, baraúna, caatingueira e imburana-de-cheiro. Além disso, plantas como a jurema, aroeira, angico e marmeleiro produzem néctar, pólen e ceras que são utilizadas pelas abelhas como fonte de alimento e para a produção de colmeias. As partes das plantas como folhas, troncos, raízes e frutos são usados na alimentação de gado, bodes e ovelhas, enquanto o umbuzeiro, juazeiro, quixabeira, mandacaru e maracujá-do-mato fornecem vitaminas para os moradores da região e para os animais (Embrapa Informação Tecnológica, 2007).

Figura 1: A dança dos ventos inexistentes.



Fonte: A autora (2024).

Outras espécies vegetais podem ser utilizadas para a extração de óleos, ceras, fibras e para fins ornamentais, sendo uma importante fonte de renda para a comunidade sertaneja. A madeira é amplamente utilizada como lenha e para produção de carvão. A fauna garante para os moradores carne, mel, gordura, couro e peles, que podem ser obtidas a partir da pecuária, pesca ou caça. Além disso, as espécies da Caatinga têm sido bastante utilizadas para o desenvolvimento de fármacos e têm aplicação nas indústrias química, de cosméticos e alimentícia (Brasil, 2022).

O clima local é marcado pela irregularidade das chuvas e elevadas taxas de evapotranspiração, o que a torna particularmente suscetível às mudanças climáticas e ao processo de desertificação (Moura, *et al.*, 2019). Durante períodos prolongados de estiagem, a disponibilidade de água torna-se insuficiente, gerando riscos para a população e prejudicando as atividades agrícolas, o que por sua vez resulta no abandono das terras por parte dos agricultores. As atividades econômicas na área englobam a agropecuária e o extrativismo, podendo variar entre práticas de larga escala e aquelas voltadas à subsistência (Embrapa territorial, 2022).

Figura 2: Montes ressecados.



Fonte: A autora (2024).

Os solos na região apresentam variações, desde argilosos profundos e ricos em nutrientes até arenosos com baixa fertilidade, além de solos profundos endurecidos com capacidade de drenagem limitada (Araújo-Filho, 2011). Essas características, combinadas ao desmatamento, uso inadequado do solo e práticas de pecuária extensiva, desempenham um papel significativo no processo de desertificação, afetando 85% do Semiárido Brasileiro.

A Caatinga é o bioma semiárido mais biodiverso do mundo, mas a ocupação humana resultou na alteração de 80% de seus ecossistemas originais, principalmente devido ao desmatamento e às queimadas. Atualmente, é o bioma mais afetado pela desertificação no Brasil, sendo 62% das áreas suscetíveis a essas alterações do Brasil, localizadas na Caatinga (IBGE, 2019; Brasil, 2022). Apesar do preocupante cenário, apenas 9% do bioma está protegido por unidades de conservação, e somente 2% dessas áreas são de proteção integral. Por isso, são necessárias políticas, programas e projetos que assegurem a preservação do bioma e promovam o suporte às comunidades que dependem dele para a sua sobrevivência (IBGE, 2019).

Figura 3: O lar da dona Maria.



Fonte: A autora (2024).

4.2 TÉCNICAS PARA MELHORIA DO CULTIVO E MITIGAÇÃO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A gestão correta do solo é de extrema importância e influencia diretamente na sua qualidade (Rai *et al.*, 2020). A prática de monocultura, o uso de produtos químicos e a manipulação intensiva do solo estão ligados à mortalidade de microrganismos essenciais para o desenvolvimento saudável do solo, resultando na baixa produtividade das terras e acelerando a desertificação (Mason *et al.*, 2022).

Nesse sentido, produtos biotecnológicos têm sido empregados com o intuito de aprimorar o solo através da introdução de microrganismos provenientes de fontes externas, somado a práticas de agricultura regenerativa, que é uma abordagem que busca minimizar os danos ao solo (Rezende, *et al.*, 2021). Essas ferramentas são essenciais para a diminuição dos impactos climáticos e consequente preservação da biodiversidade da Caatinga.

A agricultura regenerativa é um tipo de sistema produtivo agrícola que está relacionado a práticas conservacionistas do solo, com o objetivo de obter terras ricas

em nutrientes e acesso hídrico adequado (Moyer *et al.*, 2020). Para a obtenção desse sistema equilibrado é necessário associar algumas técnicas como a agricultura de conservação, a integração de culturas e árvores em conjunto com a pecuária, a restauração da saúde do solo e a absorção de carbono da biosfera.

