

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Agricultura regenerativa em solo arenoso na caatinga e sua relação de convivência com o semiárido: um novo “olhAR” para o “SERTão”**

Tainã Cadija Almeida de Mamede  
*Doctor Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS**  
**2025**

**TAINÃ CADIJA ALMEIDA DE MAMEDE**

**Agricultura regenerativa em solo arenoso na caatinga e sua relação de convivência com o semiárido: um novo “olhAR” para o “SERtão”**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Raphael B. Alves Fernandes

Coorientadores: Oldair Vinhas Costa  
Andre M. X. de Carvalho

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

M264a  
2025 Mamede, Tainã Cádija Almeida de, 1985-  
Agricultura regenerativa em solo arenoso na caatinga e sua  
relação de convivência com o semiárido: um novo “olhAR” para  
o “SERTão” / Tainã Cádija Almeida de Mamede. – Viçosa, MG,  
2025.

1 tese eletrônica (178 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndice.

Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Solos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.481>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos arenosos - Bahia. 2. Solos - Manejo. 3. Caatinga.  
4. Agrobiodiversidade. I. Fernandes, Raphael Bragança Alves,  
1969-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de  
Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.478142

**TAINÃ CADIJA ALMEIDA DE MAMEDE**

**Agricultura regenerativa em solo arenoso na caatinga e sua relação de convivência com o semiárido: um novo “olhAR” para o “SERtão”**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 29 de abril de 2025.

Assentimento:

---

Tainã Cadija Almeida de Mamede  
Autora

---

Raphael Braganca Alves Fernandes  
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 14/08/2025 às 16:49:19 e pelo orientador em 20/08/2025 às 11:17:30. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **OMQX.ZE33.8ZS5** e clique no botão 'Validar documento'.

Ao meu filho Ravi e ao deserto que atravessamos. Aos agricultores sertanejos, que tanto me inspiram com sua resiliência e simplicidade.

## AGRADECIMENTOS

A fonte criadora que me impulsiona a evoluir e a ser cocriadora neste fluxo incessante da vida.

A minha guiança espiritual e a todos os encantados, por estarem sempre na minha proteção, ao meu lado com tanto amor. Gratidão !

Ao mestre e amigo Jesus, que me inspira tanto e me faz crescer com humildade, generosidade e amor. Te amo!

A minha ancestralidade, que desbravou o caminho para que eu chegasse até aqui. Agora sigo no caminho que escolhi e honro a vocês.

Aos meus pais, Sr. Edson e D. Nira, que me deram a vida, me ensinaram o sentido da palavra amor e sempre estiveram ao meu lado, apoiando cada escolha, acolhendo cada lágrima e compartilhando cada sorriso. Amo muito vocês! Obrigado. As minhas irmãs, Cari e Dai, que sempre me incentivam e me faz acreditar que sou capaz de realizar tudo que quero. Nosso amor foi combustível na realização deste sonho.

Ao meu filho Ravi que me trouxe ao encontro da minha melhor versão e que me ensina todos os dias, de tantas formas a ser ainda melhor. Gratidão meu tesouro! Amo você.

Aos meus avós (in memória), por construírem com luta e amor a base por onde tudo começou.

A toda minha família sobrinhos, tios (as) primos (as) que me dão tanto amor, tanto aconchego e vibram por cada conquista, me fazendo tão feliz!

Aos agricultores Marsha Hanzi e Luís, por tantos ensinamentos, pela resiliência de sustentarem um sonho construindo uma terra mais bela, repleta de vida com um solo sadio e abundante. Gratidão pela confiança, por terem nos recebido de braços abertos para que este trabalho pudesse ser realizado. Vida longa à Jardins Marizá! À Universidade Federal de Viçosa -UFV, pela oportunidade de realizar a pós-graduação e viver uma etapa tão importante da minha vida acadêmica.

Ao professor e orientador Raphael Fernandes, por todo apoio, confiança, incentivo e aprendizados. Obrigado por ter acreditado neste trabalho, por ter cruzado meu caminho e por ter sido tão generoso e amigo.

Ao professor e co-orientador Oldair Vinhas, pelos campos repletos de suor, descrição de solo e muitos aprendizados. Obrigado pelos valiosos conhecimentos e pela amizade.

Aos mestres incríveis que tive na minha formação, pelos valiosos ensinamentos, em especial ao professor Carlos Scheffer, Irene Cardoso e Victor Hugo (in memória).

Ao professor e co-orientador André Carvalho, pelos valiosos ensinamentos, disposição e colaboração no tratamento estatístico deste trabalho. Muito obrigado por ser um profissional incrível, acessível, gentil e paciente.

Ao Laboratório de Isótopos estáveis (LIE) da UFV e toda sua equipe, em especial João e Humberto, por terem sido tão pacientes e dispostos a colaborar neste trabalho.

Ao Laboratório de Física do Solo da UFV e sua equipe, em especial a Cláudio, pela dedicação e apoio na realização deste trabalho.

Ao Laboratório de Mineralogia da UFV e, em especial Saulo e Taiana, por terem colaborado com a DRX.

Ao graduando Itaciano, pela dedicação e competência no tratamento das amostras de solo no LIE. Você foi um grande colaborador acadêmico e amigo, sem a sua parceria, as histórias, os risos, a pizza não seriam possíveis. Gratidão!

Mesmo distante, aos colegas da sala 230, em especial a Karin, pelo apoio e por ter sido uma amiga tão especial.

Ao grupo ECOA -UFV e ao CTA da Zona da Mata Mineira, pelas reuniões, vivências e imersões tão enriquecedoras, repletas de gente que faz a agroecologia na prática.

Aos colegas da UFV, por todo apoio e pelos momentos de amizade e descontração, em especial Luana Figueiredo, Naiara, Juliano, Rugana, Leonne, Daniel Nunes, Maria Cardoso, Catherine, Andres.

A amiga e professora Emiliana, pela amizade, alegria e por compartilhar sua casa e sua família linda com tanto amor nos dias em Viçosa.

A minha amiga Josi e o elo que iniciamos em Fertilidade do Solo e que nos acompanhará sempre. Gratidão por me acolher em sua casa, por cuidar de mim, pelo forró, pela sua energia curadora e amizade. Te quero sempre perto!

A amiga Iorrana, pelas inúmeras conversas, abraços, risos e choro. Por ter me recebido em sua casa e pelo apoio acadêmico, especialmente na análise estatística multivariada. Gratidão!

A Embrapa Agrobiologia e toda equipe do laboratório de Micorrizas, em especial Itamar, Orivaldo, Iracema e Anastácia, pelas análises de FMA, apoio e aprendizados enriquecedores na execução deste trabalho.

A residencia universitária da pós da UFRRJ, por me receber com tanta alegria e amizade. Em especial a minha irmãzinha da pós Hemy, "O que é que isso menina?" hahaha.

Aos meus alunos Igo e Higo, pela parceria tão especial na dedicação deste trabalho, seja no campo e/ ou laboratório. Vocês foram fundamentais na realização de cada etapa. Obrigado pela confiança e amizade!

A UEFS, pela oportunidade de apoio financeiro e acadêmico para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos colegas da UEFS, pela amizade e por terem apoiado e concedido a aprovação da licença doutoramento, em especial a Joselisa, Uchôa, Consuelo e Osvaldo.

Ao laboratório de Ecotoxicologia Terrestre da UDESC e toda sua equipe, em especial ao professor Osmar Filho, pela receptividade e pelos valiosos aprendizados.

A Daniele Tomazelli, pelo apoio científico e acadêmico no estudo dos FMA's.

Ao Núcleo de Estudos em Agroecologia NEA - Trilhas UEFS, pela possibilidade de ampliar o conhecimento e o espírito de coletividade na perspectiva agroecológica.

A amiga e professora Marina Castro, pela parceria constante e por me ensinar fazer a agroecologia no papel de uma verdadeira líder.

Ao Laboratório de Espectrorradiometria do PPGM – UEFS e toda sua equipe, pelo apoio as análises espectrais.

Ao Laboratório de História de los Agroecosistemas da Universidade Pablo de Olavid, Sevilla – Espanha e toda sua equipe, em especial ao professor Molina, pela confiança e apoio na elaboração do estudo do MSA.

A Adria e a Pablo Domouso, pelo apoio na construção do conhecimento acerca do MSA.

As pessoas incríveis que conheci no Sul da Espanha e que me fizeram sentir em casa.

Aos meus amigos de infância Nari, Vinha, Binho, Mímica, por sempre acreditarem em mim, por toda loucura, entrega e acolhimento para este trabalho.

As mulheres que a vida me trouxe e que me fazem um bem tão grande, Cami, Paty, Mônica, Raiana, Val, Beta, Lulu, Janine, Marcinha, Livia, Martina, Tâmara, Gisele, Cristal, Marina.

As minhas amigas bruxinhas, que fazem magia no meu coração Cris e Sandrinha.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo apoio através do projeto “Agriculturas de base agroecológica como propulsora da agricultura familiar, da integração de saberes, da saúde do solo e das relações de convivência com a seca”.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“O futuro pertence não a quem tem mais, mas a quem faz mais com o que têm”

Odum.

## RESUMO

MAMEDE, Tainã Cadija Almeida de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2025. **Agricultura regenerativa em solo arenoso na caatinga e sua relação de convivência com o semiárido: um novo “olhAR” para o “SERTão”**. Orientador: Raphael Braganca Alves Fernandes. Coorientadores: Oldair Vinhas Costa e Andre Mundstock Xavier de Carvalho.

O semiárido apresenta condições edafoclimáticas específicas demarcadas pelo bioma Caatinga. Neste ambiente, os solos arenosos, frequentemente apresentam pouca profundidade e baixa ou ausente estabilidade dos agregados, características que acentuam a susceptibilidade à erosão e a degradação. Neste cenário, práticas de convivência com a seca são relevantes e pouco se conhece sobre o efeito de manejos regenerativos sobre a qualidade desses solos e a manutenção da agrobiodiversidade, os quais constituem fatores importantes para potencializar as funções ecossistêmicas do solo. Diante do exposto, o presente estudo objetivou avaliar os fatores determinantes da qualidade do solo na região semiárida quando submetido ao manejo regenerativo, e seus efeitos sobre a manutenção da agrobiodiversidade. O estudo foi dividido em quatro capítulos, todos executados na região do semiárido do estado da Bahia. O capítulo 1 “Diversidade vegetal e indicadores de qualidade do solo no contexto da agricultura regenerativa de base agroecológica no Semiárido brasileiro” consistiu em identificar a cobertura vegetal agrícola e os indicadores de qualidade do solo sensíveis ao manejo regenerativo de base agroecológica, bem como suas alterações em comparação a sistemas convencionais de plantio e a mata nativa como área de referência. Para tal, foram feitas análise química para fins de fertilidade, análise física e análise biológica, incluindo o estudo de diversidade da cobertura vegetal agrícola. A área de manejo regenerativo foi a que apresentou melhor desempenho dos indicadores de qualidade do solo. O capítulo 2 “Fungos micorrízicos arbusculares (FMA) em resposta ao manejo regenerativo de solos arenosos no bioma Caatinga no nordeste do Brasil.” visou avaliar a ocorrência de espécies e a densidade de esporos de FMA em um sistema de manejo regenerativo (MR) e convencional (MC) no semiárido, bem como em uma área de vegetação nativa com fragmento de Caatinga (CA) e relacionar com as propriedades de solo e as espécies vegetais. A fertilidade do solo e a biodiversidade parece ter tido importante influência na resposta da atividade dos FMA. O capítulo 3 “Espectrorradiometria de solos arenosos na perspectiva da agricultura regenerativa no bioma caatinga” avaliou a resposta espectral de solos na avaliação de diferentes sistemas de manejo regenerativo no semiárido. Os

espectros obtidos foram capazes de diferenciar os tratamentos, especialmente aqueles com incremento de matéria orgânica a partir do manejo regenerativo. O capítulo 4 “Relações de convivência com a seca pela agricultura regenerativa de base agroecológica na ótica do metabolismo social agrário no semiárido brasileiro: considerações iniciais como incentivo a agroecologia no sertão” visaram obter respostas preliminares acerca das estratégias de convivência com a seca de um organismo agrícola. Os resultados mostraram que o fluxo interno de energia está sendo alimentado em maior proporção pela biomassa seca daquilo que está sendo reinvestido a partir do funcionamento ecológico do organismo agrícola, resultando assim em um índice PPL - EROI positivo.

Palavras-chave: Agroecologia; Manejo regenerativo; Solos arenosos; Permacultura; Policultivo

## ABSTRACT

MAMEDE, Tainã Cadija Almeida de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2025. **Regenerative agriculture in sandy soil in the caatinga and its relationship with the semi-arid region: a new “look” at the “SERTÃO”**. Adviser: Raphael Braganca Alves Fernandes. Co-advisers: Oldair Vinhas Costa and Andre Mundstock Xavier de Carvalho.

The semi-arid region presents specific edaphoclimatic conditions shaped by the Caatinga biome. In this environment, sandy soils are frequently shallow and exhibit low or absent aggregate stability, characteristics that increase their susceptibility to erosion and degradation. In this context, drought-resilience practices are relevant, yet little is known about the effects of regenerative management on the quality of these soils and the maintenance of agrobiodiversity—both of which are important factors in enhancing the ecosystem functions of the soil. This study aimed to evaluate the determining factors of soil quality in the semi-arid region under regenerative management, as well as its effects on agrobiodiversity. The research was structured into four chapters, all conducted in the semi-arid region of Bahia. Chapter 1, titled "Plant diversity and Soil Quality Indicators in the Context of Regenerative Agroecological Agriculture in the Brazilian Semi-Arid Region," sought to identify agricultural vegetation cover and soil quality indicators sensitive to regenerative agroecological management, as well as their changes in comparison with conventional planting systems and native forest as a reference area. For this purpose, chemical (fertility), physical, and biological analyses were conducted, including the study of agricultural vegetation diversity. The regenerative management area showed the best performance in terms of soil quality indicators. Chapter 2, "Arbuscular Mycorrhizal Fungi (AMF) in Response to Regenerative Management of Sandy Soils in the Caatinga Biome of Northeastern Brazil," aimed to assess the occurrence and spore density of AMF in regenerative (RM) and conventional (CM) systems in the semi-arid region, as well as in a native forest area with Caatinga vegetation (NF), and to relate these to soil attributes and plant species. Soil fertility and biodiversity appeared to play a significant role in AMF activity. Chapter 3, "Spectroradiometry of Sandy Soils from the Perspective of Regenerative Agriculture in the Caatinga Biome," evaluated the spectral response of soils under different regenerative management systems in the semi-arid region. The obtained spectra were able to distinguish between treatments, especially those with increased organic matter resulting from regenerative management. Chapter 4, "Drought Resilience through Regenerative Agroecological Agriculture from the Perspective of Agrarian Social Metabolism in the Brazilian Semi-Arid Region: Initial Considerations to

Encourage Agroecology in the Backlands," aimed to obtain preliminary insights into drought resilience strategies of an agroecological farming organism. The results showed that internal energy flow is increasingly sustained by dry biomass reinvested through the ecological functioning of the agricultural organism, resulting in a positive PPL-EROI index.

Keywords: Agroecology; regenerative management; sandy soils; permaculture; polyculture

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>INTRODUÇÃO</b>	19
Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA	24
Figura 2 – Localização do município de Tucano – BA	25
Figura 3 – Pontos de amostragem em Tucano – BA	27
Figura 4 – Delineamento amostral da coleta de solos feito nas áreas de estudo em Tucano – BA, 2021	28
Figura 5 – Perfil 1	29
Figura 6 – Perfil 2	32
Quadro 1 - Caracterização das práticas agrícolas das áreas de manejo regenerativo INI: INICIO, MR3: 3 anos, MR10: 10 anos, POL: policultivo e manejo convencional (MANC: mandioca , MILC: milho) na região de Tucano – BA, 2021.	26
Tabela 1 - Parâmetros químicos do perfil de solo nº 1 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.	30
Tabela 2 - Parâmetros físicos do perfil de solo nº 1 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.	31
Tabela 3 – Parâmetros químicos do perfil de solo nº 2 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022	33
<b>CAPÍTULO I</b>	41
Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA.	
Figura 2 – Análise da resistência a penetração (RP) com penetrômetro de impacto e obtenção da umidade e temperatura <i>in situ</i> ambos até a profundidade de 60 cm em Tucano, BA Set/21	44
Figura 3 – Análise da condutividade hidráulica não saturada com o uso de um Mini Disk infiltrometer <i>in situ</i> em Tucano, BA Set/21	45
Figura 4 – Diagrama de separação da Matéria Orgânica Particulada (MOP) e da Matéria Orgânica Mineral (MAM)	46
Figura 5 – Diagrama de separação da matéria orgânica leve (MOL) para quantificação do C	46
Figura 6 – Difratograma de raio-X da fração argila da área de MR10. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato)	50
Figura 7 - Estoque de carbono (CS) do solo em mg. ha <sup>-1</sup> e frações do carbono (MOP, MAM, MOL) (n=4) presente nas frações Matéria Orgânica Particulada (MOP), Matéria Orgânica Pesada (MAM) e Matéria Orgânica Leve (MOL). As médias seguidas de letras diferentes diferem estatisticamente entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade	53

Figura 8 - Fluxograma de descrição do manejo associado ao gradiente de concentração dos teores das frações MOP (mg/g) e MOL (mg/g) dos respectivos tratamentos. INI : Início, MR3: 3 anos, MR10: 10 anos, POL: Policultivo (manejo regenerativo); MANC: mandioca convencional, MILC: milho convencional; CAAT (Mata nativa - Caatinga). CO : composto orgânico.	54
Figura 9 - Pilha do composto orgânico sendo revirada manualmente e pelas galinhas	57
Figura 10 – Esterco proveniente do manejo dos animais pelo pastejo rotacionado na área de manejo regenerativo denominada Policultivo (POL) em Jardins Marizá, Tucano – BA.	57
Figura 11 – Densidade do solo (DS) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e Mata nativa Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm. OBS: As médias (n = 4) seguidas de um * diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de $\alpha$ de 5% por família.	63
Figura 12 – Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) na profundidade do solo 0-20 cm. OBS: As médias (n = 4) seguidas de um * diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de $\alpha$ de 5% por família.	65
Figura 13 – Resistência a penetração (RP) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e Mata nativa Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm. OBS: As médias (n = 4) seguidas de um * diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de $\alpha$ de 5% por família.	68
Figura 14 – Plantio de mandioca convencional (MANC) em solo arenoso após gradeamento em área adjacente a Jardins Marizá, Tucano – BA em SET/21.	69
Figura 15 – Porosidade total (PT) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) na profundidade do solo 0-20 cm. OBS: As médias (n = 4) seguidas de um * diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de $\alpha$ de 5% por família.	71
Figura 16 – Porosidade total (PT) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI)	71
Figura 17 – Hidrofobicidade em solos arenosos na área de manejo regenerativo em Jardins Marizá, Tucano – BA em set. 21	72
Figura 18 – Análise de componentes principais das propriedades físicas, químicas e biológicas das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional:	72

mandioca (MANC), milho (MILC) e mata nativa (CAAT) em Tucano-BA

Quadro 1 – Contrastes planejados (C) utilizados na comparação entre os diferentes tratamentos para as variáveis físicas. 48

Quadro 2 – Mix de sementes utilizadas com finalidade de melhorar a estrutura, nutrientes e produção do solo na área denominada policultivo (POL) a partir do manejo regenerativo em Jardins Marizá, Tucano - BA. 56

Tabela 1 – Valores médios (n=4) de análise física de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021 em SET/21 43

Tabela 2 - Média dos parâmetros químicos do solo (n = 4) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL) 49

## **CAPÍTULO II**

Figura 1 – Localização de Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA 84

Figura 2 - Análise de coordenadas principais (PCoA) utilizando o coeficiente de Bray-Curtis, com base na ocorrência de espécies de FMAs, na estação úmida (u) e seca (s), em Manejo Regenerativo (MR), Plantio de Mandioca convencional (MC) e vegetação nativa tipo caatinga (CA). 91

Tabela 1 - Valores médios da análise química de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021. 86

Tabela 2 – Valores médios de análise física de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo (MR) convencional (MC) e mata nativa Caatinga (CA) no semiárido da região de Tucano – BA, 2021. 88

Figura 3 – Significância estatística dos coeficientes de correlação de Spearman (R) entre espécies de FMA em nível de gênero e propriedades do solo ( $P < 0,05$ ) das áreas de manejo regenerativo (MR), manejo convencional (MC) e Caatinga no semiárido de Tucano, BA. 90

Tabela 3 – Ocorrência de espécies vegetais presentes nas áreas de manejo regenerativo (MR), manejo convencional (MC) e Caatinga (CA) e a correlação de Spearman entre a densidade de esporos e as respectivas espécies na região do semiárido de Tucano, BA 94

Tabela 4 – Ocorrência de espécies vegetais presentes nas áreas de manejo regenerativo (MR), manejo convencional (MC) e Caatinga (CA) e a correlação de Spearman entre a densidade de esporos e as respectivas espécies na região do semiárido de Tucano, BA 102

## **CAPÍTULO III**

Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA	119
Figura 2 - Assinaturas espectrais do manejo regenerativo (10 anos (MR10), 3 anos (MR3), Início (INI) Policultivo (POL), convencional (mandioca (MANC), milho (MILC)) e mata nativa Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano- BA	123
Figura 3 - A - Comportamento espectral das áreas de manejo regenerativo (MR10), convencional (milho) e mata nativa Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano- BA. Figura 3 - B - Difratoograma de raio-X da fração argila da área de manejo convencional do milho (MILC) (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato)	124
Figura 4 - Difratoograma de raio-X da fração argila do barro utilizado como substrato para compor o composto orgânico usado na adubação dos canteiros. Ct: Caulinita; Il: Ilita; Mm/l: montmorilonita	125
Figura 5 - A: Comportamento espectral das áreas de manejo regenerativo (MR10), convencional (milho) e mata nativa Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano- BA. Figura 5 - B: Difratoograma de raio-X da fração argila da área de mata nativa CAAT. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita). C - Difratoograma de raio-X da fração argila da área de MR10. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato)	127
Figura 6 - Curvas espectrais de solos arenosos do semiárido após manejo regenerativo em, Tucano- BA. Evidência típica do indicativo de matéria orgânica a partir da concavidade na faixa espectral do VNIR. Óxido de ferro	130
Figura 7 – Valores médios de reflectância nos respectivos comprimentos de onda (700, 1900, 2205 e 2300 nm) evidenciando as diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Correlação de pearson para a matéria orgânica do solo (MOS), matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica leve (MOL), matéria orgânica pesada (MAM) e argila (ARG)	131
Figura 8 – Percentuais de C da fração MOP dos diferentes tratamentos na profundidade de 0-20 cm. *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade	132
Figura 9 – Percentuais de C da fração MAM dos diferentes tratamentos na profundidade de 0-20 cm. *Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade	134
Tabela 1 – Valores médios de análise física de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021	120
Tabela 2 - Valores médios da análise química de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021	121

## **CAPÍTULO IV**

Figura 1 - Fluxo de energia das relações humanas que podem ser individuais ou biológicas e coletivas ou sociais	152
Figura 2 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA	154
Figura 3 - Levantamento bibliográfico realizado em 23/10/2024 através da base SCOPUS	156
Figura 4 - Descrição das relações de fluxos e fundos avaliados de forma preliminar no modelo de eficiência energética em Jardins Marizá, Tucano – BA.	157
Figura 5 - Índices do Energy Return on Investment (EROI) demonstrando a eficiência energética do agroecossistema em Jardins Marizá, Tucano – BA.	166
Tabela 1 – Fatores de conversão utilizados para o cálculo da quantidade de energia bruta (MJ/kg) dos componentes da biomassa	163
Tabela 2 – Produtividade primária líquida (PPL ou PPN neta) e seus componentes em energia bruta. BVS= Biomassa Vegetal socializada; BR= Biomassa Reutilizada; BnC = biomassa não colhida; BA =biomassa acumulada	165
Tabela 3 - Componentes em energia bruta da Biomassa Animal Socializada (BAS) de Jardins Marizá, Tucano – BA.	169
Tabela 4 – Fonte externa de energia para realização de atividades e uso de insumos em Jardins Marizá, Tucano – BA.	171
Tabela 5 – Descrição da energia bruta da biomassa (%) das diferentes categorias	172

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADA: Argila Dispersa em Água

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ca: cálcio

CAAT: Mata Nativa Caatinga

CH: Condutividade Hidráulica Não Saturada

CO: Composto Orgânico

COT: Carbono Orgânico Total

CO<sub>2</sub>: Dióxido de Carbono

CTC: Capacidade de Troca Catiônica

CV: Coeficiente de Variação

Dp: Densidade de partículas

DS: Densidade do solo

DBC: Delineamento Blocos Casualizados

DRX: Análise de Difração de Raios X

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EROI: Retorno de Energia sobre Investimento

FAO: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura

FMA: Fungos Micorrízicos Arbusculares

GEEs: Gases do Efeito Estufa

NaOH: Hidróxido de Sódio

IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IF: Índice de Floculação

INI: Início

IRMS: Massa de Razão Isotópica

INEMA: Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

K: potássio

LIE: Laboratório de Isótopos Estáveis

MANC: Manutenção e Construção

MA: Metabolismo Agrário

MAM: Matéria Orgânica Mineral

MANC: Mandioca Convencional

Mg: magnésio

MILC: Miho Convencional

MOL: Matéria Orgânica Leve

MOP: Matéria Orgânica Particulada

MR: Manejo Regenerativo

MSA: Metabolismo Social Agrário

ONU: Organização das Nações Unidas

PCA: Análise de Componentes Principais

PCZ: Ponto de Carga Zero

PPL: Produtividade Primária Líquida

PPN: Produtividade Primária Neta

P: Fósforo

POL: Policultivo

Pt: Porosidade total

REDESER: Revertendo o Processo de Desertificação nas Áreas Suscetíveis do Brasil

RP: Resistência à Penetração

RH: Raio Hidratado

SAF: Sistemas Agroflorestais

UFV: Univeridade Federal de Viçosa

VNIR: Visível e Infravermelho Próximo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	22
<b>2 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	27
2.1 AMOSTRAGEM	29
2.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E DESCRIÇÃO DOS SOLOS	32
REFERÊNCIAS	38
<b>CAPÍTULO I: DIVERSIDADE VEGETAL E INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA REGENERATIVA DE BASE AGROECOLÓGICA NO SEMIARIDO BRASILEIRO</b>	42
RESUMO	
1 INTRODUÇÃO	43
2 MATERIAIS E MÉTODOS	44
2.1 AMOSTRAGEM DO SOLO	45
2.2 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO	46
2.3 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DO SOLO	49
2.4 ANÁLISE DA COBERTURA VEGETAL	51
2.5 TRATAMENTO ESTATÍSTICO	51
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
3.1 QUÍMICA E A MINERALOGIA DO SOLO	52
3.1.1 Matéria orgânica como indicador de qualidade do solo a partir do efeito de manejo	56
3.2 COBERTURA VEGETAL E ÍNDICES DE DIVERSIDADE	65
3.3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO	67
3.3.1 Densidade do Solo (DS)	67
3.3.1.2 Efeito da prática de manejo na densidade do solo	68
3.3.2 Agregados do solo	69
3.3.3 Resistência a Penetração (RP)	71
3.3.4 Porosidade Total (Pt) e Condutividade hidráulica não saturada ( $K(\theta)$ )	74
3.4 AGRUPAMENTO DOS SOLOS A PARTIR DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS	77
4 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	80
<b>CAPÍTULO II: FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (FMA) EM RESPOSTA AO MANEJO REGENERATIVO DE SOLOS ARENOSOS NO BIOMA CAATINGA NO NORDESTE DO BRASIL</b>	84
RESUMO	

1 INTRODUÇÃO	85
2 MATERIAIS E MÉTODOS	86
2.1 ÁREA DO ESTUDO	87
2.2 AMOSTRAGEM DO SOLO	87
2.3 EXTRAÇÃO DE ESPOROS	87
2.4 IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES	88
2.5 ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO	89
2.6 COBERTURA AGRÍCOLA VEGETAL DO SOLO	89
2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA	90
3 RESULTADOS	90
3.1 OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES	94
3.2 CORRELAÇÃO COM AS PROPRIEDADES DO SOLO	94
4 DISCUSSÃO	96
4.1 DENSIDADE DE ESPOROS	97
4.2 RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DO SOLO E OS FMA'S	97
4.2.1 Textura do solo	99
4.2.2 Fósforo (P)	100
4.2.3 Matéria orgânica (MO) e H+Al (acidez potencial)	101
4.3 VARIAÇÃO SAZONAL E PREDOMÍNIO DE ESPÉCIES EM ZONAS SEMIÁRIDAS	101
4.4. RELAÇÃO DA DIVERSIDADE DE PLANTAS COM OS FMA'S	105
5 CONCLUSÃO	106
REFERÊNCIAS	113
<b>CAPÍTULO III: ESPECTRORRADIOMETRIA DE SOLOS ARENOSOS NA PERSPECTIVA DA AGRICULTURA REGENERATIVA NO BIOMA CAATINGA</b>	113
RESUMO	
1 INTRODUÇÃO	114
2 MATERIAIS E MÉTODOS	116
2.1 ÁREA DO ESTUDO	116
2.2 COLETA DO SOLO	117
2.3 ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO	117
2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS - X	119
2.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS ESPECTRAIS DE SOLOS	119

2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA	119
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	120
3.1 RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO ESPECTRAL, MANEJO E PROPRIEDADES DO SOLO	121
3.2 COMPREENDENDO AS RESPOSTAS ESPECTRAIS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS) A PARTIR DO MANEJO	121
3.3 A ESPECTROSCOPIA DE SOLOS É UM MÉTODO EFICAZ NA TOMADA DE DECISÃO NO MANEJO REGENERATIVO?	132
4 CONCLUSÃO	134
REFERÊNCIAS	135
<b>CAPÍTULO IV: CONVIVENCIA COM A SECA NA AGRICULTURA REGENERATIVA DE BASE AGROECOLÓGICA SOB A ÓTICA DO METABOLISMO SOCIAL AGRÁRIO (MSA): CONSIDERAÇÕES INICIAIS NO SEMIÁRIDO.</b>	143
1 INTRODUÇÃO	144
2.1 COMPREENDENDO OS FLUXOS ENERGÉTICOS	146
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS	147
2.1 ÁREA DO ESTUDO	147
2.1.1 Caracterização da área	147
2.1.2 Levantamento dos dados	149
2.2 DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE BIOMASSA E INDICADORES UTILIZADOS	150
2.2 DESCRIÇÃO DOS CÁLCULOS DAS CATEGORIAS DE BIOMASSA	151
2.3.1 Biomassa Vegetal Socializada (BVS)	151
2.3.2 Biomassa Animal Socializada (BAS)	151
2.3.3 Biomassa Reutilizada (BR)	152
2.3.4 Biomassa não colhida (BnC)	153
2.3.5 Biomassa Acumulada (BA)	154
2.3.6 Fluxo externo	155
2.4 CONVERSORES DE ENERGIA	157
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	157
4 CONCLUSÃO	168
5 REFERÊNCIAS	170
6 APÊNDICE	174

## 1 INTRODUÇÃO

Cerca de 95% da produção global de alimentos dependem do solo. No entanto, as práticas agrícolas intensivas, a superexploração dos recursos naturais e o crescimento populacional, estão pressionando cada vez mais este importante recurso. Um terço deles já está degradado, e especialistas estimam que a erosão do solo pode levar a uma perda de 10% na produção agrícola até 2050 (FAO, 2022).

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAO tem defendido melhorias em práticas ambientais nos sistemas agroalimentares, com foco na conservação e gestão sustentável de terras agrícolas, no âmbito do projeto “Revertendo o Processo de Desertificação nas Áreas Suscetíveis do Brasil: Práticas Agroflorestais Sustentáveis e Conservação da Biodiversidade”, também conhecido como REDESER. O objetivo da proposta é ampliar e fortalecer a base técnico-científica do manejo florestal sustentável da Caatinga, visando colher subsídios técnicos que poderão melhorar o manejo dos recursos florestais do bioma (FAO, 2022). Isto porque a degradação das terras em ambientes secos é um processo que causa efeitos severos a biodiversidade e a vida humana, acarretando consequências danosas as funções ecossistêmicas do solo. As regiões semiáridas são especialmente suscetíveis às condições de seca por causa de sua baixa precipitação anual. Quando aliada a presença de solos arenosos é necessária ainda mais cautela já que envolve a fragilidade vinculada aos aspectos erosivos e de desertificação. Como maneira de reverter as consequências advindas da relação exploratória e do manejo inadequado destes solos, a agroecologia busca fornecer uma compreensão mais profunda da natureza dos agroecossistemas e seu funcionamento, integrando princípios agronômicos, ecológicos e socioeconômicos (Altieri, 2001). A integração desses princípios são os fundamentos dos sistemas agrícolas de base agroecológica (Gliessman, 2000). Especificamente para a biologia do solo, componente importante de sustentabilidade em sistemas mais frágeis como este, que sofre pela mecanização abusiva e a utilização crescente e combinada de agrotóxicos sendo um fator complicador e deletério para a comunidade microbiana do solo (Oliveira *et al.*, 2009).

Em sistemas como o do semiárido, um manejo do solo embasado na abordagem agroecológica pode se tornar de grande utilidade, por viabilizar a integração de contextos sociais, ecológicos, econômicos e culturais (Freitas, 2009; Ventura, Andrade, 2013; Lana *et al.*, 2018). Solos manejados sob princípios

agroecológicos podem oferecer melhor condição ao desenvolvimento vegetal e de animais, proporcionando melhor equilíbrio sucessional, sustentabilidade, segurança alimentar, além de colaborar com a conservação da biodiversidade. Neste sentido, a cobertura vegetal se configura como um dos elementos mais significativos, uma vez que exerce um papel fundamental na indicação de elementos como a qualidade do solo, influência na dinâmica geomorfológica, temperatura, precipitação, entre vários outros parâmetros oriundos das inter-relações entre os fenômenos do ambiente físico natural (Galvncio *et al.*, 2016).

Os sistemas de base agroecológica frequentemente são voltados para a valorização do aporte e transformação da matéria orgânica, bem como para a atividade biológica que atua na ciclagem de nutrientes, buscando manter a qualidade dos agroecossistemas (Miller, 2014; Gama-Rodrigues *et al.*, 2008). As interações das comunidades de fungos e bactérias são comuns no solo sob este tipo de manejo, o que influencia os processos edafológicos (Menezes *et al.*, 2017). Para a manutenção da vida microscópica e seus benefícios, torna-se imprescindível um manejo que valorize a conservação da estrutura do solo e a atenuação dos impactos da erosão e compactação.

A qualidade física do solo associada à sua estrutura é sempre um ponto chave na avaliação da saúde do solo. Apesar de a textura não ser um bom indicador de qualidade, ela é uma característica que pode afetar algumas propriedades do solo envolvidas na sua qualidade. Os processos físico-químicos de formação dos agregados estão associados principalmente à presença de argilas muito pequenas e, portanto, tendem a ser predominantes em solos de textura mais fina. Em solos arenosos, situação típica de algumas regiões do semiárido, por outro lado, a agregação é quase inteiramente dependente de processos biológicos (Brady; Weil, 2013). Neste caso, a presença, manutenção e estabilidade da matéria orgânica é fundamental, constituindo-se no principal agente responsável pela formação e estabilidade dos agregados (Brady; Weil, 2013).

O modelo de produção em bases agroecológicas tem potencial de beneficiar especialmente os solos do semiárido que, apesar de serem considerados férteis, em sua maioria (EMBRAPA, 2014), não são necessariamente produtivos. As limitações normalmente verificadas incluem propriedades físicas limitantes e acúmulo de sais, o que acaba por inviabilizar o plantio de espécies agrícolas. No semiárido, densidades do solo de 1,40 g/cm<sup>3</sup> em Planossolos e de 1,50 g/cm<sup>3</sup> em Neossolos já indicam

restrições de uso. Essas limitações são especialmente mais relevantes quando associadas ao desmatamento, baixo teor de matéria orgânica do solo e compactação por pisoteio do gado (Ursulino; Moreno, 2014). O cultivo pode ser afetado também pela alta salinidade do solo. Assim como ocorreu em um Luvisolos e Neossolos Flúvicos irrigados por sulcos e/ou inundação (Soares *et al.*, 2016).

Em solos do semiárido, além do menor teor de argila, o déficit hídrico e o reduzido aporte orgânico exigem uma dinâmica diferenciada em relação ao manejo do solo em bases agroecológicas. Neste caso é fundamental investir em técnicas como a integração de culturas com a criação de animais, que por meio da urina, saliva e excrementos favorecem a decomposição da matéria orgânica (Lana *et al.*, 2018) ou mesmo de policultivos com vegetais de diferentes estratos e sistemas radiculares adaptados as condições edafoclimáticas. Um exemplo da aplicação dessas técnicas na agricultura familiar sertaneja é o Projeto de Policultura no Semiárido, que foi coordenado pelo Instituto de Permacultura da Bahia. No projeto, técnicas e práticas de manejo têm sido conduzidas a partir da adoção dos sistemas agroflorestais (SAF) que tem logrado reverter processos de desertificação, bem como por meio de toda uma rede de organização participativa, devolver a dignidade e segurança alimentar para famílias de quatro municípios baianos (Freitas, 2009; Sanches, 2011).

Alguns benefícios da policultura envolvem o favorecimento direto da agrobiodiversidade a partir do sistema diversificado (plantas e/ou animais) no manejo, além de seu efeito benéfico sobre a retenção de água no solo, podendo reduzir a evapotranspiração, dispensando a irrigação e controlando o surgimento de plantas espontâneas, além de oferecer toda uma biomassa vegetal que é totalmente aproveitada na unidade produtiva (Ventura; Andrade, 2013).

Uma das propostas de policultivo mais difundidas no país são os Sistemas Agroflorestais (SAFs). Esses sistemas têm sido referenciados como prestadores de serviços ecossistêmicos, com impactos positivos no estoque de carbono acima e abaixo do solo (Vasconcellos *et al.*, 2020). Como indicado, a manutenção de carbono no semiárido é fundamental para a qualidade do solo e sistemas de manejo, os quais são fundamentais para se garantir a sustentabilidade dos agroecossistemas.

Em torno de 300 milhões de toneladas de carbono são perdidos para a atmosfera a cada ano pelas terras áridas como resultado da desertificação

(Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Determinar este balanço entre perdas e ganhos de carbono em solos pode não ser um grande desafio, uma vez que as lacunas verificadas nos estudos têm sido atenuadas a partir do uso das geotecnologias, que incluem mapeamento de áreas desertificadas, regeneradas e vegetadas do semiárido (Sá *et al.*, 2015; Galvencio *et al.*, 2016; Lima; Almeida, 2017; Silva *et al.*, 2020) ou técnicas de sensoriamento remoto, que incluem análises espectrais da vegetação e sua relação com o fluxo de CO<sub>2</sub> (Silva; Baptista, 2015). As ferramentas geotecnológicas permitem análises de baixo custo e não destrutivas visando a melhor compreensão de áreas do semiárido como a Caatinga. Nessas áreas são verificadas constantes alterações da paisagem pela remoção anual de parte da vegetação nativa para a implantação de novos campos de cultivo (Sampaio; Costa, 2011).

Do exposto fica evidente a relevância de estudos que busquem avaliar práticas conservacionistas de manejo do solo que favoreçam as funções ecossistêmicas, a agrobiodiversidade e a capacidade de equilíbrio sucessional no semiárido. Algumas iniciativas neste sentido buscam integrar um sistema de cooperação de espécies vegetais e animais com a valorização do solo como recurso fundamental para a sustentabilidade desses agroecossistemas mais frágeis. Uma dessas experiências agroecológicas é a propriedade denominada Jardins Marizá, localizada na região de Tucano, BA. Nesta propriedade, práticas de agricultura regenerativa inspirada na permacultura são executadas desde 2004.

A agricultura regenerativa é uma das possibilidades de fazer a agroecologia pautada no manejo do agroecossistema e vem sendo amplamente discutida como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e possibilidade de aumento dos estoques de carbono orgânico do solo, e consequente sequestro de CO<sub>2</sub> (White, 2020; Newton *et al.*, 2020; Giller *et al.*, 2021). O termo “agricultura regenerativa” foi utilizado inicialmente por Robert Rodale, no início da década de 1980, para descrever uma abordagem holística da agricultura que incentiva a inovação contínua e a melhoria das medidas ambientais, sociais e econômicas. Neste contexto, a saúde do solo se enquadra como prioridade, estando intrinsecamente ligada a segurança da saúde alimentar global (Rodale Institute, 2022). Atualmente não há uma definição científica de consenso para o termo, mas há diversas abordagens para se definir o que vem a ser a agricultura regenerativa. Disto resulta o fato de que, muitas das vezes, pode haver a exclusão e, ou a inclusão de processos,

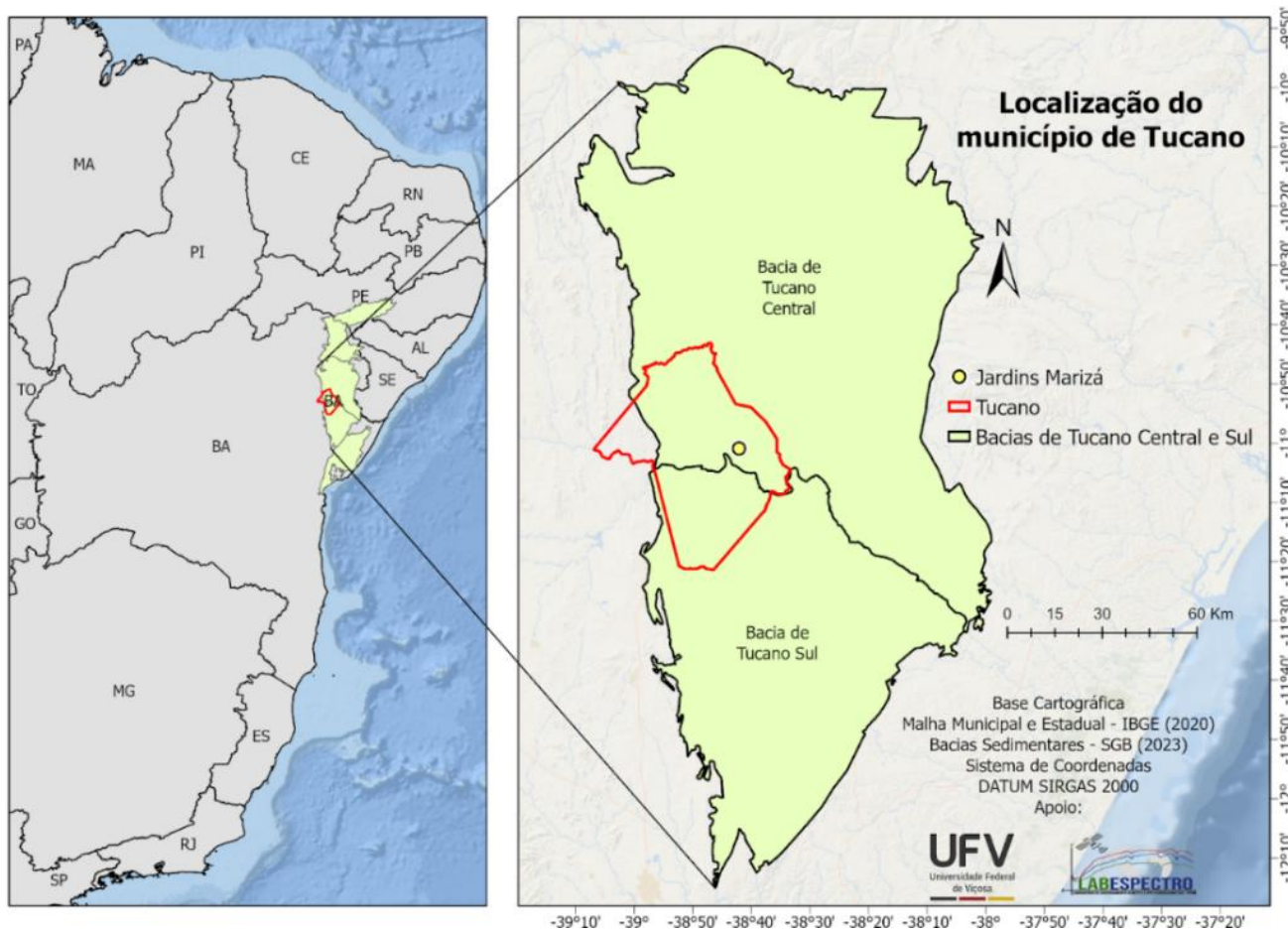
iniciativas e resultados que estejam de acordo com o interesse de um determinado grupo (Elevitch *et al.*, 2018; Schreefel *et al.*, 2020). De qualquer maneira a melhor definição para a agricultura regenerativa é a que inclui a conservação do solo como ponto de entrada para se regenerar e contribuir para as múltiplas funções ecossistêmicas do solo, sejam elas de regulação e apoio e que tragam melhorias não apenas ao meio ambiente, bem como as dimensões socioeconômicas da produção sustentável de alimentos (Schreefel *et al.*, 2020). Um estudo de cenários para os próximos 30 anos dos países que forma a Grã-Bretanha, indicou que, para se cumprir uma meta internacional de emissão líquida zero de Gases do Efeito Estufa (GEEs), seria necessário reduzir 6,48 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por ano, o que poderia ser conseguido com a prática das lavouras de cobertura em terras agrícolas (Jordon *et al.*, 2022). O estudo considera o uso de lavouras de cobertura e da rotação de culturas como práticas da agricultura regenerativa, com potencial para aumentar substancialmente os estoques de carbono no horizonte dos 30 anos, sendo capaz de mitigar até um quarto das emissões agrícolas de GEEs. Além de minimizar os efeitos oriundos das mudanças climáticas, a agricultura regenerativa pode viabilizar uma melhor resposta do Metabolismo Agrário (MA) proposta por González de Molina *et al.* (2019), a partir de um resultado satisfatório da Produtividade Primária Líquida (PPL) do agroecossistema. Essa metodologia permite uma análise integrada de diferentes dimensões do agroecossistema e possibilita, por exemplo, que um sistema agrícola seja avaliado e monitorado considerando um conjunto de indicadores de sustentabilidade, sendo a PPL um importante parâmetro desta abordagem (Fávero *et al.*, 2022). Entendendo a importância destes elementos para a manutenção da agrobiodiversidade, da conservação dos solos e da água, bem como para as relações de convivência com a seca dos povos sertanejos de um bioma estritamente brasileiro, se faz de grande relevância o incentivo tecno-científico, cultural e socioecológico deste estudo.

Diante de todo exposto, o presente estudo tem por objetivo geral avaliar os fatores que determinam a qualidade de um solo arenoso, bem como os parâmetros de sustentabilidade e biodiversidade a partir da perspectiva da agricultura regenerativa de base agroecológica no semiárido baiano.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

A Bacia Sedimentar do Recôncavo tem sua evolução relacionada à ruptura do super-continente Gondwana. O Sistema de Riftes Recôncavo-Tucano-Jatobá engloba um braço abortado durante este processo, que culminou com a abertura do Atlântico Sul, entre o leste da América do Sul e oeste do continente africano (Magnavita; Silva; Sanches, 2005), onde integra a bacia do Tucano localizada ao norte do estado da Bahia, ocupando aproximadamente uma área de 46.500 km<sup>2</sup> compreendendo três sub-bacias: Norte, Central e Sul (Magnavita *et al.*, 2003; Caixeta *et al.*, 1994). As sub-bacias Tucano Central e Tucano Sul têm como embasamento a borda Nordeste do Cráton de São Francisco. A área de estudos denominada Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano Central próximo ao limite da sub-bacia do Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA.

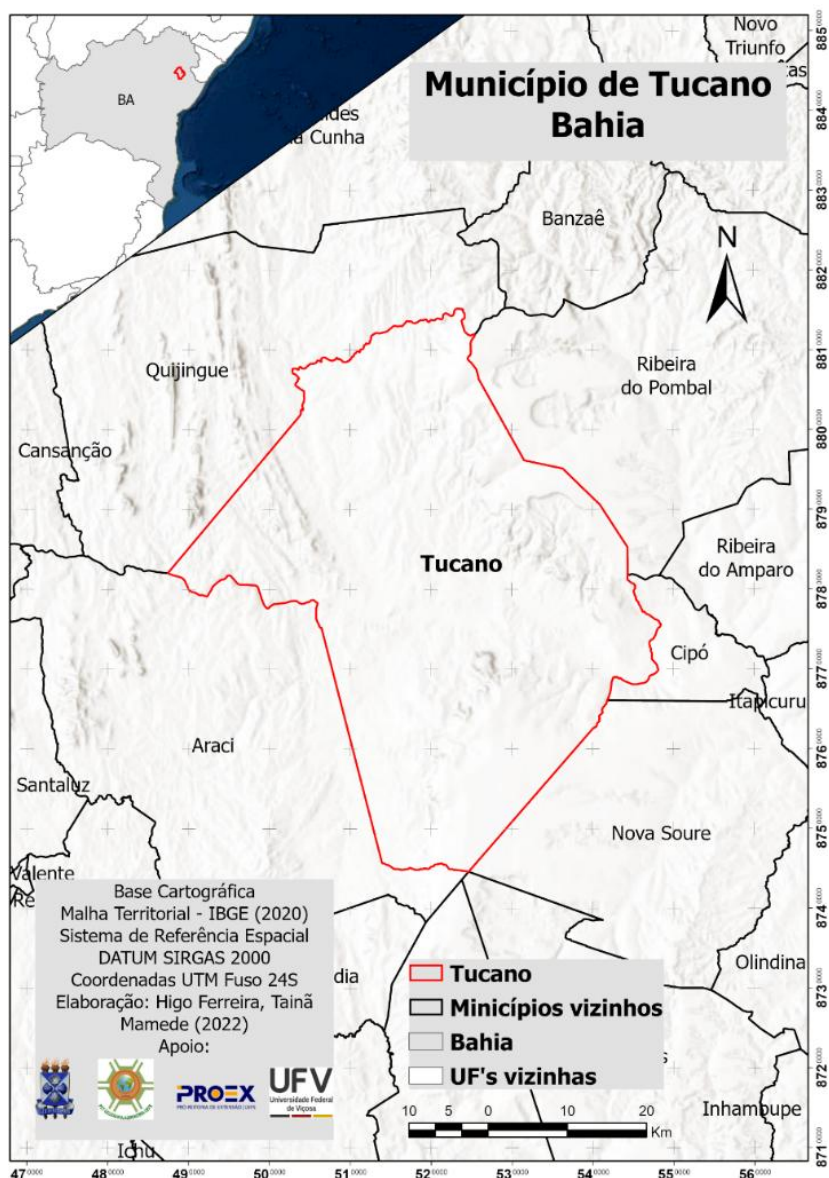


Fonte: UFV (2023)

Na Sub-bacia do Tucano Central, a presença da camada Amargosa foi descrita como uma unidade sedimentar, da formação Marizal dominada por lama revelando corpos heterolíticos de arenitos com ripples intercalados com uma fina camada de carbonato (Freitas, 2014).

O município de Tucano tem uma área territorial de 2.198,237 km<sup>2</sup> (IBGE, 2023) (Figura 2) com clima predominante do tipo estepe local e classificado como BSh (classificação de Koppen; Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 463 mm, com temperatura média de 25,4 °C. A vegetação predominante é formada por pastagens entremeadas por áreas com fragmentos de Caatinga (INEMA, 2017).

Figura 2 – Localização do município de Tucano – BA.



Fonte: UFV (2022)

A área de estudo Jardins Marizá possui aproximadamente 7 hectares, e vem sendo manejada sob sistema de agricultura regenerativa desde 2004, com o uso de diferentes práticas de manejo (Quadro 1).

Quadro 1- Caracterização das práticas agrícolas das áreas de manejo regenerativo  
INI: INICIO, MR3: 3 anos, MR10: 10 anos, POL: policultivo e manejo convencional  
(MANC: mandioca , MILC: milho) na região de Tucano – BA, 2021.

Área	Culturas agrícolas		Associação - culturas	Descrição do plantio	COB	ADU	CAL	PR	IRRI	TEMPO
	Anuais	Últimas								
INI	Não houve	Palma	Não	Roçado e plantado	CGP	Não	Não	Não	Não	5 meses
MR3	Quiabo, feijão, alpim, tomate	Romã, palma	Romã	Grade e plantio sem capina	CGP	CO	Não	Não	Não	3 anos
MR10	Abobora, milho, feijão	Palma	Leucena, gliricídia, moringa, algaroba	Plantio de sisal, após 5 anos feito corte e uso do resíduo como biomassa; formação de canteiros	CGP	CO	Não	Não	Não	10 anos
POL	milho, feijão, milho, gergelim, girassol, nabo forrageiro	Nabo forrageiro	Não	Pousio por 10 anos, grade e plantio sem capina	CGP	Não	Não	Sim	Não	10 anos c/ pousio
MANC	Mandioca	Mandioca, melancia	Não	Grade e plantio	Não	NPK	Não	Não	Sim *	2 anos
MILC	Feijão	Milho	Não	Roçado e plantado	Não	Não	Não	Não	Não	5 anos

CGP= Capim Green Panic, CO = Composto orgânico, COB= Cobertura; ADU = adubação; CAL = Calagem; PR = Pastejo rotacionado; IRRI = Irrigação. \* Gotejamento

Fonte: Elaborado pela autora

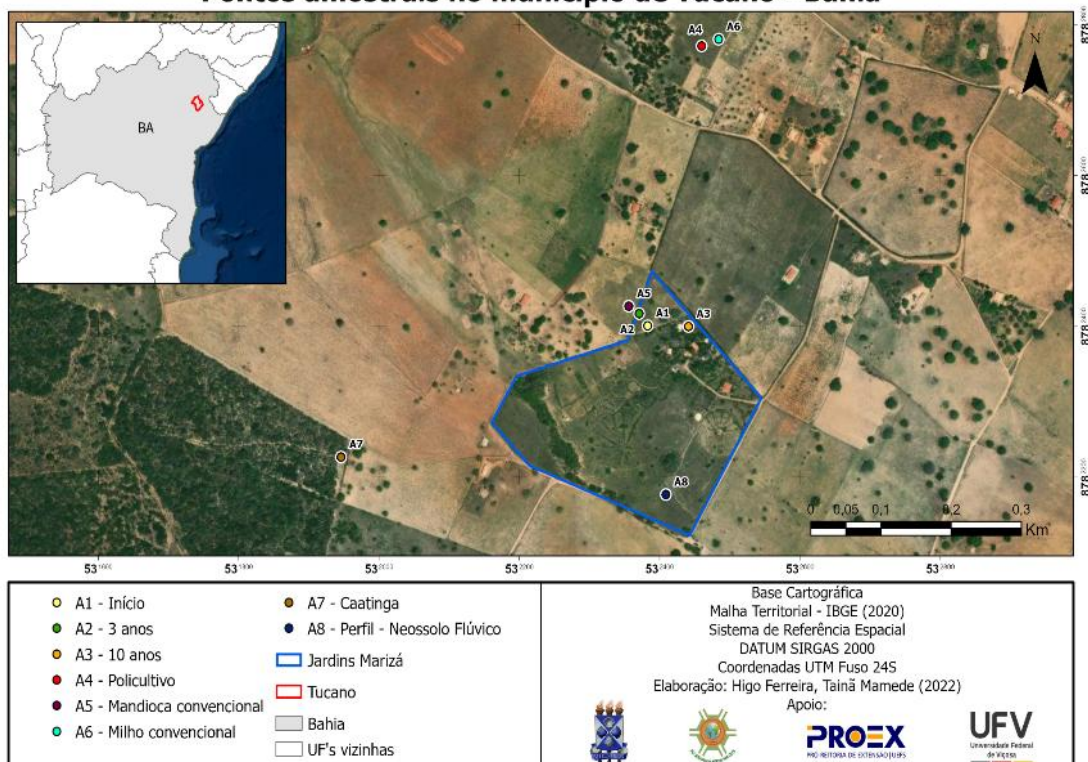
## 2.1 AMOSTRAGEM

Pontos de amostragem foram definidos para o desenvolvimento do trabalho de acordo com o histórico de uso das áreas, bem como em áreas adjacentes (propriedades vizinhas) para fins de comparação. Neste sentido, quatro áreas de manejo regenerativo foram escolhidas em Jardins Marizá (5 meses, 3 anos, 10 anos de pousio e 10 anos de manejo), além de duas áreas vizinhas de manejo

convencional e uma área de vegetação nativa (Caatinga). Essas sete áreas compuseram os tratamentos do presente estudo (Figura 3).

Figura 3 – Pontos de amostragem em Tucano – BA.

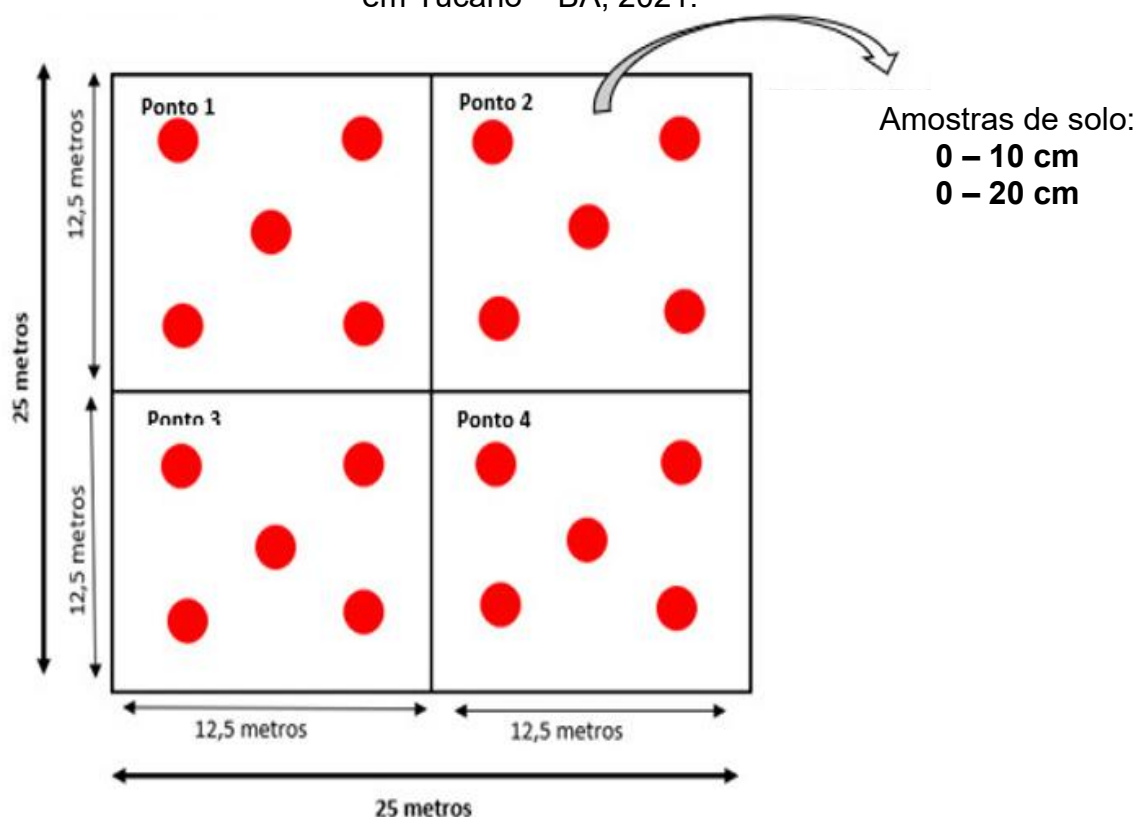
## Pontos amostrais no município de Tucano - Bahia



Fonte: Registros fotográficos realizados pela autora

No centro de cada tratamento, foi delimitado uma área de 25 x 25 m para as avaliações. Essa área foi subdividida em quatro subáreas, sendo em cada qual coletadas cinco amostras simples de amostras deformadas de solo (Figura 4). As amostras simples foram homogeneizadas para se formar uma amostra composta por subárea, sendo estas utilizadas como repetições. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0 a 10 cm para análise de fungos micorrízicos arbusculares e 0 - 20 cm para as demais análises.

Figura 4 – Delineamento amostral da coleta de solos feito nas áreas de estudo em Tucano – BA, 2021.



Fonte: Elaborada pela autora

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS ESTUDADOS

O solo do local foi descrito e classificado como um Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico, de ocorrência em relevo suave ondulado, em terço médio de encosta e originário de sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal. Para a caracterização dos solos foram abertas duas trincheiras em campo e avaliados os perfis de solo. De acordo com as

características morfológicas foram descritos os horizontes diagnósticos e feita a classificação do solo, conforme informações abaixo:

### **Descrição Geral**

IDENTIFICAÇÃO- Perfil 1 Jardins Marizá, Tucano – BA

DATA- 05/02/22

CLASSIFICAÇÃO- Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico A fraco relevo suave ondulado.

LOCALIZAÇÃO- Final de terço médio de encosta em Jardins Marizá a 4 km da estrada do povoado de Creguenhem em Tucano, BA.

LITOLOGIA- sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

MATERIAL ORIGINÁRIO- Alteração do material supracitado

PEDREGOSIDADE- Não pedregosa.

ROCHOSIDADE- Não rochosa.

RELEVO LOCAL – suave ondulado

RELEVO REGIONAL- suave ondulado a ondulado

EROSÃO- Laminar não aparente

DRENAGEM- Excessivamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA- Caatinga

USO ATUAL – Uso agrícola com policultivos. Com presença de raízes comuns finas e médias no Hor A.

DESCRITO E COLETADO- Oldair Del'Arco Vinhas Costa, Tainã Cádija Almeida de Mamede, Igor Sodré Santana, Higo Batista Ferreira.

### **Descrição morfológica**

A – 0-9cm; (2,5YR 5/3, úmida), bruno muito claro - acinzentado (2,5Y 7/3, seca), areia; grão simples, granular pequena fraca, solta, não plástica, não pegajosa; transição plana e gradual;

C – 9-55cm; (10YR 6/4, úmida), bruno muito claro - acinzentado (2,5Y 7/3, seca), areia; maciça, grão simples, solta, não plástica, não pegajosa; transição plana e gradual

2C1 – 55-95cm; (10YR 5/3, úmida), bruno claro-acinzentado (10YR 6/3, seca); mosqueado pouco difusi, areia; blocos subangular grande, fraca, solta a ligeiramente dura, solta a muito friável, não plástica e não pegajosa; com estrias horizontais ao longo de todo horizonte.

2C2 – 95-126cm; (10YR 5/3, úmida), bruno claro-acinzentado (10YR 6/3, seca); areia; blocos subangular, grande a muito grande; fraca, solta a ligeiramente dura, solta a muito friável; não plástica e não pegajosa; solta, solta. Mosqueado pouco distinto com estrias horizontais ao longo de todo horizonte.

2C3- 126-190cm; (10YR 5/4, úmida), bruno claro-acinzentado (10YR 6/3, seca); areia-franca; maciça, solta, solta, não plástica e não pegajosa; mosqueado comum proeminente; estrias horizontais em maior quantidade ao longo de todo horizonte.

3C – 190cm+

OBS: Horizontes apresentam estrias mais escuras que a massa do solo, amarronzadas e ligeiramente mais argilosa, horizontais de 1 a 3 mm, espaçados entre 10 a 15 cm. Em 2C1 as estrias são esmaecidas, aparentando estarem sendo destruídas. Parece indicar oscilações do lençol freático em diferentes períodos. Os horizontes 3C1 e 3C2 não foram descritos, apenas coletados com trado para caracterização química e física.

Figura 5 – Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico (perfil 1), no município de Tucano, BA.



Fonte: Registros fotográficos realizados pela autora

Os dados dos parâmetros químicos e físicos deste perfil de solo podem ser visualizados nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1- Parâmetros químicos do perfil de solo nº 1 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.

Horizonte	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	mg/dm <sup>3</sup>		cmolc/dm <sup>3</sup>				MO (dag/kg)	V%	m%
				Ca	Mg	H + Al	Al	T	t			
A 0-9 cm	5,80	7,40	68,00	1,29	0,56	0,30	0,00	2,32	2,02	0,73	87	7,60
C 9-55 cm	6,18	0,70	31,00	0,33	0,13	0,70	0,06	1,24	0,60	0,08	43	4,30
2C1 55-95 cm	5,90	0,50	25,00	0,18	0,08	1,10	0,40	1,42	0,72	0,22	22	2,90
2C2 95-126 cm	6,04	0,60	25,00	0,09	0,06	1,10	0,36	1,31	0,57	0,22	16,	0,00
2C3 126-190 cm	5,92	0,40	28,00	0,24	0,12	1,30	0,40	1,73	0,83	0,42	24	16,70
2C3 126-190 cm (sem estria)	5,96	0,40	26,00	0,13	0,07	1,00	0,29	1,27	0,56	0,01	21	77,60
Hor 2C3 estrias	5,80	0,20	49,00	0,56	0,30	2,20	0,58	3,19	1,57	0,22	31	67,50
Hor 3C 240 -290 cm	5,64	0,00	102,00	0,48	1,09	0,90	0,15	2,73	1,98	0,22	67	55,00
Hor 3C 290-300 cm	5,73	0,00	154,00	0,51	1,98	0,80	0,13	3,68	3,01	2,17	78	34,30

Fonte: Elaborado pela autora

Tabela 2 - Parâmetros físicos do perfil de solo nº 1 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.

Horizonte	Areia grossa (kg/kg)	Areia fina (kg/kg)	Silte (kg/kg)	Argila (kg/kg)	ADA (kg/kg)	Classificação Textural
Hor. A 0-9 cm	0,657	0,245	0,035	0,062	0,021	Areia
Hor. C 9-55 cm	0,673	0,251	0,023	0,053	0,019	Areia
Hor. 2C1 55-95 cm	0,662	0,235	0,034	0,068	0,032	Areia
Hor. 2C2 95-126 cm	0,685	0,211	0,034	0,071	0,028	Areia
Hor. 2C3 126-190 cm	0,63	0,249	0,044	0,077	0,037	Areia-franca
Hor. 2C3 126-190 cm (sem estrias)	0,641	0,256	0,039	0,064	0,029	Areia
Hor. 2C3 estrias cm	0,569	0,249	0,048	0,133	0,078	Franco-arenosa
Hor. 3C 240-290 cm	0,527	0,238	0,066	0,169	0,094	Franco-arenosa
Hor. 3C 290-300 cm	0,539	0,209	0,043	0,209	0,122	Franco-argilo-arenosa

Fonte: Elaborada pela autora

## Descrição Geral

IDENTIFICAÇÃO- Perfil 2, Jardins Marizá, Tucano – BA

DATA- 21/05/22

CLASSIFICAÇÃO- Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvíssólico A fraco, relevo suave ondulado.

LOCALIZAÇÃO- Terço médio de encosta em Jardins Marizá a 4 km da estrada do povoado de Creguenhem em Tucano, BA.

LITOLOGIA- sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

MATERIAL ORIGINÁRIO- Alteração do material supracitado

PEDREGOSIDADE- Não pedregosa.

ROCHOSIDADE- Não rochosa.

RELEVO LOCAL – topo, suave ondulado

RELEVO REGIONAL- suave ondulado a ondulado

EROSÃO- Laminar não aparente

DRENAGEM- Excessivamente drenado

VEGETAÇÃO PRIMÁRIA- Caatinga

USO ATUAL – Uso agrícola com policultivos. Presença de raízes comuns finas e médias no Hor A e Ac. Poucas e finas no C1 e C2.

DESCRITO E COLETADO- Oldair Del'Arco Vinhas Costa, Tainã Cádija Almeida de Mamede, Igor Sodré Santana, Higo Batista Ferreira, Joselisa Maria Chaves.

Figura 6 – Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico (perfil 2), no município de Tucano, BA.



Perfil 2

Fonte: Registros fotográficos realizados pela autora

### Descrição morfológica

- A – 0-6cm; (10YR 5/6, úmida), areia; grão simples, solto, solto, não plástica, não pegajosa; transição plana e gradual;
- Ac – 6-21cm; (10YR 6/6, úmida), areia; bloco subangular, moderado, fraco, grão simples, muito friável, não plástica, não pegajosa; transição plana e gradual.
- C1 – 21-60cm; (10YR 6/6, úmida); areia; blocos subangular grande, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- C2 – 60-87cm; (10YR 4/4, úmida); areia; blocos subangular, grande, muito friável, não plástica e não pegajosa; transição plana e gradual.
- C3- 87-143cm; (10YR 4/6, úmida), bruno claro-acinzentado (10YR 6/3, seca); areia; bloco subangular, muito grande, fraco, ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso.
- 2C4 – 143-178cm; (10YR 5/6, úmida), (10YR 7/4, seca); areia-franca; maciço, ligeiramente duro, muito friável, não plástico e não pegajoso.
- 2C5- 178-200+; (10YR 5/6, úmida); bruno amarelo claro (10YR 6/4, seca); maciço, ligeiramente duro a duro, friável, não plástico e ligeiramente pegajoso.

OBS: Presença de estrias finas de 3 mm com distanciamento de 8 cm. As estrias apresentam coloração amarronzada, com teores ligeiramente maiores de argila que a massa do solo, As mesmas vão esmaecendo de baixo para cima, indicando que houve intemperização recente dessas camadas. Camadas mais intensas a partir do horizonte C3.

Foi constatada a maior proporção de areia grossa no horizonte 2C4 e cascalho arredondado, pequeno de quartzo,

Os dados dos parâmetros químicos e físicos deste perfil de solo podem ser visualizados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3- Parâmetros químicos do perfil de solo nº 2 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.

Horizonte	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	Ca		Mg		Al + H		Al	T	t	MO (dag/kg)	V%	m%
				mg/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>	mg/dm <sup>3</sup>	cmolc/dm <sup>3</sup>						
A 0-6 cm	4,77	10,00	64	1,21	0,64	0,90	0,06	2,91	2,07			0,21	69	2,90	
Ac 6-21 cm	5,00	6,10	38	0,32	0,13	0,50	0,00	1,05	0,55			0,22	52	0,00	
C1 21-60 cm	5,42	0,80	50	0,12	0,05	0,50	0,06	0,80	0,36			0,22	37	16,70	
C2 60-87 cm	4,87	0,80	29	0,02	0,02	1,10	0,38	1,21	0,49			0,21	9	77,60	
C3 87-143 cm	4,90	0,90	20	0,06	0,02	1,10	0,27	1,23	0,40			0,22	10	67,50	
3C1 143-178 cm	4,97	0,50	23	0,15	0,06	1,00	0,33	1,27	0,60			0,27	21	55,00	
3C2 178-200+ cm	4,92	0,10	27	0,45	0,15	1,20	0,35	1,87	1,02			0,17	35	34,30	
C3 estria	4,88	0,20	29	0,27	0,10	1,30	0,29	1,74	0,73			0,18	25	39,70	
3C2 estria	5,16	0,10	23	0,41	0,17	1,20	0,35	1,84	0,99			0,16	34	35,40	

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 4- Parâmetros físicos do perfil de solo nº 2 em Jardins Marizá, Tucano, BA em 2022.

Horizonte	Areia grossa (kg/kg)	Areia fina (kg/kg)	Silte (kg/kg)	Argila (kg/kg)	ADA (kg/kg)	Classificação Textural
A 0-6 cm	0,731	0,193	0,017	0,059	0,022	Areia
Ac 6-21 cm	0,782	0,154	0,016	0,048	0,022	Areia
C1 21-60 cm	0,795	0,129	0,019	0,057	0,028	Areia
C2 60-87 cm	0,789	0,121	0,02	0,071	0,037	Areia
C3 87-143 cm	0,779	0,124	0,012	0,085	0,043	Areia
3C1 143-178 cm	0,741	0,119	0,034	0,106	0,068	Areia Franca
3C2 178-200+ cm	0,684	0,117	0,026	0,172	0,128	Franco-arenosa
C3 estria	0,733	0,139	0,019	0,109	0,078	Areia franca
3C2 estria	0,673	0,15	0,027	0,151	0,092	Franco-arenosa

Fonte: Elaborada pela autora

## REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. *Agroecologia: a dinâmica produtiva da agricultura sustentável*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 110 p, 2001.
- ARCOVERDE, C.; PEREIRA, C.. *Atributos físicos de solos em áreas sob diferentes usos no semiárido baiano*. *Holos*, Ano 34, v.04, 2018.
- BELLINASSO, H. *Biblioteca espectral de solos e sua aplicação na quantificação de atributos e classificação*. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola superior de Agricultura Luis de Queiroz, Piracicaba. 2009.
- BONFIM-SILVA, E. M. *et al.* *Desenvolvimento inicial de gramíneas submetidas ao estresse hídrico*. *Revista Caatinga*, v. 24, n. 2, p. 180-186, 2011.
- BOONE KAUFFMAN, R. J.; HUGHES, F.; HEIDER, C. Carbon pool and biomass dynamics associated with deforestation, land use, and agricultural abandonment in the neotropics. *Ecological Applications*, v. 19, n. 5, pp. 1211–1222, 2009.
- COSTA, C. F. G. da *et al.* *Escoamento superficial em Latossolo Amarelo distrófico típico sob diferentes groecosistemas no nordeste paraense* 4 R. *Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.17, n.2, p.162–169, 2013.
- DA SILVA, S.; BAPTISTA. G. Análises espectrais da vegetação com dados hyperion e sua relação com a concentração e o fluxo de co2 em diferentes ambientes na amazônia brasileira, *BCG - Boletim de Ciências Geodésicas*, Curitiba, v. 21, n. 2 Apr-Jun, pp.354-370, 2015.
- DE-POLLI, H.; GUERRA, J. G. M. *Determinação do carbono da biomassa microbiana do solo: método de fumigação-extração*. *Seropédica*: Embrapa-CNPAB, 10 p. 1997.
- ELEVITCH, C.R.; MAZAROLI, D. N.; RAGONE, D. Padrões agrofloretais para agricultura regenerative. *Sustain*, v. 10, pp. 1-21, 2018.
- FAO. *Solos saudáveis para as pessoas e para o planeta: FAO pede reversão da degradação do solo*. 2022. Consulta feita em 24/03/25 Disponível em:

<https://www.fao.org/brasil/noticias/detail-events/fr/c/1472352/>. Acesso em: 22 jun. 2024.

- FERNANDES, Y. A. D. *et al.* Densidade do solo e resistência mecânica à penetração de cambissolos em agroecossistemas no semiárido potiguar. *Rev. Bras. Agric. Irr.* v. 12, n. 3, Fortaleza, p. 2673 - 2682, Mai - Jun, 2018.
- FREITAS, Patrícia Honório. 'Um Novo Olhar do Sertão: Avaliação Participativa do Projeto Policultura no Semiárido'. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 4, n. 2, p. 2592-2595. 2009.
- GALVINCIO, J. D., BADARAU, M. S. BARBOSA, V. V. FREIRE, F. J. FREIRE, M. B. G. S. SOUZA, W. M Avaliação do estágio de regeneração do bioma caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.09, n.04, p. 985-996, 2016.
- GALVINCIO, Josiclêda Domiciano *et al.* *Avaliação do estágio de regeneração do bioma caatinga na microrregião do Araripe, com sensoriamento remoto*. Revista Brasileira de Geografia Física v.09, n.04, p. 985-996. 2016.
- GAMA-RODRIGUES, E.F. da; GAMA-RODRIGUES, A.C. da. *Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes*. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F.A. de O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, p.159-170. 2008.
- GILLER K.E.; HIJBEEK, R. J.A. ANDERSSON, J. Sumberg Regenerative agriculture: an agronomic perspective. *Outlook Agric.*, v. 50, pp. 13-25. 2021.
- GLIESSMAN, S. R. *Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável*. Trad. Maria José Guazzelli. Porto Alegre: UFRGS, 653 p. 2000.
- ISERMEYER, H. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Z. Pfl anzenernäh Bodenk*, v.56, p.26-38, 1952.
- LANA, A. M. *et al.* Influence of native or exotic trees on soil fertility in decades of silvopastoral system at the Brazilian savannah biome. *Agroforest Syst*, v. 92, p. 415–424, 2018.
- LEITE, R. S. *et al.* Hydroponic cultivation of *Physalis angulata* L.: Growth and production under nitrogen doses. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 47, p. 145-151, 2017.
- LEITE, R. S. *et al.* Physiological responses of *Physalis angulata* plants to water deficit. *Journal of Agricultural Science*, v. 10, n. 10, p. 287-297, 2018.
- LIMA, F. S., ALMEIDA, N. V. Dinâmica espaço-temporal da cobertura vegetal na Área de Proteção Ambiental (APA) do Cariri, Paraíba-PB, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.10, n.03, p. 699-721, 2017.
- LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; RAMOS, S. J. The saga of the agricultural development of the brazilian Cerrado. *Electronic International Fertilizer Correspondent*, Switzerland, n. 32, p. 29-57, 2012.
- MARTINS, C. M *et al.* Atributos químicos e microbianos do solo de áreas em processo de desertificação no semiárido de pernambuco. *Revista Bras. Ci. Solo*, v. 34, p.1883-1890, 2010.

- MENEZES, A. B DE RICHARDSON A. E ; THRALL P. H Linking fungal–bacterial co-occurrences to soil ecosystem function. *Current Opinion in microbiology*, v.37, p.135–141, 2017.
- MENEZES, R.S.C. *et al.* Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga. *Biome Braz. J. Biol.*, v. 72, n. 3 (suppl.), p. 643-653, 2012.
- MENEZES, R.S.C; SALCEDO I.H; ELLIOTT, E.T. Microclimate and nutrient dynamics in a silvopastoral system of semiarid northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 56, p. 27–38, 2002.
- MILLENNIUM ECOSYSTEM ASSESSMENT. *Ecosystems and Human Well-Being: Desertification synthesis*. Washington-DC: World resources Institute, 2005.
- MILLER, A. J. *Plant Mineral Nutrition*. Els: [s.l.], p.1-6, 15 jul. 2014.
- MOLINA, M. González de *et al.* *Historia de la agricultura española desde una perspectiva biofísica*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación: Madrid, 1900-p. 2008- 2019.
- NEWTON, P. Johns What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes *Front. Sustain. Food Syst.*, v. 4, 2020.
- OLIVEIRA, T. A. de; LÁZARI, T. M. de; NUNES, G. Efeito da interação do nicosulfuron chlorpyrifos sobre o banco de sementes e os atributos microbianos do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 3, p. 563-570, maio/jun. 2009.
- Por que agricultura regenerativa? Courtney White. *Revista Americana de Economia e Sociologia*, v. 79, n. 3, maio, 2020.
- SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture – the soil is the base. *Global Food Secur.*, v. 26, 2020.
- RANJARD, L.; POLY, F.; NAZARET, S. Monitoring complex bacterial communities using culture-independent molecular techniques: application to soil environment. *Research in Microbiology*, Paris, v. 51, n. 3, p. 167–177, 2000.
- RODALE INSTITUTE. *Regenerative Organic Agriculture*. Disponível em: <https://rodaleinstitute.org/why-organic/organic-basics/regenerative-organic-agriculture/>. 2022. Acesso em: 22 mar. 2022.
- ROUACHED, H.; RHEE, S. Y. Rhee. System-level understanding of plant mineral nutrition in the big data era. *Current Opinion in Systems Biology*, [s.l.], v. 4, p. 71-77, ago. 2017.
- SÁ, I. B. *et al.* A Mapeamento da desertificação da Região de Desenvolvimento Sertão do São Francisco com base na cobertura vegetal e nas classes de solos. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v. 08, n. especial (IV SMUD), p. 510-524, 2015.
- SAMPAIO, E. V. DE S. B; COSTA, T. L. Estoques e Fluxos de Carbono no Semi-Árido Nordeste: Estimativas Preliminares da. *Revista Brasileira de Geografia Física*. v.06, p. 1275-1291, 2011.
- SESSITSCH, A. *et al.* Microbial population structures in soil particle size fractions of a long-term fertilizer field experiment. *Appl Environ Microbiol*, v. 67, p. 4215-4224, 2001.

- SILVA, J. L. B. *et al.* Spatial-Temporal Monitoring of the Risk of Environmental Degradation and Desertification by Remote Sensing in a Brazilian Semiarid Region. *Revista Brasileira de Geografia Física Ambiental*. v.13, n.02, p. 544-563, 2020.
- SILVA, J. R. L. DA; MONTENEGRO.,A. A. A.; SANTOS, T. E. M. dos. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do semiárido brasileiro, sob manejo conservacionista. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental*, v.16, n.1, p.27–36, 2012.
- SILVA, M. A. S. *et al.* Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v.35, p.544- 552, 2005.
- SMIT E, L. P; GOMMANS S, V. D. B.J; VAN M.S, WERNARS K. Diversity and seasonal fluctuations of the dominant members of the bacterial soil community in a wheat field as determined by cultivation and molecular methods. *Appl Environ Microbiol*, v. 67, p. 2284-2291, 2001.
- SOARES, D. B. *et al.* A Degradação dos solos por sais em Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.09, n.05, p. 1621-1628, 2016.
- SOUSA Jr. J.G.A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENÚ, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestres e orbital. *Revista Brasileira de Ciências do Solo*, Viçosa, v. 32, p. 727- 738, 2008.
- SPARLING, G. P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indicator of changes in soil organic matter. *Australian Journal of Soil Research*, v.30, p.195-207, 1992.
- TABATABAI, M. A. Soil enzyme. *In*: WEAVER, R. W. (Org.). *Methods of soil*
- TORSVIK V.; ØVREÅS L. Microbial diversity and function in soil: from genes to ecosystems. *Ecology and industrial microbiology*, v. 5, p. 240–245, 2002.
- URSULINO, D,M,A; MORENO,M.M.T. Avaliação da qualidade de solos através de indicadores físicos e mineralógicos Assessment of the quality of soils using physical and mineralogical indicators. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 37, n. 2, p. 179-186, 2014.
- VASCONCELLOS, R. C de *et al.* Identificação dos serviços ecossistêmicos na produção agrícola: um estudo em sistemas agroflorestais. *Research, Society and Development*, v. 9, n. 10, p. e9259-109268, 2020.
- VENTURA,A.C; ANDRADE, J,C,S. Polyculture in the semi-arid regions of Brazil Field actions science reports Special Issue 3 Brazil, 2013.
- WEATHERLEY, P. E. Studies in the water relations of the cotton plant I. The Field Measurements of Water Deficit in Leaves. *New Phytologist*, v. 49, p. 81-97, 1950.

## **CAPÍTULO I: DIVERSIDADE VEGETAL E INDICADORES DE QUALIDADE DO SOLO NO CONTEXTO DA AGRICULTURA REGENERATIVA DE BASE AGROECOLÓGICA NO SEMIARIDO BRASILEIRO**

### **RESUMO**

A qualidade do solo tem intrínseca relação com as práticas de manejo ecológica e sustentáveis, podendo estimular a segurança alimentar e garantir o aumento e conservação da biodiversidade. A agricultura regenerativa de base agroecológica engloba uma série destas práticas podendo ser útil na identificação de indicadores sensíveis a qualidade do solo. Com base nisso, o objetivo deste estudo consistiu em identificar a cobertura vegetal agrícola e os indicadores de qualidade do solo sensíveis ao manejo regenerativo de base agroecológica, bem como suas alterações em comparação a sistemas convencionais de plantio e no bioma Caatinga como área de referência. Para tal, foram feitas análise química para fins de fertilidade, análise física (granulometria, densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partícula ( $D_p$ ), porosidade total (PT), resistência a penetração (RP), condutividade hidráulica não saturada ( $K(\theta)$ ), mineralogia) e análise biológica (matéria orgânica pesada (MAM), matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica leve (MOL), incluindo o estudo de diversidade da cobertura vegetal agrícola. Os resultados mostraram que os indicadores mais sensíveis as práticas regenerativas de manejo do solo foram a CTC potencial, a MOS (C-MOP, C-MOL, C-MAM), a RP, índice de floculação (IF) e PT. Dentre as áreas de manejo regenerativo a que apresentou melhor desempenho dos indicadores de qualidade do solo foi a MR10. Os indicadores físicos, químicos e biológicos estudados foram sensíveis para diferenciar as áreas de manejo regenerativo e convencional, considerando que o agroecossistema manejado pela agricultura regenerativa de base agroecológica possibilita a construção da qualidade do solo em condições similares ou ainda melhores que a Caatinga (CAAT).

Palavras-chave: Manejo do solo. Cobertura vegetal. Matéria orgânica do solo. Solos arenosos.

## 1 INTRODUÇÃO

A qualidade do solo é tão importante quanto à qualidade do ar e da água para a manutenção da vida. Como principal fonte de carbono orgânico da Terra, o solo é um importante regulador do clima e abriga uma grande reserva natural de microrganismos (Whitman, 1998). Além disso, as múltiplas interações de elementos físico-químicos e biológicos (pH, temperatura, umidade, estrutura das partículas, atividade biótica) possibilita a longo prazo que o solo promova a prestação de serviços ambientais a vida na Terra (Roesch *et al.*, 2007; FAO, 2015).

A qualidade do solo define a sua capacidade em funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais (Doran; Parkin, 1997). A ênfase não estaria em maximizar a produção e sim otimizar o uso dos recursos e sustentar produtividade por um longo período (Lal; Pierce, 1991). Para isso, a adoção de práticas de manejo ecológicas e sustentáveis gera vários benefícios do ponto de vista socioambiental, estimulando a segurança alimentar e garantindo o aumento e conservação da biodiversidade com melhoria da qualidade do solo e suas interfaces água e ar.

A agricultura regenerativa de base agroecológica assume princípios de manejo que englobam uma série de práticas sustentáveis ao solo e ao meio circundante, incluso aquelas pertencentes aos valores sociais e humanos (Schreefel *et al.*, 2020). De todo modo para que ela seja desenvolvida com eficiência a partir de uma abordagem agroecológica se faz necessário considerar as condições edafoclimáticas da área, atendendo aspectos que envolvam a restauração de solos e ecossistemas, a dependência de interações biológicas, a integração de plantas e animais e o uso eficiente do potencial fotossintético de combinações de espécies anuais e perenes (Soto *et al.*, 2020; Schreefel *et al.*, 2020; Giller *et al.*, 2021).

Na perspectiva de uma agricultura sintrópica, um conceito idealizado por Ernst Götsch no Sul da Bahia em um clima tropical úmido, a agricultura regenerativa em áreas vulneráveis sujeitas a desertificação, em regiões áridas e semiáridas da Caatinga, deve priorizar a inclusão de espécies adaptadas à seca, com alta capacidade de aporte de biomassa e retenção de água e produção de forragem (Mendes, 2019). Contudo, exige uma dinâmica sintrópica diferente daquela postulada por Götsch, já que as condições edafoclimáticas são demarcadas pela convivência com a seca. Com base nisso, em 2003, Marsha Hanzi fundadora do Instituto de Permacultura da Bahia, idealizou o projeto Jardins Marizá, o qual vem

possibilitando a regeneração de um solo arenoso a partir de um manejo sintrópico sertanejo no semiárido de Tucano, Bahia.

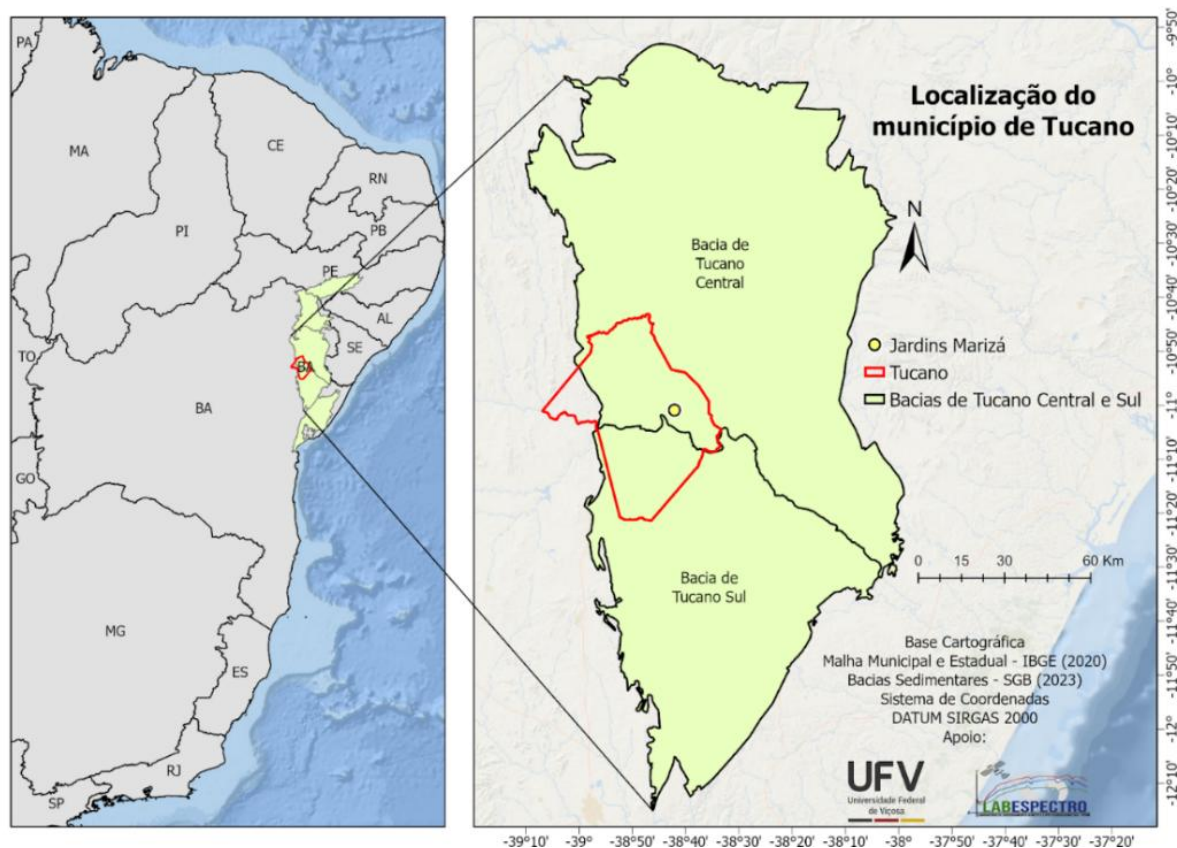
Nesta região, até este presente trabalho, não se tem informação acerca de estudos sobre indicadores de alterações químicas, físicas e biológicas do solo que retrate a dinâmica do manejo regenerativo de base agroecológica, comparativamente aquelas sujeitas ao manejo convencional, bem como o solo da vegetação natural como área de referência. Estudos desta natureza são fundamentais para a compreensão da dinâmica de melhor uso e manejo de solos arenosos que se constituem como frágeis e susceptíveis a degradação e desertificação no semiárido brasileiro. Além disso, possibilita conhecer mais sobre os solos da Caatinga, que são carentes de estudos pedológicos que relacionem os tipos de solos com as práticas de manejo de convivência com a seca, especialmente aqueles que abordem critérios de indicadores de qualidade do solo. Ademais, permite valorar a relação de convivência do povo sertanejo com os solos e as culturas de sequeiro, contribuindo para demonstrar como a escolha de uma determinada prática agrícola pode vir a melhorar ou comprometer a saúde do agroecossistema.