A agricultura de conservação é uma prática que consiste no cultivo sobre os resíduos de culturas anteriores, associada à rotação de culturas e à movimentação do solo restrita à linha de semeadura. As plantas de cobertura são essenciais para o sistema, pois aumentam a quantidade de biomassa produzida e incorporada ao solo, melhorando a qualidade e a diversidade da terra (Costa, *et al.*, 2023). A agregação do solo também é possível a partir das plantas de cobertura, provocando a estabilização e proteção do carbono. As técnicas utilizadas na agricultura regenerativa também possibilitam a captura de CO₂ atmosférico através das plantas e da comunidade microbiana (Cerri, 2023; Lamas, 2024).

Figura 4: Implementação da Cajucultura Regenerativa, Caraúbas, Apodi, RN.



Fonte: Grupo de pesquisa para implementação do Sistema Agroflorestal (2024).

O sistema de agricultura regenerativa oferece muitas vantagens, como a renovação de sistemas agrícolas e alimentares, a recuperação da fertilidade do solo, o aumento da biodiversidade e a melhora do ciclo hidrológico. Além disso, garante adaptações do ecossistema local às mudanças climáticas, diminui ou anulam as

emissões de GEEs e combatem a insegurança alimentar. Essa prática também é economicamente viável, pois garante ao agricultor produtividade e rentabilidade sem aumentar a área produtiva. Porém, o sistema possui algumas desvantagens, como a dificuldade de popularizar as técnicas, já que necessitam de ferramentas tecnológicas frequentemente não disponíveis ao agricultor comum. Ainda, a agricultura regenerativa não garante produções de larga escala, o que representa um grande problema para agricultores que dependem da monocultura (Costa, *et al.*, 2023).

A monocultura é a técnica agrícola mais utilizada no Brasil, sendo responsável por alimentar boa parte da população global (Saath e Fachinello, 2018). No semiárido essa prática também prevalece e está relacionada aos danos causados aos solos da Caatinga. Além disso, a técnica conta com o uso de produtos químicos que estimulam o crescimento de plantas, controlam as pragas e as doenças vegetais. Porém, a utilização excessiva desses químicos tem causado a queda da eficiência dos agrotóxicos e fertilizantes e o aumento dos custos (De Melo *et al.*, 2021).

Figura 5: A estrada da monocultura.



Fonte: A autora (2024).

Diante desses desafios, pesquisas têm sido realizadas utilizando os chamados microrganismos eficientes (ME), que são obtidos a partir de florestas férteis e são capazes de substituir as substâncias químicas durante o plantio (Avila, *et al.*, 2021). Os MEs são formados principalmente por rizobactérias e fungos do solo. Porém, as

interações deles com a microbiota nativa ainda não foram completamente elucidadas (Lopes *et al.*, 2020; Kang *et al.*, 2019). Ainda, não foram testados os usos de microrganismos nativos para a reposição microbiana de solos degradados da Caatinga.

Dessa forma, para mitigar os danos causados ao bioma Caatinga e aos seus habitantes, a implementação de técnicas biotecnológicas e de sistemas agroflorestais sustentáveis são de extrema importância. Paralelamente, ações educativas são fundamentais para capacitar os agricultores nas práticas sustentáveis de utilização do solo, na preservação da biodiversidade do bioma e na aplicação de técnicas, como a agricultura regenerativa.

4.3 IMPORTÂNCIA DOS MICRORGANISMOS NO CICLO DO CARBONO

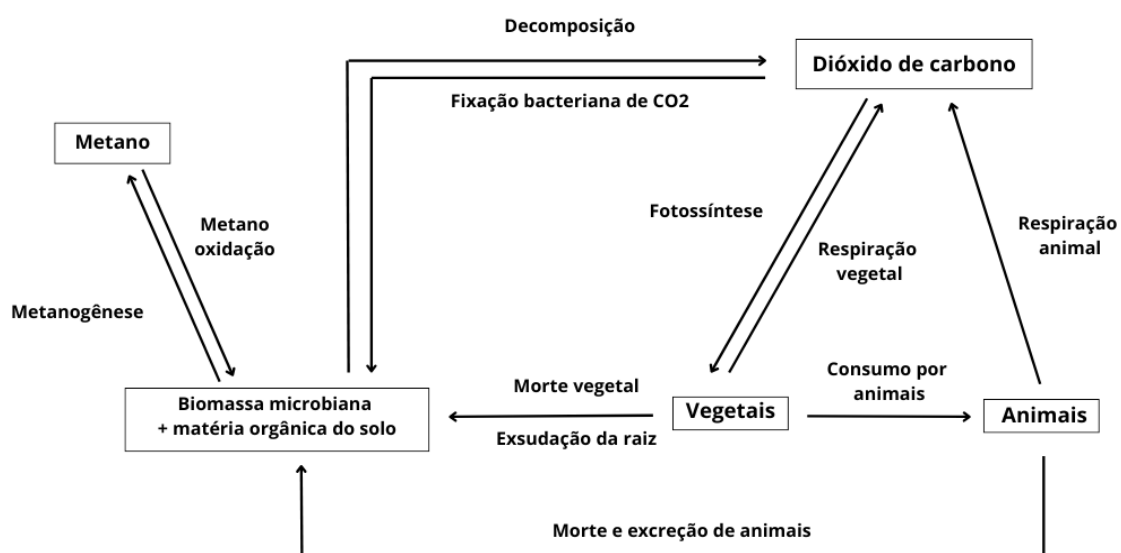
O solo é um recurso natural que possui diversas características que garantem a sobrevivência humana, tais como ciclagem de nutrientes, regulação do clima e sequestro de GEEs, sendo o maior reservatório de carbono da superfície do planeta e um dos principais eixos que movem a economia (Wang, *et al.*, 2022). O ciclo do carbono ocorre quando CO₂ liberado na atmosfera é utilizado pelos seres vivos e volta para o meio ambiente. As plantas têm como função conectar esse ciclo com as partes bióticas e transformar o CO₂ atmosférico em carbono orgânico no solo. A metade do carbono atmosférico assimilado pela planta é fixado no solo, como serrapilheira ou como carbono liberado pelas raízes (Kuzikov e Pausch, 2018).