Diante do exposto, o presente trabalho objetivou identificar a cobertura vegetal agrícola e as propriedades químicas e físicas que definem a qualidade do solo sob diferentes condições de manejo regenerativo de base agroecológica e as alterações em comparação a sistemas convencionais de plantio e a Caatinga como área de referência.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

A Bacia Sedimentar do Recôncavo tem sua evolução relacionada à ruptura do super-contidente Gondwana. O Sistema de Riftes Recôncavo-Tucano-Jatobá engloba um braço abortado durante este processo, que culminou com a abertura do Atlântico Sul, entre o leste da América do Sul e oeste do continente africano (Magnavita; Silva; Sanches, 2005), onde integra a bacia do Tucano localizada ao norte do estado da Bahia, ocupando aproximadamente uma área de 46.500 km<sup>2</sup> compreendendo três sub-bacias: Norte, Central e Sul (Magnavita *et al.*, 2003; Caixeta, *et al.*, 1994). A área de estudos denominada Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano Central próximo ao limite da sub-bacia do Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru (Figura 1).

Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA.



Fonte: UFV (2023)

Na Sub-bacia do Tucano Central, a presença da camada Amargosa foi descrita como uma unidade sedimentar, da formação Marizal dominada por lama revelando corpos heterolíticos de arenitos com ripples intercalados com uma fina camada de carbonato (Freitas, 2014).

O clima da região é predominante do tipo estepe local e classificado como BSh (classificação de Köppen; Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 463 mm, com temperatura média de 25,4 °C. A vegetação predominante é formada por pastagens entremeadas por áreas com fragmentos de Caatinga (INEMA, 2017). O solo do local foi descrito e classificado como um Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvíssólico, de ocorrência em relevo suave ondulado, em terço médio de encosta e originário de sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

## 2.1 AMOSTRAGEM DO SOLO

Pontos de amostragem foram definidos para o desenvolvimento do trabalho de acordo com o histórico de uso das áreas na propriedade, bem como em áreas adjacentes (propriedades vizinhas de manejo convencional) para fins de comparação. Neste sentido, quatro áreas da agricultura regenerativa foram escolhidas em Jardins Marizá com tempos diferentes de manejo (cinco meses, três anos, dez anos de pousio seguido de manejo e dez anos de manejo), além de duas áreas vizinhas de agricultura convencional e uma área de vegetação nativa (Caatinga). O histórico das culturas agrícolas presentes em cada tratamento pode ser visualizado no quadro 1.

No centro de cada tratamento, foi delimitado uma área de 25 x 25 m para as avaliações. Essa área foi subdividida em quatro subáreas, sendo em cada qual coletadas cinco amostras simples de amostras deformadas de solo. As amostras simples foram homogeneizadas para se formar uma amostra composta por subárea, sendo estas utilizadas como repetições. As amostras foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm.

## **2.2 ANÁLISE FÍSICA DO SOLO**

Os critérios metodológicos para análise física do solo ocorreram segundo princípios adotados por Embrapa (2017). A determinação granulométrica foi realizada segundo o método da pipeta, conforme Lei de Stokes e utilizando o NaOH 0,01 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico, após agitação lenta (50 rpm por 16 h). A densidade do solo foi obtida pelo método da proveta, uma vez que a estrutura do tipo grãos simples não permitiu a coleta de amostras indeformadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização física (n=4) do Neossolo Quartzarênico (0-20 cm) de diferentes sistemas de manejo regenerativo, convencional e Caatinga no semiárido da região de Tucano – BA.

Área	Densidade do solo (g.cm <sup>-3</sup> )	Areia total (kg/kg)	Silte (kg/kg)	Argila (kg/kg)	Classificação Textural
INI	1,57	0,93	0,025	0,044	Areia
MR3	1,48	0,913	0,032	0,055	Areia
MR10	1,35	0,867	0,053	0,08	Areia Franca
POL	1,52	0,915	0,031	0,054	Areia
MANC	1,6	0,936	0,026	0,038	Areia
MILC	1,59	0,905	0,047	0,049	Areia
CAAT	1,6	0,9	0,035	0,066	Areia

INI, MR3, MR10, POL = Manejo Regenerativo; MANC, MILC (manejo convencional); CAAT = Caatinga. Fonte: Elaborado pela autora

A Argila Dispersa em Água (ADA) foi determinada pelo método da pipeta seguindo metodologia descrita pela análise granulométrica, bem como o Índice de Floculação (IF) calculado pela equação:  $IF = \frac{\text{Argila} - \text{ADA}}{\text{argila}} \times 100$ .

A Densidade de partículas (Dp) foi obtida segundo o método do balão volumétrico, utilizando-se álcool como líquido penetrante. Já a porosidade total (Pt) foi determinada conforme equação:  $PT = 1 - \frac{Ds}{Dp}$ .

As medidas de Resistência à Penetração (RP) foram feitas até 0,60 m de profundidade usando um penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF (Stolf et al., 1983). Foram realizadas em campo 12 repetições para cada tratamento, no período seco em SET/21 (Figura 2). Os dados obtidos foram convertidos para MPa a partir de um arquivo em EXCEL, utilizando a metodologia descrita por Stolf (1991) com adaptações. No momento da coleta dos dados foram obtidos os valores de umidade *in situ* até 60 cm de profundidade através do equipamento TDR-x (Figura 2).

Figura 2 – Análise da resistência a penetração (RP) com penetrômetro de impacto e obtenção da umidade e temperatura *in situ* até a profundidade de 60 cm em Tucano, BA Set/21



Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

Para análise da condutividade hidráulica não saturada em condições de campo foi utilizado um infiltrômetro de tensão do tipo Mini Disk Infiltrometer (Figura 3).

Figura 3 – Análise da condutividade hidráulica não saturada com o uso de um Mini Disk infiltrometer *in situ* em Tucano, BA Set/21



Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

Para determinar a condutividade hidráulica de cada ponto a partir da infiltração superficial, os dados obtidos foram avaliados no software New Mini Disk Infiltrometer Macro.

### **2.3 ANÁLISE QUÍMICA E MINERALÓGICA DO SOLO**

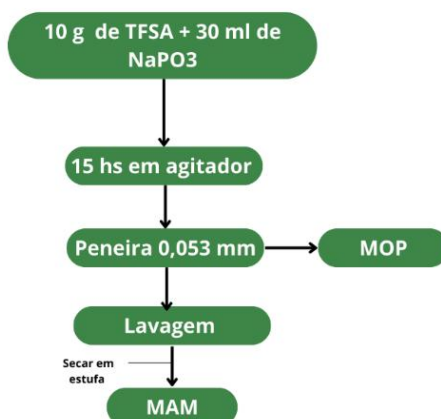
A análise química de rotina foi efetuada, o carbono orgânico total (COT) foi quantificado por oxidação por via úmida com  $K_2Cr_2O_7$   $0,167 \text{ mol L}^{-1}$  em meio sulfúrico e aquecimento externo (Yeomans; Bremner, 1988). O estoque de carbono foi calculado para a camada de 0 a 20 cm, a partir da equação 1 (Veldkamp, 1994):

$$\text{Est C} = (\text{CO} \times \text{Ds} \times e) / 10$$

onde: Est C = estoque de C orgânico em determinada profundidade ( $\text{Mg. ha}^{-1}$ ); CO = teor de COT na profundidade amostrada ( $\text{g kg}^{-1}$ ); Ds = densidade do solo da profundidade ( $\text{kg dm}^{-3}$ ); e e = espessura da camada considerada (cm).

Para análise do fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo (MOS) nas frações MOP (MO particulada) e MAM (MO pesada) utilizou-se o método adaptado de Cambardella e Elliot (1992) (Figura 4).

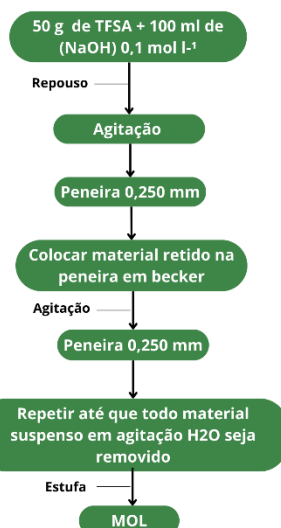
Figura 4 – Diagrama de separação da Matéria Orgânica Particulada (MOP) e da Matéria Orgânica Pesada (MAM)



Fonte: Elaborada pela autora adaptada e Cambardella e Elliot (1992)

Para a fração MOL (MO leve) a separação foi feita em água pela metodologia adaptada de Anderson e Ingram (1989) (Figura 5).

Figura 5 – Diagrama de separação da matéria orgânica leve (MOL) para quantificação do C



Fonte: Elaborada pela autora adaptada de Anderson e Ingram (1989).

A quantificação do C foi realizada em analisador elementar acoplado a um espectrômetro de Massa de Razão Isotópica (IRMS) (ANCA GSL 20-20, Sercon, Crewe, Reino Unido) no Laboratório de Isótopos Estáveis (LIE) da Universidade Federal de Viçosa (UFV). As amostras foram pesadas (40 a 50 mg) em balança do tipo Perkin Elmer – AD6, auto-balance em cápsulas de estanho, previamente

taradas. A leitura do C foi obtida em % e os dados foram tratados para encontrar o teor de C das frações.

Para análise mineralógica foram consideradas a fração argila das amostras de solo dos tratamentos MR10, MILC, CAAT e o substrato (barro coletado do riacho) utilizado na mistura do composto orgânico. O método de preparo foi de acordo com a EMBRAPA (2017) e posterior leitura no difratômetro de raios-X.

## **2.4 ANÁLISE DA COBERTURA VEGETAL**

Para o levantamento da cobertura vegetal agrícola foi utilizado o método do transecto em linha adaptado de Brower; Zar, (1984). Para tal, uma corda de 20 metros foi marcada com pontos a cada 2 m. Em cada projeção do ponto, em um raio de 80 cm foi avaliada para cada lado a presença de espécies agrícolas. Para contabilizar o estrato arbóreo, foi marcada a presença da projeção da copa dentro do respectivo ponto. Foram feitas três repetições para cada área amostral, totalizando 30 pontos.

## **2.6 TRATAMENTO ESTATÍSTICO**

O experimento foi em Delineamento inteiramente ao acaso (DIC), com quatro repetições. Para análise estatística algumas abordagens foram feitas considerando comparações entre as variáveis, substituindo os testes de comparações múltipla por comparações planejadas que podem ocorrer entre dois grupos com um ou vários tratamentos. Assim os dados foram submetidos a análise de variância, mediante contrastes planejados, cuja significância foi avaliada pelo teste de Holm a 5% de probabilidade de erro  $\alpha$  familiar (Quadro 1). Para garantir a confiabilidade da análise, a normalidade e a homocedasticidade foram avaliadas quanto a erros por meio dos testes de Jarque-Bera e Cochran, bem como a presença de outliers. Foi feita Análise de Covariância (ANCOVA) para corrigir o efeito da umidade sobre a resistência à penetração – RP. Os dados coletados foram submetidos à Análise de Variância (ANOVA) a 5% de probabilidade, seguida de comparação de médias Tukey ou Scott-Knott ( $p < 0,05$ ) este último para casos de distribuição não normal dos dados. Para medir a relação linear entre duas variáveis foram feitas correlações de Pearson (dados normais) ou Spearman (dados não normais). Com intuito de realizar uma investigação discriminatória das propriedades e entender como elas estão separadas em relação aos diferentes tratamentos foi aplicada uma Análise de

Componentes Principais (PCA). Foi utilizado o software de estatística SPEED (Carvalho *et al.*, 2020), bem como o software R para gerar os resultados de análise multivariada. Para obter os parâmetros ecológicos da vegetação foi utilizado o software Past.

Quadro 1 – Contrastes planejados (C) utilizados na comparação entre os diferentes tratamentos.

Contrasts	Comparisons	Planning contrasts
C <sub>1</sub>	MR3 - INIR	$\hat{C}_1 = t_2 - t_1$
C <sub>2</sub>	MR10 - INIR	$\hat{C}_2 = t_3 - t_1$
C <sub>3</sub>	MILC - INIR	$\hat{C}_3 = t_5 - t_1$
C <sub>4</sub>	POL - MILC	$\hat{C}_4 = t_4 - t_6$
C <sub>5</sub>	(MILC+MANC) vs MR10	$\hat{C}_5 = (t_5 + t_6) - 2 t_3$
C <sub>6</sub>	MR10 - MR3	$\hat{C}_6 = t_3 - t_2$
C <sub>7</sub>	MR10 - CAAT	$\hat{C}_7 = t_3 - t_7$

T1 = INI; T2= MR3; T3= MR10; T4= POL; T5= MANC; T6= MILC; T7= CAAT

Fonte: Elaborado pela autora

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 QUÍMICA E A MINERALOGIA DO SOLO

Com base nos resultados estatísticos da fertilidade do solo (Tabela 2), foram encontradas diferenças ( $p < 0,05$ ) nos teores de nutrientes, matéria orgânica (MO), pH em água, acidez potencial (H+Al) e CTC (T). Diferenças podem ser verificadas em MR10, MR3 e POL que apresentam maiores médias para K, Ca e Mg, seguida do P para MR3 e MR10 ( $p < 0,05$ ) respectivamente. Já as médias de T e MO tiveram maiores valores em MR10 e CAAT não apresentando diferença estatística entre elas ( $p < 0,05$ ). O pH teve a menor média para CAAT colocando este solo na condição de acidez elevada. De acordo com a classe de interpretação de fertilidade do solo (Ribeiro *et al.*, 1999) os dados de pH revelam alcalinidade fraca (REG3, REG10, POL, MAND), acidez fraca (INI E MILC) e acidez elevada (CAAT).

Tabela 2 – Caracterização química das áreas de agricultura e da Caatinga em Tucano, BA (n = 4). Áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL) Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC). Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm.

Área	pH (H <sub>2</sub> O)	mg/dm <sup>3</sup>		Ca	cmolc/dm <sup>3</sup>		T	MO dag/Kg
		P	K		Mg	Al + H		
INI	6,91 <sub>ab</sub>	10,98 <sub>bc</sub>	99,5 <sub>bc</sub>	1,06 <sub>c</sub>	0,51 <sub>c</sub>	0,2 <sub>cd</sub>	2,02 <sub>d</sub>	0,57 <sub>bc</sub>
MR3	7,38 <sub>a</sub>	60,8 <sub>a</sub>	163,5 <sub>a</sub>	2,2 <sub>ab</sub>	1,18 <sub>b</sub>	0,2 <sub>cd</sub>	3,98 <sub>b</sub>	0,97 <sub>b</sub>
MR10	7,31 <sub>a</sub>	15,58 <sub>b</sub>	131,5 <sub>ab</sub>	4,59 <sub>a</sub>	2,45 <sub>a</sub>	0,3 <sub>bc</sub>	7,7 <sub>a</sub>	2,76 <sub>a</sub>
POL	7,16 <sub>ab</sub>	8,37 <sub>c</sub>	146 <sub>ab</sub>	1,95 <sub>b</sub>	0,79 <sub>bc</sub>	0,2 <sub>cd</sub>	3,31 <sub>bc</sub>	0,67 <sub>b</sub>
MANC	7,31 <sub>a</sub>	11,9 <sub>bc</sub>	37,5 <sub>e</sub>	0,66 <sub>c</sub>	0,55 <sub>c</sub>	0,05 <sub>d</sub>	1,35 <sub>d</sub>	0,03 <sub>d</sub>
MILC	6,1 <sub>bc</sub>	9,55 <sub>c</sub>	45,5 <sub>c</sub>	1,06 <sub>c</sub>	0,4 <sub>c</sub>	0,7 <sub>ab</sub>	2,24 <sub>cd</sub>	0,4 <sub>cd</sub>
CAAT	4,74 <sub>c</sub>	6,9 <sub>c</sub>	77 <sub>b</sub>	2,08 <sub>b</sub>	0,59 <sub>c</sub>	4 <sub>a</sub>	6,86 <sub>a</sub>	2,62 <sub>a</sub>
CV (%)	34,29	20,99	20,13	20,99	26,34	27,50	19,86	19,86

  Muito bom  
  Bom  
  Médio  
  Muito baixo

Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade (p < 0,05). P: Fósforo, K: potássio, Ca: cálcio, Mg: magnésio; T: Capacidade de Troca Catiônica (CTC) em pH 7,0; H + Al: acidez; MO: Matéria Orgânica; CV: Coeficiente de Variação.

Fonte: Elaborado pela autora

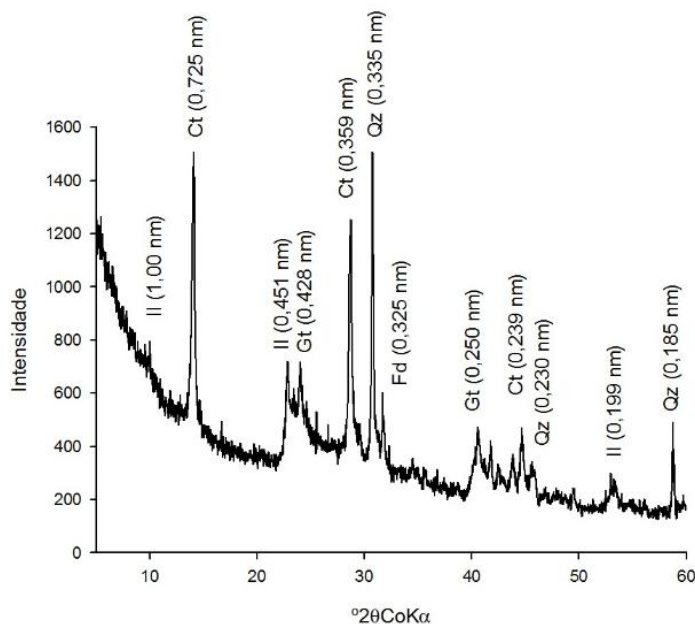
Interpretação da fertilidade

O manejo regenerativo proporcionou ganhos de soma de bases, em especial pelo aumento dos teores de Ca e Mg. De acordo com os níveis aconselháveis destes cátions no solo, os tratamentos MR3, MR10 e POL foram os que apresentaram melhores condições de fertilidade (Ribeiro *et al.*, 1999), conforme pode ser visualizado na tabela 2.

A área MR10 apresentou teor de MO similar da CAAT, não apresentando diferença estatística entre elas. Solos arenosos apresentam tendência a possuir menores concentrações de matéria orgânica que solos argilosos. Isso decorre de uma menor área superficial específica e a quantidade de cargas, o que possibilita menores interações organominerais com maiores taxas de mineralização. A mineralogia do solo, especialmente da fração argila, é um fator importante a ser levado em consideração (Alleoni *et al.*, 2009), a qual possibilita compreender o Ponto de Carga Zero (PCZ), o predomínio de cargas e o poder tampão do solo. De acordo com o DRX a área de MR10 contém presença de caulinita e goethita (Figura 6). Por possuírem cargas variáveis que mudam em função do pH, estes argilominerais contribuem para o equilíbrio de cargas elétricas, especialmente óxidos

de ferro como goethita que apresenta PCZ na faixa de 8,5, sendo na maioria das vezes um valor abaixo do pH do solo, gerando cargas positivas.

Figura 6 – Difratoograma de raio-X da fração argila da área de MR10. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato)



Fonte: Elaborado pela autora

No entanto por se tratar de um solo com apenas 8% da fração argila, apresenta baixa capacidade tampão, estando a CTC influenciada em maior proporção pela presença da matéria orgânica (MO) e não pela mineralogia. A matéria orgânica do solo promove um aumento de carga líquida predominante negativa, aumentando assim a predisposição catiônica. Isso porque o PCZ da MO se dá na faixa de 3,5, abaixo da maioria dos valores de pH dos solos, sendo que a grande capacidade de troca de cátions ocorre especialmente em pH mais alto, que é o caso deste estudo. Além disso, a matriz quartzosa está presente em grande concentração nestes solos, indicando que naturalmente eles possuem baixa reserva de nutrientes.

A acidez potencial (H + Al) apresentou valores “muito baixo” para as áreas de manejo regenerativo e convencional, já a CAAT teve valor considerado “médio” (Ribeiro *et al.*, 1999). O resultado desta variável é um indicativo direto do poder tampão do solo que se caracteriza na capacidade do solo de resistir a variações do

pH, estando diretamente relacionada com o teor de argila e matéria orgânica. Por se tratar de solos arenosos era de se esperar o baixo poder tampão, com exceção da CAAT que certamente por apresentar acidez elevada teve o teor de MO influenciando no aumento de  $H + Al$ . Um solo com elevada acidez potencial ( $H + Al$ ), tem grande probabilidade de sofrer correção do pH e ocupar os sítios de troca com cátions básicos, alterando a CTC efetiva (t) do solo. Assim é mais favorável ter um solo com acidez potencial mais elevada comparado a outro solo de acidez potencial baixa. No caso dos solos manejados a CTC efetiva (t) teve valores próximos a CTC potencial (T), como MR10 com 7,38 cmolc/dm<sup>3</sup> para a CTC efetiva (t) e 7,70 cmolc/dm<sup>3</sup> para a CTC potencial (T), indicando valores “muito bom” e “médio” respectivamente (Ribeiro *et al.*, 1999). Isto supõe que estes solos já estão apresentando quase a sua capacidade máxima de sítios de troca ocupados com cátions, ou seja, a partir disso, não há mais como melhorar a CTC efetiva (t). De qualquer maneira, é válido ressaltar que a CTC destes solos vem sendo construída conforme a entrada de MO a partir do manejo.

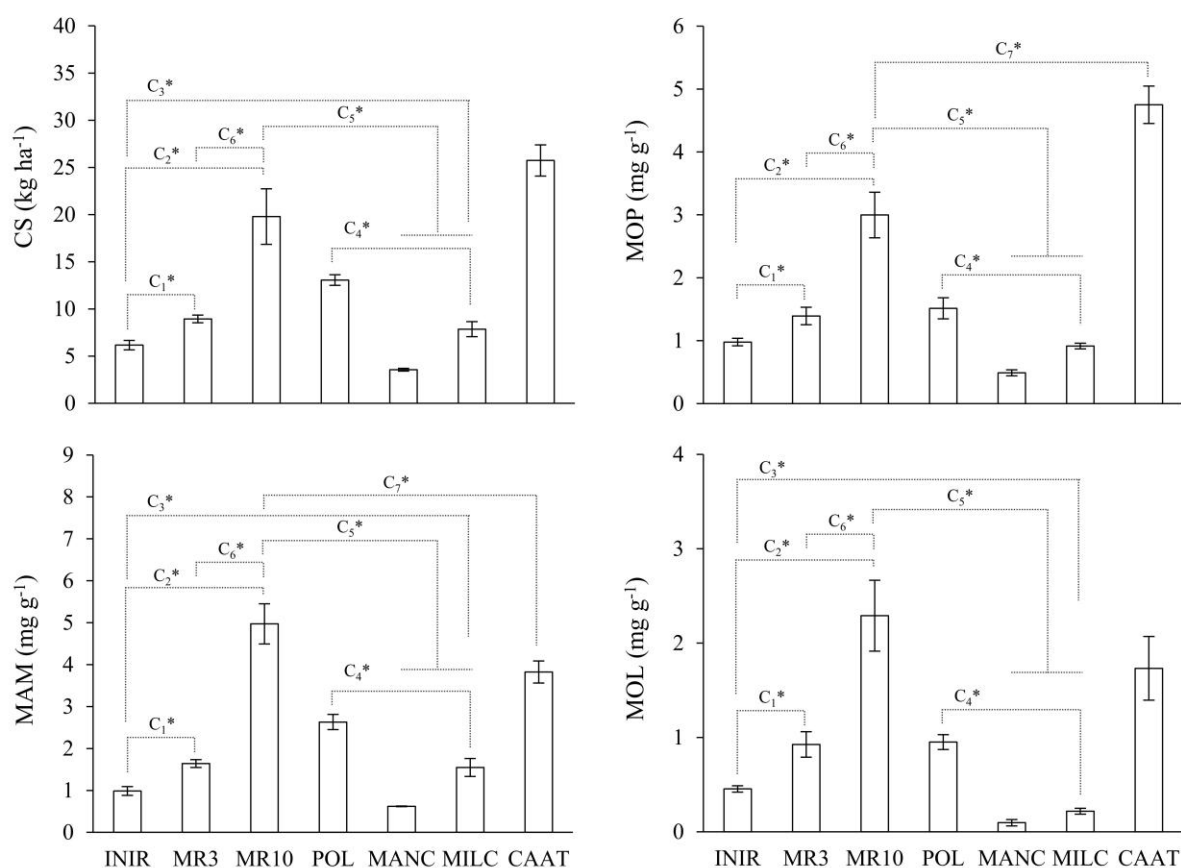
Os solos com baixo poder tampão requerem atenção nas oscilações de pH, e especialmente quando submetidos a doses de calcário que tendem a elevar o pH acima de 7,0, o que pode acarretar a redução da disponibilidade de nutrientes, especialmente os micronutrientes. Apesar de não terem sido submetidos a calagem, os tratamentos de manejo regenerativo recebem doses de calcário misturados ao composto orgânico, além de receberem por vezes pequenas quantidades nos berços de plantio o que pode acarretar o aumento da alcalinidade. De modo geral, os dados de pH revelam alcalinidade fraca (REG3, REG10, POL, MANC), acidez fraca (INI E MILC) e acidez elevada (CAAT). Assim, percebe-se que o pH dos tratamentos regenerativos já ultrapassou o que seria desejado pela maior parte das culturas. Essa tendência à alcalinidade no solo na agricultura regenerativa de Jardins Marizá deve ser monitorada pois pode afetar a disponibilidade de nutrientes. Valores de pH mais alcalino são associados ao aumento da disponibilidade de P e Mo, mas também à redução da disponibilidade de micronutrientes importantes como Zn, Mn, Cu e Fe (Novais *et al.*, 2007). Com o aumento do pH, a acidez trocável ( $Al^{3+}$ ) tem valor nulo, já que o Al não permanece em solução, mas precipita-se na forma de oxihidróxidos de alumínio. Por outro lado, a soma de cátions básicos na solução do solo se torna mais proeminente.

Em relação ao fósforo (P), a área de MR3 foi a que apresentou uma média de 60,80 mg/dm<sup>3</sup>, valor considerado “muito bom”, indicando diferença estatística das demais áreas que tiveram valores considerados “muito baixo”. O P ocorre no solo na forma lábil (trocável) e não lábil (fixado), estando apenas disponível as plantas quando presente em solução. A solubilidade vai sofrer influência da atividade radicular, especialmente do pH da rizosfera, bem como da ação dos microrganismos do solo (Mendes; Júnior, 2003). É importante que o aporte e a manutenção da matéria orgânica favoreçam uma maior concentração de P no solo, até mesmo várias vezes maior do que aquela exigida pelas plantas, pois ao contrário dos demais nutrientes, a adubação com P assume a particularidade de aplicar uma quantidade que seja capaz de satisfazer a exigência do solo, saturando os componentes responsáveis pela fixação do mesmo (Furtini Neto *et al.*, 2001). A farinha de osso é um componente utilizado na adubação orgânica como fonte de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (16%) com solubilidade em torno de 63%, tendo eficiência comprovada no processo produtivo (Venegas, 2009). A liberação mais gradual do P pela farinha de osso, garante um suprimento contínuo pelas plantas. Em MR3 houve entrada de farinha de osso em maior quantidade comparada as demais áreas de manejo regenerativo. O que pode explicar nesta área o resultado “muito bom” para o P. Em relação ao K<sup>+</sup> pode-se justificar os altos teores, que variaram nas áreas de manejo regenerativo em “bom” e “muito bom” comparado a “baixo” para MANC e “médio” para MILC, devido a adição de pó de rocha no composto orgânico, atuando como fonte importante de K. Além disso, apesar de ser um cátion monovalente, facilmente mobilizado e lixiviado na solução do solo, não há altas precipitações que favoreçam esta lixiviação.

### **3.1.1 Matéria orgânica como indicador de qualidade do solo a partir do efeito de manejo**

O estudo da MO e sua caracterização permite compreender suas funções no sistema, bem como melhorar o entendimento da dinâmica de liberação de nutrientes e da formação e estabilidade dos agregados no solo (EMBRAPA, 2002), sendo um componente fundamental no aumento da fertilidade. O estoque de carbono encontrado em MR10 com culturas anuais e perenes não apresentou diferença ( $p < 0,05$ ) com a vegetação nativa CAAT (Figura 7).

Figura 7 - Estoque de carbono (CS) do solo em  $\text{kg ha}^{-1}$  e frações do carbono (MOP, MAM, MOL) ( $n=4$ ) presente nas frações Matéria Orgânica Particulada (MOP), Matéria Orgânica Pesada (MAM) e Matéria Orgânica Leve (MOL). As médias ( $n = 4$ ) seguidas de um \* diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de  $\alpha$  de 5% por família.



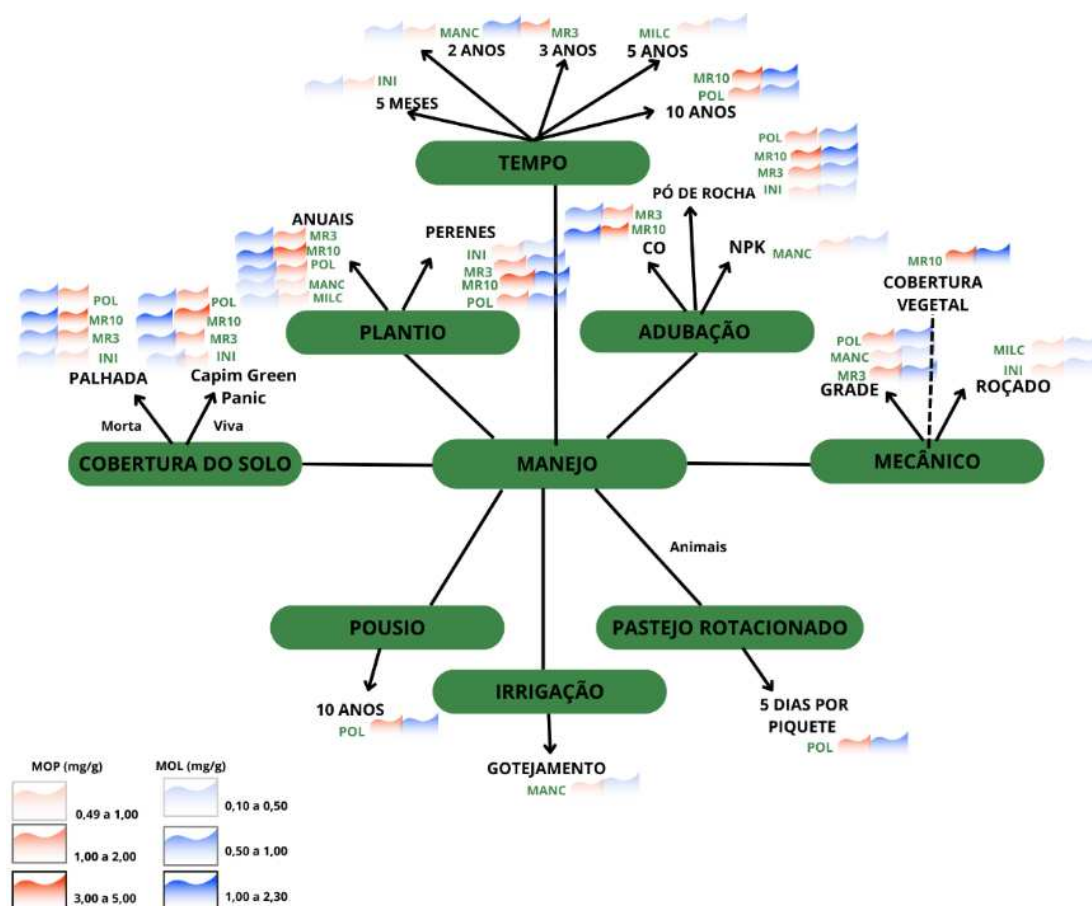
Fonte: Elaborado pela autora

Este resultado pode atuar como um indicador de qualidade e saúde deste solo nas condições edafoclimáticas específicas. Um estudo destacou a importância da fração particulada da matéria orgânica como um parâmetro essencial para monitorar a saúde dos solos arenosos do semiárido (Filho *et al.*, 2017). Por se tratar de um solo arenoso, isso se torna ainda mais relevante, dado a susceptibilidade destes solos a erosão e degradação e baixo potencial no sequestro de carbono do solo. Quando a vegetação nativa é substituída por sistemas agrícolas, os estoques de carbono orgânico (CO) tendem a ser reduzidos (Leite *et al.*, 2010). Mesmo que tenha ocorrido essa redução na fase inicial do manejo, assim como parece ter ocorrido nas áreas de INI e MR3, a área de MR10 não apresenta diferença

significativa no estoque de C com a CAAT. Para o C-MOP a CAAT apresentou maior teor em relação a MR10, já o C-MAM foi ao contrário. O C-MOL não houve diferença ( $p < 0,001$ ) comparado a CAAT (Figura 7).

Sabe-se que a fração mais lábil da MOS, sendo representada neste estudo pela MOP e MOL, correspondem aquela que apresentam sensibilidade ao manejo, atuando na ciclagem de nutrientes e na melhoria das condições estruturais e edáficas do solo, sendo, portanto, um indicador de qualidade. Neste sentido, é possível observar que o manejo adotado nas áreas de agricultura regenerativa tem propiciado o incremento de MOS ao longo do tempo conforme pode ser observado no fluxograma (Figura 8).

Figura 8 - Fluxograma de descrição do manejo associado ao gradiente de concentração dos teores das frações MOP (mg/g) e MOL (mg/g) dos respectivos tratamentos. INI : Início, MR3: 3 anos, MR10: 10 anos, POL: Policultivo (manejo regenerativo); MANC: mandioca convencional, MILC: milho convencional; CAAT (Caatinga). CO : composto orgânico.



Fonte: Elaborado pela autora

De acordo com a ilustração percebe-se que o efeito de manejo sobre os teores de C-MOP e C-MOL para a agricultura regenerativa (INI, MR3, MR10, POL) tem o fator tempo contribuindo na escala gradual de incremento do C do solo, mostrando que a adoção de práticas regenerativas de convivência com a seca apresenta resultado benéfico a saúde do solo e do agroecossistema. Critério este que não pode ser considerado para as áreas de agricultura convencional (MANC, MILC), visto que apesar de terem um tempo de manejo de 2 e 5 anos respectivamente, apresentam condições semelhantes no incremento de C comparado a área de INI com apenas 5 meses. Este resultado foi semelhante ao encontrado por Silva et al., 2015 que identificou para solos arenosos no semiárido,

maiores valores de MOP sob cultivo orgânico em comparação ao convencional. Os autores atribuíram a influência do manejo mais adequado dos solos sob sistema de cultivo orgânico, com aporte contínuo de matéria orgânica, dando condições para o aumento no estoque de MOP em relação aos solos submetidos ao cultivo convencional. Já Lima et al (2007) verificaram que o tempo de manejo orgânico de aproximadamente 9 anos, não foi suficiente para alterar a capacidade dos solos em reter cátions e aumentar o teor de matéria orgânica. Para obter um aumento no teor de matéria orgânica do solo é necessária adição contínua de elevadas quantidades de material orgânico (Mielniczuk 1999).

A agricultura regenerativa de princípios agroecológicos amplia as possibilidades da soberania alimentar por considerar o uso eficiente do potencial fotossintético de combinações de espécies vegetais (anuais e perenes), bem como a restauração de solos e a integração de plantas e animais (Schreefel *et al.*, 2020). O consórcio entre culturas anuais e perenes é uma prática constante nas áreas de MR3, MR10 e POL, sendo que até o momento da coleta de solo, não havia sido implantada culturas anuais na área de INI. O consórcio entre as espécies irá possibilitar que durante o período de estiagem, haja plantas gerindo o sistema, em condições mais adaptadas a altas temperaturas e ao déficit hídrico. Como por exemplo, as plantas forrageiras perenes do tipo C4 – capim Green Panic (*Panicum L*) e o amendoim bravo (*Arachis Pintoi*) - que são cultivadas nas áreas de manejo regenerativo. A fotossíntese é o único processo de importância biológica que pode aproveitar a fonte primária da energia solar que mantém a biosfera de nosso planeta (Taiz; Zeiger, 2009). As espécies forrageiras perenes do tipo C4 são mais eficientes no uso da radiação e podem ser mais resistentes a altas temperaturas. Logo a condutância estomática nestas espécies será mantida, através dos fluxos gasosos de CO<sub>2</sub> necessários para uma eficiente taxa fotossintética (EMBRAPA, 2014). Mesmo em uma condição de estresse, elas mantem o nível metabólico fundamental para o funcionamento do agroecossistema, apresentando vigoroso sistema de ramos e folhas com menor superfície do limbo foliar (Lunz, 2006), produzindo mais matéria seca que as plantas C3 (EMBRAPA, 2014). As modificações anatômicas e um metabolismo mais ativo, favorece maior produção de matéria seca, bem como maior fertilidade e produtividade (Lima Junior *et al.*, 2005).

Os resultados encontrados para as frações do C-MOP e C-MOL pela agricultura regenerativa, correspondem a fração mais lábil da MOS, a qual inclui

resíduos de plantas do tipo C4 e C3. A MOS pode ser resultante da deposição natural de resíduos vegetais (exsudatos e/ou morte de raízes, queda de folhas, galhos, frutos, etc) e animais (excrementos e/ou morte da biota). No entanto pode também ter sua origem pela ação humana, como por exemplo através de práticas que adotem o uso de esterco ou composto orgânico preparado na própria propriedade, ou ainda o uso de adubos verdes e coberturas do solo (Kiehl, 2008).

O uso de adubos verdes é uma prática conservacionista eficiente como cobertura do solo (EMBRAPA, 2000), sendo uma técnica utilizada pelos agricultores de Jardins Marizá através do uso de gramíneas como o capim Green Panic (*Megathyrsus maximus* cv. Green Panic) e o milheto com a função de melhorar a estrutura do solo, aumentar a biomassa, retenção de água e proteção contra erosão. Além das gramíneas, usa-se leguminosas com a função de fixar o nitrogênio atmosférico, estimular o crescimento de outras culturas e melhorar a fertilidade do solo. Na área de POL após 10 anos de pousio foi feito o uso de um mix de sementes usando milho (*Zea mays* – Gramínea); feijão (*Phaseolus vulgaris* ou *Vigna unguiculata* - Leguminosa), milheto (*Pennisetum glaucum* - Gramínea de cobertura), gergelim (*Sesamum indicum* - Oleaginosa), girassol (*Helianthus annuus* - Oleaginosa), nabo forrageiro (*Raphanus sativus* - Brassicácea) com objetivo principal de melhorar o solo. As funções e benefícios vinculados ao uso destes espécimes pode ser verificado no quadro 2. A produção de biomassa e da ciclagem de nutrientes a partir do uso varia entre “Média a Alta”, colaborando com o resultado do gradiente de concentração do C-MOP e C-MOL para esta área, conforme fluxograma.

Quadro 2 – Mix de sementes utilizadas com finalidade de melhorar a estrutura, nutrientes e produção do solo na área denominada policultivo (POL) a partir do manejo regenerativo em Jardins Marizá, Tucano - BA.

Semente	Fixação de nitrogênio	Produção de biomassa	Descompactação do solo	Ciclagem de nutrientes	Controle de nematoides	Proteção do solo	Atração de polinizadores
Milho	x	Alta	x	Média	x	Alta	x
Feijão	Alta	Média	x	Alta	x	Média	x
Milheto	x	Alta	Alta	Alta	Alta	Muito Alta	x
Gergelim	x	Média	x	Alta	x	Média	Alta
Girassol	x	Alta	Alta	Alta	x	Média	Muito Alta
Nabo							
Forrageiro	x	Média	Muito Alta	Alta	Alta	Média	x

Fonte: Souza; Rezende (2014)

As frações MOP e MOL são altamente influenciadas por práticas de manejo, como rotação de culturas, adubação orgânica, cobertura vegetal. Em relação a adubação, ocorre em MR3 e MR10 o uso de um composto orgânico produzido na propriedade pelos próprios agricultores (Figura 9).

O composto é uma mistura feita de barro (coletado próximo ao riacho), pó de rocha, farinha de osso, calcário, esterco fresco, folhas secas, material vegetal (jurubeba, lanzinha, sisal, babosa, palma). Inspirado no método de compostagem rápida de Berkeley, o composto é virado a cada três das cinco vezes, sendo usado nas hortas, no plantio de árvores e abóbora. O sistema de composto foi integrado com as galinhas que ajuda no incremento de esterco e revira o material. A área de POL não recebeu o uso do composto para o plantio e sim utilizou do próprio manejo com os animais para aumentar a fertilidade através do pastejo rotacionado (5 dias por piquete) (Figura 10).

Figura 9 - Pilha do composto orgânico sendo revirada manualmente e pelas galinhas



Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

Figura 10 – Esterco proveniente do manejo dos animais pelo pastejo rotacionado na área de manejo regenerativo denominada Policultivo (POL) em Jardins Marizá, Tucano – BA.



Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

Percebe-se que apesar de terem sido manejadas com práticas de adubação distintas as áreas de MR3 e POL não apresentaram diferença estatística ( $p < 0,001$ ) nos teores de C-MOP e C-MOL, sugerindo que ambas foram capazes de acumular ao longo do tempo o C de fonte mais lábil, mesmo que por métodos diferentes. Um estudo realizado no Agreste Paraibano mostrou que um sistema de consórcio com feijão-milho-fava apresentou teores de C-MOL 61,48 % mais baixo que a Caatinga, atribuindo o resultado a ausência de adubação orgânica, bem como pelo pastejo de animais, concluindo que a falta de um manejo eficiente para fins de fertilidade contribuiu para redução da MOL (Filho, 2017). Quando comparadas as áreas de POL e MR10 houve diferença em 49% do C-MOP e 59% do C-MOL, com maiores teores para MR10. Verifica-se com isso que o manejo MR10 com 10 anos sem o pousio + adubação orgânica (composto orgânico) + policultivo (anuais e perenes) teria sido mais eficiente que o manejo de 10 anos de pousio + pastejo rotacionado + policultivo (anuais e perenes). Ou seja, possivelmente se tratando do sertão arenoso onde os solos são mais frágeis, e degradados, não seja tão vantajoso um período longo de pousio e sim um manejo de fertilidade constante. O sistema de pastagem em comparação a outros sistemas agrícolas na zona da Mata mineira apresentou

baixa fertilidade e caráter distrófico com redução acentuada do teor de MOS e degradação física mais avançada (Portugal *et al.*, 2010).

Para os valores do C-MAM houve diferença estatística entre MR10 e CAAT, tendo MR10 uma média de 4,97 mg/g, sendo, portanto, maior em 23% comparado a média de 3.83 mg/g da CAAT. Este resultado pode indicar que o manejo regenerativo aplicado a longo prazo tem contribuído para a formação mais recalcitrante da MOS e consequente sequestro de C na camada de 0 – 20 cm, mesmo em condições de solos arenosos. Esta fração da MO possui maior tempo de permanência no solo (Stevenson, 1994), sendo caracterizada por sua forte interação com minerais, especialmente argila e óxidos de ferro, o que contribui para sua estabilidade química e proteção física contra a degradação, aumentando assim os estoques de carbono no solo (Novais *et al.*, 2007). Embora sejam considerados com baixa aptidão agrícola, o correto manejo dos Neossolos Quartzarênicos pode elevar em curto prazo seu potencial produtivo. Já o uso intensivo, com culturas anuais pode acarretar rápida degradação (Ramos *et al.*, 2023). No caso dos solos arenosos do semiárido, este efeito erosivo, decorrente do manejo inadequado, é ainda maior (Castro; Hernani, 2015). Nestas regiões semiáridas, a melhoria da fertilidade do solo é essencial para aumentar a produtividade de biomassa, aumentar a eficiência do uso da água e melhorar a qualidade do solo (Tavares *et al.*, 2005). Estudos mostram que o teor de C da fração mais pesada tende a ser maior em ambientes de vegetação nativa Caatinga (CAAT), onde ocorre o aporte de biomassa, diminuindo a probabilidade de perder C mais rapidamente através do processo de mineralização.

Os organismos do solo decompõem inicialmente as estruturas presentes nos resíduos de plantas que são mais lábeis e que envolvem menor gasto de energia e, quando a decomposição avança, compostos com estrutura química mais recalcitrante tendem a acumular (EMBRAPA, 2002). O acúmulo de C-MAM pode ser explicado pelo fato do manejo em MR10 fornecer adubação constante ao sistema através do uso do composto orgânico, bem como o aporte de biomassa advindo especialmente das espécies perenes, entre elas o sisal (*Agave sisalana*) que foi utilizado como planta de cobertura para compor o início do sistema, sendo cortada após 5 anos e utilizada na formação dos canteiros como resíduo da biomassa. Apesar de não ser uma espécie nativa, o sisal é resistente a seca, é fonte de alimento para os animais e ajuda a conservar o solo devido sua cobertura e resistência a erosão. Ademais possui teor de lignina entre 7% a 14% da matéria

seca, o que é considerado moderado a alto (Martin et al, 2010; Teklu, 2021) podendo contribuir com a entrada de resíduos mais recalcitrantes no sistema. A fração pesada é a matéria orgânica em estágio avançado de decomposição, associada à areia, silte e argila, o que promove proteção física ou química (Demolinari *et al.*, 2008). A depender do tipo e a quantidade de argila haverá maior capacidade de estabilizar a matéria orgânica em complexos organominerais podendo ocorrer maior interação com os minerais de carga variável presentes no solo (Brady; Weil, 2002). Conforme foi visto no DRX, há na área presença de caulinita e goethita, o que pode em algum modo viabilizar a estabilidade da MO, mesmo considerando 5% da fração argila (Dick *et al.*, 2009).

### 3.2 COBERTURA VEGETAL E ÍNDICES DE DIVERSIDADE

De acordo com o levantamento da cobertura vegetal nas áreas de manejo regenerativo, convencional e no bioma Caatinga foi possível identificar maior representatividade da família Fabaceae com 11 espécies com maior distribuição nas áreas de MR10 e CAAT (Tabela 2).