A produção e degradação do carbono orgânico do solo impacta diretamente na liberação e sequestro do carbono, influenciando na regulação do clima. Essa matéria orgânica pode ser armazenada na forma de partículas ou associada a minerais. A forma particulada é mais instável e pode liberar facilmente o carbono estocado no solo, reagindo com o oxigênio da superfície e voltando para atmosfera como dióxido de carbono. A associação com minerais garante maior estabilidade, sendo mais difícil sua liberação quando ocorre a morte das plantas e o preparo da terra (Araujo, *et al.*, 2021).

O ciclo do carbono é um processo complexo e que depende da atividade de microrganismos, envolvendo as etapas de fixação, decomposição e metabolismo (figura 1). A fixação do carbono necessita de algumas vias, como a do ciclo aeróbio

de Calvin-Benson-Bassham (CBB), realizada nos cloroplastos das plantas e o ciclo anaeróbico Wood-Ljungdahl (WL), realizado por bactérias. A decomposição acontece através da transformação de compostos complexos em simples, como a degradação de polímeros de celulose e o metabolismo do carbono por meio da oxidação realizada por microrganismos (Ward e Shih, 2019; Tran, P.Q. *et al.*, 2021).

Figura 6: Ciclo do carbono com os principais processos realizados pelos microrganismos do solo.



Fonte: Adaptado de Gougoulas, 2014.

O microbioma do solo é a comunidade biológica mais diversa do mundo, possuindo milhões de bactérias, arqueas, fungos, vírus e microeucariotos (Sokol *et al.*, 2022), com predomínio das comunidades bacterianas e fúngicas. A importância desses seres na liberação e no armazenamento de carbono no solo, é fundamental para o ciclo global do carbono. O processo de liberação do carbono do solo ocorre através de vias catabólicas que se dividem em fermentação e respiração. Durante esse processo, o carbono pode ser liberado como CO₂ ou na forma de outros compostos, como piruvato, etanol, glicerol e ácido láctico (Wang *et al.*, 2022).

As principais vias fermentativas utilizadas pelos microrganismos do solo incluem a via Embden-Meyerhof-Parnas (EMP), a via da hexose monofosfato (HMP), a via Entner-Doudoroff (ED), a via Warburg-Dickens (WD) e a reação de Stickland, sendo a via EMP utilizada pela maioria dos microrganismos. Já os mecanismos de respiração envolvem microrganismos anaeróbicos e anaeróbicos facultativos, em ambientes com baixa disponibilidade de oxigênio, utilizando os compostos inorgânicos

oxigenados (NO_3^- , NO_2^- e SO_4^{2-}) como receptores finais de elétrons (Wu, *et al.*, 2024).

A fixação do carbono ocorre por meio de diferentes vias metabólicas a partir do ecossistema microbiano. O carbono pode ser fixado na forma inorgânica através de processos que precipitam carbonatos, como na fotossíntese, desnitrificação e oxidação anaeróbica de sulfetos, formando cristais de carbonato, como a calcita (Jiang *et al.*, 2022). Além disso, microrganismos que produzem seu próprio alimento ou autotróficos podem fixar carbono inorgânico por meio de diversas vias metabólicas, incluindo: O ciclo da pentose fosfato redutivo (ciclo de Calvin-Benson [CB]), o ciclo tricarboxílico redutivo (rTCA), o ciclo 3-hidroxipropionato/4-hidroxibutirato (3-HP/4-HB), o ciclo dicarboxilato/4-hidroxibutirato (DC/4-HB), o biciclo 3-hidroxipropionato (3-HP) e a via redutiva da acetil-coenzima A (CoA) (via Wood-Ljungdahl [WL]) (Liu *et al.*, 2018).