Tabela 2 - Ocorrência de espécies vegetais (anuais e perenes) presentes nas áreas de Manejo Regenerativo (INI, MR3, MR10, POL)), Convencional (MANC, MILC) e Caatinga (CA) da região de Tucano - BA, Set/21

Família	Espécie	Nome popular	INI	MR3	MR10	POL	MANC	MILC	CAAT
Solanaceae	<i>Streptosolen jamesonii</i>	Marianinha	X	X	X	X		X	X
	<i>Jatropha mollissima</i>	Pinhão bravo			X				X
	<i>Croton campestris</i> A. St-Hill	Velandinho	X	X	X	X			X
Euphorbiaceae	<i>Manihot esculenta</i>	Mandioca			X				
	<i>Jatropha urens</i>	Cansação			X				
	<i>Cnidocolus phyecanthus</i>	Favela							X
	<i>Croton heliotropiifolius</i>	Velame		X				X	X
	<i>Croton sonderianus</i>	Marmeleiro-do-mato		X					
	<i>Panicum L</i>	C. Gripan	X		X	X			
Poaceae	<i>Zea mays</i>	Milho			X				
	<i>Panicum maximum</i>	C. Massai				X		X	
	<i>Poaceae spp</i>	Capim nativo	X						X
	<i>Brachiaria decumbens</i>	C. Brachiaria					X		
Portulacaceae	<i>Melinis minutiflora</i>	C. gordura					X		
	<i>Portulaca oleracea</i>	Beldroega	X	X	X	X		X	X
	<i>Portulaca spp</i>	Rasteirinho					X		
Boraginaceae	<i>Phacelia calthifolia</i>	Erva escorpião			X				
	<i>Cordia verbenacea</i>	Erva baleeira			X				
Malvaceae	<i>Euploca polyphylla</i> (Lehm.) Mello & Semir	Ervânco	X	X	X	X	X	X	
	<i>Malvaceae spp</i>	Malva	X	X	X	X		X	X
	<i>Sida cordifolia</i> L	Malva Sebosa		X	X	X		X	
Nyctaginaceae	<i>Sida linifolia</i>	Língua-de-galinha	X						
	<i>Althaea officinalis</i>	Malva branca		X				X	
	<i>Ceiba glaziovii</i>	Barrigudinha			X	X		X	
Urticaceae	<i>Boerhavia</i>	Pega pinto			X	X			
	<i>Boerhavia diffusa</i>	Batata de porco		X	X				X
Talinaceae	<i>Urtica dioica</i>	Urtiga			X				X
	<i>Elephantopus Scaber</i>	Língua de vaca			X				
	<i>Leucaena leucocephala</i>	Leucena		X	X				
	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	Sabiá			X				
Fabaceae	<i>Prosopis juliflora</i>	Algaroba			X				
	<i>Glicírcia sepium</i>	Glicírcia			X				
	<i>Piptadenia stipulacea</i>	Jurema Branca						X	X
	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tui	Caatingueiro							X
	<i>Cenostigma pyramidale</i>	Pau de rato							X

	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata de vaca							X
	<i>Mimosa hostilis</i>	Jurema Preta							X
	<i>Arachis Pintoi</i>	Amendoim amarelo	X						
	<i>Euphorbia heterophylla</i>	Amendoim bravo	X	X	X	X	X		
Asteraceae	<i>Sonchus oleraceus</i>	Serralha			X				
Amaranthaceae	<i>Amaranthus spp.</i>	Bredo				X			
Arecaceae	<i>Cocos nucifera</i>	Coqueiro			X				
Arecaceae	<i>Syagrus coronata</i>	Licuri							X
Asphodelaceae	<i>Aloe vera</i>	Babosa	X						
Crassulaceae	<i>Kalanchoe pinnata</i>	Kalanchoe			X				
	<i>Tacinga palmadora</i>	Palmatória							X
	<i>Pilosocereus gounellei</i>	Xique-xique							X
Cactaceae	<i>Opuntia sp</i>	Palma	X	X					
	<i>Pilosocereus pachycladus</i>	Facheiro							X
	<i>Spermacoce verticillata</i>	Vassourinha		X				X	
Rubiaceae	<i>Uncaria tomentosa</i>	Unha de gato							X
Cyperaceae	<i>Cyperus rotundus</i>	Tiririca				X			
Capparaceae	<i>Capparis hastata</i>	Feijão bravo							X
Sapindaceae	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	Sabão de pobre				X	X	X	X
Convolvulaceae	<i>Ipomoea nil</i>	Florzinha azul		X		X			X
Cucurbitaceae	<i>Curcubita sp</i>	Abóbora	X						
	<i>Citrullus lanatus</i>	Melancia					X		
	<i>Plectranthus barbatus</i>	Boldo	X						
Lamiaceae	<i>Marsypianthes chamaedrys</i>	Batônica	X	X		X		X	
	<i>Plectranthus amboinicus</i>	Malvarisca				X	X		
---		Desconhecido p4	X						
---		Desconhecido p6		X					
---		Desconhecido p2						X	

Fonte: elaborado pela autora

Conforme os parâmetros ecológicos foi possível encontrar para as áreas de manejo regenerativo índices de Shannon (H) que variaram de 2,233 a 2,416 para INI, 2,218 a 2,232 para MR3, 2,197 a 3,094 para MR10, 1,508 a 1,547 para POL. Já as áreas de manejo convencional tiveram valores de 1,552 a 2,096 para MANC e 1,664 a 1,959 para MILC. No caso da CAAT foi de 2,456 a 2,623. Em ecossistemas naturais relativamente diversificados o índice de diversidade de Shannon resulta entre 3 e 4 (Gliessman, 2001). Neste sentido, a área de MR10 foi a única que apresentou um índice em 3,094, podendo indicar maior diversidade. O teste t de Hutcheson mostrou diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os índices de MR10 x MANC e MR10 x MILC, indicando para ambos maior diversidade de espécies em MR10. Um quintal agroflorestal no Pará apresentou 3,03 para o índice de Shannon (Junior *et al.*, 2013). Já sistemas agroflorestais na Bahia encontrou um intervalo de 1,47 a 2,39 (Machado *et al.*, 2005). Há práticas agrícolas que têm o potencial de aumentar a biodiversidade funcional dos agroecossistemas, entre elas os policultivos, rotação de culturas, incorporação de matéria orgânica, baixa mobilização do solo e outras que afetam negativamente, como monocultura, fertilizantes químicos, retirada de ervas espontâneas. As melhores práticas oferecem subsídio a sustentabilidade dos agroecossistemas, aumentando os serviços ecológicos, como controle biológico de pragas, ciclagem de nutrientes e conservação da água e do solo (Altieri, 1999). Uma estratégia no contexto agroecológico é combinar espécies anuais e perenes em arranjos espaciais e temporais, incentivando as práticas agrícolas que aumentam a abundância e a

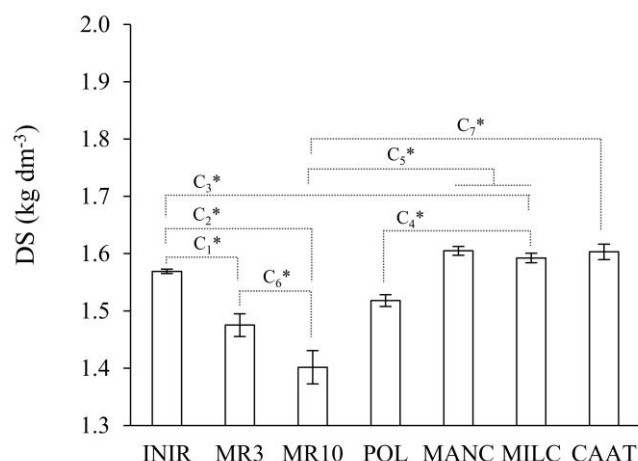
diversidade de plantas acima e abaixo do solo, promovendo sua própria fertilidade (Altieri, 1999), o que vem sendo aplicado há 10 anos na área de MR10.

### 3.3 INDICADORES DE QUALIDADE FÍSICA DO SOLO

#### 3.3.1 Densidade do Solo (DS)

Os valores de Densidade do solo (DS) variaram de 1,56 a 1,58 kg. dm<sup>-3</sup> em INI, 1,35 a 1,44 kg. dm<sup>-3</sup> em MR3, 1,35 a 1,44 kg dm<sup>-3</sup> em MR10, 1,50 a 1,53 kg.dm<sup>-3</sup> em POL, 1,58 a 1,62 kg.dm<sup>-3</sup> em MANC, 1,57 a 1,61 kg.dm<sup>-3</sup> em MILC e 1,57 a 1,63 Kg.dm<sup>-3</sup> em CAAT. As diferenças estatísticas ( $p < 0,001$ ) indicaram por contraste que a soma das médias de MANC e MILC foram maiores que MR10, assim como a média de INI, MR3 e CAAT. A área de INI apresentou diferença com média maior que a MR3, já MILC foi maior que o POL (Figura 11).

Figura 11 – Densidade do solo (DS) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm. OBS: As médias ( $n = 4$ ) seguidas de um \* diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de  $\alpha$  de 5% por família.



Fonte: Elaborado pela autora

Resultados de Ds foram encontrados por Silva *et al.* (2015), os quais constataram valores médios significativamente maiores em áreas de cultivo orgânico, comparadas com o solo sob mata nativa no bioma Caatinga. A densidade depende da estrutura do solo em todos os seus aspectos, tendo a MO influência destacada nos valores da DS, logo, conhecer comportamento constitui importante

indicativo das condições de manejo de um determinado solo (Lier; 2010). Geralmente solos de textura mais fina, como os argilosos, possuem menor densidade em relação aos arenosos, sobretudo se possuírem um teor de MO adequado, já que a agregação advinda pela MO garante um grande espaço poroso total, fazendo com que a densidade do solo seja baixa (Brady; Weil, 2008).

Um estudo feito em solos arenosos do Rio Grande do Norte indicou  $D_s$  na camada superficial (0-18 cm) de  $1,57 \text{ kg dm}^{-3}$ . Por outro lado, Klein *et al.* (2004) encontraram  $D_{s\text{máx}}$  de  $1,77 \text{ Mg seu m}^{-3}$ . O uso de rotação de culturas e plantas de cobertura, indicou após sete anos redução em  $0,07 \text{ Mg m}^{-3}$  na  $D_s$  na camada superficial (Albuquerque *et al.* 1995). O limite crítico para o crescimento radicular em solos arenosos indica  $D_s$  até  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$  (Reichert *et al.* 2003). De qualquer maneira, todos os resultados estiveram abaixo deste limite.

### 3.3.1.2 Efeito da prática de manejo na densidade do solo

O teste de Pearson indicou correlação negativa fraca ( $p = -0,249$ ) entre a DS e o estoque de carbono. Já para as frações MOP, MAM e MOL os valores de correlação foram  $p = -0,27$ ;  $p = -0,366$ ;  $p = -0,566$  respectivamente. Estes resultados reforçam a relação inversamente proporcional da matéria orgânica e a densidade do solo.

Sabe-se que a DS não se caracteriza como uma propriedade constante, já que muda de acordo com a condição estrutural do solo, variando significativamente ao longo do tempo em resposta a mudanças na cobertura e manejo do solo (Batey, 2009).

Neste sentido, de forma geral, os menores valores de densidade do solo em superfície podem estar relacionados a maior densidade de raízes e ao conteúdo de matéria orgânica (Silva *et al.*, 2017). Conforme correlação moderada negativa de Pearson ( $p = -0,566$ ), houve maior influência da MOL neste processo, sendo as áreas de MR10 e CAAT aquelas que apresentaram maiores proporções. Alguns trabalhos destacam o maior acúmulo de MOL em áreas de mata nativa quando comparados com culturas conservacionistas (Guareschi *et al.*, 2012, Loss *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2015). No entanto, outros autores identificaram que a área sob pasto apresentou maior teor de MOL quando comparado a Caatinga. Neste sentido, o fato de o solo manter-se constantemente com uma cobertura viva, favorece o

acúmulo da fração leve da matéria orgânica do solo, já que em condições relativamente áridas, a MOL tende a se decompor a taxas lentas e se acumular em teores elevados em comparação a condições de maior umidade (Janzen *et al.*, 1992; Correia *et al.*, 2015).

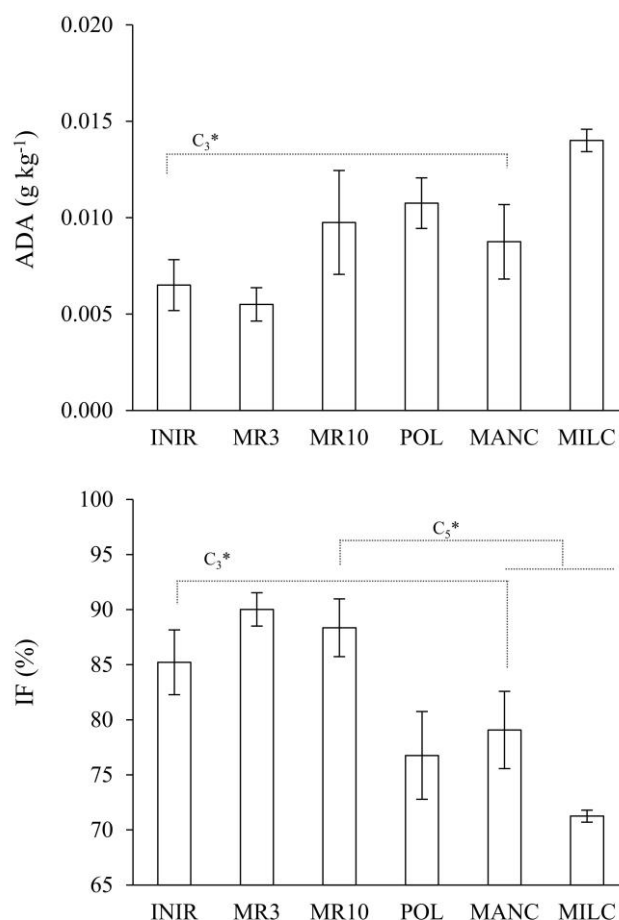
Na área de estudo, a cobertura viva do solo com capim *Green Panic* é uma prática adotada pelo viés da agricultura regenerativa com objetivo de manter o solo coberto e com garantia de atividade biológica radicular e maior densidade de raízes. O que frequentemente pode aumentar as condições de resíduos de plantas parcialmente decompostos, de hifas de fungos e esporos que se constituem como parte da MOL (Gregorich; Janzen, 1996), melhorando a agregação.

Os teores de C - MOL diferiram ( $p < 0,001$ ) apresentando valores superiores para as áreas de manejo regenerativo. Neste sentido, torna-se possível interpretar que os valores de C-MOL são aqueles que estão respondendo em maior proporção pelas principais diferenças na qualidade física do solo vinculadas a densidade aparente destas áreas. À medida que aumenta o tamanho dos macroagregados, a importância dos polissacarídeos na estabilidade dos agregados diminui e a importância de raízes finas e hifas de fungos vai aumentando (Jastrow; Miller, 1998). Quando os solos apresentam sinais de degradação, os indicadores de qualidade física do solo, como DS, RP e estabilidade dos agregados evidenciam a necessidade da adoção de práticas de manejo que favoreçam a estruturação do solo, como aquelas que elevam os teores de matéria orgânica (Stefanoski *et al.*; 2013) conforme pode ser observado na área de estudo em Jardins Marizá.

### 3.3.2 Agregados do solo

Os processos físico-químicos e biológicos influenciam na formação dos agregados do solo, sendo os primeiros mais importantes para a formação dos microagregados e os processos biológicos dos macroagregados (Brady; Weil, 2008).

Figura 12 – Argila dispersa em água (ADA) e índice de floculação (IF) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) na profundidade do solo 0-20 cm. IF = MR3-MILC\*; ADA = MR3-MILC\*; MILC + MANC Vs MR10\* OBS: As médias ( $n = 4$ ) seguidas de um \* diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de  $\alpha$  de 5% por família.



Fonte: Elaborado pela autora

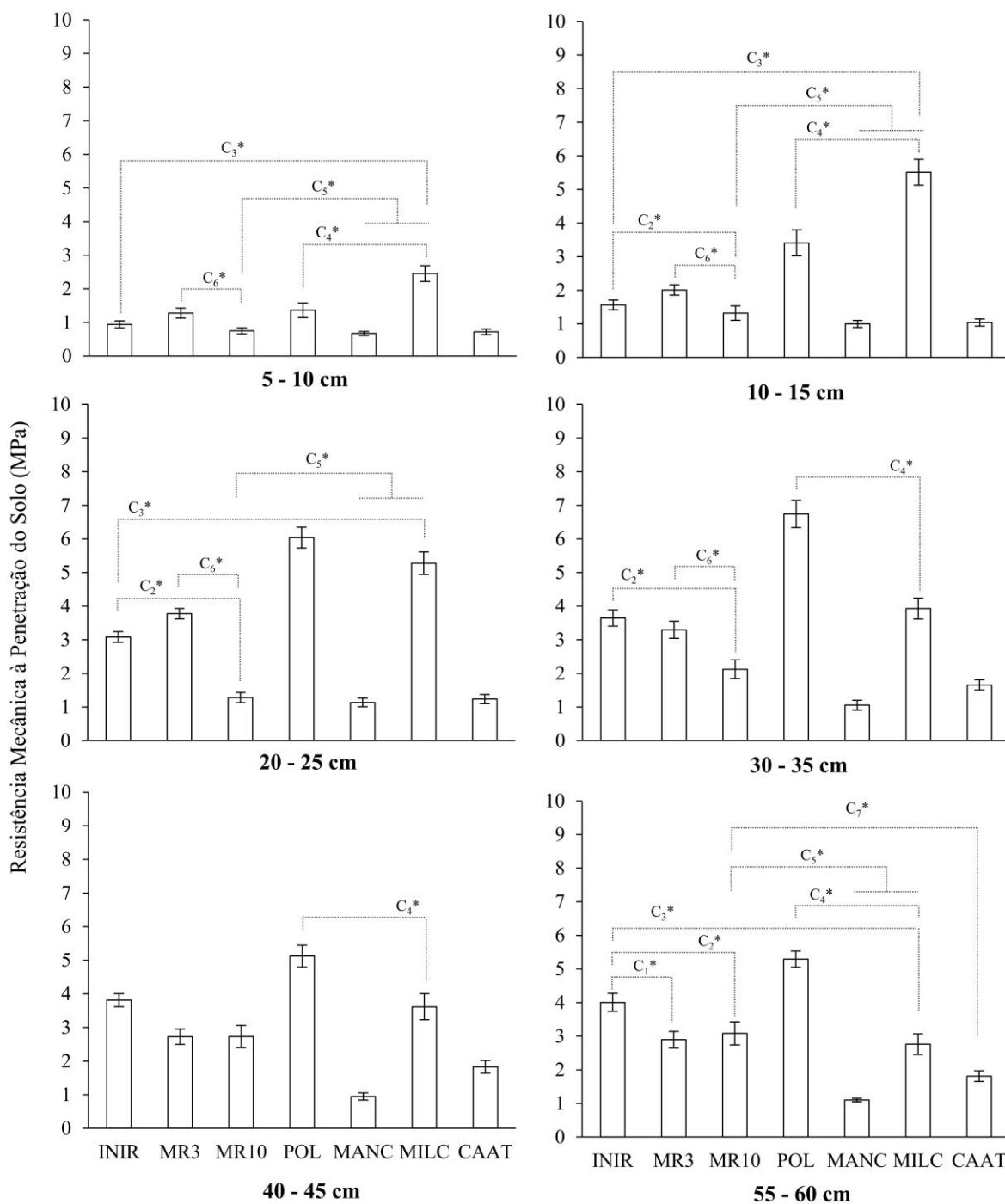
Os maiores valores de ADA foram observados para MILC e os menores valores para MR3 (Figura 12), por outro lado MR3 e MR10 se destacaram por apresentar os maiores valores de IF (%), reforçando assim a relação inversamente proporcional entre essas propriedades. A importância de um solo flocoado tem relação com a preservação do C e com as argilas, cuja a presença de cargas eletrostáticas são responsáveis em parte pela atividade química, especialmente dos cátions do solo. É particularmente importante a presença de cátions trivalente ( $\text{Al}^{3+}$ ) ou divalente ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ) no solo, uma vez que a natureza química correspondente a camada de valência e um menor Raio Hidratado (RH) destes cátions possibilita uma maior aproximação das partículas eletricamente carregadas presentes no solo, especialmente da montmorilonita, argila do grupo 2:1 presente no barro utilizado para compor o composto orgânico usado nas áreas de MR3 e MR10, podendo assim explicar o aumento na possibilidade de flocação destes solos. Ou seja, uma condição química viabiliza uma condição física no aspecto estrutural do solo. Neste

sentido, foi possível verificar que as maiores médias de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  ocorreram para MR10, o qual apresentou IF de 88%. As médias de IF de MANC e MILC foram menores ( $p < 0,004$ ) que MR10. Da mesma forma para os valores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  que apresentou para estas áreas as menores médias. Houve diferença também entre o MR3 e o MILC, sendo este último com um menor percentual de 72% do IF. O teste de Pearson mostrou correlação fraca ( $r = 0,392$ ) entre o IF e o  $\text{Ca}^{2+}$  e correlação moderada ( $r = 0,486$ ) para o IF e o  $\text{Mg}^{2+}$ , reforçando a relação diretamente proporcional destes elementos e a influência dos cátions, em especial do  $\text{Mg}^{2+}$  na floculação do solo.

### 3.3.3 Resistência a Penetração (RP)

Práticas intensivas de cultivo agrícola que envolvem revolvimento do solo com utilização de sistemas de cultura com baixo aporte de biomassa vegetal (pousio, monocultura) resulta em uma diminuição na estabilidade dos agregados (Braidá et al, 2011). Os resultados de resistência a penetração ( $p < 0,001$ ) indicaram que nas camadas de 5 - 10 cm, 10 - 15 cm, 20 - 25 cm e, os valores de MILC foram maiores que os de MR10 (Figura 13). Em 30 - 35 cm e 55 - 60 cm essa diferença estatística não ocorreu, passando a indicar a área de INI com o maior valor de RP. Por outro lado, MR10 teve maior valor em comparação a CAAT indicando diferença estatística apenas na camada de 55 - 60 cm. A área de INI também mostrou maior valor de RP em comparação a MR3 em 55 - 60 cm. Quando se trata do POL verificou-se na camada mais superficial de 5 - 10 cm um valor menor comparado a MILC. No entanto, à medida que aumentou a profundidade das camadas o valor de RP da POL foi aumentando e a partir da camada 30 - 35 cm superou o valor de MILC ( $p < 0,001$ ).

Figura 13 – Resistência a penetração (RP) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm.



Médias (n = 4) seguidas de um \* diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de  $\alpha$  de 5% por família. Fonte: Elaborado pela autora

O fato de os animais pastorem na área de POL pode explicar o aumento da RP nas camadas abaixo de 10 cm. Já os valores reduzidos para a área de MANC,

pode está atrelado ao gradeamento do solo, o qual ocorreu para o plantio da mandioca próximo ao período de coleta dos dados no campo (Figura 14).

Figura 14 – Plantio de mandioca convencional (MANC) em solo arenoso após gradeamento em área adjacente a Jardins Marizá, Tucano – BA em SET/21.



Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

O gradeamento é uma prática que pode reduzir a RP, pois quebra a compactação da camada superficial e melhora a porosidade em curto prazo. O fato de o solo arenoso ter baixa coesão facilita a descompactação destas camadas, facilitando a penetração de raízes. No entanto, a depender do manejo esta estrutura solta pode rapidamente compactar, aumentando problemas como erosão, lixiviação de nutrientes, perda de umidade e degradação estrutural do solo. Foi importante perceber que quando combinado com práticas regenerativas do solo, o gradeamento favoreceu para um solo estruturado mais sustentável que não teve grandes variações da RP até a profundidade de 60 cm. Isto pode ser observado para a área de MR3 que fez uso da grade seguida do plantio sem capina, investindo no uso de plantas de cobertura anuais e perenes e adição de MO. Já a área de POL que também fez o gradeamento, apesar de ter utilizado práticas regenerativas com plantas de cobertura, inseriu o manejo dos animais com o pastejo rotacionado, o que aumentou a RP abaixo de 10 cm. Ambas as áreas de INI e MILC foram apenas roçadas e plantadas, apesar disso a RP de INI foi significativamente menor ( $p < 0,001$ ) na camada 5 – 10 a 20 – 25 cm em comparação a MILC. Passando a apresentar diferença estatística apenas na camada de 55 a 60 cm, quando a área de INI passa a ter valor de RP maior. Solos arenosos tende a diminuir a RP em

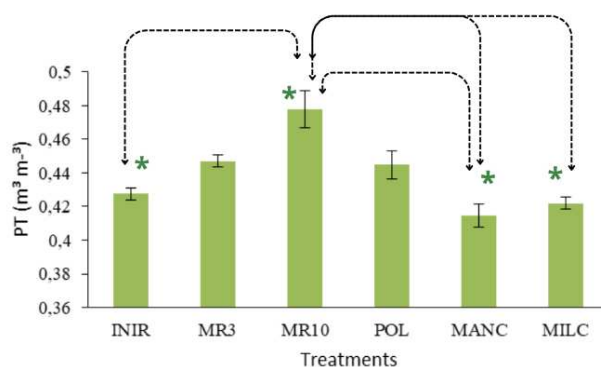
profundidade. Isto porque nas camadas mais profundas ocorre uma menor compactação em decorrência de menos intervenção mecânica. Além disso, por haver menor coesão entre as partículas e maior drenagem, a umidade pode aumentar em profundidade. Neste sentido, o fator umidade *versus* raízes pode estar influenciando para que os solos do manejo regenerativo apresentem aumento da RP em profundidade. Em termos físicos, para apresentar uma boa qualidade o solo deve proporcionar às culturas condições mecânicas que permitem o crescimento do sistema radicular (Lier, 2020). As áreas de manejo regenerativo apresentam maior densidade de raízes, especialmente de espécies perenes, como o capim *Green Panic* que consome água de maneira eficiente, utilizando suas raízes profundas e reduzindo a evaporação. Em sistemas agroflorestais úmidos os efeitos sobre as variações da água no solo são mais complexos sob a combinação de árvores e culturas sazonais do que sob as mesmas árvores e culturas quando cultivadas separadamente, sendo que árvores perenes tem mais consumo de água que culturas anuais (Ong *et al.*, 1992; Williams *et al.*, 2009). No caso dos solos arenosos do semiárido, esta relação no ambiente agroflorestal, pode ser pautada para as condições de aporte de biomassa das gramíneas, que pelas condições do clima estarão presentes em maior proporção que as espécies arbóreas. Diferente dos sistemas convencionais que não dispõem de cobertura vegetal, a água tende a drenar mais rapidamente para camadas profundas, ficando menos disponível para as plantas, porém podendo, pelo efeito da umidade, reduzir a RP do solo em profundidade. As variações da água no solo dentro deste ecossistema dependem de muitos fatores, especialmente distribuições de raízes, propriedades do solo e o clima predominante (Zhang *et al.*, 2016).

### **3.3.4 Porosidade Total (Pt) e Condutividade hidráulica não saturada (K( $\theta$ ))**

A porosidade total de uma amostra de solo ( $m^3m^{-3}$ ) é definida como a fração do seu volume ocupada por água e ar (Lier, 2020). O arranjo das partículas do solo determina a quantidade e natureza dos poros existentes, sendo a textura e matéria orgânica as variáveis condicionantes da estrutura que irão influenciar nos valores de porosidade total do solo (PT). A depender do solo a porosidade total irá variar entre 0,30 e 0,70  $m^3m^{-3}$ , sendo uma propriedade muito influenciado pelo uso e manejo do solo (Lier, 2019).

Neste estudo, a maior média ( $0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) da PT correspondeu ao tratamento MR10, apresentando significativa diferença ( $p < 0,001$ ) pelo contraste planejado com INI, MANC e a soma das médias de MILC e MANC (Figura 15).

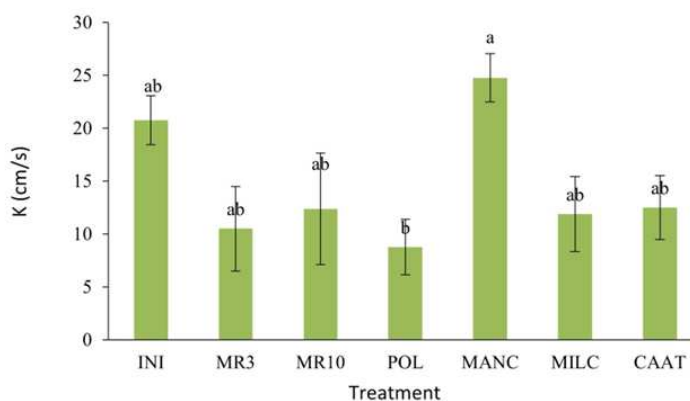
Figura 15 – Porosidade total (PT) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) na profundidade do solo 0-20 cm. Médias ( $n = 4$ ) seguidas de um \* diferem entre si, conforme indicado nos gráficos, pelo teste de Holm em fileiras no nível de erro de  $\alpha$  de 5% por família.



Fonte: Elaborado pela autora

Já os valores de condutividade hidráulica não saturada foram baixos e apresentaram pouca variação entre os tratamentos, com exceção de MANC ( $p < 0,001$ ) (Figura 15).

Figura 16 – Condutividade hidráulica não saturada ( $K \text{ cm/s}$ ) das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e vegetação nativa: Caatinga (CAAT) na profundidade do solo 0-20 cm. Médias seguidas de letras diferentes na coluna diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Elaborado pela autora

Os maiores valores de  $K(\theta)$  para MANC podem estar relacionados com o Manejo (MANC), já que a área tinha sido recém-gradeada para o plantio convencional da mandioca. Além disso, o fator umidade pode ter influenciado, já que ocorre manejo de irrigação por gotejamento no sistema. Assim, quanto maior a umidade, maior a quantidade de poros preenchidos com água e, portanto, maior será a  $K(\theta)$ . Em solos arenosos, essa relação é ainda mais forte, pois esses solos têm pouca retenção de água, e a condutividade hidráulica diminui rapidamente quando o solo seca. Com estes resultados verifica-se que nem sempre os maiores valores de porosidade estarão associados aos maiores valores de  $K(\theta)$ , já que MANC apresentou uma média significativamente menor de PT em comparação com MR10. É possível presumir a presença de uma condição hidrofóbica nos solos, especialmente nas áreas de manejo regenerativo, conforme pode ser visualizado na foto (Figura 17).

Figura 17 – Hidrofobicidade em solos arenosos na área de manejo regenerativo em Jardins Marizá, Tucano – BA em set. 21.



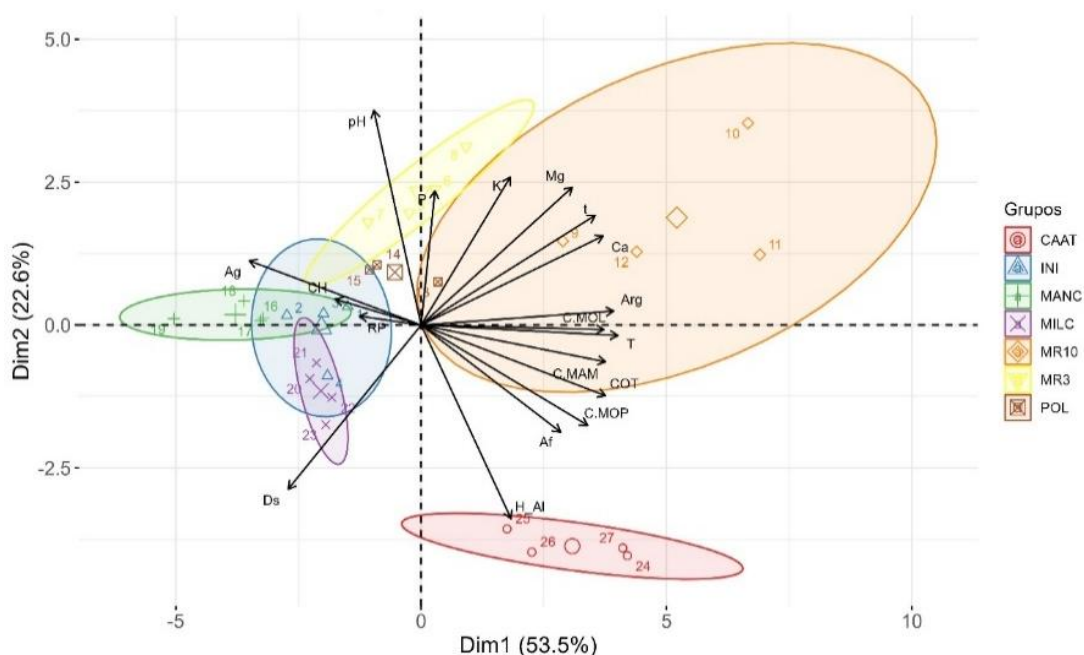
Fonte: Registro fotográfico realizado pela autora

A repelência à água ou hidrofobicidade em solos é dada pela resistência do solo a ser molhado pela água da chuva ou irrigação, por períodos que podem variar entre segundos, horas, dias ou semanas e está associada ao recobrimento das partículas do solo por substâncias orgânicas hidrofóbicas, as quais interagem de forma complexa com os poros e partículas minerais (Vogelmann, 2014; Doerr *et al.*, 2005; Buczko *et al.*, 2005). Este aspecto leva à diminuição da taxa de infiltração e da quantidade de água disponível no solo, podendo prejudicar assim a germinação de sementes e o crescimento vegetal, sendo especialmente estudado em solos arenosos florestais das regiões com clima semiárido (EMBRAPA, 2008). Algumas espécies de árvores estão associadas com a maior produção de substâncias hidrofóbicas, especialmente aquelas com considerável quantidade de resinas, ceras e óleos aromáticos (Doerr *et al.*, 2000). O manejo com entrada de MO e o uso de plantas de cobertura (perenes), especialmente aquelas que compõem o estrato arbóreo pode estar favorecendo a hidrofobicidade nas áreas de manejo regenerativo, principalmente MR10.

### **3.4 AGRUPAMENTO DOS SOLOS A PARTIR DAS PROPRIEDADES QUÍMICAS, FÍSICAS E BIOLÓGICAS**

O resultado da PCA conjunta para as propriedades físicas, químicas e biológicas dos 7 tratamentos indicou dois dos componentes principais (PC1 e PC2) respondendo por 76,1% da variabilidade total dos dados. O PC1 explicou 53,5% da variância total do conjunto de dados, sendo que os parâmetros que explicaram mais

fortemente foram as variáveis químicas e biológicas (MO), tendo maior influência da CTC potencial (T), da fração argila (Arg), C-MAM, COT, C-MOL, Ca, CTC efetiva (t), fração areia grossa (Ag) e C-MOP. Já o PC2 explicou 22,6% da variabilidade total dos dados, sendo as variáveis pH, H + Al, Ds, K, Mg e P que explicam mais fortemente a ordenação dos agrupamentos nesse eixo (Figura 18). Figura 18 – Análise de componentes principais das propriedades físicas, químicas e biológicas das áreas de agricultura regenerativa: início (INI); 3 anos (MR3); 10 anos (MR10); policultivo (POL). Agricultura convencional: mandioca (MANC), milho (MILC) e Caatinga (CAAT) em Tucano-BA.



Fonte: Elaborado pela autora

Os solos de MR10 são representados principalmente pelas variáveis químicas e biológicas (C-MAM, C-MOL, C-MOP, COT), apresentando certa similaridade de eixo com o agrupamento CAAT que foi maior representado por H + Al. Já MR3 teve maior influência do pH e do P. Os demais solos INI, POL, MANC e MILC foram representados especialmente pelas variáveis físicas que inclui fração areia grossa (Ag), densidade do solo (DS), condutividade hidráulica não saturada (CH) e resistência a penetração (RP), colocando-os em proximidade.

Estes resultados reforçam as análises estatísticas anteriores que demonstraram que os solos de MR10 teve sua fertilidade construída ao longo do tempo em razão do manejo, que inclui dentre as práticas o consórcio de espécies anuais e perenes, cobertura viva e incremento de matéria orgânica.

## 4 CONCLUSÃO

Levando em consideração as estratégias de convivência com a seca adotada no manejo regenerativo de base agroecológica em Jardins Marizá, Tucano – BA foi possível identificar propriedades químicas, físicas e biológicas de qualidade do solo. Dentre as propriedades químicas os macronutrientes e a CTC potencial (T) foram que melhor discriminou as diferenças entre as áreas, verificando que o manejo regenerativo propiciou maior fertilidade. De acordo com as condições biológicas, o C-MOL e o C-MOP pode atuar como um indicador de qualidade e saúde do solo, indicando que nas condições edafoclimáticas específicas, o efeito do manejo regenerativo tem propiciado o incremento de carbono do solo, especialmente da área de MR10, que também teve o maior C-MAM quando comparado com a CAAT. Pode-se concluir que o manejo regenerativo aplicado a longo prazo tem contribuído para a formação mais recalcitrante da MOS e consequente sequestro de C na camada de 0 – 20 cm, mesmo em condições de solos arenosos. A MO mais lábil (C-MOP, C-MOL) tem sido incorporada mediante o efeito do manejo com entrada do composto orgânico. No contexto da biodiversidade vinculada a cobertura agrícola foi possível constatar que a combinação de espécies anuais e perenes em arranjos espaciais e temporais, aumentando a abundância e a diversidade de plantas acima e abaixo do solo, promoveu maior diversidade de espécies para as áreas de manejo regenerativo, sendo MR10 a que apresentou maior índice. Em relação as propriedades físicas a Resistência a Penetração (RP), o Índice de Floculação (IF) e a Porosidade Total (PT) atuaram como indicadores de qualidade física do solo. Diante do exposto, os indicadores físicos, químicos e biológicos estudados foram sensíveis para diferenciar as áreas de manejo regenerativo e convencional, considerando que o agroecossistema manejado pela agricultura regenerativa de base agroecológica possibilita a construção da qualidade do solo em condições similares ou ainda melhores que a Caatinga (CAAT).

## REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v. 74, p. 19–31. 1999.
- ANTONINO, A. C. D. *et al.* Determinação da condutividade hidráulica e da sorvidade de um solo com infiltrômetro a disco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, n. 2, p. 213-219, 2001.
- BATEY, T. Soil compaction and soil management-A review. *Soil Use and Management*, v. 25, dez. 2009. Disponível em:<[http://barchampro.co.uk/sites/default/files/batey\\_2009\\_soil\\_compaction.pdf](http://barchampro.co.uk/sites/default/files/batey_2009_soil_compaction.pdf)>. Acesso em: 17 mar. 2025.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *The nature and properties of soils*. Prentice Hall, 14th ed. 2008. 965 p.
- BRAIDA, J.A. *et al.* M. Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. *Tópicos de Ciência do Solo*, v.7, p. 221 -278, 2011.
- BROWER, J. E.; ZAR, J. H. *Field and laboratory methods for general ecology*. 2.ed. Dubuque: Wm. C. Brown Company Publishers, 1984. 226 p.
- BUCZKO, U.; BENS, O.; HÜTTL, R. F. Variability of soil water repellency in sandy forest soils with different stand structure under Scots pine (*Pinus sylvestris*) and beech (*Fagus sylvatica*). *Geoderma*, Cottbus, v. 126, p. 317-336, 2005.
- CARVALHO, A. M. X., *et al.* SPEED Stat: um programa de planilhas gratuito, intuitivo e minimalista para análises estatísticas de experimentos melhoramento de Culturas e Biotecnologia Aplicada, v. 20, n. 3. 2020.
- CORREIA, K. G. *et al.* Atividade microbiana e matéria orgânica leve em áreas de Caatinga de diferentes estágios sucessionais no Semiárido Paraibano. *Revista Caatinga*, Mossoró, v. 28, n. 1, p. 196-202, jan. mar., 2015.
- DEXTER, A. R. Soil physical quality: Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v. 120, n. 3-4, p. 201-214. 2004.
- DICK, D. P. *et al.* *Química da matéria orgânica do solo*. In: MELO, V.F.; ALLEONI, R.F. (Eds.) *Química e mineralogia do solo. Parte II – Aplicações*. Viçosa: SBSCS, 2009. p.1-67.
- DOERR, S. H. *et al.* Extraction of compounds associates with water repellency in sandy soils of different origin. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v. 43, p. 225-237, 2005.
- DOERR, S. H.; SHAKESBY, R. A.; WALSH, R. P. D. Soil water repellency: it causes, characteristics and Hydro geomorphological significance. *Earth-Science Reviews*, Swansea, v. 51, p. 33-65, 2000.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, *Soil Science Society of America*, n. 35, 1994. p.3-22.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. *Manual de métodos de análises de solo*. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: 1997. 212 p.

- EMBRAPA. *Informações sobre plantas forrageiras C4 para cultivo em condições de deficiência de drenagem e tolerância a frio recurso eletrônico*. Márcia Cristina Teixeira da Silveira, Naylor Bastiani Peres. Dados eletrônicos. Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2014.
- EQUIPE PRINCIPAL. *R. R: Uma linguagem e ambiente para computação estatística; Equipe principal do R: Viena, Áustria*, 2019.
- FERREIRA FILHO, R. M. *Frações da matéria orgânica e atributos físicos de um vertissolo em sistemas de consórcio de longa duração*. Dissertação ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal da Paraíba. Areia, 2017.
- FIGUEIREDO JUNIOR, Orlando *et al.* Levantamento florístico dos quintais agroflorestais do pds virola jatobá em anapú, Pará. *Enciclopédia Biosfera*, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v.9, n.17, p. 1793. 2013.
- FURTINI NETO, A.E.; VALE, F.R.; RESENDE, A.V. Fertilidade do solo. Lavras: Ed. UFLA, 2001. 252 p.
- GILLER, K. E. *et al.* (2021). Regenerative Agriculture: Na agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, v. 50, n.1, p. 13–25. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>. Acesso em: 12 out. 2024.
- GLIESSMAN, S. R. *Diversidade e estabilidade do agroecossistema*. In: \_\_\_\_ Agroecologia: processos ecológicos em agricultura sustentável. Porto Alegre, Editora Universidade, 2001. p. 437-474.
- GREGORICH, E.G. *et al.* Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 74, p. 367-375, 1994.
- GREGORICH, E.G.; JANZEN, H.H. *Storage of soil carbon in the light fraction and macroorganic matter*. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Ed.) Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton: CRC Press, 1996. p.167-211.
- GUARESCHI, R. F., PEREIRA, M. G., PERIN, A. Deposição de resíduos vegetais, matéria orgânica leve, estoques de carbono e nitrogênio e fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado Goiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, n.3, p.909-920, 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v36n3/21.pdf>>. Acesso em: 01 nov. 2017.
- GUÉRIF, G. Richard J. *et al.* A review of tillage effects on crop residue management, seedbed conditions and seedling establishment. *Soil Tillage Res.*, v. 61, pp. 13-32, 2001.
- JASTROW, J.D.; BOUTTON, T.W.; MILLER, R.M. Carbon dynamics of aggregate-associated organic matter estimated by carbon-13 natural abundance. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.60, p.801 807, 1996.
- KIEHL, E.J. *Adubação orgânica: 500 perguntas e respostas*. Piracicaba: Edmar José Kiehl, 2008. 227p.
- KLEIN, V. A. *et al.* *Densidade máxima e relativa de solos sob plantio direto*. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água, 15, Santa Maria, 2004. Resumos expandidos. Santa Maria: UFSM, 2004

- LAL, R.; PIERCE, F. J. The vanishing resource. *In: R. Lal and F.J. Pierce, "Soil Management for Sustainability."* SWCS. Ankeny, IA. p.1-5. 1991.
- LEITE, L. F.C. *et al.* Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no cerrado do Piauí R. Bras. *Eng. Agríc. Ambiental*, v. 14, p.1273-1280, 2010.
- LIER, Q. J.V. *Física do solo*. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 298 p, 2010.
- LIER, Q.J. *Física do solo baseada em processos*. Piracicaba, 2020, 413p.
- LIMA-JUNIOR, E.C. *et al.* Trocas gasosas, características das folhas e crescimento de plantas jovens de *Cupania vernalis* Camb. submetidas a diferentes níveis de sombreamento. *Ciência Rural*, v. 35, n. 5, Santa Maria, p. 1092-1097. 2005.
- LIMA, H. V. *et. al.* Indicadores de qualidade do solo em sistemas de cultivo orgânico e convencional no semiárido cearense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 5, p. 1085-1098, 2007.
- LOSS, A. *et al.* Fertilidade do solo e matéria orgânica em Vertissolo e Argissolo sob cobertura florestal e pastagem. *Comunicata Scientiae*, v.5, n.1, p.01-10, 2014.
- LUNZ, A.M.P. *Crescimento e produtividade do cafeeiro sombreado e a pleno sol*. Tese (Doutorado Fitotecnia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 94 p. 2006.
- MACHADO, E. L. M. *et al.* Análise da diversidade entre sistemas agroflorestais em assentamentos rurais no sul da Bahia. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, Garça, v.5, n.1, p.1-14, 2005.
- MAIA, Claudia Maria Branco de Freitas *et al.* Indução à Repelência à Água em Solo Arenoso a partir de Extratos Naturais Hidrofóbicos. *Comunicado Técnico 206*. EMBRAPA ISSN, p. 1517-5030, 2008.
- MARTIN, Adriana Regina *et al.* Studies on the thermal properties of sisal fiber and its constituents. *Thermochimica. Acta 506*, (s.1–2), p.14–19. 2010.
- MEA - Millennium Ecosystem Assessment. *Ecosystem and human well-being: Synthesis*. Washington: Island Press, 2005. 137p.
- MENDES, M. *Potencialidades do Sistema Agroflorestal para Reflorestamento da Caatinga: Uma Experiência no Assentamento Moacir Lucena-Apodi/RN*. 2019. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais). UFRN, Natal/RN, 2019.
- MIELNICZUK, J. *et al.* Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *In: CURI, N.; MARQUES, J. J.; ALVAREZ V., V. H. (Org.). Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 3. p. 209-248, 2003.
- MIELNICZUK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. *In: SANTOS, G.A. & CAMARGO, F.A.O., eds. Fundamentos da matéria orgânica do solo sistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre, Genesis, p.2-8. 1999.
- MORAIS, J. P. S. *et al.* Sisal fibers: Morphology and applications in polymer composites. *Carbohydrate Polymers*, v. 81, n. 2, p. 411-418, 2010. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.03.046.

- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: UFLA, 2006. 729p.
- NOVAIS, R. F. *et al.* (Org.). *Fertilidade do solo*. 1. ed. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS, 2007. 1017 p.
- PORTUGAL, Arley Figueiredo; COSTA, Oldair Del'Arco Vinhas; COSTA, Liovando Marciano da Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:575-585, 2010.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Ci. Amb.*, 27:29-48, 2003.
- ROESCH, L. F. W. *et al.* Pyrosequencing enumerates and contrasts soil microbial diversity. *International Society for Microbial Ecology*, v.1, p.283-290. 2007.
- SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture: the soil is the base, *Global Food Security*, v. 26, 2020.
- SILVA, G. F. *et al.* Indicadores de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso na mesorregião do agreste paraibano. *Revista Caatinga*, v.28, n.3, p.25-35, jul./set. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rcaat/v28n3/1983-2125-rcaat-28-03-00025.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- SOTO, R. Lujan, PADILLA, M. Cuellar; VENDE, J. de. Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impacts of regenerative agriculture on ecosystem services. *Ecosystem Services*, 45, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101157>. Acesso em: 03 nov. 2025.
- SOUZA, J., L., REZENDE. P. *Manual de horticultura orgânica*. Viçosa, MG: Aprenda fácil, 2014.
- STEFANOSKI, D. C. *et al.* Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 12, p. 1301-1309, 2013.
- STEVENSON, F.J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2. ed. New York: J. Wiley, 1994. 496p.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 819 p. 2009.
- TEKLU, G. Characterization of Physico-chemical, Thermal, and Mechanical Properties of Ethiopian Sisal Fibers. *Journal of Natural Fibers*, v. 19, n. 8, p. 1-12. 2021.
- VENEGAS, F. Efeito de doses de farinha de carne e osso como fonte de fósforo na produção de milho verde (ZEA MAYS L.). *Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde*, v. XIII, n. 1, 2009, pp. 63-76.
- VOGELMANN, E. S. *Relações da matéria orgânica com a hidrofobicidade do solo*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- WHITMAN, W. B.; COLEMAN, D. C.; WIEBE, W. J. *Prokaryotes: the unseen majority*. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, v. 95, p. 6578–6583. 1998.

## **CAPÍTULO II: FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES (FMA) EM RESPOSTA AO MANEJO REGENERATIVO DE SOLOS ARENOSOS NO BIOMA CAATINGA NO NORDESTE DO BRASIL**

### **RESUMO**

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) são colonizadores do córtex da raiz da maioria das plantas terrestres e estabelecem uma simbiose mutualística denominada micorrizas. As associações micorrízicas promovem benefícios interdependentes para ambos (fungo e planta) e a agricultura regenerativa de base agroecológica pode ser uma aliada. Neste contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a ocorrência de espécies e a densidade de esporos de FMA em um sistema de manejo regenerativo (MR) e convencional (MC) no semiárido, bem como em uma área de fragmento de Caatinga (CA), bem como relacionar com as propriedades de solo e as espécies vegetais. As amostras compostas de solo foram coletadas na região de Tucano - Bahia (11°0'53' S, 38°42'12' W) na profundidade de 0 - 10 cm, quatro em cada área de estudo. Propriedades do solo e a cobertura da vegetação foram considerados para investigar possíveis relações com o número de esporos e a diversidade de espécies. Os resultados mostraram diferença no período seco na densidade de esporos para a área de MR ( $P < 0,05$ ), com os maiores valores. A textura, o fósforo (P), matéria orgânica (MO) e  $H^+$  Al (acidez potencial) indicou correlação significativa com a riqueza de espécies. A abundância de espécies vegetais em MR aumentou as possibilidades de associações micorrízicas. Foi possível constatar que as condições do manejo regenerativo em solos arenosos influenciaram de diferentes graus a resposta dos FMA em relação a densidade de esporos e a riqueza de espécies, sendo que a fertilidade do solo parece ter tido influência nesta resposta.

Palavras-chave: Biodiversidade. Matéria orgânica. Agroecologia. Semiárido.

## 1 INTRODUÇÃO

Os Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMA) possuem estreita relação com a comunidade vegetal, contribuindo com o equilíbrio dos diferentes ecossistemas terrestres (Brundrett, Tedersoo, 2018; Tedersoo *et al.*, 2020). Isto porque eles são colonizadores do córtex da raiz da maioria das plantas e estabelecem uma simbiose mutualística denominada micorrizas. As associações micorrízicas promovem benefícios interdependentes para ambos (planta e fungo) e podem ser estimuladas no agroecossistema a partir de um manejo de base agroecológica (Ali *et al.*, 2021). O processo de colonização fúngica das raízes das plantas hospedeiras é caracterizado por estágios distintos que incluem uma série de alterações morfogenéticas complexas no fungo: germinação de esporos, diferenciação das hifas, formação de apressórios, penetração radicular, crescimento intercelular, formação de arbúsculos e transporte de nutrientes (Harrier, 2001).

Quando presentes em regiões semiáridas como o bioma caatinga, os fungos podem oferecer às plantas maior tolerância ao estresse hídrico, aumentando assim a resiliência dos sistemas naturais e manejados (Augé 2001; Pereira *et al.*, 2020). O estudo conduzido por Pontes *et al.* (2017) demonstrou que a floresta nativa da caatinga apresenta elevada diversidade de espécies de FMAs comparados ao cultivo de feijão de porco. Enquanto o estudo de Marinho *et al.* (2019) retratou a diferença na alfa diversidade de FMAs entre áreas naturais e antropizadas.

Entender a ecologia dos FMA em solos do semiárido é de extrema importância para preservar a biodiversidade natural, aliando com estratégias de cultivo para manter os solos produtivos. Isto particularmente se torna ainda mais importante quando se trata da capacidade destas florestas de se recuperarem de distúrbios humanos, bem como das mudanças climáticas. Os FMA atuam como peça-chave na estruturação dos diversos ecossistemas naturais e sua diversidade se relaciona diretamente com a produtividade e biodiversidade vegetal (Van der Heijden, 1998; Jeffries *et al.*, 2003); sendo estruturada principalmente de acordo com a vegetação e o tipo de solo (Jonhson *et al.*, 2003). Para fins ecológicos, apesar das limitações, o estudo da ocorrência de FMA baseado em esporos constitui em estratégia eficaz (Morton *et al.*, 1995).

A maioria dos estudos sobre FMA se concentra em ecossistemas naturais (Stukenbrock, Rosendahl 2005; Ji *et al.*, 2013). No entanto, com o aumento

crecente no uso dos solos para a agricultura, torna-se relevante pesquisar como estas comunidades estão distribuídas em diferentes sistemas agrícolas de produção. Isto deve incluir os distintos tipos de manejo do solo e do agroecossistema, desde a agricultura convencional até aquelas de base agroecológica.

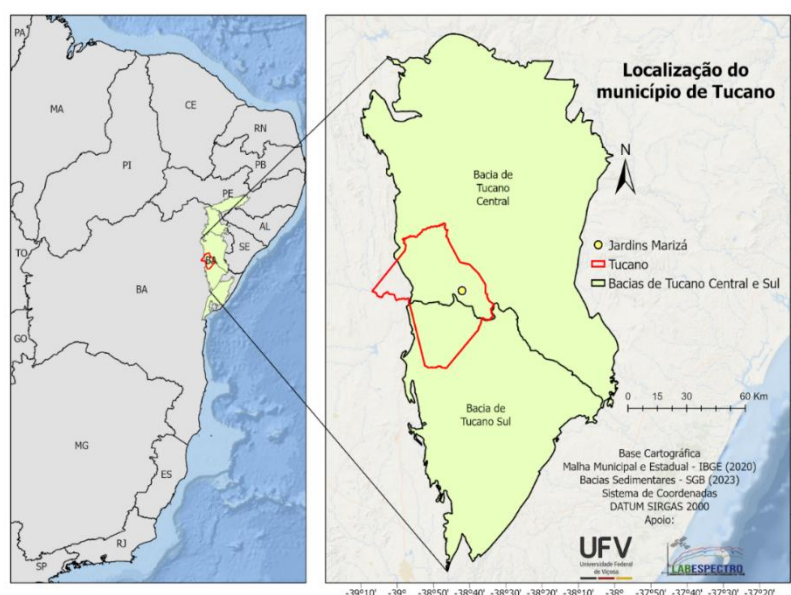
Neste sentido, o objetivo deste estudo consistiu em estimar a diversidade (riqueza de espécies) de fungos micorrízicos pelas populações de esporos da rizosfera em resposta ao manejo regenerativo e ao manejo convencional comparados ao solo natural do bioma caatinga e relacionar com as propriedades do solo e a cobertura vegetal agrícola.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A bacia do Tucano localiza-se no estado da Bahia, e ocupa aproximadamente uma área de 46.500 km<sup>2</sup> compreendendo três sub-bacias: Norte, Central e Sul (Magnavita *et al.*, 2003; Caixeta, *et al.*, 1994). A área de estudo Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano Central próximo ao limite da sub-bacia do Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru (Figura 1).

Figura 1 – Localização de Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA



Fonte: UFV (2023)

O clima da região é predominante do tipo estepe local e classificado como BSh (classificação de Köppen; Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 463 mm, com temperatura média de 25,4 °C. A vegetação predominante é formada por

pastagens entremeadas por áreas com fragmentos de Caatinga (INEMA, 2017). O solo do local foi descrito e classificado como um Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico (> 90% de areia), de ocorrência em relevo suave ondulado, em terço médio de encosta e originário de sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

## **2.2 AMOSTRAGEM DO SOLO**

As amostras de solo foram coletadas na região de Tucano- BA, considerando três áreas: policultura de manejo regenerativo de base agroecológica (MR) com 10 anos de manejo, priorizando entrada de composto orgânico no solo, plantas de cobertura e consorcio entre espécies anuais e perenes com culturas de sequeiro; Plantio de mandioca convencional (MC) que prioriza entrada de adubação granulada do tipo NPK e irrigação por gotejamento e uma área da Caatinga (CA). Foram coletadas quatro amostras compostas constituídas de 5 amostras simples em cada área, sendo que cada amostra foi delimitada por uma área de 12,5 x 12,5 m, a uma profundidade de 0 - 10 cm. As amostras compostas foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas a 4°C para a conservação.

## **2.3 EXTRAÇÃO DE ESPOROS**

Os esporos foram extraídos das amostras de solo pelo método do peneiramento úmido e descritos por Gerdemann e Nicolson (1963) e centrifugação diferencial, conforme descrito por Jenkins (1964). Os esporos foram extraídos de uma alíquota de 50 cm<sup>3</sup> de solo de cada amostra e foram estudados os esporos retidos na peneira de 0,053 mm. Os esporos foram quantificados sob microscópio estereoscópico.

## **2.4 IDENTIFICAÇÃO DAS ESPÉCIES DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES**

Para a identificação taxonômica, esporos são depositados nas lâminas e estas recebem o montante a base de PVLG (Polivinil-Lacto-Glicerol) e o montante misturado com reagente de Melzer (1:1) auxiliam na identificação das espécies. Nesta etapa, os esporos são rompidos a fim de expor suas paredes germinativas e poder ser observado suas reações em reagente Melzer. A identificação das espécies de FMAs foi realizada comparando o observado em microscópio óptico com as

descrições das espécies originais ou presentes no manual de Schenck e Pérez (1988) ou na página da International Culture Collection of Arbuscular Mycorrhizal Fungi (INVAM, 2021).

## 2.5 ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

A determinação granulométrica foi realizada segundo o método da pipeta, conforme Lei de Stokes e utilizando o NaOH 0,01 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico (EMBRAPA, 2017), após agitação lenta (50 rpm por 16 h). A densidade do solo foi obtida pelo método da proveta, uma vez que a estrutura do tipo grãos simples não permitiu a coleta de amostras indeformadas. A análise química de rotina foi efetuada, como o carbono orgânico total (COT) sendo quantificado por oxidação por via úmida com K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,167 mol L<sup>-1</sup> em meio sulfúrico e aquecimento externo (Yeomans; Bremner, 1988). As variáveis químicas e físicas do solo podem ser verificados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Valores médios da análise química de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021.

Área	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	Ca	Mg	H <sup>+</sup> Al	Al	T	t	MO (dag/kg)	V%	m%	P-Rem mg/L
		mg/dm <sup>3</sup>			cmolc/dm <sup>3</sup>								
MR	7,31	15,58	131,50	4,59	2,45	0,33	0,00	7,70	7,38	2,76	95,75	0,00	55,75
MC	7,31	11,90	37,50	0,66	0,55	0,05	0,00	1,35	1,30	0,03	97,45	0,00	58,25
CA	4,74	6,90	77,00	2,08	0,59	4,00	0,10	6,86	2,96	2,62	41,48	3,6	60,00

Fonte: Elaborada pela autora

Tabela 2 – Valores médios de análise física de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo (MR) convencional (MC) e Caatinga (CA) no semiárido da região de Tucano – BA, 2021.

Área	Densidade do solo (g.cm <sup>-3</sup> )	Areia total(kg/kg)	Silte(kg/k g)	Argila(kg/k g)	Classificação Textural
MR	1,35	0,867	0,053	0,080	Areia Franca
MC	1,6	0,936	0,026	0,038	Areia
CA	1,60	0,900	0,035	0,066	Areia

Fonte: Elaborado pela autora

## 2.6 COBERTURA AGRÍCOLA VEGETAL DO SOLO

Para a determinação da cobertura agrícola vegetal do solo, adaptou-se o método da corda (Brower; Zar, 1984), onde um transecto de linha com 20 m foi utilizado com marcação de pontos a cada 2 m para leitura da presença e o tipo de cobertura agrícola vegetal sobre o solo. A corda foi estendida aleatoriamente na diagonal de cada parcela, em três repetições, sendo contados os intervalos que apresentavam cobertura vegetal pelas espécies agrícolas, nativas e espontâneas.

## 2.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o desenho experimental descrito: 3 sistemas de uso do solo × 2 estações com 4 repetições. Ou seja, três preditores foram estudados considerando um estudo observacional associado ao manejo do solo e dois preditores associados a condições sazonais (período seco e úmido). A alfa diversidade de espécies de FMAs foi calculada a partir da matriz de presença e ausência, e estimada por Simpson (D) e Shannon com o software PAST, versão 4.0.3 (Hammer *et al.*, 2001).

Os dados foram submetidos à análise de variância de acordo com o modelo inteiramente casualizado utilizando o software de estatísticas SPEED (Carvalho *et al.*, 2020). Os resíduos do modelo foram submetidos aos testes de Cochran e Jarque-Bera e ESD não reduzida para avaliar as condições de homocedasticidade, normalidade e presença de outliers. Aplicou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade para avaliar as possíveis diferenças. Para testar os possíveis efeitos da gestão da estação e das intensificações do uso do solo utilizou-se a Análise Multivariada Permutacional de Variância (PERMANOVA) (Anderson, 2001), a partir do Matriz de distância de Bray-Curtis através da função 'adonis' em R 'vegan pacote, versão 2.5–6 (Oksanen *et al.*, 2019).

Para avaliar a similaridade e distinção das comunidades de FMAs nas três áreas do estudo e nas épocas testadas foi realizada a Nonmetric Multidimensional Scaling (NMDS) ordination of fungal communities based on the Bray–Curtis dissimilarity matrix. Para compreensão da distribuição das espécies em cada área, foi realizada a Principal Coordinates Analysis (PCoA), com base na matriz Bray-Curtis através do software Canoco 5.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 OCORRÊNCIA DE FUNGOS MICORRÍZICOS ARBUSCULARES

Um total de 32 espécies de FMA foi identificada com base na morfologia dos esporos, distribuídos em nove gêneros e quatro famílias do filo Glomeromycota, pertencente aos gêneros *Glomus* (18) e *Acaulospora* (17) *Racocetra* (6), *Gigaspora* (4), *Ambispora* (3), *Cetraspora* (3), *Scutellospora* (1), *Dentiscutta* (1), *Rizophagus* (1).

A ocorrência no número de espécies da família Acaulosporaceae foi semelhante para as áreas de manejo regenerativo (MR) e convencional (MC). Já a ocorrência de espécies da família Gigasporaceae foi maior na vegetação nativa Caatinga (CA), seguido por MC e o menor número de espécies no MR. Da família Ambisporaceae ocorreu o registro apenas de uma espécie, a qual foi comum as três áreas. Para as espécies da família Glomeraceae a maior ocorrência foi verificada na CA, MR e MC respectivamente (Tabela 3).

Tabela 3 - Ocorrência de espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs) em Manejo Regenerativo (MR), Plantio de Mandioca convencional (MC) e vegetação nativa tipo caatinga (CA) nas estações úmida e seca.

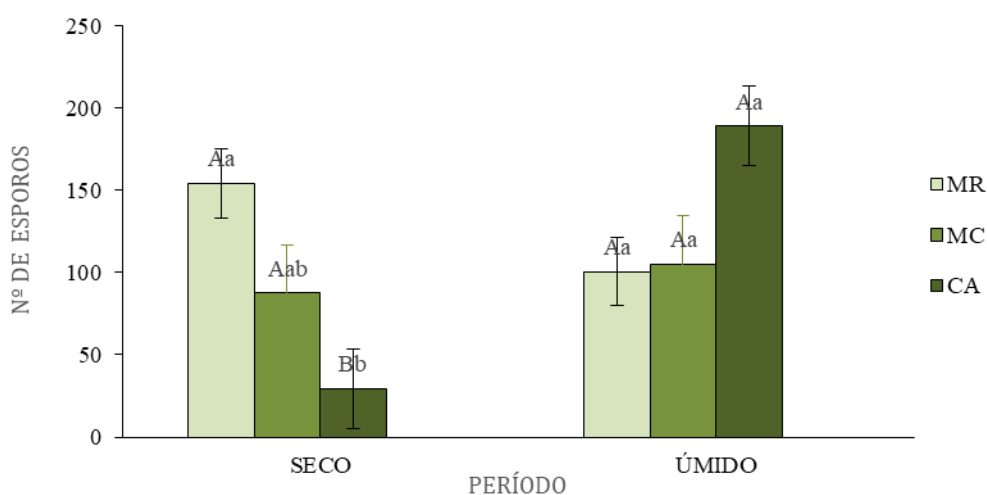
Família/Espécies	Áreas		
	MR	MC	CA
<b>Acaulosporaceae</b>	6	6	5
<i>Acaulospora scrobiculata</i>	x	X	x
<i>Acaulospora</i> sp			x
<i>Acaulospora colombiana</i>			x
<i>Acaulospora excavata</i>	x	X	
<i>Acaulospora foveata</i>	x	X	
<i>Acaulospora mellea</i>	x	X	x
<i>Acaulospora reducta</i>		X	x
<i>Acaulospora tuberculata</i>	x	X	
<i>Acaulospora rehmsii</i>	x		
<b>Ambisporaceae</b>	1	1	1
<i>Ambispora leptoticha</i>	x	X	x
<b>Gigasporaceae</b>	2	4	9
<i>Gigaspora</i> sp	x	X	x
<i>Gigaspora</i> sp.1			x
<i>Cetraspora pellucida</i>	x	X	x
<i>Scutellospora</i> sp			x
<i>Racocetra collaridea</i>			x
<i>Racocetra verrucosa</i>			x
<i>Racocetra gregaria</i>		X	x

<i>Racocetra fulgida</i>	X	x	
<i>Dentiscutata heterogama</i>			x
<b>Glomeraceae</b>	6	5	7
<i>G. fasciculatum</i>			x
<i>G. clavisporum</i>	x		
<i>Glomus glomerulatum</i>	x		
<i>Glomus macrocarpum</i>	x	X	x
<i>Glomus microagregatum</i>	x	X	x
<i>Glomus multicaule</i>			x
<i>Glomus</i> sp.	x	X	
<i>Glomus</i> sp.1	x	X	x
<i>Glomus</i> sp.2		X	x
<i>Rhizophagus fasciculatus</i>			x
<b>Taxon não identificado</b>	0	2	1
NID		x	
NID2		x	
NID3			x
<b>Total</b>	15	18	23

Fonte: Elaborada pela autora

A densidade de esporos de FMA em 50 cm<sup>3</sup> de solo variou no período seco de 79 a 241 no MR, de 32 a 211 no MC e 12 a 56 na CA. Já no período úmido variou de 63 a 139 no MR, de 63 a 151 no MC, de 77 a 252 na CA. Os dados apresentaram diferença estatística ( $p < 0,05$ ) significativa no período seco entre os manejos, MR e a CA, o qual apresentou para o MR maior esporulação (Figura 1). Apesar do solo do MR apresentar maior número de esporos em relação a CA e o MC, não foi verificada diferenças quanto os índices de diversidade de Shannon e Chao-1 (Tabela 2).

Figura 1 - Densidade de Esporos de fungos micorrízicos arbusculares em Manejo Regenerativo (MR), Plantio de Mandioca convencional (MC) e vegetação nativa tipo caatinga (CA). As letras maiúsculas representam diferença entre as linhas e as letras minúsculas representam a diferença entre colunas.



Fonte: Elaborado pela autora

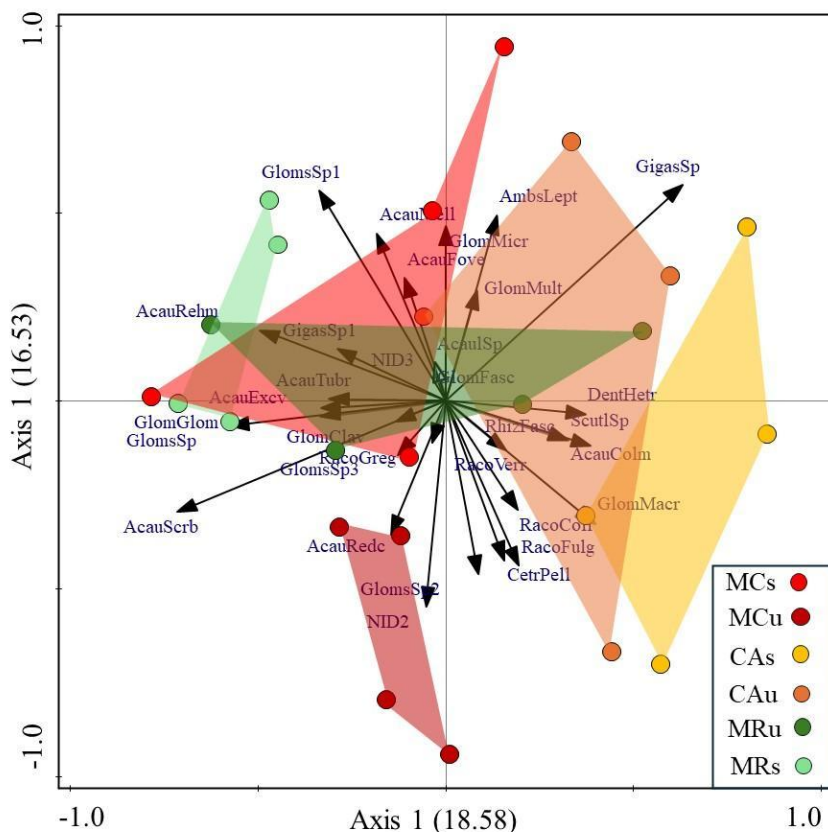
Tabela 2 - Índices diversidade Shannon (H') e de Simpson (D) em Manejo Regenerativo (MR), Plantio de Mandioca convencional (MC) e vegetação nativa tipo caatinga (CA) nas estações úmida e seca.

Tratamento	Shannon	Simpson
MR- seco	1.371	0,7424
MC- seco	1.356	0,7347
CA- seco	1.379	0,7462
MR-úmido	1.351	0,7314
MC-úmido	1.355	0,7346
CA-úmido	1.373	0,7438

Fonte: Elaborado pela autora

Na análise de coordenadas principais (PCoA) para as espécies de fungos micorrízicos arbusculares (FMAs), é possível observar que o eixo da coordenada principal 1 (PC1) foi responsável por 18,58% da variação dos dados e a coordenada principal 2 (PC2) por 16,53%, explicando assim 35,11% do conjunto total de dados (Figura 2).

Figura 2 - Análise de coordenadas principais (PCoA) utilizando o coeficiente de Bray-Curtis, com base na ocorrência de espécies de FMAs, na estação úmida (u) e seca (s), em Manejo Regenerativo (MR), Plantio de Mandioca convencional (MC) e vegetação nativa tipo caatinga (CA).



Fonte: Elaborado pela autora

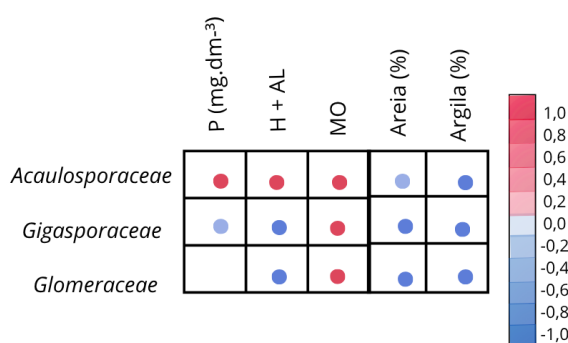
É possível observar a distribuição das espécies em relação as diferentes áreas. Nota-se que para a CAs e CAu as espécies são *Glomus macrocarpum*, *Acaulospora colombiana*, *Racocetra collaridea*, *Racocetra fulgida*, *Cetraspora pelúcida*, *Scutellospora sp*, *Dentiscutata heterogama*, *Racocetra verrucosa*, *Rhizophagus fasciculatus*, *Ambispora leptoticha*, *Glomus multicaule.*, *Glomus microagregatum* Para a área de CAs houve maior representatividade de *Gigaspora sp*. Para MRs e MRu as famílias mais representativas foram *Acaulosporaceae* e *Glomeraceae*, sendo as espécies *Acaulospora scrobiculata* e *Glomus sp.1* aquelas mais encontradas. Para MCs e MCu a família *Acaulosporaceae* foi mais representativa com maior evidência da espécie *Acaulospora scrobiculata*. É válido ressaltar que embora estejam em períodos distintos (seco e úmido) os grupos de CAs e CAu apresentam similaridade em sua estrutura, visto que apresentam distribuição sobrepostas. O mesmo ocorre para os grupos de MRu e MRs, diferentemente de MCs e MCu que apresentam um distanciamento dos grupos em

sua distribuição. No período úmido as espécies *Glomus macrocarpum*, *Cetraspora pellucida*, *Acaulospora mellea* e *Glomus microagregatum* ocorreram em comum nas três áreas estudadas. Já no período seco a espécie *Ambispora leptoticha* foi a única em comum.

### 3.2 CORRELAÇÃO COM AS PROPRIEDADES DO SOLO

O coeficiente de correlação de Spearman indicou forte correlação entre algumas propriedades do solo e o número de espécies encontradas nas respectivas áreas (Figura 3). Em número as correlações foram maiores para as áreas de MR (17) e CA (16), sendo a MC a que apresentou menor correlações (5).

Figura 3 – Significância estatística dos coeficientes de correlação de Spearman (R) entre espécies de FMA em nível de gênero e propriedades do solo ( $P < 0,05$ ) das áreas de manejo regenerativo (MR), manejo convencional (MC) e Caatinga no semiárido de Tucano, BA.



Fonte: Elaborado pela autora

## 4 DISCUSSÃO

Este estudo é pioneiro em avaliar a composição e estrutura da comunidade de FMA's em solos arenosos da região de Tucano - BA pela perspectiva do manejo regenerativo de base agroecológica. Especialmente em regiões semiáridas e áridas e em solos de baixa fertilidade, as plantas tornam-se mais dependentes da simbiose micorrízica para tolerar o estresse hídrico e as deficiências nutricionais (Frosi *et al.*, 2016). Por conta disto, a produtividade de trigo de sequeiro em uma região do semiárido na província de Gansu, China foi aumentada a partir da inoculação com FMA, o qual também propiciou o aumento na eficiência do uso da água, o carbono

orgânico do solo e a relação C/N da biomassa microbiana (Duan *et al.*,2021). Ou seja, a presença de FMA pode ser uma medida eficaz no estímulo da qualidade do solo a partir do desenvolvimento agrícola sustentável em regiões de baixa disponibilidade hídrica.

Os FMAs podem, portanto, serem de extrema relevância para minimizar as consequências da convivência com a seca pelas comunidades de agricultores sertanejos, que por sua vez sofrem com a insegurança alimentar, as frequentes secas, a degradação do solo e do agroecossistema e a perda da biodiversidade. Este critério inclusive dialoga com o desafio enfrentado pela transição agroecológica de produzir alimentos para uma população crescente com poucos recursos, sem comprometer a saúde do agroecossistema (Wezel; Soldat 2009) que vem sendo alterado especialmente pelo manejo intensivo do solo.

Há cerca de 550 milhões de anos, muito antes dos povos mesopotâmicos passarem a exercer a agricultura nas margens do rio Tigre e Eufrates, os FMA já exerciam uma relação simbiótica com as plantas. Simbioses mutualísticas são aquelas em que ambos os envolvidos podem se beneficiar da associação, no entanto nem todas as associações descritas como micorrizas demonstraram ser mutualísticas por meio de análises experimentais de interações nutricionais ou determinação de aptidão (Smith & Read, 2008). As associações vêm se distribuindo ao redor do mundo, com cerca de 261 espécies descritas, pertencentes a três classes, cinco ordens, 15 famílias e 32 gêneros. Dessas, 148 espécies ocorrem em solo brasileiro (Goto; Jobim, 2014). Assim como há registros no Brasil de que as famílias de FMA mais frequentes são Glomeraceae (35%) e Acaulosporaceae (19%) (Goto; Jobim, 2014). Neste estudo houve o registro das mesmas famílias de abrangência, representando 56% e 53% do total respectivamente. Resultados semelhantes também foram detectados para o semiárido brasileiro (Siqueira *et al.*, 2010; Dantas *et al.*, 2015; Sousa, 2019).

Sabe-se que o semiárido apresenta condições edafoclimáticas específicas com características demarcadas, sendo o principal fator limitante a disponibilidade hídrica, já que a precipitação anual se concentra em apenas três ou quatro meses consecutivos. No entanto, apesar disso a distribuição das espécies nas áreas de MR e CA apresentaram uma similaridade em sua estrutura mesmo em períodos distintos (Figura 2), indicando que apesar das mudanças edafoclimáticas, o meio oferece condições para que essa distribuição ocorra sem afetar drasticamente a estrutura

das espécies. O que não ocorreu na área de manejo convencional, que apresentou distanciamento na estrutura de distribuição das espécies, considerando o período seco e úmido.

Os sistemas de manejo orgânico podem afetar positivamente a diversidade de vários grupos de organismos, incluindo fungos micorrízicos arbusculares (Leksono, 2017). Um estudo realizado em videiras indicou que o sistema de manejo orgânico influencia as interações planta-micróbio que levam à colonização, isto porque foi observado maior diversidade de Shannon para porta-enxertos SO4 com uma diversidade maior de FMA comparado ao sistema convencional (Moukarzel *et al.*, 2024). De maneira geral, a fertilidade do solo pode influenciar em grande parte as comunidades de FMA, como indicado pela mudança na diversidade de FMA ao longo de gradientes de deposição de N e carbono orgânico no solo (Egerton-warburton; Allen, 2000; Johnson *et al.*, 1991). Quando se trata de análise molecular um sistema agroecológico mostrou manter maior diversidade de FMA em comparação com os sistemas convencionais, embora não houve diferença na abundância de esporos de FMA (Júnior *et al.*, 2019).

#### 4.1 DENSIDADE DE ESPOROS

O número de esporos no MRs foi maior ( $p < 0,05$ ) em comparação a CAs. A densidade de esporos de FMA pode estar associada a fatores como relação edafológica, características físico-químicas do solo, clima e umidade do solo (Armenta *et al.*, 2016). As condições edafológicas podem responder a alta abundância de esporos durante a estação seca, sendo o estado fenológico das plantas um potencial estímulo (Guadarrama; Alvarez-Sanchez, 1999; Moreira-Souza *et al.*, 2003). As variações de plantas C3 e C4, normalmente presentes em condições agroflorestais vão apresentar taxa fotossintética distinta durante a estação seca e a disponibilidade do C para as raízes das plantas pode ficar comprometida induzindo a formação de esporos (Cardoso *et al.*, 2003).

A densidade de esporos de FMA mostram padrões sazonais distintos em ecossistemas áridos (Abbott; Robson, 1991), podendo no período seco ocorrerem principalmente como bancos de esporos do solo (Birhane *et al.*, 2010). Um estudo realizado em um clima tropical úmido em um sistema agroecológico da zona da mata mineira não apresentou diferenças no número de esporos em relação aos diferentes

sistemas de manejo (convencional e agroecológico). O autor concluiu que o manejo pode interferir na composição da comunidade, sem necessariamente reduzir o número de esporos (Junior *et al.*, 2019). Já em condições de Florestas Decíduas secas em ecossistemas áridos, dados mostraram na estação seca alta abundância de esporos (Birhane *et al.*, 2010) e alta diversidade de esporos de micorrizas arbusculares (Uhlmann *et al.*, 2006).

Em áreas agrícolas de monocultura de milho, as densidades de esporos variaram entre 26 e 251 em 50 cm<sup>3</sup> de solo (Maia e Trufem 1990). Resultado semelhante foi encontrado neste estudo para a área de manejo de mandioca convencional (MC). De forma geral, a densidade de esporos encontrada neste estudo foi compatível com outros na região do semiárido (Maia *et al.*, 2010; Pagano *et al.*, 2013).

## **4.2 RELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES DO SOLO E OS FMA'S**

Apesar de coexistirem em condições antigas e adversas na natureza, os FMA's se desenvolvem em abundância e diversidade em determinadas condições ambientais. A manutenção da qualidade do solo e do rendimento das culturas depende do equilíbrio adequado entre matéria orgânica, organismos do solo e diversidade de plantas que são componentes essenciais de um ambiente de solo produtivo e ecologicamente equilibrado, cujo oferece melhores condições ao desenvolvimento dos FMA's (Hendrix *et al.*, 1990; Crouzet *et al.*, 2016).

Atributos do solo como umidade, granulometria e densidade tem sido estudado para compreender as possíveis relações edafológicas existentes (Silva *et al.*, 2008; Moreira *et al.*, 2019; Duan *et al.*, 2021; Oliveira *et al.*, 2022). Inclusive, sabe-se que plantas micorrizadas apresentam maior tolerância a seca, uma vez que possuem aumento da condutância estomática, maior taxa fotossintética, maior tempo de seca requerido para declínio do potencial hídrico da folha, menor tempo para recuperação do potencial hídrico após período de seca, bem como maior eficiência de uso da água pela planta (EMBRAPA, 2006).

### **4.2.1 Textura do solo**

As investigações acerca da textura sobre a esporulação e colonização de FMA's ou a diversidade de espécies não parece está clara. Apesar das características físico-químicas do solo serem importantes nem sempre irão indicar variações no comportamento dos fungos (EMBRAPA, 2004).

Por outro lado, a presença dos FMA's tem indicado melhorias em determinadas propriedades do solo, como foi observado pelo aumento significativo na estabilidade dos agregados estudando o efeito da inoculação micorrízica (Caravaca *et al.* 2006). Embora estudos realizados afirmem que as diferenças no número de esporos de FMA's podem ser explicadas parcialmente pela textura do solo (Carrenho *et al.*, 2007; Sieverding, 1991).

Solos arenosos parecem influenciar para uma menor densidade de propágulos de micorrizas arbusculares (Sieverding, 1991). Ao avaliar o número de esporos de fungos micorrízicos em diferentes condições de preservação de solos arenosos em ambiente de dunas na Espanha verificou-se que a maior abundância (n= 77) foram encontradas na duna bem preservada, sugerindo que a degradação ambiental reduz a diversidade e a quantidade desses fungos (Camprubí *et al.*, 2010). Solos arenosos cultivados com eucalipto, pinus e campo nativo apresentou o maior número de esporos de FMA's na área de pinus com 12 anos de idade. Os autores atribuíram o resultado a preferência de alguns fungos micorrízicos em colonizarem determinadas espécies de plantas (Silva *et al.*, 2008).

O solo e a vegetação são os principais influenciadores em escala local destes fungos, podendo afetar sua estrutura (Pagano *et al.*, 2011). Percebeu-se um melhor desempenho dos FMA'S em solos arenosos mais preservados e/ou compostos por determinados grupos vegetais (Silva *et al.*, 2008). Diferentemente da estrutura sabe-se que a textura do solo não sofre alteração com o manejo. De qualquer maneira, a prática regenerativa de solo na área de 10 anos (MR) com a adição de composto orgânico feito com uma mescla de barro (argila) pode ter influenciado a condição estrutural e conseqüentemente o desempenho dos FMA's, que apresentou forte correlação da riqueza com as propriedades areia e argila do solo.

Em solos arenosos, o uso de práticas agrícolas que reduzam o crescimento radicular e conseqüentemente o crescimento do micélio pode provocar a rápida degradação das hifas (Tisdall; Oades, 1982). A ação do micélio é importante para manter os macroagregados unidos, possibilitando assim sua imobilização e posterior ligação das partículas intermediada por componentes orgânicos (Read, 1989). As

hifas podem atingir no solo até 50 m por grama de agregado, contribuindo, assim, de modo significativo para a sua estabilização (Moreira; Siqueira, 2006).

Ao estudarem a colonização radicular no sorgo Carrenho *et al.* (2007) identificaram que foi significativamente reduzida em solo argiloso. Os autores atribuíram que solos argilosos são mais férteis naturalmente que os arenosos, com maior capacidade de troca catiônica, o que pode ter limitado, pela maior concentração de nutrientes, o desenvolvimento dos FMA's. De qualquer maneira, a fração argila desempenha um papel muito importante na ligação de enzimas do solo resultando na formação de húmus ou complexos argila-enzima oferecendo um meio eficaz para a atividade da microbiota e para proteção do solo (Arora *et al.*, 2021).

De forma geral, os efeitos produzidos pela textura do solo têm sido menos estudados, no entanto demonstram importância como fator regulador da ação dos FMA (Carrenho *et al.*, 2007). A espécie *Acaulospora mellea* que esteve presente no período úmido das diferentes áreas, apresentou forte correlação negativa com a areia.

#### **4.2.3 Fósforo (P)**

O fósforo (P) é um macronutriente essencial as plantas e desempenha um papel vital em seu crescimento. No entanto, sua deficiência nos solos brasileiros, especialmente para o feijão que é um cultivar muito comum no semiárido, é a principal limitação da fertilidade do solo (Velooso *et al.*, 2013).

Sabe-se que os FMA são conhecidos por sua capacidade em facilitar a absorção de nutrientes, especialmente o P, formando arbúsculos nas raízes, aumentando a superfície de absorção e solubilização do nutriente (Jeffries *et al.*, 2003). Estudos tem relatado o efeito da disponibilidade de P na comunidade de FMA (Cardoso; Kuyper, 2006; Qin *et al.*, 2017) e embora alguns relatem que altos teores de P disponíveis reduzam a colonização micorrízica (Liu *et al.*, 2016), outros associam que doses intermediárias podem gerar um efeito positivo (Moreira; Siqueira 2002).

Uma hipótese sugere que as plantas poderiam fornecer mais C para os FMA quando o P é limitado ao crescimento da planta, enquanto o aumento nos níveis de P poderia diminuir o fornecimento de carboidratos assimilados pelas plantas para os simbiontes micorrízicos (Liu *et al.*, 2012). As correlações com o P ocorreram apenas

para a área MR que apresentou um teor do nutriente na categoria ‘baixo’ de acordo com a classe de interpretação de fertilidade do solo (Ribeiro et al., 1999). Apesar dos espécimes *Acaulospora scrobiculata* e *Gigaspora sp* apresentarem ocorrência em todas as áreas de estudo, sua presença indicou correlação forte positiva e negativa respectivamente apenas com MR. Já *Cetraspora pellucida* indicou correlação forte positiva.

Os valores de P para as áreas de MC e CA foram “muito baixo”. Apesar disso, não é possível confirmar que a ausência de correlação do P com a composição nestas áreas se deu por esta razão, já que pode ter ocorrido influência de outras variáveis, sobretudo vegetação. Um estudo feito no semiárido mostrou que o teor de P está mais relacionado a hifas extra-radiculares (Pagano et al., 2013). Um teste para avaliar o impacto do manejo intensivo nos FMA identificou que o aumento da disponibilidade de P após a fertilização foi o principal fator que afetou a composição da comunidade de FMA (Qin et al., 2017).

#### **4.2.4 Matéria orgânica (MO) e H+Al (acidez potencial)**

A matéria orgânica é o componente que está mais diretamente relacionado com a qualidade do solo. Em virtude da sua sensibilidade as práticas de manejo, a variação no acúmulo da matéria orgânica do solo (MOS) pode ser usada como um indicador de qualidade (Machado, 2005).

Em solos arenosos mais frágeis este acúmulo é desafiador, já que a incorporação de C é inviabilizada por fatores físicos e químicos. Se for em condições semiáridas se torna ainda mais problemática. Contudo, mesmo em condições frágeis, em decorrência do manejo regenerativo que ocorre na área de MR com a adição do composto orgânico, foi possível verificar teor considerado “médio” para a MO. O mesmo resultado se deu na área de referência CA. Já MC indicou uma categoria “muito baixo” (Ribeiro et al., 1999).

A correlação de spearman foi forte positiva entre a MO e a riqueza de espécies para *Acaulospora mellea*, *Glomus clavisporum*, *Glomus sp* para a área de MR. Já a acidez potencial expressa por H + Al que tem relação com teor de argila e MO, tende a ser mais alta à medida que esses teores estiverem altos, possibilitando o aumento da resistência nas flutuações do pH em condições adversas do solo. Solos arenosos tendem a ter valores baixos de H + Al, já que se constituem em

solos com baixos teores de MO e argila. Para as áreas de MR e MC os teores de H+ Al foram considerados “muito baixo”, já para a CA foi classificado como “médio” (Ribeiro *et al.*, 1999). O teste de Spearman indicou correlação forte para as áreas de MR e CA.

### **4.3 VARIAÇÃO SAZONAL E PREDOMÍNIO DE ESPÉCIES EM ZONAS SEMIÁRIDAS**

Em geral as regiões semiáridas são pouco contempladas no estudo dos solos, menos ainda quando se trata da relação com fungos micorrízicos arbusculares (Pagano *et al.*, 2011). Alguns estudos revelam o potencial na representatividade dos grupos micorrízicos da Caatinga (Goto *et al.*, 2010). Os gêneros *Glomus* e *Gigaspora* são comumente associados às culturas da zona árida (Tarafdar; Rao, 1990) e em ambientes de dunas (Beena *et al.*, 2000). Dados de áreas semiáridas e áridas mostram que a riqueza varia de 3 a 50 espécies de FMA (Alguacil *et al.*, 2012; Carneiro *et al.*, 2012; Mergulhão *et al.*, 2010; Pagano *et al.*, 2013, Yang *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2014). Em uma região semiárida do norte de MG, Brasil verificou-se que as variações sazonais afetaram os FMAs, e a maior abundância ocorreu na estação seca (Pagano *et al.*, 2011), concluindo que a vegetação, as variações sazonais e o tipo de solo afetam a diversidade de FMAs, e que esta última é um fator chave para a similaridade/dissimilaridade das comunidades de FMAs entre áreas no semiárido brasileiro.

### **4.4. RELAÇÃO DA DIVERSIDADE DE PLANTAS COM OS FMA'S**

De acordo com o levantamento da cobertura agrícola vegetal nas áreas de manejo regenerativo (MR) com a ocorrência de 26 espécies, convencional (MC) com 8 espécies, bem como na vegetação nativa Caatinga com 23 espécies foi possível aplicar o teste de Spearman que indicou correlação entre a densidade de esporos e as espécies vegetais verificadas (Tabela 4).

Tabela 4 – Ocorrência de espécies vegetais presentes nas áreas de manejo regenerativo (MR), manejo convencional (MC) e Caatinga (CA) e a correlação de Spearman entre a densidade de esporos e as respectivas espécies na região do semiárido de Tucano, BA.