Dentre essas vias, o ciclo de Calvin-Benson (CB) é o mais importante. Ainda, em solos desérticos e áreas agrícolas a fixação de carbono também ocorre pela fixação escura mediada por microrganismos. A capacidade adaptativa do microbioma contribui para a estabilidade do carbono no solo e para a mitigação de impactos no ciclo global do carbono. Assim, os microrganismos são de extrema importância, pois o seu crescimento e interação com o meio ambiente que controla o destino do carbono vegetal e orgânico do solo (Malik, *et al.*, 2019).

4.4 AS MUDANÇAS CLIMÁTICAS E A AÇÃO NOS MICRORGANISMOS

As mudanças climáticas são alterações em padrões de temperatura e clima, que ocorrem de forma natural e têm papel fundamental na dinâmica da terra. Porém, a intensificação das atividades humanas como a queima de combustíveis fósseis, o desmatamento e a utilização incorreta do solo têm acelerado esse processo, causando impactos negativos (Matteucci, *et al.*, 2022). A estiagem prolongada e a desertificação de regiões do semiárido brasileiro podem estar relacionados ao uso inadequado dos recursos naturais. Esse processo provoca a perda da biodiversidade de vegetais e animais e causa insegurança para as comunidades sertanejas (Duran *et al.*, 2018). As mudanças climáticas têm ocorrido em diversas partes do mundo, aumentando o risco de fome e o número de refugiados climáticos. Por isso, o

desenvolvimento e a aplicação de tecnologias voltadas para a mitigação das mudanças climáticas tornam-se indispensáveis.

Figura 7: Sobrevivência.



Fonte: A autora (2024).

O solo possui um papel fundamental na fixação e liberação de GEEs compostos que absorvem energia no infravermelho e são responsáveis pelo efeito estufa, que realizam o aquecimento do planeta. No entanto, atividades humanas como queimadas, desmatamento e manejo inadequado do solo estão diretamente associadas à liberação desses gases, intensificando o aquecimento global (Dong *et al.*, 2021; Lei *et al.*, 2021).

Assim, práticas agrícolas que substituem a vegetação nativa, como a monocultura, têm degradado extensivamente a Caatinga (Pereira *et al.*, 2021). Nesse contexto, os microrganismos têm um papel crucial nos processos de ciclagem de carbono orgânico e nutrientes no solo (MALIK, *et al.*, 2019). E estão diretamente envolvidos na produção e no consumo de GEEs, sendo, por isso, essencial a identificação das consequências causadas às comunidades microbianas, a partir das alterações climáticas (Totsche *et al.*, 2018).

As mudanças climáticas podem ser divididas em alterações de longo e curto prazo, afetando de forma diferentes as comunidades microbianas do solo. As

mudanças ambientais que ocorrem a longo prazo modificam a composição e a função dos microrganismos no solo, porém geralmente não causam incompatibilidades entre as comunidades. Já as variações repentinas, como enchentes, aumento de temperatura e de CO₂, estimulam transformações genéticas que podem ocasionar essas desconformidades. As adaptações, que podem incluir a transcrição, tradução e a transferência de genes entre os seres, dependem do grau de perturbação e do tempo (Ruan *et al.*, 2023). Por isso, faz-se necessário o estudo da microbiota para prever o seu comportamento com o aumento das mudanças climáticas, a fim de elucidar os mecanismos que controlam as respostas a condições ambientais extremas em diferentes biomas.

4.5 COMUNIDADES FÚNGICAS EM SOLOS DO BIOMA CAATINGA

Os fungos são classificados como Reino Fungi, composto por seres eucariontes que podem ser unicelulares ou pluricelulares e encontrados em diversos ambientes, tendo como exemplo os cogumelos, mofos, líquens e outros organismos. Os unicelulares são representados pelas leveduras. Já os pluricelulares são a maioria das espécies de fungos, possuindo um corpo constituído de hifas, que são filamentos microscópicos envolvidos por parede de quitina, em que o material genético é armazenado. Os fungos diferem das plantas pela falta de clorofila ou pigmentos fotossintetizantes, sendo um ser heterotrófico. A sua alimentação ocorre a partir de enzimas que digerem as substâncias para posterior absorção dos nutrientes pelo fungo (Sokol *et al.*, 2022). A sua reprodução pode ocorrer de forma assexuada ou sexuada, sendo a última realizada por seres mais complexos (Carvalho, 2010).