Família	Espécie	Nome popular	MR	MC	CA	Spearman
Solanaceae	<i>Streptosolen jamesonii</i>	Marianinha	x		x	
	<i>Jatropha mollissima</i>	Pinhão bravo	x		x	0,884
	<i>Croton campestris</i> A. St-Hill	Velandinho	x		x	
Euphorbiaceae	<i>Manihot esculenta</i>	Mandioca	x			
	<i>Jatropha urens</i>	Cansação	x			
	<i>Cnidoscolus phyeacanthus</i>	Favela			x	0,728
	<i>Croton heliotropiifolius</i>	Velame			x	0,825
	<i>Croton sonderianus</i>	Marmeleiro-do-mato				
Poaceae	<i>Panicum L</i>	C. Gripan	x			
	<i>Zea mays</i>	Milho	x			
	<i>Panicum maximum</i>	C. Massai				
	<i>Poaceae spp</i>	Capim nativo			x	
	<i>Brachiaria decumbens</i>	C. Brachiaria		x		
Portulacaceae	<i>Melinis minutiflora</i>	C. gordura		x		
	<i>Portulaca oleracea</i>	Beldroega	x		x	
	<i>Portulaca spp</i>	Rasteirinho		x		
	<i>Phacelia spp</i>	Erva escorpião	x			-0,743
Boraginaceae	<i>Cordia verbenacea</i>	Erva baleeira	x			
	<i>Euploca polyphylla</i> (Lehm.) J. I. Mello & Semir	Ervânco	x	x		
Malvaceae	<i>Malvaceae spp</i>	Malva	x		x	
	<i>Sida cordifolia</i> L	Malva Sebosa	x			
	<i>Sida linifolia</i>	Língua-de-galinha				
	<i>Althaea officinalis</i>	Malva branca				
Nyctaginaceae	<i>Ceiba glaziovii</i>	Barrigudinha	x			
	<i>Boerhavia</i>	Pega pinto	x			
	<i>Boerhavia diffusa</i>	Batata de porco	x		x	
Urticaceae	<i>Urtica dioica</i>	Urtiga	x		x	
Talinaceae	<i>Elephantopus Scaber</i>	Língua de vaca	x			
	<i>Leucaena leucocephala</i>	Leucena	x			
	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	Sabiá	x			
Fabaceae	<i>Prosopis juliflora</i>	Algaroba	x			
	<i>Gliricidia sepium</i>	Gliricidia	x			
	<i>Piptadenia stipulacea</i>	Jurema Branca			x	
	<i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tui	Caatingueiro			x	

	<i>Cenostigma pyramidale</i>	Pau de rato		x	0,733
	<i>Bauhinia forficata</i>	Pata de vaca		x	0,728
	<i>Mimosa hostilis</i>	Jurema Preta		x	
	<i>Arachis Pintoi</i>	Amendoim amarelo			
	<i>Euphorbia heterophylla</i>	Amendoim bravo	x	x	
<b>Asteraceae</b>	<i>Sonchus oleraceus</i>	Serralha	x		
<b>Amaranthaceae</b>	<i>Amaranthus spp.</i>	Bredo			
<b>Areaceae</b>	<i>Cocos nucifera</i>	Coqueiro	x		
<b>Areaceae</b>	<i>Syagrus coronata</i>	Licuri			x
<b>Asphodelaceae</b>	<i>Aloe vera</i>	Babosa			
<b>Crassulaceae</b>	<i>Kalanchoe pinnata</i>	Kalanchoe	x		
	<i>Tacinga palmadora</i>	Palmatória			x
<b>Cactaceae</b>	<i>Pilosocereus gounellei</i>	Xique-xique			x
	<i>Opuntia sp</i>	Palma			
	<i>Pilosocereus pachycladus</i>	Facheiro			x
<b>Rubiaceae</b>	<i>Spermacoce verticillata</i>	Vassourinha			
	<i>Uncaria tomentosa</i>	Unha de gato			x
<b>Cyperaceae</b>	<i>Cyperus rotundus</i>	Tiririca			
<b>Capparaceae</b>	<i>Capparis hastata</i>	Feijão bravo			x
<b>Sapindaceae</b>	<i>Mimosa caesalpiniiifolia</i>	Sabão de pobre		x	x
<b>Convolvulaceae</b>	<i>Ipomoea nil</i>	Florzinha azul			x
	<i>Curcubita sp</i>	Abóbora			
<b>Cucurbitaceae</b>	<i>Citrullus lanatus</i>	Melancia		x	
	<i>Plectranthus barbatus</i>	Boldo			
	<i>Marsypianthes chamaedrys</i>	Batônica			
<b>Lamiaceae</b>	<i>Plectranthus amboinicus</i>	Malvarisca		x	

Fonte: Elaborado pela autora

Das 24 famílias encontradas, 4 delas indicaram correlação das espécies (6) com a densidade de esporos, sendo a maioria de associação positiva (Tabela 6).

A espécie *Jatropha molíssima* (Pohl) Baill conhecida popularmente como pinhão-bravo é endêmica do bioma Caatinga, sendo importante na alimentação das abelhas e na polinização. No período chuvoso, a espécie apresentou fases fenológicas de crescimento vegetativo cronologicamente distinta tendo maior crescimento em altura, comparada a outras espécies do mesmo gênero (Queiroz *et al.*, 2013). Embora, não tenha sido encontrado estudos que relacionem a associação

micorrízica com a espécie *Jatropha molíssima*, há pesquisas que investigaram a espécie *Jatropha curcas*, demonstrando que a ocorrência de FMA na rizosfera viabiliza melhores condições de desenvolvimento e menor mortalidade (Morais, *et al.*, 2008; Barros, 2018). Logo, o resultado de correlação positiva significativa para as áreas de MR e CA da espécie *Jatropha molíssima* em relação a densidade de esporos pode ser embasada nestes estudos. As demais correlações positivas ocorreram para a área exclusiva da CA, com espécies vegetais de ocorrência no bioma, sendo uma delas a espécie endêmica leguminosa *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon e G.P.Lewis.

Houve uma correlação negativa para a área de MR vinculada a presença de *Phacelia spp.* A erva escorpião (nome popular) são herbáceas nativas do continente americano, sendo originada de regiões áridas com alta tolerância a seca. Plantas de algumas famílias como as Boraginaceae, a qual insere-se a *Phacelia spp.*, não parecem formar associações micorrízicas arbusculares eficientes (Harley; Harley, 1987).

A correlação das espécies vegetais com o nº de espécies de FMA mostrou pelo teste de Spearman correlação negativa significativa (-0,68) com a leguminosa *Leucaena leucocephala*. Um estudo para avaliar a ocorrência de FMA em *Leucaena leucocephala* e em Sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia Benth*) mostrou que nas áreas de plantio com leucena a colonização micorrízica foi inferior a 15%. Os autores atribuíram que fatores relacionados à fertilidade do solo atuam na colonização micorrízica de indivíduos e não necessariamente esteja vinculada as características da espécie vegetal (Silva *et al.*, 2007). Não houve correlação significativa para a área de MC.

Abordagens agroecológicas possibilitam a integração da biodiversidade vegetal e animal, o que potencializa interações e sinergismos complexos, otimizando funções e processos ecossistêmicos, como regulação biótica de organismos nocivos, ciclagem de nutrientes e acúmulo de biomassa, permitindo assim que os agroecossistemas gerencie seu próprio funcionamento (Altieri, 1999). O resultado do design agroecológico é a melhoria da sustentabilidade econômica e ecológica do agroecossistema, com sistemas de manejo que dialogam com a biodiversidade disponível localmente e com as condições ambientais (Altieri, 1995).

Embora os FMA desempenhem um papel importante na manutenção da biodiversidade vegetal (Haselwandter; Bowen, 1996; Barea *et al.*, 2011) e da

fertilidade do solo (Guo *et al.*, 2016), eles permanecem pouco conhecidos em regiões semiáridas (Martínez-García *et al.*, 2011). Sistemas de monocultura de café apresentaram maiores densidades de esporos nas camadas superiores do solo e menores densidades de esporos nas camadas mais profundas do solo em comparação com os sistemas agroflorestais de café. Isso parece ter relação com a maior abundância de raízes nas camadas mais profundas do solo no sistema agroflorestal de café, o que pode permitir que esses sistemas mantenham uma maior abundância de esporos de fungos de micorrizas arbusculares nas camadas mais profundas do solo Cardoso *et al.* (2003).

Por outro lado, uma maior densidade de esporos foi detectada em agroflorestas do semiárido indiano quando comparados a locais não cultivados (Tarafdar *et al.*, 1990). As comunidades de FMA na rizosfera de diferentes espécies arbustivas podem ser influenciadas principalmente pelo teor de nutrientes do solo (Martínez-García *et al.*, 2011), sendo necessária uma compreensão mais precisa dos fatores que afetam a abundância e a diversidade dos FMAs para entender melhor a contribuição dos FMAs para a conservação das plantas nesses ecossistemas frágeis. As preferências das plantas hospedeiras ajudam a prever os efeitos indiretos nos ecossistemas quando as comunidades de plantas mudam (Mohammad *et al.*, 2024). Características da superfície radicular, além da estrutura anatômica das raízes, também podem influenciar os estágios iniciais da interação planta-fungo (Brundrett; Kendrick, 1990), bem como as adições orgânicas que aumentam o nível geral de atividade microbiana e quanto mais micróbios estiverem ativos, maiores são as atividades biológicas (Fry, 1982). Um estudo no semiárido mostrou que a diversidade de FMA foi representada nos tipos de vegetação arbórea, sendo a Gigasporales aquela que teve ampla distribuição e adaptação ecológica (Pagano *et al.*, 2013).

## 5 CONCLUSÃO

Foi possível constatar que as condições atreladas ao manejo de solos arenosos no semiárido vinculadas as propriedades do solo e a cobertura vegetal influenciou na resposta dos FMA's. A textura, P e MO foram as variáveis que influenciaram na riqueza de espécies, sendo que na área de MC houve apenas a influência da textura. Em contrapartida a área de MR teve para o P e a MO forte

influência. Isso possibilita interpretar que o manejo regenerativo em solos arenosos tende a influenciar na diversidade de espécies no agroecossistema, especialmente pela condição da fertilidade do solo. Essa abordagem também pode ser aplicada a distribuição das espécies, já que MR e a CA apresentaram uma similaridade em sua estrutura mesmo em períodos distintos (seco e úmido), indicando que apesar das mudanças edafoclimáticas, as condições do meio podem ser mais favoráveis para que essa distribuição ocorra sem afetar drasticamente a estrutura das espécies. A densidade de esporos foi maior para MR no período seco, o que pode estar atrelado aos diferentes efeitos dos estágios fenológicos das plantas consorciadas em policultivo, associada as condições do solo. A relação dos FMA's com a diversidade de espécies vegetais, mostrou que as práticas de manejo regenerativa de base agroecológica com o aumento na abundância de espécies vegetais, possibilitou maiores correlações entre as associações micorrízicas. Ressalta-se a importância da realização de futuros estudos que aplique o método de quantificação da colonização de raízes, bem como uma análise molecular da diversidade.

## REFERÊNCIAS

- ABBOTT, L.K.; ROBSON, A. D. Factors influencing the occurrence of vesicular arbuscular mycorrhizas *Agric. Ecosyst. Environ.*, 35 pp. 121-150. 1991.
- ALGUACIL, M.M. *et al.* Torres Perennial plant species from semiarid gypsum soils support higher AMF diversity in roots than the annual *Bromus Rubens*. *Soil Biol. Biochem.*, v. 49, pp. 132-138, 2012.
- ALI, A., *et al.* Different cropping systems regulate the metabolic capabilities and potential ecological functions altered by soil microbiome structure in the plastic shed mono-cropped cucumber rhizosphere. *Agric. Ecosyst. Environ.* v.318, p.107-486. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107486>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- ALTIERI, M. A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v. 74, p. 19–31, 1999.
- ANDERSON, M.J. Non-Parametric MANOVA. *Austral Ecol.* P. 32–46. 2001.
- ARMENTA, C. A. D. *et al.* Variación en el estatus micorrízico de leguminosas del Desierto Sonorense. *Rev. Cienc. Biol. Salud.* v.18, p. 52-58. 2016.
- ARORA, Raavi *et al.* Temporal changes in soil biochemical properties with seasons under rainfed land use systems in Shiwalik foothills of northwest India. *Agroforest Syst.* v. 95, p.1479–1491, 2021.

- AUGÉ, R.M. Water relations, drought, and vesicular-arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Mycorrhiza*, v. 11, pp. 3-42. 2001.
- BACH, E.M.; WALL, D.H. *Trends in Global Biodiversity: Soil Biota and Processes. In.: The Encyclopedia of the Anthropocene.* DellaSala Dominick, A., Goldstein Michael, I., Eds.; Elsevier: Oxford, UK, v. 3, pp. 125–130. 2018.
- BARROS, J. M. T. de M. Fungos micorrízicos em mudas de *Jatropha curcas* L. submetidas a estresse hídrico. Universidade Federal de Alagoas. Dissertação ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia. 2018.
- BASU, S.; RABARA, R.C.; NEGI, S. AMF: The future prospect for sustainable agriculture. *Physiol. Mol. Plant Pathol.*, v. 102, 36–45. 2018.
- BEENA, K. R.; RAVIRAJA N. S., SRIDHAR, K. R. 2000a. Seasonal variations of arbuscular mycorrhizal fungal association with *Ipomoea pes-caprae* of coastal sand dunes, Southern India. *J. Environ. Biol.*, v. 21, p. 341-347.
- BIRHANE, E.; KUYPER, T.W.; STERK, F.J. Bongers Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of Northern Ethiopia *Forest Ecol. Manage.*, v. 260, pp. 2160-2169, 2010.
- BIRHANE, E. *et al.* Arbuscular mycorrhizal associations in *Boswellia papyrifera* (frankincense-tree) dominated dry deciduous woodlands of Northern Ethiopia. *Forest Ecology and Management*, v. 260, p. 2160–2169, 2010.
- BROWER, J. E.; ZAR, J.H. Field and laboratory methods for general ecology. 2.ed. Dubuque: Wm. C. Brown Company Publishers, v. 226, p. 1984.
- BRUNDRETT, M.; KENDRICK, B. The roots and mycorrhizas of herbaceous woodland plants. II. Structural aspects of morphology. *New Phytologist*, v.114, p.469-479. 1990.
- BRUNDRETT, M.C.; TEDERSOO, L. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytol.* v.220, p. 1108–1115. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/nph.14976>. Acesso em: 20 jan. 2024.
- CAMPRUBÍ, A. *et al.* Estación V Arbuscular mycorrhizal fungi associated with psammophilic vegetation in Mediterranean coastal sand dunes. *Spanish Journal of Agricultural Research*. v.8p. 96-102. 2010.
- CARAVACA, F. *et al.* Formation of stable aggregate in rhizosphere soil of *Juniperus oxycedrus*: Effect of AM fungi and organic amendments. *Applied Soil Ecology*, v. 33, p. 30-81, 2006.
- CARDOSO, I. M.; KUYPER, T. W. Mycorrhizas and tropical soil fertility. *Agriculture*,
- CARDOSO, I.M. *et al.* Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agroforest Syst.*, v. 58 pp. 33-43. 2003.
- CARNEIRO, R.F.V. *et al.* Fungos micorrízicos arbusculares como indicadores da recuperação de áreas degradadas no Nordeste do Brasil, *Rev. Cienc. Agron.*, v. 43, pp. 648-657, 2012.
- CARRENHO, R. *et al.* The effect of different soil properties on arbuscular mycorrhizal colonization of peanuts, sorghum and maize. *Acta Botanica Brasilica*, v. 21, n. 3, p723-730. 2007.

- Communities along an Anthropogenic Nitrogen Deposition Gradient. *Ecological*
- CROUZET, O. *et al.* Functional and structural responses of soil N-cycling microbial communities to the herbicide mesotrione: a dose-effect microcosm approach. *Environ Sci Pollut R*, v. 23, p.1–11, 2016.
- DANTAS, B. L. Diversidade de fungos micorrízicos arbusculares em pomar orgânico no semiárido cearense. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.45, n.8, p.1480-1486, 2015.
- DUAN, H. X. Improvement of wheat productivity and soil quality by arbuscular mycorrhizal fungi is density- and moisture-dependent. *Agronomy for Sustainable development*. v. 41, n. 3. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00659-8>. Acesso em: 02 out. 2023.
- Ecosystems and Environment*, v. 116, p. 72-84, 2006.
- EGERTON-WARBURTON, L. M.; ALLEN, E. B. Shifts in Arbuscular Mycorrhizal
- EMBRAPA ALGODÃO. *Para Entender Micorrizas Arbusculares*, por Lúcia Vieira Hoffmann e Valeska Silva Lucena. Campina Grande, 2006. 22p. (Embrapa Algodão. Documentos, 156).
- EMBRAPA. *Fungos micorrízicos arbusculares em áreas de agricultores familiares da comunidade*, Água Boa, MG, v. 2, 2010.
- EMBRAPA. *Micorriza arbuscular: um bioindicador da fertilidade dos solos e da distribuição de arvores no bioma Cerrado/ Planaltina, DF*. Embrapa: Cerrados, 2004.
- field succession. *Oecologia*, v. 86, n. 3, p. 349–358, 1991.
- FRY, W.E., 1982. *Principles of Plant Disease Management*. Academic Press: New York, 378 pp.
- GLIESSMAN, S.R. Sustainable agriculture: an agroecological perspective. *Advances in Plant Pathology*, v.11, 1995, pp. 45-57.
- GOTO, B. T. *et al.* Checklist of the arbuscular mycorrhizal fungi (Glomeromycota)
- GUADARRAMA, P.; ALVAREZ-SANCHEZ, F.J. Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores in different environments in a tropical rain forest, Veracruz, Mexico, *Mycorrhiza*, v. 8, pp. 267-270. 1999.
- GUADARRAMA, P.; ALVAREZ-SANCHEZ, F.J. Abundance of arbuscular mycorrhizal fungi spores in different environments in a tropical rain forest, Veracruz, Mexico *Mycorrhiza*, v.8, pp. 267-270. 1999.
- HAMMER, O.; HARPER, D.A.T.; RYAN, P.D. PAST : Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Even a cursory glance at the recent paleontological literature should convince anyone tha. *Palaeontol. Electron*. V. 4, p.1–9. 2001.
- HARLEY, J. L., HARLEY, E. L. A check-list of mycorrhiza in the British flora. *New*
- HARRIER, L.A. The arbuscular mycorrhizal symbiosis: a molecular review of the fungal dimension. *Oxford University Press*, v. 52; Issue: suppl. 2001.

- HASELWANDTER, K; BOWEN G. D. Mycorrhizal relations in trees for agroforestry and land rehabilitation, *Forest Ecology and Management*, v. 81, Issues 1–3, 1996.
- HAWKINS, H.J.; JOHANSEN, A.; GEORGE, E. Uptake and transport of organic and inorganic nitrogen by arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Soil*. 226, 275–285. 2000.
- HENDRIX, P.F. *et al.* 1990. Soil biota as components of sustainable agroecosystems. In: Edwards, C.A., Lal, Rattan, Madden, Patrick, Miller, Robert H., House, Gar (Eds.), *Sustainable Agricultural Systems. Soil and Water Conservation Society*, IA, pp. 637–654.
- in the Brazilian semiarid. *Mycotaxon*, n. October, p. 251–254, 2010.
- JEFFRIES, P. *et al.* The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. *Biology and Fertility of Soils*, v. 37, n. 1, p. 1-16, 2003.
- Jl, B. *et al.* Patterns of diversity and adaptation in Glomeromycota from three prairie grasslands. *Molecular Ecology*, v. 22, 9, pp. 2573-2587. 2013. Cited 46 times.doi: 10.1111/mec.12268
- JOHNSON, N. C. *et al.* Dynamics of vesicular-arbuscular mycorrhizae during old
- KOHLER, J. *et al.* Elevated CO<sub>2</sub> increases the effect of an arbuscular mycorrhizal fungus and a plant-growth-promoting rhizobacterium on structural stability of a semiarid agricultural soil under drought conditions. *Soil Biol Biochem*, v. 41, p.1710–1716, 2009.
- Lavras: UFLA, 2006. 729p.
- LEKSONO, A. S. O efeito dos sistemas de agricultura orgânica na diversidade de espécies. *AIP. Conf. Proc.*1908:030001. 2017.
- LIU, W. *at al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in soil and roots respond differently to phosphorus inputs in an intensively managed calcareous agricultural soil. *Scientific Report*, v.6, p.1-11, 2016. DOI: 10.1038/srep24902.
- LIU, W. *at al.* Arbuscular mycorrhizal fungi in soil and roots respond differently to phosphorus inputs in an intensively managed calcareous agricultural soil. *Scientific Report*, v.6, p.1-11, 2016. DOI: 10.1038/srep24902.
- LIU, Y. *et al.* Direct and indirect influences of 8 yr of nitrogen and phosphorus fertilization on Glomeromycota in an alpine meadow ecosystem. *New Phytol.* v. 194, p. 523–535. 2012.
- MACHADO, P.O.L.A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Química Nova*, v.28, n.2, p.329-334, 2005.
- MAIA, L. C.; TRUFEM, S. F. B. Fungos micorrizicos vesiculo - arbusculares em solos cultivados no estado do Pernambuco, Brasil. *Rev Bras Bot*, v.13, p.89–95. 1990.
- MAIA, L.C. *et al.* *Goto Fungos micorrizicos arbusculares no bioma Caatinga*. In.: J.O. Siqueira, F.A. de Souza, E.J.B.N. Cardoso, S.M. Tsai (Eds.), *Micorrizas 30 anos de pesquisa no Brasil*, UFLA, Lavras, pp. 311-339. 2010.

- MARINHO, F. High diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in natural and anthropized sites of a Brazilian tropical dry forest (Caatinga). *Fungal Ecology*, v. 40, p.82-91. 2019.
- MARSCHNER, H.; Dell, B. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. In Management of Mycorrhizas in Agriculture, Horticulture and Forestry; Robson, A.D., Abott, L.K., MALACCJUK, N. Plant Soil, Kluwer Academic Publishers: Amsterdam, *The Netherlands*, 1994; v. 159, pp. 89–102.
- MERGULHÃO, A.C.E.S. *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in a gypsum mining impacted semiarid área. *Acta Bot. Bras.*, v. 24, pp. 1052-1061, 2010.
- MESSIAS, F. de Queiroz *et al.* Crescimento e fenologia de espécies de *Jatropha* durante a estação chuvosa. Manejo de Solo, Água e Planta, *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* v.17, n. 4, 2013.
- Monographs*, v. 10, n. 2, p. 484–496, 2000.
- MORAIS, T. OLIVEIRA, Fungos micorrízicos arbusculares na rizosfera de pinhão manso (*Jatropha Curcas* L.) NO SEMI-ÁRIDO BAIANO. *Anais... XI Encontro Nacional de Microbiologia Ambiental*, 2008.
- MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e Bioquímica do solo*. 2. ed.
- MOREIRA, F.M.S; SIQUEIRA, J.O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: UFLA, 2002. 626p.
- MOREIRA-SOUZA, M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. *Ktze Mycorrhiza*, v.13, pp. 211-215. 2003.
- MOREIRA-SOUZA, M. *et al.* Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. *Ktze Mycorrhiza*, v.13, pp. 211-215. 2003.
- MORTON, J.B.; BENTIVENGA S.P.; BEVER J.D. Discovery, measurement and interpretation of diversity in arbuscular endomycorrhizal fungi. Glomales, Zygomycetes. *Can J Bot*, v. 73, pp. S25-S32. 1995.
- MOUKARZEL, Romy; E. Jones. Eirian, Preeti Panda, Justine Larrouy, John V Ramana, Alexis Guerin-Laguette, Hayley J Ridgway, Vineyard management systems influence arbuscular mycorrhizal fungi recruitment by grapevine rootstocks in New Zealand. *Journal of Applied Microbiology*, v. 135, n. 8, August 2024, lxae211.
- OKSANEN, A.J. *et al.* *Encycl. Food Agric. Ethics*. p. 2395–2396. 2019. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-94-024-1179-9\\_301576](https://doi.org/10.1007/978-94-024-1179-9_301576). Acesso em: 24 abr. 2024.
- ONG, C. *et al.* *Water Use of Agroforestry Systems in Semi-Arid India* John Wiley and Sons. Inc.: New York, NY (United States),1992.
- PAGANO, M. C.; R. B. ZANDAVALLI, F. S. Araújo Biodiversity of arbuscular mycorrhizas in three vegetational types from the semiarid of Ceará State Brazil. *Appl. Soil Ecol.*, v. 67, pp. 37-46, 2013.
- PANDE, MANISH; TARAFDAR, J.C. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity in neem-based agroforestry systems in Rajasthan, *Applied Soil Ecology*, v. 26, n. 3, 2004.

- PEREIRA, S. *et al.* Intense mycorrhizal root colonization in a human modified landscape of the Caatinga dry forest. *Forest Ecology and Management*, v. 462, p.117-970, 2020.
- Phytologist*, Cambridge, v.105, p.1-112. 1987.
- PONTES, J.S., OEHL, F. *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in Brazil's. *Caatinga and experimental agroecosystems. Biotropica*, v. 49, p. 413-427. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/btp.12436>. Acesso em: 25 jun. 2024.
- PRATES JÚNIOR, Paulo *et al.* Agroecological coffee management increases arbuscular mycorrhizal fungi diversity. *Open Access*, v. 14, n. 1, January, 2019.
- QIN, H. Intensive management decreases soil aggregation and changes the abundance and community compositions of arbuscular mycorrhizal fungi in Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) forests. *Forest Ecology and Management*, v. 400, p. 246-255, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.06.003>.
- READ, D. J. Mycorrhizas and nutrient cycling in sand dune ecosystems. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, p. 89-110, 1989.
- RUDOLPH, S.; MACIÁ-VICENTE, J. G.; LOTZ-WINTER, H. Temporal variation of fungal diversity in a mosaic landscape in Germany. *Studies in Mycology Open Access*. v. 89, p. 95 -104, 2018.
- SIEVERDING, E. *Vesicular-arbuscular mycorrhiza management in tropical agrosystems*. Eschborn: GTZ. 1991.
- SILVA, Iolanda Ramalho da *et al.* Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi along an environmental gradient in the Brazilian semiarid, *Applied Soil Ecology*, v. 84, 2014.
- SILVA, Luciana Xavier da *et al.* Fungos micorrízicos arbusculares em áreas de plantio de leucena e sábia no estado de Pernambuco. *Rev. Árvore*, v. 31, n.3, 2007.
- SILVA, Rodrigo Ferreira da *et al.* Comunidade de fungos micorrízicos arbusculares em solo cultivado com eucalipto, pinus e campo nativo em solo arenoso, São Francisco de Assis, RS. *Ciênc. Florest.* v. 18, n. 3, 2008.
- SMITH, S.E.; READ, D.J. *Mycorrhizal Symbiosis*. 3rd Edition, Elsevier Academic Press, Amsterdam, 787. 2008;
- SOUSA, N, M, F de. *Diversidade e distribuição potencial de fungos micorrízicos arbusculares na região semiárida do Brasil*. Tese do Programa de Pós-Graduação em Ciências Biológicas, Recife, Pernambuco. 2018.
- STUKENBROCK, E.H.; ROSENDAHL, S. Distribution of dominant arbuscular mycorrhizal fungi among five plant species in undisturbed vegetation of a coastal grassland (Open Access) *Mycorrhiza*, v.15, n. 7, pp. 497-503. Cited 43 times. 2005. doi: 10.1007/s00572-005-0357-2.
- TARAFDAR, J.C.; RAO, A.V., 1990. Levantamento de espécies de árvores da zona árida indiana para a ocorrência de infecção por VAM. In: *Anais... da Conferência Nacional sobre Micorrizas*. HAU, pp. 47-49.
- TEDERSOO, L. *et al.* Regional-Scale In-Depth Analysis of Soil Fungal Diversity Reveals Strong pH and Plant Species Effects in Northern Europe. *Front. Microbiol.* v. 11, p. 1-31. 2020.

- TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v. 33, p. 141-163, 1982.
- TREJO, D.; BAROIS I. Sangabriel-Conde W. Disturbance and land use effect on functional diversity of the arbuscular mycorrhizal fungi. *Agrofor Syst*, v. 90, p.265–279, 2016.
- TURBÉ, A. *et al.* *Soil Biodiversity: Functions, Threats and Tools for Policy Makers*. Report for European Commission, D G Environment. 2010. Disponível em: [https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/biodiversity\\_report.pdf](https://ec.europa.eu/environment/archives/soil/pdf/biodiversity_report.pdf). Acesso em: 8 jun. 2024.
- UHLMANN, E.; GÖRKE, C.; PETERSEN, A. F. Oberwinkler Arbuscular mycorrhizae from arid parts of Namibia. *J. Arid Environ.*, v. 64, pp. 221-237, 2006.
- UHLMANN, E.; GÖRKE, C.; PETERSEN, A. F. Oberwinkler Arbuscular mycorrhizae from arid parts of Namibia. *J. Arid Environ.*, v. 64, pp. 221-237, 2006.
- VELOSO, C. A. C., *et al.* Produção de grão pelo feijão-caupi em função da aplicação de calcário em latossolo amarelo do Nordeste Paraense. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 34., 2013, Florianópolis. *Anais...* Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013
- WEZEL, A.; SOLDAT, V. A quantitative and qualitative historical analysis of the scientific discipline of agroecology *International Journal of Agricultural Sustainability*. v.7, n.1, pp. 3-18. 2009. Disponível em: [168times.http://www.earthscanjournals.com/ijas/007/0003/0070003.pdf](http://www.earthscanjournals.com/ijas/007/0003/0070003.pdf) doi: 10.3763/ijas.2009.0400. Acesso em: 25 jun. 2024.
- WILLIAMS, C., MCNAMARA, J.; CHANDLER, D. Controls on the temporal and spatial variability of soil moisture in a mountainous landscape: the signature of snow and complex terrain *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 13, n.7, pp. 1325-1336, 2009).
- XINRONG, Li; MINGZHU, He; RONGLIANG, Jia. The Response of Desert Plant Species Diversity to the Changes in Soil Water Content in the Middle-lower Reaches of the Heihe River[J]. *Advances in Earth Science*, v. 23n. 7, p. 685-691, 2008.
- YANG, C. *et al.* Diversity and functionality of arbuscular mycorrhizal fungi in three plant communities in semiarid grasslands national park, Canada. *Microb. Ecol.*, v. 59, pp. 724-733, 2010.
- YONGKUN, Zhang; XIAO, Qingli; HUANG, Mingbin. Temporal stability analysis identifies soil water relations under different land use types in an oasis agroforestry ecosystem, *Geoderma*, v. 271, 2016.

### **Capítulo III: ESPECTRORRADIOMETRIA DE SOLOS ARENOSOS NA PERSPECTIVA DA AGRICULTURA REGENERATIVA NO BIOMA CAATINGA**

#### **RESUMO**

A agricultura regenerativa visa a melhoria da saúde do solo e a segurança da saúde alimentar global. No contexto do semiárido, o uso de práticas regenerativas em solos arenosos pode ser uma eficiente maneira para a recuperação de ambientes com baixa fertilidade natural e susceptíveis a processos de erosão e degradação. Diante deste exposto, o objetivo deste estudo foi avaliar a capacidade de discriminação da resposta espectral de solos na avaliação de diferentes sistemas de manejo regenerativo no semiárido. Amostras de solo foram coletadas e submetidas a varredura em um espectrorradiômetro entre 350 a 2500 nm (NIRS), sendo obtidas as assinaturas espectrais. No intuito de melhor compreender os resultados espectrais, foram realizadas análises químicas e físicas para avaliação do efeito do manejo regenerativo sobre a qualidade do solo. Os resultados indicaram maior intensidade em 1.900 nm de uma feição típica de absorção do argilomineral ilita nas áreas de manejo regenerativo de 10 anos (MR10) e na área de referência Caatinga (CAAT). Nos comprimentos 1.400 e 2.200 nm verificaram-se fortes bandas típicas de reflectância da caulinita na área do cultivo de milho convencional, o qual apresentou maior reflectância. O indicativo da presença de matéria orgânica viabilizou uma menor reflectância ao longo do espectro nas áreas de manejo regenerativo, especialmente em MR10 e policultivo (POL). Através da correlação negativa o teste de Pearson reforçou este resultado com as frações MOP, MOL e MAM. A área MR10 apresentou melhores condições no incremento de MOS a partir da agricultura regenerativa, o que favoreceu a uma resposta espectral mais próxima da CAAT. Os espectros obtidos foram capazes de diferenciar os tratamentos, e o manejo regenerativo demonstrou ser uma das formas de se melhorar a qualidade do solo, podendo ser áreas-alvos no estudo de viabilidade de análises espectrais.

Palavras-chave: Indicadores de qualidade. Agroecologia. Sensores remotos. Análise espectral.

## 1 INTRODUÇÃO

A saúde do solo e as relações ecológicas dependem das práticas de manejo exercidas nos agroecossistemas. Quando alinhadas a uma agricultura regenerativa, tais práticas passam a promover melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo. A agricultura regenerativa vem sendo amplamente discutida como estratégia de mitigação das mudanças climáticas e possibilidade de aumento dos estoques de carbono orgânico do solo, e consequente sequestro de CO<sup>2</sup> (White, 2020; Newton *et al.*, 2020; Giller *et al.*, 2021).

O termo “agricultura regenerativa” foi utilizado inicialmente por Robert Rodale, no início da década de 1980, para descrever uma abordagem holística da agricultura que incentiva a inovação contínua e a melhoria das medidas ambientais, sociais e econômicas. Neste contexto, a saúde do solo se enquadra como prioridade, estando intrinsecamente ligada à segurança da saúde alimentar global (Rodale Institute, 2022). Possivelmente a melhor definição para a agricultura regenerativa é a que inclui a conservação do solo como ponto de entrada para se regenerar e contribuir para as múltiplas funções ecossistêmicas do solo, sejam elas de regulação e apoio e que tragam melhorias não apenas ao meio ambiente, bem como as dimensões socioeconômicas da produção sustentável de alimentos (Schreefel *et al.*, 2020).

Um estudo de cenários para os próximos 30 anos dos países que formam a Grã-Bretanha, indicou que, para se cumprir uma meta internacional de emissão líquida zero de gases do efeito estufa (GEEs), seria necessário reduzir 6,48 milhões de toneladas de CO<sup>2</sup> equivalente por ano, o que poderia ser conseguido com a prática das plantas de cobertura em terras agrícolas (Jordon *et al.*, 2022). Este estudo considera o uso de lavouras de cobertura e da rotação de culturas como práticas da agricultura regenerativa, sendo ambas com potencial para aumentar os estoques de carbono em 30 anos, e ainda capazes de mitigar até um quarto das emissões agrícolas de GEEs. Neste sentido, a dinâmica e a qualidade do carbono orgânico do solo revelam a importância de um manejo que seja capaz de favorecer a saúde do solo, sendo, portanto, um importante indicador de qualidade do solo e de sustentabilidade de agroecossistema (Reeves, 1997).

Em uma região do semiárido o desafio de implementar e conduzir práticas mais sustentáveis é ainda maior, visto que a umidade e o aporte de material orgânico são comprometidos em virtude das condições climáticas. Quando se trata

da qualidade física dos solos desses ambientes, formados em sua maioria por solos arenosos, a dificuldade é gigantesca, uma vez que a formação da estrutura - ponto chave na avaliação da saúde do solo, é dificultada pela pequena presença de materiais mais finos.

A agregação em solos arenosos é quase inteiramente dependente de processos biológicos (Brady; Weil, 2013). Neste caso, a presença, manutenção e estabilidade da matéria orgânica no sistema é fundamental, sendo o principal agente responsável pela formação e estabilidade dos agregados (Brady; Weil, 2013). No entanto, quando o manejo de solos arenosos ocorre sob condições de déficit hídrico, a biomassa proveniente do aporte orgânico é muito reduzida pela menor produção primária.

Neste cenário, torna-se importante investir em técnicas de manejo que favoreçam a incorporação de carbono no solo. Entretanto, pelos baixos teores nos solos comentados, a sensibilidade de discriminação de manejos pode ser uma dificuldade. Somado a isto, a própria análise de carbono ou requer equipamento de alto custo, como os analisadores elementares, ou depende do uso de reagentes químicos perigosos e com geração importante de resíduos. Neste sentido, o uso de técnicas de sensoriamento remoto pode ser uma alternativa interessante, por oferecer uma resposta rápida, de baixo custo e de procedimento não destrutivo. Neste contexto, o uso da espectrorradiometria de reflectância, técnica que faz uso de instrumentos radiométricos de laboratório para medir a radiação eletromagnética refletida pelos materiais terrestres, pode ser uma alternativa que merece maior refinamento. Nos últimos anos, tem aumentado o número de pesquisas em solos que empregam a tecnologia para espectroscopia de reflectância visível (V) e infravermelho (NIR) (Ahamadi *et al.*, 2021) Isso pode ser devido a possibilidade em avaliar várias propriedades de uma amostra a partir de uma única leitura espectral, identificando características do solo de forma rápida e custo-efetivo (RIBEIRO *et al.*, 2021) e, sendo inclusive considerada por alguns autores uma poderosa alternativa à análise química convencional (Corfoti *et al.*, 2018; Demattê *et al.*, 2019). Isso sugere que a espectroscopia V-NIR do solo está ganhando mais atenção e confiança na comunidade científica. Neste procedimento, a leitura é registrada e transmitida na forma de gráficos denominados de *curva de reflectância espectral* (Meneses; Almeida; Baptista, 2019), que se configura como uma identidade digital do material

analisado, e que pode auxiliar na caracterização e identificação dos seus constituintes e de outras propriedades derivadas.

A técnica sensorial comentada é não imageadora, e possibilita a medição contínua da reflectância do material (Meneses; Almeida; Baptista, 2019). Ainda que o solo possa apresentar grande variabilidade de constituintes - exigindo técnicas tradicionais complexas para sua caracterização, a espectrorradiometria mostra-se como uma ferramenta complementar que pode fornecer informações importantes acerca da química, física e mineralogia. Os fatores que determinam o comportamento espectral dos solos incluem aspectos físicos (cor, textura umidade), químicos (nutrientes), biológicos (enzimas, matéria orgânica) e mineralógicos (óxidos de ferro. etc) (Epiphanyo *et al.*, 1992).

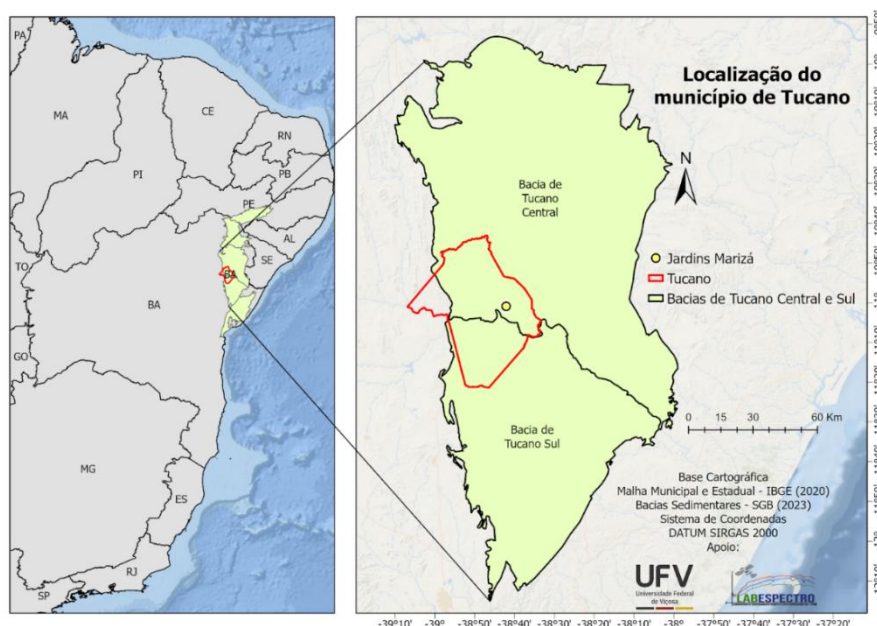
Diante disso, o objetivo do presente estudo foi investigar as mudanças ocorridas nos solos arenosos manejados pela agricultura regenerativa em uma região do semiárido brasileiro do bioma Caatinga a partir da resposta espectral. Para tal, foram utilizados como elementos de apoio a análise discriminatória: análise química e física do solo e difração de raio x.

## **2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudos denominada Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano Central próximo ao limite da sub-bacia do Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru (Figura 1). O clima da região é predominante do tipo estepe local e classificado como BSh (classificação de Koppen e Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 463 mm, com temperatura média de 25,4 °C. A vegetação predominante é formada por pastagens entremeadas por áreas com fragmentos de Caatinga (INEMA, 2017). O solo do local foi descrito e classificado como um Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico (> 90% de areia), de ocorrência em relevo suave ondulado, em terço médio de encosta e originário de sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

Figura 1 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA.



Fonte: UFV (2023)

## 2.2 COLETA DO SOLO

Pontos de amostragem foram definidos para o desenvolvimento do trabalho de acordo com o histórico de uso das áreas no interior da propriedade, bem como em áreas adjacentes (propriedades vizinhas) para fins de comparação. Neste sentido, quatro áreas de manejo regenerativo foram escolhidas no Jardins Marizá (5 meses, 3 anos, 10 anos de pousio e 10 anos de manejo), além de duas áreas vizinhas de manejo convencional e uma área de vegetação nativa (Caatinga). Essas sete áreas compuseram os tratamentos do presente estudo.

No centro de cada tratamento, foi delimitado uma área de 25 x 25 m para as avaliações. Essa área foi subdividida em quatro subáreas, sendo em cada qual coletadas cinco amostras simples de amostras deformadas de solo. As amostras simples foram homogeneizadas para se formar uma amostra composta por subárea, sendo estas utilizadas como repetições. As amostras foram coletadas na profundidade de 0 a 20 cm.

## 2.3 ANÁLISE FÍSICA E QUÍMICA DO SOLO

A determinação granulométrica foi realizada segundo o método da pipeta, conforme Lei de Stokes e utilizando o NaOH 0,01 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico (EMBRAPA, 2017), após agitação lenta (50 rpm por 16 h). A densidade do solo foi

obtida pelo método da proveta, uma vez que a estrutura do tipo grãos simples não permitiu a coleta de amostras indeformadas (Tabela 1).

Tabela 1 – Valores médios de análise física de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021

Área	Densidade do solo (g.cm <sup>-3</sup> )	Areia total (kg/kg)	Silte (kg/kg)	Argila (kg/kg)	Classificação Textura
INICIO	1,57	0,930	0,025	0,044	Areia
REG3	1,48	0,913	0,032	0,055	Areia
REG10	1,35	0,867	0,053	0,080	Areia Franca
POLIC	1,52	0,915	0,031	0,054	Areia
MANDC	1,6	0,936	0,026	0,038	Areia
MILC	1,59	0,905	0,047	0,049	Areia
CAAT	1,60	0,900	0,035	0,066	Areia

Fonte: Elaborado pela autora

A análise química de rotina foi efetuada (Tabela 2), como o carbono orgânico total (COT) sendo quantificado por oxidação por via úmida com K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 0,167 mol L<sup>-1</sup> em meio sulfúrico e aquecimento externo (Yeomans; Bremner, 1988). O estoque de carbono foi calculado para a camada de 0 a 20 cm, a partir da equação (Veldkamp, 1994): Est C = (CO x Ds x e)/10, onde: Est C = estoque de C orgânico em determinada profundidade (. ha<sup>-1</sup>); CO = teor de COT na profundidade amostrada (g kg<sup>-1</sup>); Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm<sup>-3</sup>); e e = espessura da camada considerada (cm).

Tabela 2 - Valores médios da análise química de solo de diferentes sistemas de manejo regenerativo e convencional no semiárido da região de Tucano – BA, 2021

Área	pH (H <sub>2</sub> O)	P	K	Ca	Mg	Al + H	Al	T	t	MO (dag/kg)	V%	m%	P-Rem mg/L
		mg/dm <sup>3</sup>				cmolc/dm <sup>3</sup>							
INICIO	6,91	10,98	99,50	1,06	0,51	0,20	0,00	2,02	1,82	0,57	90,60	0,00	58,60
MR3	7,38	60,80	163,50	2,20	1,18	0,18	0,00	3,98	3,80	0,97	95,93	0,00	57,48
MR10	7,31	15,58	131,50	4,59	2,45	0,33	0,00	7,70	7,38	2,76	95,75	0,00	55,75
POL	7,16	8,37	146,00	1,95	0,79	0,20	0,00	3,31	3,11	0,67	93,93	0,00	57,63
MANC	7,31	11,90	37,50	0,66	0,55	0,05	0,00	1,35	1,30	0,03	97,45	0,00	58,25
MILC	6,10	9,55	45,50	1,06	0,40	0,68	0,00	2,24	1,57	0,40	69,58	0,00	57,73
CAAT	4,74	6,90	77,00	2,08	0,59	4,00	0,10	6,86	2,96	2,62	41,48	3,6	60,00

Fonte: Elaborado pela autora

## 2.4 DIFRAÇÃO DE RAIOS X

Para determinar a composição mineralógica do solo, foi realizada uma análise de difração de raios X (DRX). Para tanto, separou-se as frações areia, silte e argila. Em seguida com a fração argila umedecida lâminas foram montadas. Após secar por 7 horas, as lâminas foram submetidas a leitura do aparelho DR-x.

## 2.5 AVALIAÇÃO DOS DADOS ESPECTRAIS DE SOLOS

Em laboratório, as amostras coletadas em campo foram peneiradas em malha de 2 mm e secas por 24 h em estufa a 45°C, seguindo os protocolos de Ben-Dor (2015). Em seguida, as assinaturas espectrais foram registradas utilizando-se um espectrorradiômetro ASD FieldSpec® 4 Hi-Res, que trabalha no intervalo de 350 a 2500 nm (VIS-NIR-SWIR)). As interpretações das assinaturas espectrais e identificação de suas feições diagnósticas foram feitas com auxílio do Software Envi 5.3 (64bit), auxiliado pela biblioteca espectral da United State Geological Survey (USGS).

## 2.6 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A fim de avaliar as diferenças de reflectância espectral entre os tratamentos, aplicou-se para cada banda o teste de Tukey e a correlação de Pearson, utilizando o programa Speed Stat 3.3.