Os fungos possuem muitas espécies que são utilizadas na alimentação humana, como o shiitake e champignon. Esses seres também são utilizados para a fermentação de pães, bebidas alcoólicas, fabricação de queijos especiais e de antibióticos, como a penicilina que utiliza o fungo do gênero *Penicillium*. Os fungos podem realizar o mutualismo com outros seres, como as micorrizas que é a associação dos fungos com as raízes das plantas. Essa relação possibilita a obtenção de carboidratos e aminoácidos para os fungos e a melhor absorção de sais minerais do solo para as raízes do vegetal (Carvalho, 2010; Vieira e Queiroz, 2012).

Os fungos são a comunidade microbiana que mais predomina em termos de biomassa, desempenhando também um papel crucial na decomposição de materiais orgânicos (Bar-on *et al.*, 2018). Esses organismos são essenciais para o equilíbrio entre o carbono e os nutrientes do solo, possuindo enzimas especializadas que possibilitam a degradação de substratos de carbono mais complexos, contribuindo significativamente para os ciclos biogeoquímicos (Sokol *et al.*, 2022).

Os aspectos adaptativos dos fungos são importantes, pois possibilitam a sobrevivência das espécies. No bioma Caatinga, estudos mostraram a presença principalmente dos táxons *Acaulospora* (22 táxons), *Glomus* (14), e *Rhizoglomus* (11), que representaram 49% do número de espécies de Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA). Essas espécies apresentam alta taxa de tolerância e são bastante encontradas em solos ácidos e alcalinos, como os que compõem o semiárido do Brasil (dos Passos, *et al.*, 2021).

Os fungos também possuem a capacidade de produzir compostos orgânicos mais resistentes à decomposição, do que as substâncias geradas pelas bactérias (Zhang *et al.*, 2020). Um exemplo é a glicoproteína glomalina, sintetizada pelos FMAs associados às raízes de plantas. A glomalina exerce diversas funções importantes, como aderir às hifas na superfície do solo e reduzir sua palatabilidade a predadores. Com o aspecto semelhante à cola, a glomalina estabiliza o solo, auxilia no armazenamento de carbono e na associação da matéria orgânica instável aos minerais do solo. Esse processo transforma o carbono orgânico em uma forma mais estável e resistente à decomposição, contribuindo significativamente para o sequestro de carbono e a conservação da estrutura do solo (Totsche *et al.*, 2018).

Os fungos micorrízicos podem ser classificados em dois tipos principais, cada um com habilidades diferentes para a obtenção de nutrientes da matéria orgânica. Os fungos ectomicorrízicos (ECM) possuem a capacidade de produzir enzimas que oxidam a matéria orgânica e facilitam a liberação de nutrientes. Por outro lado, os fungos micorrízicos arbusculares (FMA) dependem dos fungos saprófitos para a degradação da matéria orgânica e obtenção de nutrientes (Sokol *et al.*, 2022). O predomínio de um desses grupos no solo resulta em características distintas. Em ambientes dominados por fungos FMA, a produção de matéria orgânica associada a minerais é maior, contribuindo para a formação de estoques de carbono mais estáveis e para a melhoria da estrutura do solo (Sokol *et al.*, 2022).

A presença de fungos e de seus derivados, como a glomalina, em solos da Caatinga, é de grande importância, pois auxiliam no estabelecimento das plantas nos solos do bioma. Os FMAs conseguem se adaptar com facilidade em solos de baixa fertilidade e alta aridez, minimizando os processos de desertificação e contribuindo com a revegetação de solos degradados (Dos Passos, *et al.*, 2021).

4.6 COMUNIDADES BACTERIANAS EM SOLOS DO BIOMA CAATINGA

As bactérias ou Eubactérias são seres pertencentes ao Reino Monera, tendo como características ser organismos procariontes, unicelulares, que podem ser autótrofos ou heterótrofos. O reino Monera é composto por bactérias e cianobactérias, que podem ser chamadas de algas azuis. A reprodução desses seres ocorre de forma assexuada a partir do processo de divisão binária. Porém, também realizam a troca de material genético a partir da conjugação, transformação e transdução o que permite grande variedade genética (Carvalho, 2010).

Os seres do Reino Monera podem ser encontrados em diversos ambientes como em solos, água doce, do mar, ar, nas superfícies de objetos, no interior dos organismos e em materiais em decomposição. Ainda, podem ser classificados de acordo com sua morfologia, como bacilos, cocos, espirilos e vibriões. Esses organismos são muito importantes na indústria de alimentos, pois são usados na fabricação de queijos, iogurtes e vinagre. As bactérias também possuem papel importante no trato digestivos de diversos seres produzindo vitaminas essenciais (Vieira e Queiroz, 2012). Ainda, possuem um importante papel na manutenção do solo, estando relacionadas a liberação e fixação do carbono (Ward e Shih, 2019).

A região semiárida do Brasil apresenta solos frágeis, longos períodos de estiagem e curtos períodos com fortes chuvas, o que intensifica a degradação do solo (Pereira, *et al.*, 2022). A ação antrópica, como o desmatamento e as queimadas, a fim de preparar o solo para a agricultura, afetam o conteúdo de matéria orgânica e os microrganismos da terra (Pereira *et al.*, 2021). Estudos foram realizados e mostraram os microrganismos mais comumente encontrados no solo, sendo as *Cyanobacteria*, *Euryarchaeota*, *Betaproteobacteria*, *Alphaproteobacteria*, *Crenarchaeota* e a *Chlorophyta* os mais relacionados a fixação do carbono no solo (Wu *et al.*, 2024).

Ainda, algumas pesquisas identificaram o conteúdo microbiano de solos de regiões de Caatinga. Pereira, *et al.*, 2022, fez análises de solos nativos e degradados ou restaurados do Piauí, e identificou, a partir de técnicas de sequenciamento, 19 filos de comunidade bacteriana. Os filos mais encontrados foram a Actinobacteria (32,8%), Proteobacteria (18%), Acidobacteria (14%) e Chloroflexi (10,5%), sendo relacionadas ao aumento de fertilidade do solo, disponibilização de nitrogênio e fósforo, crescimento vegetal e a fixação de carbono, respectivamente (Soares, S. C., 2020).

Os solos restaurados ou degradados apresentaram aumento de espécies como a do filo *Chloroflexi*, que tem relação com a decomposição da matéria orgânica, reforçando que a composição da microbiota depende das condições ambientais (Araujo, *et al.*, 2021). Nos solos degradados também foram identificados a diminuição de carbono orgânico total, como consequência do desmatamento da vegetação nativa e da perda de carbono. Enquanto as terras nativas apresentaram maior diversidade microbiana, como o aumento de *Actinobacteria*, *Verrucomicrobia* e *Entotheonellaeota*, que são essenciais para o aumento da fertilidade do solo (Pereira, *et al.*, 2022). Tal fator ocorre pela presença da cobertura vegetal e consequentemente maior quantidade de carbono orgânico, o que é decisivo para o aumento da diversidade microbiana quando comparadas com regiões degradadas (Pereira *et al.*, 2021).

Além disso, as características do solo como pH, temperatura e a presença de Ca^{2+} e Mg^{2+} influenciam diretamente a composição microbiana, podendo causar impactos positivos ou negativos nas comunidades (Ruan *et al.*, 2023). Por exemplo, as *Actinobacteria*, *Verrucomicrobia* e *Entotheonellaeota* presentes nos solos nativos, que apresentam correlações negativas com as características anteriormente citadas. As espécies vegetais utilizadas no replantio também são muito importantes, pois estão relacionadas com a presença de microrganismos incomuns ou presentes em menores quantidades em solos da Caatinga, sendo estes menos eficientes na decomposição da matéria orgânica gerada na região (Pereira, *et al.*, 2022).

Apesar de alguns estudos apresentarem a composição bacteriana do solo de algumas regiões de Caatinga, a dinâmica e os mecanismos das comunidades microbianas frente a mudanças ambientais extremas, ainda não foram completamente elucidados (Jansson e Hofmockel, 2020). Por isso, estudos para compreender as características microbianas e os mecanismos que conferem resistência aos ecossistemas são necessários, a fim de prever as respostas do microbioma às

mudanças climáticas e desenvolver técnicas e tecnologias que mitiguem essas alterações.

5. CONCLUSÃO

A Caatinga, reconhecida pela sua biodiversidade, tem sido impactada pelos processos de desertificação causados pela utilização inadequada do solo e as mudanças climáticas. A manutenção do solo depende diretamente da ação dos microrganismos. Algumas pesquisas apontam para o predomínio de filos bacterianos em regiões de Caatinga, como *Actinobacteria*, *Proteobacteria*, *Acidobacteria* e *Chloroflexi*, responsáveis pela fertilidade do solo, disponibilização de nitrogênio e fósforo, crescimento vegetal e a fixação de carbono, respectivamente. Também, foi evidenciado que as alterações ambientais modulam a população bacteriana, causando diferenças nos principais filos encontrados em solos nativos e degradados. Os fungos também são muito importantes para o funcionamento do solo e estão relacionados a produção de substâncias que estabilizam a terra, tendo sido identificados em solos da Caatinga os táxons *Acaulospora*, *Glomus* e *Rhizoglomus*, contendo principalmente Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA).