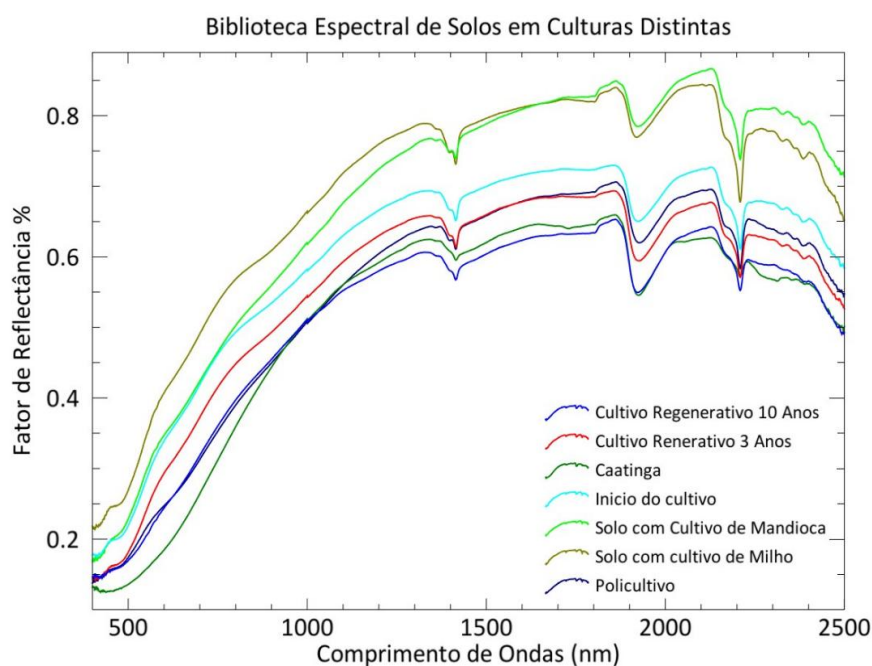
A análise multivariada também foi utilizada no presente estudo por parecer adequada (Leone, Sommer, 2000; Ben-Dor *et al.*, 2009) aos estudos de dados espectrais na interpretação das relações dos constituintes do solo. Na tentativa de explorar as similaridades espectrais existentes e a capacidade discriminatória dos diferentes tratamentos, utilizou-se a análise de cluster – método Ward; distância típica de correlação que é uma técnica classificatória multivariada com objetivo de agrupar os tratamentos de acordo com suas semelhanças e dissemelhanças. Nesta avaliação foi utilizado o Software Origin 9.1 (versão gratuita).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 RELAÇÃO ENTRE O COMPORTAMENTO ESPECTRAL, MANEJO E PROPRIEDADES DO SOLO

As curvas de reflectância espectral (Figura 2) evidenciam feições distintas em relação às áreas de manejo regenerativo e convencional.

Figura 2 - Assinaturas espectrais do manejo regenerativo (10 anos (MR10), 3 anos (MR3), Início (INI) Policultivo (POL), convencional (mandioca (MANC), milho (MILC)) e Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano- BA.

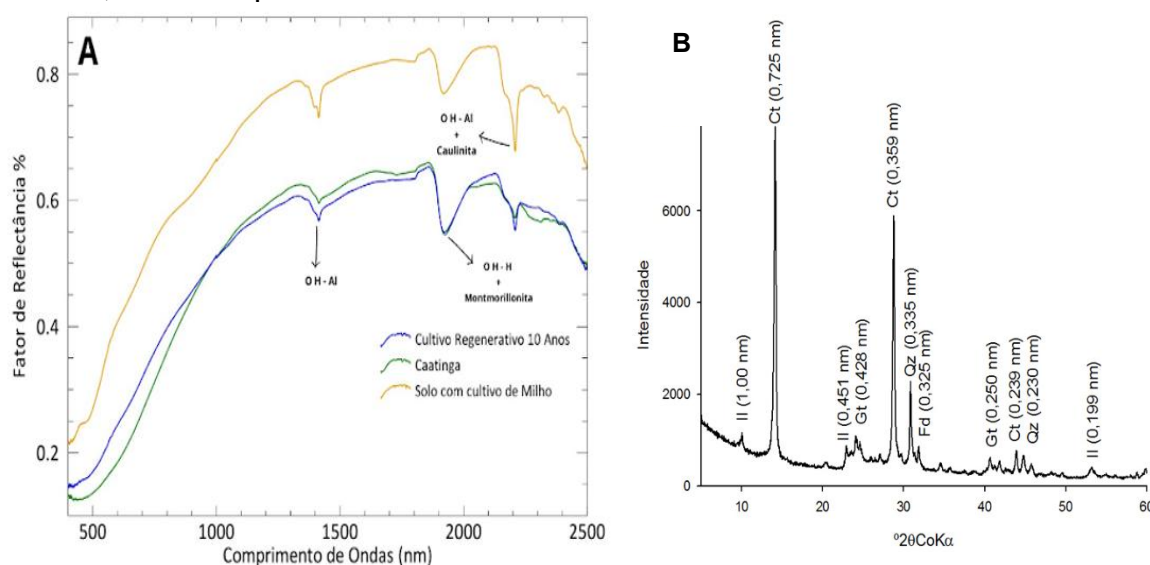


Fonte: Elaborado pela autora

As bandas encontradas em 1.415 nm e 2.204 nm referem-se tanto à montmorillonita como à caulinita (Meneses; Almeida; Baptista, 2019) e estão atribuídas às vibrações das moléculas de água e grupos OH das estruturas destes minerais. No caso específico da montmorillonita, como há moléculas de água entre suas camadas unitárias, bandas de absorções fortes ocorrem em 1400 e 1900 nm, estando a banda em 1.900 atribuída às vibrações de moléculas de água (Hunt; Salisbury, 1970). No entanto, fortes bandas de hidroxilas centradas em 1.400 e 2.200 nm são típicas de reflectância de caulinita, com a ausência de apreciável água retida resultando em apenas uma fraca banda em 1.900 nm (Epiphanyo, 2012). Na curva espectral da caulinita, a forte absorção ocorrida na região de 2200nm é

indicativa da influência da hidroxila estrutural (Dalmolin *et al.*, 2005), resultado que pode ser verificado no formato mais alongado em 2.200 com feição típica da caulinita no solo do cultivo de milho (MILC). Consubstancialmente este resultado confirmou a presença da caulinita para a mesma área (MILC) pelo difratograma (Fig. 3).

Figura 3 - A - Comportamento espectral das áreas de manejo regenerativo (MR10), convencional (milho) e Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano-BA. Figura 3 - B - Difratograma de raio-X da fração argila da área de manejo convencional do milho (MILC) (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato

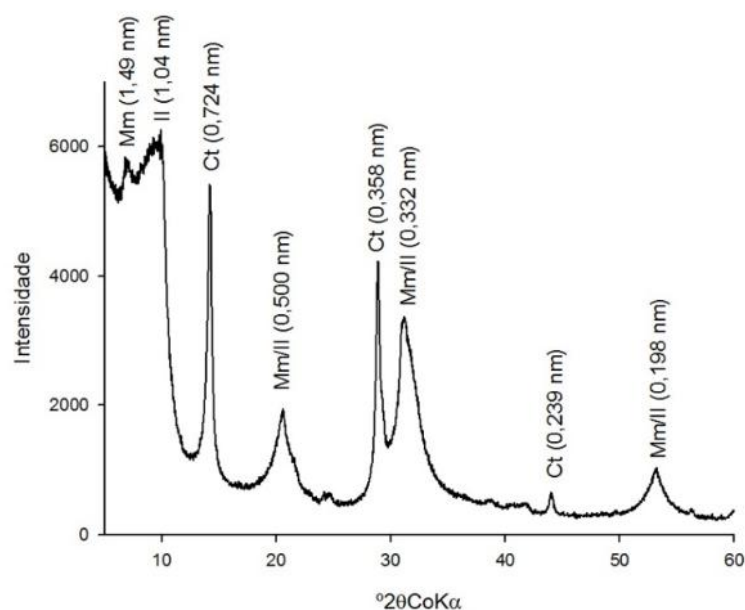


Fonte: Elaborado pela autora

Na faixa espectral do SWIR em 1.900 e 2.205 nm houve a suspeita do indicativo da feição de absorção típica do argilomineral montmorilonita  $(\text{Na,Ca})_{0,33}(\text{Al,Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$  nas áreas de cultivo regenerativo 10 anos (MR10), bem como na Caatinga (CAAT) (Figura 3A). Embora a presença de argilominerais do tipo 2:1 (grupo das esmectitas) seja comum na região semiárida do Nordeste brasileiro, associada ao clima seco e sem excedente hídrico (Corrêa *et al.*, 2003; Melfi *et al.*, 2004; Melo; Alleoni, 2009), não é comum ocorrer em solos arenosos com 8% de fração argila. Uma possibilidade foi associar este resultado ao manejo a partir do uso da adição de um barro (substrato), o qual é utilizado pelos agricultores na produção do composto orgânico. A mistura é composta de barro (coletado próximo a riacho), pó de rocha, farinha de osso, calcário, esterco fresco, folhas secas, material vegetal (jurubeba, lanzinha, sisal, babosa, palma). No entanto,

é importante considerar que as relações definidas entre alguns componentes do solo e as características espectrais são normalmente válidas para variadas condições, no entanto estas devem ser definidas experimentalmente (Madeira Netto; Baptista, 2000). Assim, se faz necessário investigar o estudo dos dados espectrais de solo, aliado a outros métodos clássicos. Com isso, no intuito de melhor compreender as bandas espectrais que indicam a presença da montmorilonita foi realizada nas amostras de CAAT, MR10 e MILC, bem como nas amostras do barro utilizado na adição do composto orgânico, uma análise dos argilominerais pelo método de difração de raio x que se constitui em um dos mais simples e difundidos para identificação mineralógica. Os difratogramas das amostras de referência exibiram as concentrações dos distintos minerais. As amostras de solo da CAAT, de MR10 e MILC não apresentaram evidências da presença de montmorilonita. Por outro lado, as amostras do barro (puro) utilizado no composto orgânico para adubação dos cultivos de MR10 apresentaram altas concentrações (Fig.4).

Figura 4 - Difratoograma de raio-X da fração argila do barro utilizado como substrato para compor o composto orgânico usado na adubação dos canteiros. Ct: Caulinita; Il: Ilita; Mm/l: montmorilonita



Fonte: Elaborado pela autora

A composição mineralógica é fortemente dependente do grau de intemperismo do solo e do seu material de origem. É comum ter a presença de ilita quando o material de origem é micáceo. No caso deste estudo os arenitos finos a

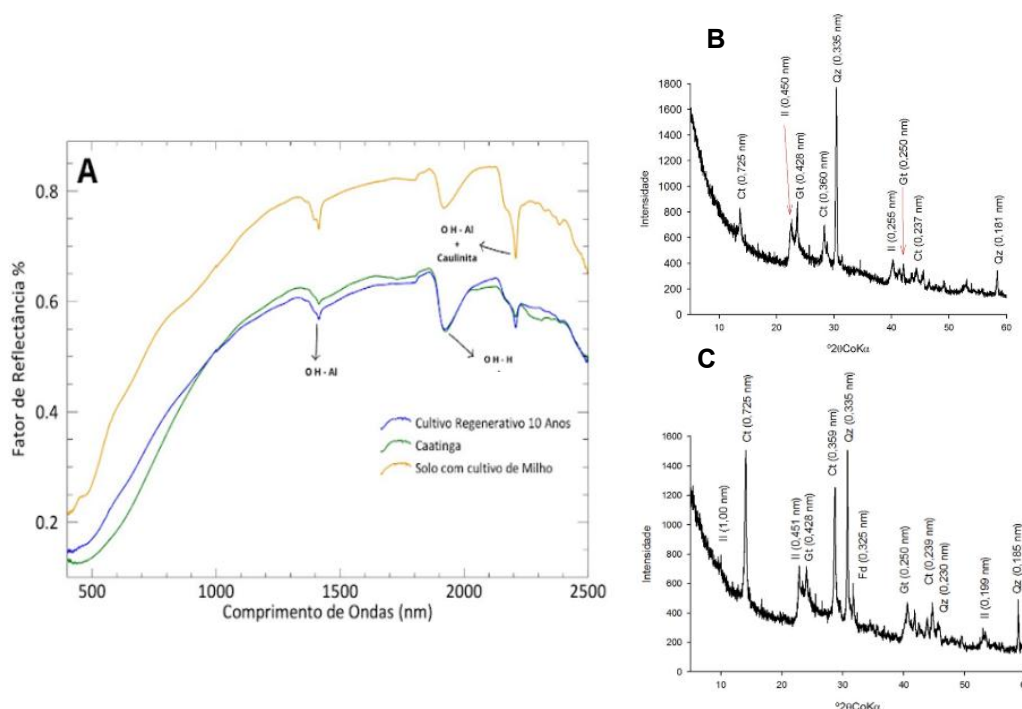
grosseiros da formação Marizal são caracterizados pela presença de quartzo, feldspato, mica detrital e argilas, indicando um ambiente deposicional rico em minerais micáceos associados a sistemas fluviais e deltaicos (Varejão *et al.*, 2016). Conhecer sobre a composição mineralógica torna-se essencial para avaliar o comportamento espectral dos solos devido às várias feições de absorção, bem como a influência no albedo que estes conferem às curvas espectrais (Dalmolin *et al.*, 2005).

Sabe-se que o aprofundamento da feição em 1.900 nm é indicativo de minerais 2:1. Embora a montmorilonita seja o argilomineral mais abundante deste grupo, há outros minerais com estrutura 2:1 como as micas presentes na fração argila do solo que são caracterizadas como illitas. O termo illita designa as micas dioctaedrais de dimensão argila, semelhantes a muscovita, mas com maior quantidade de silício, água e menos K comparado a composição normal da muscovita (Ker *et al.*, 2012). Uma dificuldade comum na identificação dos minerais dos grupos dos filossilicatos 2:1 é a ocorrência de minerais interestratificados, que mostram alternância entre camadas que expandem (como as montmorilonitas) e que não expandem (como as micas) (Melo; Alleoni, 2009). Neste sentido, a DRX foi crucial para compreender que o maior aprofundamento na feição espectral em 1.900 nm nas áreas de CAAT e MR10 não está relacionado com o indicativo da presença da montmorilonita e sim da illita (Figura 5), conforme verificado também por Terra (2011). A expansibilidade intracristalina da illita é limitada devido à forte ligação iônica, gerada pelos íons K<sup>+</sup> entre as camadas estruturais, sendo está uma das principais diferenças entre a montmorilonita (Santos, 1989).

Para o estudo das características dos solos e das suas propriedades espectrais, torna-se importante considerar não apenas os fenômenos físicos decorrentes das interações energia-matéria, mas também os conceitos pedológicos, levando em consideração aspectos vinculados ao grau de intemperismo, constituição física, química e mineralógica (Terra, 2011).

Figura 5 - A: Comportamento espectral das áreas de manejo regenerativo (MR10), convencional (milho) e Caatinga (CAAT) em solos arenosos do semiárido, Tucano-BA. Figura 5 - B: Difractograma de raio-X da fração argila da CAAT. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Illita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita). C - Difractograma de raio-X da fração

argila da área de MR10. (Prof 0-20 cm, Ct: Caulinita; Il: Ilita; Qz: Quartzo; Gt: Goethita; Fd: Feldspato).



Fonte: Elaborado pela autora

A razão é que a resposta espectral pode refletir a combinação de influências de vários fatores presentes nos solos, que podem se alterar de um solo para outro, especialmente quando envolve sistemas de manejo distintos (Irons; Weismiller; Petersen, 1989). Na Figura 2 o MILC e a MANC apresentam a maior intensidade de reflectância comparado aos demais preditores. Este resultado espectral pode estar associado a matéria orgânica e a mineralogia, em especial de minerais primários, como o quartzo, o qual foi confirmado na respectiva área pelo DR-X (Figura 3 B). A granulometria nos diferentes tratamentos tem predomínio da fração areia, típico de Neossolos quartzarenicos, contribuindo para a classe textural Areia, com exceção da área de MR10 com areia franca, Essa distribuição é explicada pelos depósitos da formação Marizal na porção leste da Sub-bacia Tucano Central, composto predominantemente por elementos de barras arenosas e cascalhosos subaquáticas na porção estratigráfica inferior (Membro Banzaê) que foram interpretados como sistemas aluviais entrelaçados arenosos e cascalhosos (Carrera, 2015). Nesta fração, predomina nos ambientes tropicais, minerais resistentes ao intemperismo, sendo o mais comum o quartzo (Ker *et al.*, 2012). Este mineral promove fator de reflectância acima de 0.5%, entretanto, na faixa espectral entre 400 a 2500 não

apresentam banda de absorção específica. É possível constatar que as curvas espectrais se enquadram no tipo ascendente até 1800 nm e descendente até 2500 nm, caracterizando-se como curvas de solos arenosos, assim como identificado por Souza et al., 2013. Na análise estatística da fração areia foi possível verificar diferenças significativas entre os tratamentos (Tabela 1), sendo MR10 a única que diferiu das demais áreas. O teste de Pearson indicou correlação moderada positiva ( $r = 0,42$ ) (Schober et al., 2018) no comprimento de onda 2205 nm com a fração areia, ou seja, este resultado reflete as condições próprias do solo arenoso no comportamento espectral, confirmando que quanto maior a quantidade de areia maior será a reflectância do solo. A distribuição do tamanho de partícula no solo e a presença de diferentes argilominerais influem na resposta espectral dos solos. Devido à sua constituição mineralógica (rica em quartzo), de maneira geral, solos de textura arenosa tendem a ter maior reflectância, e ao fato de geralmente apresentarem baixos teores de matéria orgânica (Dalmolin et al., 2005) conforme demonstrou os resultados das áreas, sendo as de manejo convencional (MANC e MILC) aquelas com maior reflectância.

A textura do solo tem forte influência na infiltração e retenção de água, aeração do solo, disponibilidade de nutrientes pelas plantas, capacidade de troca catiônica e facilidade de compactação, bem como implicações no seqüestro de carbono (Tümsavaş et al., 2019). Um manejo regenerativo que atenda aos requisitos da sustentabilidade do agroecossistema se faz fundamental para oferecer a qualidade do solo pautada nos indicadores físicos, químicos e biológicos. Em casos de solos arenosos, a condição de fragilidade e degradação é ainda maior, sendo as práticas adequadas de manejo essenciais para evitar a desertificação do solo, bem como auxiliar na preservação e aumento dos estoques de CO do solo (Yudina et al., 2022). Embora algumas propriedades de solo, como a textura seja dependente dos processos de formação ao longo do tempo, e, portanto, não sujeito a variações devido ao manejo do solo, a MOS tende a apresentar variações em decorrência do histórico de manejo.

A textura guarda íntima relação com a conservação da matéria orgânica dos solos (MOS). Solos argilosos apresentam a tendência de possuir maior concentração de carbono orgânico do que solos arenosos. Isso ocorre pela maior reatividade e quantidade de cargas nos mais argilosos, o que possibilita a formação de mais complexos argilohúmicos e menores taxas de mineralização (Melo; Alleoni,

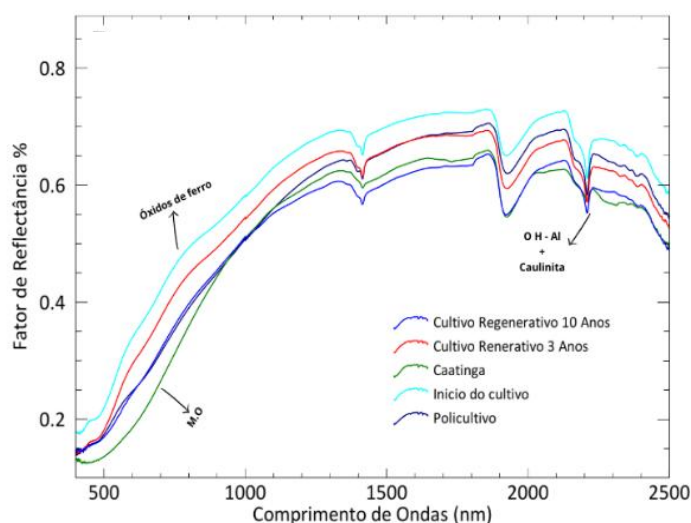
2009), protegendo a matéria orgânica do solo. Por se tratar de Certamente a diferença textural entre as áreas pode não ter sido o aspecto que implicou nas diferentes reflectâncias, especialmente naqueles de manejo convencional MILC e MANC com as áreas de MR10 e CAAT. No entanto, é possível que a MOS tenha exercido influência nestes resultados. Isto ocorre pelo fato da MOS ter baixo nível de reflectância e praticamente não apresentar feições espectrais de absorção. Quando estão presentes em mistura com material de maior reflectância, como o quartzo presente em maior proporção em Neossolos quartzarênicos, diminui a reflectância e, conseqüentemente, reduz o contraste das feições de absorção do material (Demattê *et al.*, 2003). Estudos mostram que quanto maior o teor de MOS, menor o albedo e conseqüentemente menor a reflectância (Ben-Dor *et al.*, 1997; Dalmolin *et al.*, 2005; Silva-Sangoi *et al.*, 2022), já a sua remoção provoca o aumento de reflectância na faixa espectral de 400 nm a 2.500 nm (Demattê *et al.*, 2003).

### **3.2 COMPREENDENDO AS RESPOSTAS ESPECTRAIS DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO (MOS) A PARTIR DO MANEJO**

Ao comparar as respostas espectrais dos tratamentos de manejo regenerativo com os de manejo convencional, verifica-se uma tendência típica do indicativo de MOS, que apesar de não possuir feições específicas de absorção, tende a promover uma redução na reflectância no espectro ótico refletivo, mascarando feições de outros constituintes (Figura 6).

A matéria orgânica é uma das propriedades do solo mais sensíveis às transformações decorrentes dos sistemas de manejo. No caso do semiárido a taxa de degradação da matéria orgânica é influenciada sobremaneira pela disponibilidade hídrica e altas temperaturas. Um estudo recente no semiárido verificou que as maiores taxas de decomposição e liberação de macronutrientes no solo ocorreu em períodos de alta precipitação pluviométrica (Pereira *et al.*, 2023).

Figura 6 - Curvas espectrais de solos arenosos do semiárido após manejo regenerativo em, Tucano- BA. Evidência típica do indicativo de matéria orgânica a partir da concavidade na faixa espectral do VNIR. Óxido de ferro



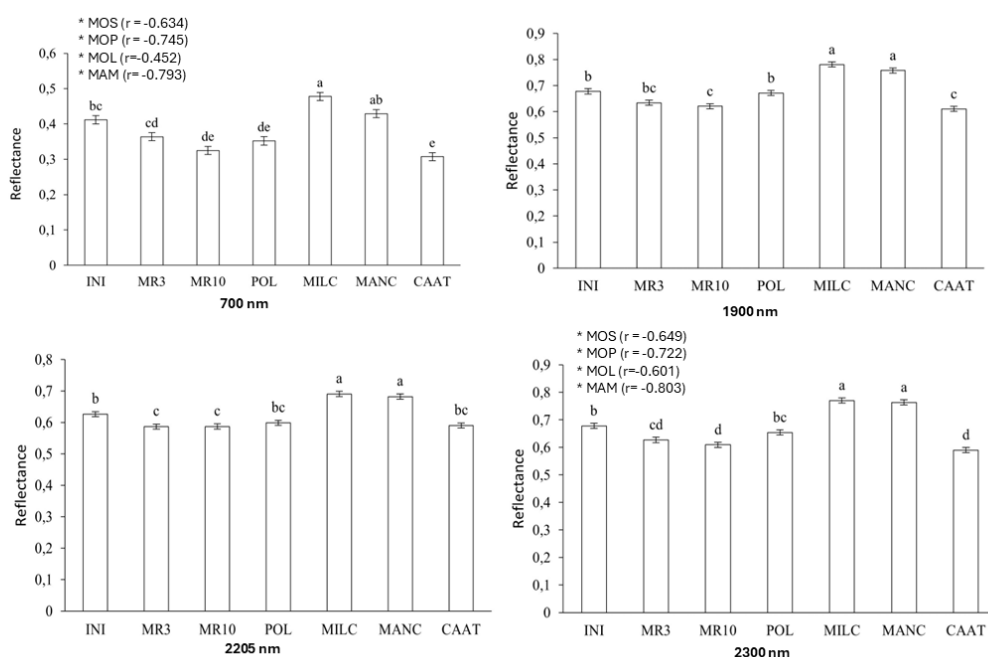
Fonte: Elaborado pela autora

O comportamento espectral associado a uma menor reflectância pode ser verificado, especialmente nas áreas de MR10 e CAAT, os quais apresentaram maiores médias no teor de MO (Tabela 2).

No espectro do tratamento da CAAT verifica-se um formato côncavo na faixa do visível para o infravermelho próximo, apresentando feições ao redor de 700 e de 950 nm (Figura 6). As bandas de absorção a 700 nm estão relacionadas com a influência do carbono orgânico e dos ácidos húmicos (Viscarra-Rossel *et al.*, 2006). O fracionamento químico da matéria orgânica é baseado nas características de solubilidade das substâncias húmicas que são compostas de ácidos fúlvicos, ácidos húmicos e huminas. Os ácidos húmicos, por sua vez, foram definidos como associações nas quais predominam compostos hidrofóbicos (cadeias polimetilênicas, ácidos graxos, esteroides) (Baldotto & Baldotto, 2014). O carbono orgânico total (COT) contribui em média com 98% do C em formas orgânicas do solo, podendo compor frações do C lábil que podem incluir substâncias não húmicas, resíduos orgânicos parcialmente decompostos, restos de animais e de origem microbiana (hifas de fungos, esporos e outros) (Gregorich; Janzen, 1996; Gregory *et al.*, 2016). O C lábil corresponde às formas que seriam de fácil mineralização pela microbiota do solo (Novais *et al.*, 2007). No comprimento de onda de 700 nm foi verificado diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre os tratamentos, com

exceção das médias de MR10 e POL. Ou seja, apesar de MR10 ter apresentado teores de MO ( $p < 0,05$ ) similar a CAAT (Tabela 2) a composição química desta MO pode ser diferente. A análise de Pearson mostrou uma correlação moderada negativa ( $r = -0.634$ ) para a MOS. Para as frações MOP ( $r = -0.745$ ) e MAM ( $r = -0.793$ ) uma correlação forte negativa (Figura 7). A matéria orgânica particulada (MOP) é uma fração lábil com maior taxa de ciclagem dos constituintes orgânicos, podendo sofrer alterações a curto prazo a partir do manejo do solo (Bayer *et al.*, 2002).

Figura 7 – Valores médios de reflectância nos respectivos comprimentos de onda (700, 1900, 2205 e 2300 nm) evidenciando as diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Correlação de Pearson para a matéria orgânica do solo (MOS), matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica leve (MOL), matéria orgânica pesada (MAM).

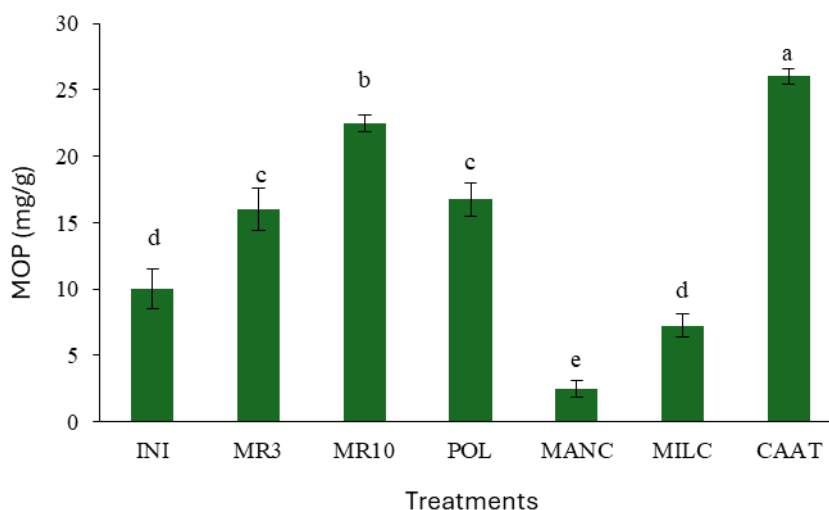


Fonte: Elaborado pela autora

De alguma maneira os constituintes orgânicos mais lábeis da fração MOP relacionados a este comprimento de onda podem explicar os resultados para as áreas de MR10 e POL, sendo que ambas são manejadas com entrada de esterco fresco. No POL a entrada do excremento a partir do pastejo rotacionado dos animais começou a ocorrer após 10 anos de pousio. Já em MR10 a entrada de esterco (gado e galinha) ocorre no sistema há 10 anos a partir do uso do composto orgânico

colocado nos berços de plantio. Além disso, a cobertura vegetal nestes solos é constante, incluindo vegetação herbácea, arbustiva e arbórea, sendo que em POL há a presença de herbácea com alguns componentes arbustivos. O conteúdo da MOP encontra-se ligado principalmente ao aporte orgânico pelo aumento e manutenção dos resíduos orgânicos (Silva & Mendonça, 2007). A MOP é altamente influenciada por práticas de manejo, como rotação de culturas, adubação orgânica, cobertura vegetal. Certamente por possuírem uma demanda maior de resíduos frescos sujeitos a degradação e mais prontamente disponível as plantas, a MR10 e POL não apresentaram diferença estatística para o comprimento de onda em 700 nm. Ao analisar os dados da MOP ( $p = <0,001$ ) constatou-se que as áreas da CAAT e MR10 são as que apresentam maior percentual de C-MOP respectivamente. O POL apresentou similaridade com a área de MR3. Já a área de INI foi similar a MILC (Fig. 8).

Figura 8 – Percentuais de C da fração MOP dos diferentes tratamentos na profundidade de 0-20 cm. \*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade



Fonte: Elaborado pela autora

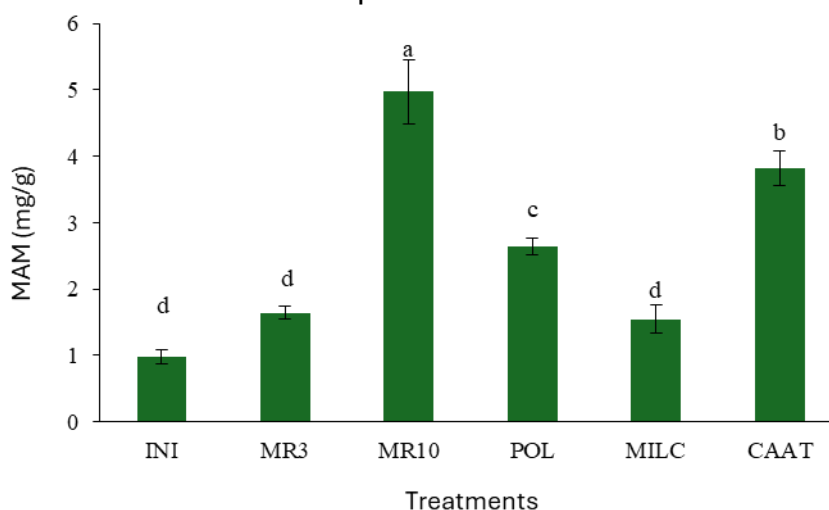
Este resultado fortalece o comportamento espectral anteriormente apresentado para as áreas de CAAT e MR10, as quais tiveram menor albedo e consequentemente menor reflectância em decorrência de um maior teor de MO. Da mesma maneira, as demais áreas respondem ao resultado espectral, sendo aquelas de manejo convencional (MILC e MANC) as que tiveram uma maior reflectância. É importante ressaltar ainda que apesar da área de MR10 ter maior porcentagem em

C-MOP, quando avaliada no comprimento de onda em 700 nm teve comportamento espectral similar a POL. O que reforça a possibilidade de o resultado estar vinculado não apenas ao teor de MO, mas especialmente a natureza química dos resíduos, a sua constituição (Epiphany *et al.*, 1992).

A complexidade da constituição da matéria orgânica pode tornar mais difícil a compreensão detalhada da sua influência sobre a reflectância dos solos (Madeira Netto, 1996), sendo necessário maiores estudos para compreender melhor seu comportamento espectral. No caso da CAAT a composição e constituição da MOS presente na fração MOP em 700nm pode estar vinculado ao maior rebaixamento nesta feição. Isto vale para os demais resultados de reflectância acerca da MOS nos diferentes tratamentos. Nos tratamentos que apresentam menor teor em MO, sendo estes MR3 e INI para manejo regenerativo e MILC e MANC para manejo convencional, percebe-se um rebaixamento do espectro, mascarando a concavidade causada pelos óxidos de ferro, já que nesta faixa do visível é possível avaliar sua presença, a qual apesar de ter baixos teores em solos arenosos (Demattê *et al.*, 2003) teve sua presença confirmada pelo DR-X.

Já 2300 nm estão associados a grupos aromáticos ou ligações carboxílicas alifáticas relacionadas com a estrutura da matéria orgânica associada às partículas minerais no solo (Ben-dor *et al.*, 1997). De maneira geral, estes grupos mais recalcitrantes correspondem os maiores estoques de carbono e podem ser encontrados nas frações pesadas, os quais tem uma relação íntima com a textura do solo (Feller; Beare, 1997). Nas bandas de absorção em 2300 nm não houve diferença nas médias de reflectância ( $p < 0,05$ ) entre as áreas de MILC e MANC, assim como MR10 e CAAT (Figura 7). Já os dados de Pearson mostraram uma correlação moderada negativa ( $r = -0.649$ ) para a MOS. Para as frações MOP, MAM e MOL, a fração MAM foi a que apresentou uma correlação forte negativa. O que era esperado, já que sua coloração mais escura reduz a reflectância. O que pode indicar maior contribuição destes constituintes orgânicos no resultado de reflectância dos solos, conforme a descrição de Ben-dor *et al.* (1997). Para os teores de C-MAM as áreas de INI, MILC e MANC foram as que apresentaram menores percentuais ( $p < 0,05$ ), já as áreas de MR10 e CAAT os maiores teores ( $p < 0,05$ ) (Figura 9).

Figura 9 – Percentuais de C da fração MAM dos diferentes tratamentos na profundidade de 0-20 cm. \*Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.



Fonte: Elaborado pela autora

O comportamento espectral pode indicar a assinatura dos componentes orgânicos inferindo sobre a qualidade do solo. Assim foi observado, pela presença da humina, a qual corresponde uma fração mais recalcitrante da MO, que apresentou correlações negativas com os fatores de reflectância ao longo de todo o espectro analisado (350–2500 nm) com destaque nas regiões do infravermelho próximo (NIR) e do infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Ribeiro *et al.*, 2023).

A influência da MOS ao longo do espectro tende a mascarar a presença de alguns constituintes. O que ocorre em relação aos óxidos de ferro que quando presentes em maior quantidade, espera-se uma depressão ou concavidade, na região próxima a 450 nm, onde a goethita exerce forte absorção. Em 917 nm e em 885 nm situam-se outros pontos de absorção pela goethita e pela hematita, respectivamente (Epiphanyo *et al.*, 1992), podendo ser percebido pela presença de pequenas ombreiras. Na área de MILC este comportamento espectral encontra-se mais pronunciado. Isto porque os teores de MO destes solos são baixos e conseqüentemente não influencia na obliteração dos óxidos. Já na faixa do SWIR a feição de absorção da caulinita apresenta-se mais profunda nos tratamentos de manejo convencional (MANC e MILC). No manejo regenerativo, essa profundidade no espectro foi menos acentuada, com tendência de feição com maior pronunciamento no tratamento INI e com menor no MR10 (Figura 1). Este resultado no MR10 pode estar atribuído a presença da matéria orgânica que tende a reduzir a profundidade da feição da caulinita centrada em 2.205 nm. De modo geral a matéria

orgânica tende a promover a redução da intensidade da reflectância (Bellinaso; Demattê; Romeiro, 2010). O conteúdo de carbono orgânico no solo pode ser utilizado como parâmetro para se inferir sobre a qualidade do solo (Li; Shangguan; Deng, 2020; Lorenz; Lal, Lal, 2009) bem como avaliar práticas de manejo, além da sustentabilidade de sistemas de produção agrícola.

Alguns estudos observaram correlação nas faixas espectrais entre 500 e 850 nm com o carbono orgânico do solo (Viscarra-Rossel *et al.*, 2016; Faria *et al.*, 2023). Absorções em torno de 1.400 nm podem estar relacionadas à molécula de água em argilominerais (Meneses; Almeida; Baptista, 2019) e ligadas à celulose em resíduos orgânicos (Moura-Bueno *et al.*, 2018). Para a análise NIR de C, a faixa espectral mais relevante é de 1.650 a 2.500 nm (Bellon-Maurel & Mcbratney, 2011). Por outro lado, Beck *et al.* (1976) sugeriram que o intervalo de 900 a 1.200 nm seria melhor para o mapeamento de carbono orgânico em solos. De qualquer maneira, a complexidade da matéria orgânica dos solos é imensa e merece maiores estudos para compreender melhor seu comportamento espectral (Madeira Netto, 1996).

Este resultado pode ser fundamentado nas práticas de manejo regenerativo, que apesar de ocorrerem em um Neossolo quartzarênico são manejados em tempos distintos nos diferentes tratamentos, a partir de práticas diversas, conforme indicado no quadro 1. Desta maneira, as diferentes respostas espectrais das áreas de manejo regenerativo, parece refletir as condições temporais vinculadas as práticas regenerativas aplicadas.

### **3.3 A ESPECTROSCOPIA DE SOLOS É UM MÉTODO EFICAZ NA TOMADA DE DECISÃO NO MANEJO REGENERATIVO?**

Como indicado, a espectrorradiometria de reflectância é uma ferramenta que favorece estudos de diferentes propriedades do solo de forma qualitativa e quantitativa (Demattê *et al.*, 2019; Moura-Bueno *et al.*, 2019; Demattê *et al.*, 2018; Viscarra-Rossel *et al.*, 2016; Dotto *et al.*, 2016, Stevens *et al.*, 2013,). Os principais fatores que contribuem para as alterações das curvas espectrais dos solos são o tipo de mineralogia, a granulometria, o teor de umidade, teor de matéria orgânica, de óxido de ferro (Formaggio *et al.*, 1996). Por sua vez, o teor de C é um dos indicadores de qualidade do solo mais estudados para compreensão da saúde do agroecossistema a partir de um manejo sustentável (Hau *et al.*, 2024; Ribeiro *et al.*,

2023; Vicechonte *et al.*, 2019; Vicente; Gama-Rodrigues; Aleixo, 2023; Solomon, *et al.*, 2007).

No cenário atual onde muitos laboratórios têm adotado a agenda da química verde, com foco na redução de custos, insumos e reagentes, alguns autores mais empolgados, chegam a declarar que é possível substituir a análise convencional de solos pela espectroscopia NIR/MIR (Bellon-Maurel *et al.*, 2010). Para tal, estudos metodológicos que envolvem técnicas de medição, predição e calibração das amostras tem sido realizado com intuito de informar os cientistas de solos sobre os limites e os pontos críticos dos indicadores clássicos, bem como da possibilidade de uso de novos indicadores que permitam uma avaliação confiável e de baixo custo do teor de carbono sequestrado no solo (Viscarra Rossel *et al.*; 2006; Viscarra Rossel *et al.*, 2006; Mancini *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2021; Bem-dor;1997; Viscarra Rossel *et al.*, 2010; Hong *et al.*, 2019; Mousavi *et al.*, 2020; Zhang *et al.*, 2021). Neste contexto, a espectroscopia NIR/MIR tem se mostrado como um método reconhecido e promissor na medição de rotina do teor de carbono orgânico do solo (Bellon-Maurel *et al.*, 2011; Bellon-Maurel; Mcbratney, 2011).

Um mapeamento por espectroscopia de argila e carbono orgânico do solo em condições de campo e laboratório, concluiu que a espectroscopia VNIR (Visível e Infravermelho Próximo) em laboratório forneceu previsões mais precisas do que o sensoriamento VNIR in situ (Brickleyer; Marrom, 2010). Da mesma forma, um estudo para avaliar a influência do manejo na qualidade de solos argilosos, identificou maior precisão das estimativas de VNIR com amostras secas em estufa do que com amostras úmidas em campo (Chaudhary *et al.*, 2012). Ao comparar as vantagens de eficiência, entre VNIR in situ e em laboratório, parece que o VNIR in situ possa ser uma alternativa viável ao VNIR de laboratório para estimativas de carbono, mas ainda não parece ser adequada na estimativa da textura do solo (Cho *et al.*, 2017).

Por outro lado, a desvantagem comumente abordada da técnica é que as previsões de VNIR não atingem a precisão laboratorial da análise química (Brown, 2007). A análise espectral quantitativa do solo usando espectroscopia de reflectância no visível e no infravermelho requer técnicas estatísticas sofisticadas para discernir a resposta dos atributos do solo a partir das características espectrais (Viscarra-Rossel *et al.*, 2006). Um estudo do uso da espectroscopia de reflectância (350–2500 nm) associada à técnica de spiking para melhorar modelos de predição

de matéria orgânica do solo (MOS) no Cerrado brasileiro, investigou a viabilidade de métodos mais rápidos e econômicos para estimar a MOS em áreas agrícolas. O resultado mostrou que apesar de ter uma melhora na recalibração com spiking em 12%, os modelos apresentaram baixa capacidade preditiva devido à baixa variabilidade espectral entre as áreas, especialmente baixa concentração de MOS (Everson *et al.*, 2023). A partir desta perspectiva, levando em consideração o que foi encontrado neste estudo, torna-se importante validar as práticas de manejo regenerativa, as quais são capazes de recuperar indicadores de qualidade do solo, em especial o C, e que, portanto, se enquadram como aliadas das técnicas espectrais de sensoriamento remoto que investigam a capacidade preditiva de modelos mais robustos.

Neste contexto, é imprescindível considerar a importância social e ecológica do carbono no solo, tanto como fator de saúde vinculado ao manejo bem como na mitigação das mudanças climáticas decorrentes da emissão de gases do efeito estufa (GEE) (Lal, 2014). Desta forma, solos que antes seriam limitados em sua resposta espectral decorrente de condições precárias que envolvem o estudo das suas propriedades poderão ser alvos de aplicação de ferramentas poderosas capazes de adaptar modelos espectrais a condições locais.

Os resultados deste estudo podem constatar, mesmo sem o uso de técnicas preditivas, o quanto solos mais sustentáveis podem responder a aplicação destes métodos. Assim, é urgente refinamento, discussões e pesquisas que tratem não apenas da possibilidade de aplicação do sensoriamento espectral VNIR/MIR como um método eficaz para um diagnóstico das propriedades do solo, mas também das iniciativas de manejo sustentável de solos, especialmente os arenosos, como áreas-alvo modelo na investigação do uso da espectroscopia na tomada de decisão.

#### **4 CONCLUSÃO**

A espectrorradiometria foi capaz de discriminar o comportamento espectral das principais propriedades (textura, argilominerais, MOS) dos solos a partir da influência dos diferentes manejos no semiárido de Tucano - BA. Foi possível interpretar que a leitura espectral conseguiu trazer a partir das diferentes reflectâncias a influência da MOS na perspectiva da ação do tempo pelo manejo das respectivas áreas. Solos manejados pela agricultura regenerativa podem ser áreas-alvo para investigar a viabilidade das técnicas espectrais, uma vez que não limita as

respostas na aplicação do método. A área MR10 apresentou melhores condições no incremento de MOS a partir da agricultura regenerativa, o que favoreceu a uma resposta espectral mais próxima da CAAT, que atuou como área de referência neste estudo. A análise das frações MOP, MOL, MAM e sua correlação com os comprimentos de onda trazem a necessidade em aprofundar os estudos acerca da composição da MOS para um melhor entendimento sobre sua complexidade, bem como sua relação com as bandas de absorção.

## REFERÊNCIAS

- BALDOTTO, M. A.; BALDOTTO, L. E. B. Ácidos húmicos. Solos e Nutrição de Plantas. *Rev. Ceres*. v. 61, suppl. 2014.
- BAYER, C; *et al.* Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on a subtropical soil. *Plant and Soil*, v.238, p. 133-140, 2002.
- BECK, R.H. *et al.* *Spectral characteristics of soils related to the interaction of soil moisture, organic carbon, and clay content*. West Lafayette, IN. Purdue University, (LARS). 1976 Disponível em: <http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.23.05>. Acesso em: 15 jun. 2024.
- BELLINASSO, H.; DEMATTÊ, J. A. M.; ROMEIRO, S. A. Soil spectral library and its use in soil classification. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 34, p. 861-870, Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/65FyRKp6KBmJfGn4kMjYK4p/?format=pdf&lang=en> n. 2010.
- BELLON-MAUREL A. V.; MCBRATNEY, A. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils e Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 43, p. 1398-1410, 2011.
- BELLON-MAUREL, V.; FERNANDEZ-AHUMADA, E.; PALAGOS, B.; ROGER, J. M.; MCBRATNEY A. Critical review of chemometric indicators commonly used for assessing the quality of the prediction of soil attributes by NIR spectroscopy. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 29, n. 9, 2010.
- BELLON-MAUREL, V.; MCBRATNEY, A.; BELLON-MAUREL, V.; MCBRATNEY, A. Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils e Critical review and research perspectives. *Soil Biology & Biochemistry*, v. 43, p.1398 – 1410, 2011.
- BEM-DOR, E.; ONG, C.; LAU, I. C. Reflectance measurements of soils in the laboratory: Standards and protocols. *Geoderma*, 245-246, p. 112 -124, 2015.
- BEN-DOR, E.; CHABRILLAT, S.; DEMATTÊ, J. A. M.; TAYLOR, G. R.; HILL, J.; WHITING, M. L.; SOMMER, S. Using Imaging Spectroscopy to study soil Properties. *Remote Sensing of Environment*, v.113, Supplement 1, p. S38-S55, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>. 2009. Acesso em: 24 jun. 2024.