Porém, os dados apresentados utilizaram regiões restritas, sendo necessário o aprofundamento de pesquisas sobre a comunidade microbiana presente em diversas regiões da Caatinga. Dessa forma, torna-se imprescindível a prospecção das espécies microbianas pertencentes ao bioma, a fim de identificar os microrganismos nativos mais comumente encontrados na região. Também, faz-se necessário a realização de análises genéticas e metabolômicas para a compreensão dos mecanismos envolvidos nas respostas microbianas às alterações ambientais extremas. Ainda, para a conservação do solo e das comunidades microbianas é necessário orientar os agricultores na implementação de sistemas sustentáveis de plantio, como a agricultura regenerativa, que busca minimizar os impactos ao solo, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Por fim, pretendeu-se, a partir desse trabalho, despertar o interesse ao conhecimento e desenvolvimento de métodos agrícolas ecológicos e de ferramentas biotecnológicas utilizando os microrganismos nativos do bioma. Sendo assim, espera-se que este tema seja aprofundado em estudos futuros e em novas oportunidades de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, Ademir Sergio Ferreira; OLIVEIRA, Louise Melo de Souza; MELO, Vania Maria Maciel; ANTUNES, Jadson Emanuel Lopes; ARAUJO, Fábio Fernando; MENDES, Lucas William. Distinct taxonomic composition of soil bacterial community across a native gradient of Cerrado-Ecotone-Caatinga. **Applied Soil Ecology**, v. 161, 2021, p. 103874. ISSN 0929-1393.
- ARAUJO-FILHO, José Coelho de. Relação solo e paisagem no Bioma Caatinga. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 14., 2011, Dourados. Anais [...] Dourados: UFGD, 2011.
- AVILA, G. M. de A.; GABARDO, G.; CLOCK, D. C.; LIMA JUNIOR, O. S. de. Use of efficient microorganisms in agriculture. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 8, p. e40610817515, 2021.
- BAR-ON, Y. M.; PHILLIPS, R.; MILO, R. The biomass distribution on Earth. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 115, p. 6506–6511, 2018.
- BFG. The Brazil Flora Group. Coleção Flora do Brasil 2020. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2021.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Caatinga. 2022.
- CERRI, E. C. Agricultura regenerativa. In: GHELER, C. (Ed.). *I Workshop de Agricultura regenerativa no Brasil - CEBDS*. Anais [...] Virtual: CEBDS, 15 ago. 2023.
- Carvalho, Irineide Teixeira de. Microbiologia básica / Irineide Teixeira de Carvalho. – Recife: EDUFRPE, 2010. 108 p. : il. ISBN: 978-85-7946-020-3
- COSTA, Carla *et al.* Agricultura regenerativa no Brasil: desafios e oportunidades. São Paulo: CEBDS, 2023.
- CTFB. Catálogo Taxonômico da Fauna do Brasil. 2024.
- DE MELO, T. A.; DE SOUZA SERRA, I. M. R. Effect of hydroalcoholic neem (*Azadirachta indica*) extract and oil on the fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* and in the induced resistance of okra to fusariosis. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 2, p. e7110212357-e7110212357, 2021.
- DONG, X. *et al.* Organic carbon mineralization and bacterial community of active layer soils response to short-term warming in the Great Hing'an mountains of northeast China. **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 802213, 2021.
- DOS PASSOS, J. H. *et al.* Arbuscular Mycorrhizal Fungal Community Structure in the Rhizosphere of Three Plant Species of Crystalline and Sedimentary Areas in the Brazilian Dry Forest. **Microbial Ecology**, v. 82, p. 104–121, 2021.

DURAN, J. *et al.* Temperature and aridity regulate spatial variability of soil carbon fractions and microbial community composition in urban and suburban forests. **Scientific Reports**, v. 10, p. 15933, 2020.

EMBRAPA INFORMAÇÃO TECNOLÓGICA. Preservação e uso da Caatinga / Embrapa Informação Tecnológica; Embrapa Semiárido. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 39 p. (ABC da Agricultura Familiar, 16).

EMBRAPA TERRITORIAL. Sistema de Inteligência Territorial Estratégica do Bioma Caatinga. Campinas, 2022.

IBGE. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Biomas e sistema costeiro-marinho do Brasil**: compatível com a escala 1:250.000. Rio de Janeiro: Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 2019. 168 p.

IPCC. Sixth assessment report – working group II, 2022.

JIANG, P. *et al.* Research progress on microbial carbon sequestration in soil: a review. **Eurasian Soil Science**, v. 55, p. 1395–1404, 2022.

KANG, S. M. *et al.* Integrated phytohormone responses under abiotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 139, p. 58–72, 2019.

LAMAS, Fernando. Agricultura regenerativa – o que significa, o que regenerar? **Embrapa**, 2024.

LEI, J. *et al.* Temporal changes in global soil respiration since 1987. **Nature Communications**, v. 12, p. 403, 2021.

LING, N. Elevated temperature and CO₂ strongly affect the growth strategies of soil microorganisms. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 1, p. 125–137, 2023.

LIU, Z.; SUN, Y.; ZHANG, Y.; FENG, W.; LAI, Z.; FA, K.; QIN, S. Metagenomic and ¹³C tracing evidence for autotrophic atmospheric carbon absorption in a semiarid desert. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 125, p. 156–166, 2018.

LOPES, R.; TSUI, S.; GONÇALVES, P. J. R. O.; QUEIROZ, M. A look into a multifunctional toolbox: endophytic *Bacillus* species provide broad functional capabilities. **Journal of Applied Microbiology**, v. 129, n. 1, p. 1–11, 2020.

MALIK, A. A. *et al.* Defining trait-based microbial strategies with consequences for soil carbon cycling under climate change. **The ISME Journal**, v. 14, n. 1, p. 1–9, 2019.

MASON, R. E. *et al.* Evidence, causes, and consequences of declining nitrogen availability in terrestrial ecosystems. **Science**, v. 376, p. eabh3767, 2022.

MATTEUCCI, M. P. S. *et al.* Afinal, o que são as mudanças climáticas? **UNICEF Blog**, 2022.

MOURA, M. S. B. *et al.* Aspectos meteorológicos do Semiárido Brasileiro. In: XIMENES, L. F.; SILVA, M. S. L.; BRITO, L. T. L. **Tecnologias de convivência com o Semiárido brasileiro**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2019. cap. 2, p. 85–104.

MOYER, J. *et al.* Regenerative agriculture and the soil carbon solution. Kutztown: [s.n.], [s.d.].

PAUSCH, J.; KUZUYAKOV, Y. Carbon input by roots into the soil: Quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale. **Global Change Biology**, v. 24, n. 1, p. 1–12, 2018.

PEREIRA, A. P. A.; ZAGATTO, M. R. G.; BRANDANI, C. B. Acacia changes microbial indicators and increases C and N in soil organic fractions in intercropped Eucalyptus plantations. **Journal of Environmental Management**, v. 9, p. 1–13, 2018.

PEREIRA, A. P.; LIMA, L. A. L.; BEZERRA, W. M.; PEREIRA, M. L.; NORMANDO, L. R. O.; MENDES, L. W.; DE 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, p. 2210–2225, 2021.

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.

RAI, P. K. *et al.* Role and potential applications of plant growth-promoting rhizobacteria for sustainable agriculture. **Trends of Microbial Biotechnology for Sustainable Agriculture and Biomedicine Systems: Diversity and Functional Perspectives**. p. 49–60, 2020.

REZENDE, C. C. *et al.* Multifunctional microorganisms: use in agriculture. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 2, p. e50810212725, 2021.

RUAN, Y., *et al.* Elevated temperature and CO₂ strongly affect the growth strategies of soil bacteria. **Nature Communications**, v. 14, p. 391, 2023.

SAATH, K. C. D. O.; FACHINELLO, A. L. Crescimento da demanda mundial de alimentos e restrições do fator terra no Brasil. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 56, n. 2, p. 195–212, 2018.

SOARES, S. C. Estrutura e funcionalidade da comunidade microbiana do solo sob rotação de culturas em plantio direto submetido à aplicação de dejetos líquido bovino a longo prazo. Curitiba, 2020.

SOKOL, N.W.; SLESSAREV, E.; MARSCHMANN, G.L. *et al.* Life and death in the soil microbiome: how ecological processes influence biogeochemistry. **Nat Rev Microbiol** 20, 415–430 (2022).

TOTSCHKE, K. U. *et al.* Microaggregates in soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 181, p. 104–136, 2018.

TRAN, P. Q. Depth-discrete metagenomics reveals the roles of microbes in biogeochemical cycling in the tropical freshwater Lake Tanganyika. **The ISME Journal**, v. 15, p. 1971–1986, 2021.

Vieira, Darlene Ana de Paula / Darlene Ana de Paula Veira, Nayara Cláudia de Assunção Queiroz. — — Inhumas: IFG; Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2012. 100 p.: il. Bibliografia.

WALKUP, J. G.; MORRISSEY, E. M. Scaling up taxon-specific microbial traits to predict community-level microbial activity in agricultural systems. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 200, p. 109622, 2024.

WANG, Q. *et al.* Carbon cycle in the microbial ecosystems of biological soil crusts. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 171, p. 108729, 2022.

WARD, L. M.; SHIH, P. M. The evolution and productivity of carbon fixation pathways in response to changes in oxygen concentration over geological time. **Free Radical Biology and Medicine**, v. 140, p. 188–199, 2019.

WU, Haowei *et al.* Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. **Science of The Total Environment**, v. 909, 2024, p. 168627. ISSN 0048-9697.

ZHANG, X. *et al.* Coupled changes in soil organic matter and bacterial activity in response to environmental changes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 140, p. 1–10, 2020.