- BEN-DOR, Y INBAR, Y CHEN. The reflectance spectra of organic matter in the visible near-infrared and short wave infrared region (400–2500 nm) during a controlled decomposition process. *Remote sensing of Environment*, v. 61, Issue 1, p.1-15. 1997.
- BRADY, N. C.; WEIL, R. R. *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.
- BRICKLEMYER, R. S.; BROWN, D. J. On-the-go VisNIR: Potential and limitations for mapping soil clay and organic Carbon. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 70, p. 209–216, 2010.
- BROWN, D. J. Using a global VNIR soil-spectral library for local soil characterization and landscape modeling in a 2nd-order Uganda watershed. *Geoderma*, v. 140, n. 4, p.444-453. 2007.
- CAIXETA, J.; BUENO, G.; MAGNAVITA, L.; FEIJÓ, F. Bacias do recôncavo, tucano e jatobá. *Boletim de Geociências da Petrobras*. Rio de Janeiro, v. 8, p. 163–172, 1994.
- CARTER, M. R. Organic matter and sustainability. In: REES, B.C.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D.; WATSON, C.A., eds. Sustainable management of soil organic. *Wallingford, CAB International*, p.9-22. 2001.
- CASTRO, S. S.; HERNANI, L. C. Solos frágeis: caracterização, manejo e sustentabilidade. *Embrapa Solos-Livro técnico (INFOTECA-E)*, 2015.
- CHAUDHARY V. P.; SUDDUTH, A. K.; KITCHEN, R. N.; KREMER, R. J. Reflectance spectroscopy detects management and landscape differences in soil carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 76, Issue 2, p. 597-606. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2011.0112>. 2012. Acesso em: 14 abr. 2024.
- CHO Y.; SHERIDAN A. H.; SUDDUTH K. A.; VEUM K.S. Comparison of field and laboratory VNIR spectroscopy for profile soil property estimation. *Transactions of the ASABE*. v. 60, 5, p.1503 – 1510. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/trans.12299>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- CORRÊA, M. M.; KER, J. C.; MENDONÇA, E. S.; RUIZ, H. A.; Bastos, R. S. Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa. (PB) *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 27, n. 2, abril, pp. 311-324, 2003.
- DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.; KLAMT, E.; DICK, D.P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. *Ciência Rural*, v. 35, n.2, 2005.
- DEMATTE, J. A. M.; MAFRA, A. L.; BERNARDES, F. F. Comportamento espectral de materiais de solos e de estruturas biogênicas associadas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 22, n. 4, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000400007>. Acesso em: 14 abr. 2024.
- DEMATTE, J.A.M. A Biblioteca Espectral de Solos Brasileira (BSSL): uma visão geral, aplicação e desafios. *Geoderma*, 354, artigo 113793, 2019.
- DEMATTE, J.A.M. *et al.* Sistema de Sensoriamento Geoespacial do Solo (GEOS3): um poderoso procedimento de mineração de dados para recuperar a reflectância

- espectral do solo a partir de imagens de satélite. *Ambiente*, 212, p. 161-175, 2018.
- DEMATTE, J.A.M.; EPIPHANIO, J.C.N.; FORMAGGIO, A.R.. Influência Da Matéria Orgânica E De Formas De Ferro Na Reflectância De Solos Tropicais. *Bragantia*, v.62, p.451-464. 2003.
- DOTTO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. T.; MOURA-BUENO, J. M. Potencial da espectrorradiometria na classificação do teor de argila do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 40, p.1-8, 2016.
- EMBRAPA. Bioma Caatinga. Quartizarenicos. In: CUNHA, T. J. F.; SÁ, I. B.; PETRERE, V. G.; TAURA, T. A. *Embrapa Semiárido*, 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/bioma-caatinga/solos/neossolos/quartzarenicos>. Acesso em: 09 set. 2023.
- EMBRAPA. *Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solo*. 2.ed, rev. [s.n.]: Rio de Janeiro. 212p. 1997. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/330804/1/Manualdeanalisedesolo2ed1997.pdf>. Acesso em: 09 set. 2023.
- EPIPHANIO, J. C. N. *et al.* Comportamento espectral de solos do estado de são paulo. INPE: São José dos Campos, p. 1-143, 1992.
- EVERSON, C. *et al.* Estimating Soil Organic Matter (SOM) Using Proximal Remote Sensing: Performance Evaluation of Prediction Models Adjusted at Local Scale in the Brazilian Cerrado, *Remote Sensing. Open Access*. V. 15, 2023.
- FARIA, O. C. O. *et al.* Estimate of carbon stock in the soil via diffuse reflectance spectroscopy (vis/nir) air and orbital remote sensing. *Rev. Caatinga*, Mossoró, v. 36, n. 3, p. 675 – 689, 2023.
- FELLER, C. BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v. 79, p. 69-116, 1997.
- FORMAGGIO, A.R.; EPIPHANIO, J.C.N.; VALERIANO, M.M.; OLIVEIRA, J.B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciências do Solo, Campinas*, v. 20, p. 467-474, 1996.
- FREITAS, B.T. *A Formação Marizal (Aptiano) na Bacia do Tucano (BA): contribuição a análise da arquitetura de depósitos fluviais e implicações paleo-biogeográficas*. Tese (doutorado) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 175, 2014.
- GILLER, K. E.; HIJBEEK, R.; ANDERSSON, J. A.; SUMBERG, J. Regenerative agriculture: an agronomic perspective. *Outlook Agric.*, v. 50, n.1, p. 13-25. 10.1177/0030727021998063. 2021.
- GONÇALVES, L. L. *Influência da umidade do solo na resposta espectral de solo exposto via espectrorradiometria de campo*. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos), p. 120, 1999. - Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil, Brasília, Disponível em: <http://ptarh.unb.br/wp-content/uploads/2017/01/LuzidethL.pdf>. 1999. Acesso em: 09 set. 2023.
- GREGORICH, E.G; JANZEN, H.H. Storage of Soil Carbon in the Light Fraction and Macro-Organic Matter. In: Carter, M.R. and Stewart, B.A., Eds., *Structure and*

- Soil Organic Matter Storage in Agricultural Soils, *CRC Press*, Boca Raton, 167-190. 1996.
- GREGORY, A. S.; DUNGAIT, J. A. J.; WATTS, C. W.; BOL, R.; DIXON, E. R.; WHITE, R. P.; & WHITMORE, A. P. Long-term management changes topsoil and subsoil organic carbon and nitrogen dynamics in a temperate agricultural system: Long-term management, soil carbon and nitrogen. *European Journal of Soil Science*, v. 6, 4, p. 421–430. 2016.
- HAU, N-X; TUAN N-T; TRUNG, L-Q, CHI, T-T; Estimation of soil organic carbon content using visible and near-infrared spectroscopy in the Red River Delta, Vietnam. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 255, 2024.
- HONG, Y.; LIU, Y.; CHEN, Y.; LIU, Y.; YU, L.; LIU, Y.; CHENG, H. Application of fractional-order derivative in the quantitative estimation of soil organic matter content through visible and near-infrared spectroscopy. *Geoderma*, p. 337, 758–769. 2019.
- IRONS, J. R.; WEISMILLER, R. A.; PETERSEN, G. W. *Soil reflectance*. In: ASRAR, G.(ed.) Theory and applications of optical remote sensing. John Wiley: New York, p. 66-106, 1989.
- JIANG, Q.; LI, Q.; WANG, X.; WU, Y.; YANG, X.; LIU, F. Estimation of soil organic carbon and total nitrogen in different soil layers using VNIR spectroscopy: Effects of spiking on model applicability. *Geoderma*, v. 293, p. 54-63, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.030>. 2017. Acesso em: 09 set. 2023.
- JORDON, M. W. *et al.* Can Regenerative Agriculture increase national soil carbon stocks? Simulated country-scale adoption of reduced tillage, cover cropping, and ley-arable integration using RothC. *Science of The Total Environment*. v. 825, 2022.
- KER, J, C. *et al.* *Pedologia: fundamentos*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBCS): Viçosa, p. 343. 2012.
- KÖPPEN, W.; GEIGER, R. *Klimate der Erde*. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wallmap: [s.l.]. 1928.
- LAL, R. Societal value of soil carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*, v. 69, 6, p. 186A – 192<sup>a</sup>. Disponível em: <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.186A>. 2014. Acesso em: 09 set. 2023.
- LEE, K.S.; LEE, D.H.; SUDDUTH, K.A.; CHUNG, S.O.; KITCHEN, N.R.; DRUMMOND, S.T. Wavelength identification and diffuse reflectance estimation for surface and profile soil properties. *Transactions of the ASABE*, v. 52, n. 3, p. 683-695, 2009.
- LEONE, A.P.; SOMMER, S. Análise multivariada de espectros laboratoriais para avaliação do desenvolvimento e degradação do solo nos Apeninos do Sul (Itália). *Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente*, v. 72, p. 346-359, 2000.
- LI, J.; SHANGGUAN, Z.; DENG, L. Dynamics of soil microbial metabolic activity during grassland succession after farmland abandonment. *Geoderma*, p. 363. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114167>. 2020. Acesso em: 09 set. 2023.

- LORENZ, K.; LAL, K. R.; LAL, L. R. Biogeochemical C and N cycles in urban soils. *Environment International*, v. 35, 2009.
- MADEIRA NETTO, J. da S.; BAPTISTA, G. M. de M. *Reflectância espectral de solos*. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000.
- MADEIRA NETTO, J.S. Spectral reflectance properties of soils. *Photo Interpretation*, Paris, v.34, p. 59-70, 1996.
- MAGNAVITA, L. *et al.* Bacias sedimentares brasileiras: Bacia de Tucano. *Fundação paleontológica Phoenix*. Ano 5, n. 52, 2003.
- MAGNAVITA, L. P.; SILVA, R. R. da.; SANCHES, C. P. Guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 13, p. 301-334, 2005.
- MANCINI, M. *et al.* Multinational prediction of soil organic carbon and texture via proximal sensors. *Soil Science Society of America Journal*. v. 88. 2023.
- MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; CARVALHO, A; FORTI, M. C; Use of pedological maps in the identification of sensitivity of soils to acidic deposition: application to Brazilian soils. *Anais... da Academia Brasileira de Ciências*, v. 76, n. 1, março, pp. 139-145. Academia Brasileira de Ciências. Rio de Janeiro, Brasil. 2004.
- MELO, V. de F.; ALLEONI, L. R. F. *Química e Mineralogia do Solo: conceitos básicos e aplicações*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo (SBSC): Viçosa, p. 1381. 2009
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T.; BAPTISTA, G. M. de M. *Reflectância dos Materiais Terrestres: análise e interpretação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019.
- MOURA-BUENO, J. M. *et al.* Erosão em áreas de encosta com solos frágeis e sua relação com a cobertura do solo. *Revista Scientia Agrária*, v.19, p. 102-112. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5380/rso.v19i1.53738>. 2018. Acesso em: 09 set. 2023.
- MOURA-BUENO, J.M., *et al.* Estratificação de uma biblioteca espectral local VIS-NIR-SWIR por critérios de homogeneidade produz previsões mais precisas de carbono orgânico no solo. *Geoderma*, 337 p. 565-581, 2019.
- MOUSAVI, F. *et al.* Diffuse reflectance spectroscopy for rapid estimation of soil Atterberg limits. *Geoderma*, v. 361, 114083. 2020.
- NEWTON, P.; CIVITA, N.; FRANKEL-GOLDWATER, L.; BARTEL, K.; JOHNS, C. What is regenerative agriculture? a review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Front. Sustain. Food Syst.* v. 4, p.194. 2020.doi: 10.3389/fsufs.2020.577723.
- NOVAIS, R. F. *et al.* *Fertilidade do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. (SBSC): Viçosa, p. 1017. 2007.
- NOVAIS, R.F. et L. *Fertilidade do Solo*. Viçosa: SBSC, p. 1017. 2007.
- PEREIRA, D. G. C. *et al.* Litter decomposition and nutrient release in different land use systems in the Brazilian semi-arid region. *Catena*, v. 231, p. 107-345, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107345>. Acesso em: 23 jun. 2023.

- POMMIER, A.A.M. T. *et al.* Clément. The added value of including key microbial traits to determine nitrogen-related ecosystem services in managed grasslands. *J. Appl. Ecol.*, 55, 1, p. 49-58, 2017.
- POMMIER, T. *et al.* The added value of including key microbial traits to determine nitrogen-related ecosystem services in managed grasslands. *Journal of Applied Ecology*, v. 55, n.1, p. 49-58. 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13010>. Acesso em: 23 jun. 2023.
- RATTAN, L. Societal value of soil carbon. *Journal of Soil and Water Conservation*. v. 69, n. 6, p.186A – 192, 2014.
- REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Tillage Res.*, v. 43, p.131-167, 1997.
- RIBEIRO S, G.; OLIVEIRA M, R. R; LOPES L M; COSTA M. C. G; TOMA, R. S; ARAÚJO I. C. da S; MOREIRA, L. C. J; TEIXEIRA, A. dos S . Reflectance spectroscopy in the prediction of soil organic carbon associated with humic substances. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. v. 47. 2023. Disponível em: 10.36783/18069657rbc20220143. Acesso em: 23 jun. 2023.
- RICHTER, T. N.; JARMER, S.; CHABRILLAT, C.; OYONARTE, P.; HOSTERT, KAUFMANN, H. Free iron oxide determination in Mediterranean soils using diffuse reflectance spectroscopy. *Soil Science Society of America Journal*, 73, 1, p. 72-81, 2009.
- RODALE INSTITUTE. *Regenerative Organic Agriculture*. 2022. Disponível em: <https://rodaleinstitute.org/why-organic/organic-basics/regenerative-organic-agriculture/>. Acesso em: 22 mar. 2022.
- ROMÃO, R. L. *Carbono orgânico em função do uso do solo*. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo), p. 47, 2012. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2012.
- SALVIANO, A. M. *et al.* Potencialidades e limitações para o uso agrícola de solos arenosos na região semiárida da Bahia. *Magistra*, v. 28, n. 2, p. 137-148, 2016.
- SANTOS, P. S. *Ciências e tecnologia de argilas*. 2. ed ed. São Paulo:1989.
- SATO, M. V. *Primeira aproximação da biblioteca espectral de solos do Brasil: caracterização de espectros de solos e quantificação de atributos*. Dissertação (Mestrado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas), p. 103, 2015. Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2015.
- SCHOBBER, P.; BOSSERS, S. M.; SCHWARTE, L. A. Statistical Significance Versus Clinical Importance of Observed Effect Sizes: What Do P Values and Confidence Intervals Really. *Represent Anesth Analg*. mar., v. 126, n. 3, p. 1068-1072. 2018.
- SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture: the soil is the base. *Global Food Secur.*, 26, 2020.
- SHANGGUAN, J.; LI Z.; DENG, L. Dynamics of soil microbial metabolic activity during grassland succession after farmland abandonment. *Geoderma*, v. 363, Article 114167, 2020.
- SILVA-SANGOI D. V. *et al.* Soil organic matter and clay predictions by laboratory spectroscopy: Data spatial correlation. *Geoderma Regional*. v. 28, 2022.

- Simulated country-scale adoption of reduced tillage, cover cropping, and ley-arable integration using RothC. *Science of the Total Environment*, v. 825, 153955, p. 1-9, 2022.
- SOLOMON D. *et al.* Long-term impacts of anthropogenic perturbations on dynamics and speciation of organic carbon in tropical forest and subtropical grassland ecosystems. *Glob Chang Biol*, 13, p. 511–530, 2007.
- SOUZA, J. L. de.; RESENDE, P. *Manual de Horticultura Orgânica*. Aprenda Fácil: Viçosa, 3. ed., p. 841. 2014.
- SOUZA, S. F. *et al.* Sensoriamento remoto no estudo de solos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. Foz do Iguaçu. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2013.
- STEVENS, A.; NOCITA, M.; TÓTH, G.; MONTANARELLA, L.; VAN WESEMAEL, B. Previsão do carbono orgânico do solo à escala europeia por espectroscopia de reflectância no visível e no infravermelho próximo. *PLoS ONE*. v. 8, n. 6, 2013.
- STEVENSON, F. J. *Humus chemistry: genesis, composition, reactions*. 2nd ed. New York: J. Wiley and Sons, p. 512. 1994.
- TERRA, F.S. *Espectroscopia de reflectância do visível ao infravermelho médio aplicado aos estudos qualitativos e quantitativos de solos*. Tese de doutorado, 374p. Piracicaba, 2011.
- TUMSAVAS, Z. *et al.* Prediction and mapping of soil clay and sand contents using visible and near-infrared spectroscopy. *Biosystems Engineering*, v. 177, p. 90–100. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.06.00>. Acesso em: 22 mar. 2022.
- VAREJAO, F. G. *et al.* Upper Aptian mixed carbonate-siliciclastic sequences from Tucano Basin, Northeastern Brazil: Implications for paleogeographic reconstructions following Gondwana break-up. *Cretaceous Research*, v. 67, p. 44-58, Dec. 1. 2016.
- VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. *Soil Science Society of America Journal*, v.58, p.175-180, Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010025x>. 1994. Acesso em: 22 mar. 2022.
- VICENTE, L. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C. MARCIANO, C. R. Organic carbon within soil aggregates under forestry systems and pasture in Southeast region of Brazil. *Catena*, 182, p. 104-139, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104139>. 2019. Acesso em: 22 mar. 2022.
- VICENTE, L.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; ALEIXO, S. Composição química do carbono orgânico em frações de densidade de agregados em sistemas agroflorestais de cacau no sul da Bahia, *J Solo Sci Planta Nutr*, Brasil, 2023.
- VISCARRA ROSSEL, R.A. *et al.* Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. *Geoderma*, v. 131, p. 59–75. 2006.
- VISCARRA ROSSEL, R.A.; BEHRENS, T. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. *Geoderma*, v. 158, p. 46–54, 2010.

- VISCARRA ROSSEL, R.A.; MCGLYNN, R.N.; MCBRATNEY, A.B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. *Geoderma*, 137, 70–82. 2006.
- VISCARRA ROSSEL, R.N. MCGLYNN, A.B. MCBRATNEY. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV–vis–NIR diffuse reflectance spectroscopy. R.A. *Geoderma*. v.137, Edições 1–2, p. 70-82. 2006.
- WHITE, C. Por que agricultura regenerativa? *Revista Americana de Economia e Sociologia*, v. 79, n. 3, 2020.
- WHITE, K. *et al.* Mapping the iron oxide content of dune sands, Namib Sand Sea, Namibia, using Landsat Thematic Mapper Data. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.62, p.30-39, 1997.
- YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19, p. 1467-1476, 1988.
- Yudina, A. V. *et al.* Micro- within macro: How micro-aggregation shapes the soil pore space and water-stability. *Geoderma*, v. 415, p. 115, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.115771>. Acesso em: 22 jun. 2024.
- ZHANG, Z. *et al.* Strategies for the efficient estimation of soil organic matter in salt-affected soils through Vis-NIR spectroscopy: Optimal band combination algorithm and spectral degradation. *Geoderma*, v.382, p.114–129, 2021.

## **CAPÍTULO IV: CONVIVENCIA COM A SECA NA AGRICULTURA REGENERATIVA DE BASE AGROECOLÓGICA SOB A ÓTICA DO METABOLISMO SOCIAL AGRÁRIO (MSA): CONSIDERAÇÕES INICIAIS NO SEMIÁRIDO.**

### **RESUMO**

A agricultura regenerativa de princípios agroecológicos pode ampliar as possibilidades de eficiência energética de um agroecossistema. Em solos arenosos do semiárido alcançar esta eficiência é mais desafiador, uma vez que o déficit hídrico, aliado a falta de nutrientes e retenção de água do solo pode inviabilizar o fluxo externo de energia, aumentando assim a demanda energética do sistema. Neste sentido, com o objetivo de obter respostas preliminares acerca de um organismo agrícola que desenvolve um manejo regenerativo no semiárido brasileiro e validar as estratégias de convivência com a seca, foi aplicado cálculos de medição de eficiência energética do agroecossistema sob a ótica do metabolismo social agrário. Para isso foi realizado um levantamento de dados quantitativo e qualitativo, incluindo entrevistas-semiestruturadas, questionários, consulta ao IBGE, levantamento de espécies vegetais *in situ*. Os resultados mostraram que o fluxo interno de energia está sendo alimentado em maior proporção pela biomassa seca daquilo que está sendo reinvestido a partir do funcionamento ecológico do organismo agrícola, resultando assim em um índice PPL - EROI positivo. Estes resultados validam as estratégias agroecológicas de convivência com a seca aplicada pelos agricultores na regeneração do solo, bem como incentiva novas propostas agroecológicas de produção de alimentos e de animais em solos arenosos na região do semiárido, bem como para o aprofundamento do estudo do metabolismo social agrário em Jardins Marizá e em outras regiões do semiárido brasileiro.

Palavras-chave: Eficiência energética. Produtividade primária líquida. Biomassa seca. Metabolismo social agrário. Semiárido.

## 1 INTRODUÇÃO

A temática da soberania e segurança alimentar caminha a passos lentos junto à população urbana. A maior parte da população dos centros urbanos mantém-se distante da discussão dos riscos dos alimentos processados e/ou ultraprocessados, sustentando um sistema hegemônico que considera o alimento enquanto mercadoria e mantém uma relação distante com o campo, com os alimentos naturais e com a democratização do acesso à terra.

O conceito de Soberania Alimentar inclui o direito de os povos escolherem como planejar a produção, distribuição e consumo dos seus alimentos, numa estreita relação com temas com modelos produtivos sustentáveis e de eficiência energética pautados no fortalecimento da agricultura familiar e, mais recentemente e cada vez mais intensamente, nos pilares da Agroecologia.

A agricultura regenerativa de princípios agroecológicos amplia as possibilidades da soberania alimentar por considerar o uso eficiente do potencial fotossintético de combinações de espécies vegetais (anuais e perenes), a restauração de solos e ecossistemas, as interações biológicas, os serviços ecossistêmicos, a integração de plantas e animais, e os valores sociais e humanos inerentes à unidade de produção (Luján Soto et al., 2020; Schreefel et al., 2020; Giller et al., 2021).

Em regiões áridas e semiáridas onde o índice pluviométrico reduzido é um grande desafio para os agricultores, é importante a adoção de estratégias de produção e de convivência com a seca, sendo a agricultura regenerativa uma prática potencial associada à maior sustentabilidade desses agroecossistemas.

As formas de avaliar a entrada e saída energética de um sistema produtivo tem ocorrido não apenas do ponto de vista clássico que envolve os critérios de produção. Sobretudo, tem ocorrido sob a ótica agroecológica dos agroecossistemas, possibilitando alcançar uma melhor compreensão do funcionamento energético e suas possibilidades sustentáveis de produção (Guzmán; Molina, 2015; Guzman et al., 2017). Como instrumento de análise desta eficiência, tem-se o “Retorno de Energia sobre Investimento” (EROI) que atua com um indicador numérico capaz de permitir tomadas de decisões e comparações de processos energéticos metabólicos em condições de espaço e tempo semelhantes (Hall et al., 2017; Murphy et al., 2011). Quando aplicado à agricultura, mede a quantidade de energia investida para

obter uma unidade de energia na forma de biomassa (Gúzman et al., 2017), o que seria identificado como “custo energético” da biomassa líquida produzida e disponibilizada para uso pela sociedade, na forma de alimentos, matérias-primas ou biocombustíveis (Scheidel; Sorman, 2012; Guzmán & Molina, 2015). Do ponto de vista agroecológico, este enfoque ocorreu com o objetivo de medir a capacidade de um agroecossistema em manter suas próprias funções ecossistêmicas essenciais (Tello et al., 2016; Guzmán et al., 2014; Guzman; Molina, 2015). O EROI agroecológico torna-se um meio de mensurar a saúde do ambiente e comparar níveis de sustentabilidade de um agroecossistema (Guzman, Molina, 2015)

Neste sentido, avaliar o custo energético que envolve um sistema produtivo agrícola é de grande importância para compreensão da quantidade de energia que está sendo exigida para o desempenho do agroecossistema, especialmente aquelas de fonte externa, a qual enfrenta o desafio de reduzir as demandas energéticas e consequentemente os Gases de Efeito Estufa (GEE) (Tello et al., 2016; Gúzman et al., 2017). Quando estes critérios de eficiência energética estão atrelados a condições mais restritas de produção agrícola sustentável que envolvem o déficit hídrico, bem como solos arenosos pobres em nutrientes, essa análise tende a ser ainda mais desafiadora, levando a reconhecer a necessidade de investimento energético que seja coerente as relações de convivência com a seca e que seja capaz de produzir biomassa nas condições mais apropriadas a este sistema.

O Metabolismo Social Agrário (MSA) é um campo de estudo que investiga o intercâmbio de energia, materiais e informação dos agroecossistemas com seu meio ambiente social e ecológico. Ele relaciona o estudo dos fluxos biofísicos que mantêm a geração de biomassa e os serviços ambientais, sendo muito importante para as investigações no campo agroecológico, contemplando inclusive como se dá à apropriação da biomassa pela sociedade (Molina, 2019; Molina, Toledo, 2011). Torna-se cada vez mais emergente a compreensão dos fluxos de energia em um agroecossistema. A partir disso é possível avaliar os impactos ambientais positivos que a agricultura de base agroecológica vem somando a estes ambientes. Podendo até mesmo mitigar os efeitos das mudanças climáticas prevenindo assim a emissão de gases do efeito estufa, a partir do sequestro do carbono pelo manejo sustentável dos solos. Avaliar estes critérios em uma condição semiárida, onde os agricultores buscam estratégias de convivência com seca e desbravam um solo degradado para produzir alimentos de maneira sustentável é uma das maneiras de incentivar a

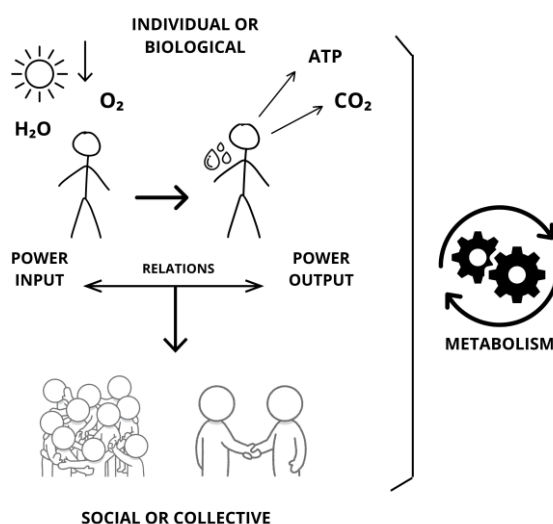
agroecologia e a possibilidade de regeneração de um solo através da resiliência de um povo.

Diante do exposto, o objetivo deste artigo foi apresentar considerações iniciais de um modelo agrícola de eficiência energética manejado pela agricultura regenerativa na relação de convivência com a seca na ótica do metabolismo social agrário.

## 1.1 COMPREENDENDO OS FLUXOS ENERGÉTICOS

Compreender a complexidade de um sistema socioecológico requer conhecimento sobre variáveis específicas e como suas partes componentes estão relacionadas à medida que os recursos ambientais são utilizados (Ostrom, 2009). Nesta proposta estão os fluxos de energia, materiais e informações que envolvem as relações do ser humano com o meio ambiente, sejam elas individuais ou biológicas, coletivas ou sociais na perspectiva da atividade metabólica (Molina et al., 2019) (Figura 1). Uma analogia seria o corpo humano, o qual troca fluxos de entrada e saída de energia em forma de  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $CO_2$ , ATP e constantemente requer o funcionamento de um metabolismo biológico. Para que este metabolismo opere beneficiando outros compartimentos orgânicos se faz necessário a compensação em formas de energia a partir de bons hábitos, como alimentação, sono, atividade física, de maneira que não ocorra um déficit energético e gere um desgaste orgânico. Na atividade metabólica ocorre o intercâmbio de energia e materiais com o meio ambiente. Isso possibilita compreender a relação entre a sociedade e a natureza como uma relação metabólica (Molina, Alier, 2001; Molina et al., 2019).

Figura 1 - Fluxo de energia das relações humanas que podem ser individuais ou biológicas e coletivas ou sociais



Fonte: Elaborado pela autora adaptado de Molina *et al.* (2019)

No Metabolismo Agrário (MA) estima-se a Produtividade Primária Líquida (PPL) ou Produtividade Primária Neta (PPN) do agroecossistema através do manejo desempenhado pelos membros sendo contabilizada a biomassa vegetal produzida dos produtos colhidos e de todas as partes não colhidas, incluindo a biomassa do sistema radicular das plantas levando em consideração a análise sustentável da unidade (Molina et al., 2019). O MA responde acerca da capacidade de produção e reprodução da biomassa de um sistema agrícola no tempo e espaço, tendo como principal indicador a PPN que é uma taxa quantificada na forma de matéria seca ou energia bruta (t/ha/ano; MJ/h/ano).

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

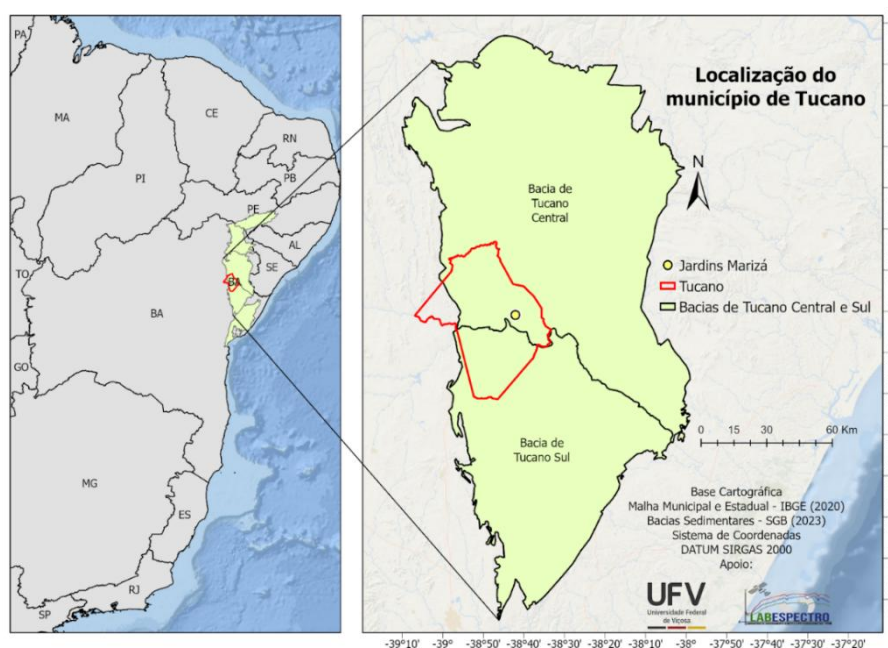
### **2.1 ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudos denominada Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano.

#### **2.1.1 Caracterização da área**

A área de estudos denominada Jardins Marizá localiza-se na sub-bacia Tucano Central próximo ao limite da sub-bacia do Tucano Sul pela zona de acomodação do rio Itapicuru (Figura 2) na região de Tucano na Bahia.

Figura 2 – Localização da área de estudo Jardins Marizá na Sub-bacia Tucano Central no município de Tucano – BA.



Fonte: UFV (200-)

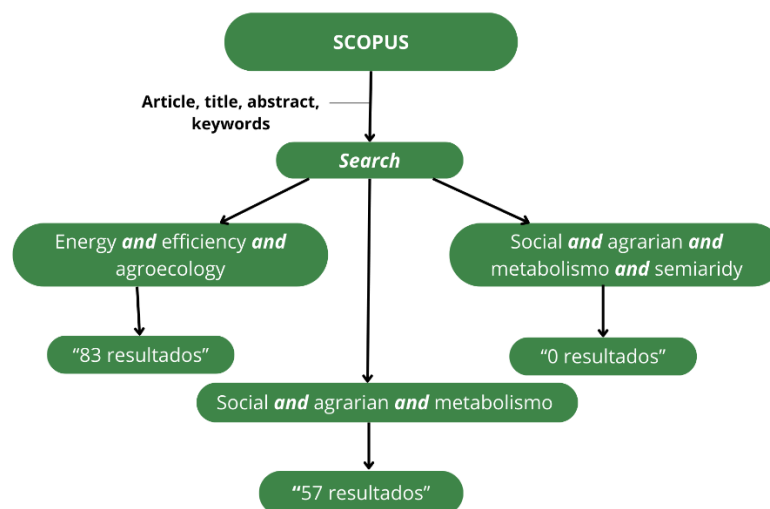
O clima da região é predominante do tipo estepe local e classificado como BSh (classificação de Köppen e Geiger, 1928). A precipitação média anual é de 463 mm, com temperatura média de 25,4 °C. A vegetação predominante é formada por pastagens entremeadas por áreas com fragmentos de Caatinga (INEMA, 2017). O solo do local foi descrito e classificado como um Neossolo Quartzarênico Distrófico neofluvissólico (> 90% de areia), de ocorrência em relevo suave ondulado, em terço médio de encosta e originário de sedimentos arenosos provenientes da alteração de rocha sedimentar da Formação Marizal.

O sistema de manejo adotado pelos agricultores envolve práticas regenerativas de base agroecológica, dentre elas aquelas que oferecem o consórcio entre espécies anuais e perenes, plantas de cobertura, uso de composto orgânico, pastejo rotacionado de animais, policultura, cobertura do solo e cercas-vivas. Apesar de ser um Neossolo Quartzarenico a agricultura regenerativa que vem sendo desenvolvida há 20 anos tem regenerado o solo, incorporando carbono, conforme foi demonstrado nos resultados dos capítulos anteriores. Este tipo de agricultura vem possibilitando serviços ecossistêmicos diversos a partir da interação planta-animal e da biodiversidade como um todo.

### 2.1.2 Levantamento dos dados

O estudo aplicou metodologias qualitativas e quantitativas e amplo levantamento bibliográfico. Parte deste levantamento foi composto pela busca de periódicos com palavras-chave fundamentais na base de dados da Scopus (Figura 3), onde verificou-se não haver artigos publicados (até aquele momento) com o tema do MSA no semiárido. Os estudos encontrados trazendo a temática do semiárido se resumiu em duas dissertações (Matias, 2017; Silveira, 2021) e um capítulo de livro (Fávero; Monteiro, 2021) que trouxe um recorte da pesquisa de Matias (2017). Para as coletas de dados primários, foram realizadas entrevista semiestruturadas, questionários, conversas informais, levantamento da vegetação in situ e observação de campo. Foi feita consulta também no IBGE. Os dados foram compilados em sua maioria no Laboratório de História de los Agroecossistemas da Universidade Pablo de Olavid – UPO em Sevilla – ES pela coordenação do professor Manoel González de Molina.

Figura 3 - Levantamento bibliográfico realizado em 23/10/2024 através da base SCOPUS.



Fonte: Base SCOPUS 2024.

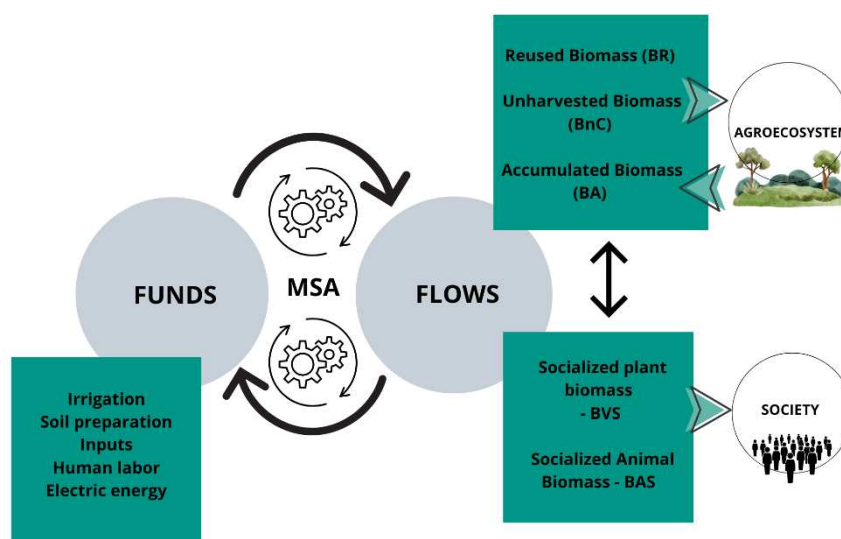
Para o levantamento da cobertura vegetal agrícola foi realizado o método da corda (transecto de linha) adaptado de (Brower; Zar, 1984). Para tal, uma corda de 20 metros foi marcada com pontos a cada 2 metros. Em cada projeção do ponto dentro de um raio de 80,00 cm foi avaliada para cada lado a presença de espécies

agrícolas. Para contabilizar o estrato arbóreo, foi marcada a presença da projeção da copa dentro do respectivo ponto.

## 2.2 DESCRIÇÃO DOS FLUXOS DE BIOMASSA E INDICADORES UTILIZADOS

Os fluxos representam a energia e materiais necessários associados a entrada de energia através da biomassa e os fundos que são as estruturas que transformam estes fluxos em bens e serviços (Guzman et al., 2014). A partir deste pressuposto foi elaborado um fluxograma para alcance metodológico de uma abordagem inicial a partir de considerações preliminares de como ocorre o metabolismo social agrário em Jardins Marizá (Figura 4). É válido ressaltar também que os índices de colheita, raiz e resíduos que são comumente utilizados em estudos do metabolismo agrário foram aplicados como caráter investigatório apenas para as culturas anuais. No entanto, não foram trazidos para a discussão dos dados. Os indicadores utilizados neste trabalho foram das dimensões sociais (horas de trabalho, nº de trabalhadores) e agroambientais (uso eficiente da água, preparo do solo, insumos, qualidade do solo).

Figura 4 - Descrição das relações de fluxos e fundos avaliados de forma preliminar no modelo de eficiência energética em Jardins Marizá, Tucano – BA.



Fonte: Elaborado pela autora.

## **2.3 DESCRIÇÃO DOS CÁLCULOS DAS CATEGORIAS DE BIOMASSA**

### **2.3.1 - Biomassa Vegetal Socializada (BVS)**

Se enquadra na biomassa vegetal que é ofertada a sociedade (grupo de pessoas), a qual se beneficia daquilo que é extraído diretamente do agroecossistema. Do mesmo modo ocorre para a biomassa animal socializada, que juntas compõem a biomassa total socializada. Para encontrar os valores de produção das culturas agrícolas (milho, feijão, abóbora, melancia, amendoim, mandioca, palma forrageira, plantas espontâneas) correspondentes a biomassa vegetal socializada (BVS) foram consultados dados do censo agropecuário do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (2017) e considerou-se estimativas em entrevista feita aos agricultores. Para tal foi considerado kg/ano da área total (aproximadamente 7 há). Para as plantas espontâneas que são manejadas como melhoradoras de solo no sistema, como parte do composto orgânico, bem como na dieta pela família usou-se a quantidade de 3.373,75 kg/MS por hectare para herbáceas na Caatinga (Matias, 2017). Logo, para 7 hectares 23.616,25 kg/MS. Já as árvores forrageiras que são utilizadas em parte na dieta pela família (vagens, sementes, folhas), bem como oferecida aos animais (aproximadamente 15 kg/dia para os animais). Ao considerar 10 animais, sendo 8 vacas e 2 carneiros encontrou-se o valor da biomassa reutilizada (BR) em 45.771 MF/ano. A partir deste resultado estimou-se para 2 hectares (área proporcional ao plantio) o total de árvores forrageiras para BVS em 45.771 MF/ano. Em relação a palma forrageira foi informado pelos agricultores que fornecem em média 10kg para os animais. Da mesma forma foi encontrado o valor para BR em 30.514 e a partir do resultado encontrou-se o valor total de palma forrageira para 2 hectares. Para calcular a produtividade do capim Green Panic foi considerado que no semiárido a produção pode variar em 9.267,14 MF/kg por hectare ao ano (Albuquerque, 1988). Logo, para 7 hectares tem-se 64.869 de MF/kg/ano. Este valor subtraído por 7.325,33 kg de massa fresca do capim resulta em 57.544,65 kg de massa fresca, correspondente o valor que consta na BVS.

### **2.3.2 Biomassa Animal Socializada (BAS)**

Em relação a biomassa animal socializada, os valores de leite, ovos e carne foram estimados a partir das informações adquiridas pelo questionário e entrevista

com os agricultores. Para a produção de leite o número de 8 vacas produz em média 5 l/dia, correspondendo 14.600 l/ano. Ao converter em Kg considerou-se a densidade do leite aproximada de 1,03 kg/L e multiplicou-se pelo correspondente valor em L/ano, resultando em 15.038,00 kg de leite. Para os ovos foram considerados o número de 27 galinhas com produção diária média de 1 (UM) ovo cada para 200 dias /ano (levando em consideração o fator da seca, altas temperaturas e disponibilidade de alimento). Para estimar o valor da dúzia, o total de 5400 ovos foi dividido por 12 resultando em 450 DU. Considerando que uma dúzia tem aproximadamente o peso de 720 g tem-se o valor total em gramas de 324.000 g o que foi equivalente a 324 kg. Para obter os valores da carne de 40 Kg, considerou-se o nº de animais (2 carneiros) – as vacas não são abatidas e sim vendidas em feiras livres - abatidos ao ano e multiplicou-se pelo valor em média de 20 kg/animal de acordo com Santos e colaboradores (2022). Segundo a agricultora, quando há ovos em maior quantidade, algumas dúzias são vendidas na feira pelo valor de R\$ 12,00, sendo obtido ao ano uma média de R\$ 144,00. Em relação as vacas, as mesmas permanecem no sistema por aproximadamente um período de 10 anos.

### **2.3.3 Biomassa Reutilizada (BR)**

A BR é a biomassa que retorna ao agroecossistema de forma intencional pelo agricultor, sendo a reincorporação dependente do trabalho humano e o agricultor consciente da sua importância agronômica. Para BR foram considerados as proporções de feijão, palma forrageira, milho e árvores forrageiras que são oferecidas na dieta dos animais (vacas, carneiros e galinhas). De acordo com observação de campo feita pelo agricultor, o qual acompanhou os animais no pasto, há o consumo aproximado de 10 Kg de palma forrageira/dia e 15 kg de árvores forrageiras/dia por vaca. No entanto, como são 8 vacas e 2 carneiros, foi estimada a quantidade do que seria ingerido pelos carneiros (70 kg) proporcionalmente ao peso da vaca (400 kg). Logo, se uma vaca consome 15 kg de árvores forrageiras/dia, um carneiro com 18% do seu peso consome 2.7 kg de árvores/forrageiras. O consumo total de árvores forrageiras pelas vacas e carneiros seriam 43.800 MF/ano e 1.971 MF/ano respectivamente. Da mesma forma procedeu-se com a palma forrageira. Para o cálculo do Capim Green Panic utilizado como forragem para os animais e cobertura para o solo, foi estimado pelo que faltava complementar na dieta dos animais (8 vacas e 2 carneiros) incluindo a palma forrageira e árvores forrageiras

(29.247,67 kg / MS). O consumo médio de matéria seca (MS) dos animais é cerca de 3% do peso vivo por dia. Considerando que a vaca pesa em média 400 kg cada e o carneiro 70 kg cada, fez-se o cálculo do número de animais (8 vacas e 2 carneiros) X peso (400 e 70) X consumo (0,03). Assim, obteve-se o valor de 100, 2 kg /dia e 36.573 kg MS/ano pelos animais. Para encontrar a necessidade de suplementação com capim, considerou-se o valor de 29.247,67 kg/MS/ano (palma e arvores forrageiras) e subtraiu pela necessidade do consumo dos animais de 36.573 kg MS/ano. O resultado de - 7.325,33 kg /MS é a quantidade de capim consumida como forragem pelos animais. É válido ressaltar que o esterco produzido pelos animais é reutilizado na produção de um composto orgânico com finalidade de adubação. No entanto, não é quantificado diretamente como biomassa e sim está contido indiretamente no percentual consumido de capim pelos animais, já que os animais comem e excretam na forma de esterco. Estimou-se o valor de reutilização da madeira (algaroba) em média 500 un/ano para produção de estacas com peso médio de 7 kg. As espécies vegetais Jurubeba (*Solanum paniculatum*), lãzinha (*Cochlospermum vitifolium*), Sisal (*Agave sisalana*), babosa (*Aloe barbadensis*) são utilizadas na mistura do composto orgânico para adubação, elaborado pelos agricultores, tendo sido devidamente pesadas e informadas para compor os dados deste estudo. Para o cálculo da palhada que é utilizada como cobertura de solo, foi considerado a quantidade em matéria fresca da BVS do milho. Estimou-se a quantidade de palhada que pode variar (Stella et al., 2019) com base na estimativa de 1,5 a 2 vezes o peso das espigas (embora isso possa variar dependendo do cultivo e da variedade). Com isso, multiplicou-se 476 pelo fator de palhada (1,5) resultando em 714 Kg / MF de produção de palhada. Para o cálculo da MS este valor foi multiplicado por 0,83 (Velloso et al., 1977) correspondente ao teor de matéria seca (MS) na palhada do milho.

Para o cálculo de palhada do capim, assumiu-se que a palhada residual representa uma estimativa de 50% da biomassa seca total (Cândido et al., 2005; Lange et al., 2013). Então foi multiplicado pelo teor da MS da BVS do capim, resultando em aproximadamente 10.070,3 kg/MS de palhada residual.

### **2.3.4 Biomassa não colhida (BnC)**

A biomassa não colhida é aquela que volta ao agroecossistema de maneira espontânea sem ter a intermediação do agricultor. Logo, não depende de trabalho

humano e pode ser dividida em biomassa não colhida da parte aérea e biomassa não colhida radicular. Para o cálculo da biomassa subterrânea de árvores, foi feita a soma dos valores de massa fresca de “árvores forrageiras” da BVS e BAS, depois a conversão pelo fator 0,54 resultando em 49.433 kg/MS. Em seguida, considerando que 60% da biomassa subterrânea está ativa e coberta pelo solo (raízes finas e grossas, rizomas e micorrizas) (Schroth & Sinclair, 2003; Vogt et al., 1998) aplicou-se a relação raiz: parte aérea (R:S) multiplicando  $49,433 \times 0,60$  resultando em 29.659,8 kg /MS nas raízes. Este valor foi multiplicado por 17,57 MJ/kg (Guzmán et al., 2014) correspondente a cobertura vegetal e obteve-se a energia bruta em J/ha/ano.

O cálculo da biomassa aérea coberta ocorreu de forma semelhante, no entanto foi considerado apenas o teor de BVS sendo 24.716,34 multiplicado por 0,70 (Silva; Sampaio, 2008) correspondente a 70% da biomassa aérea coberta (parte interna protegida pelo dossel). Em geral, a proporção da biomassa aérea nos caules e galhos mais grossos ocorre a partir de 70% (Salis et al., 2006; Peichl, Arain, 2007; Paul et al., 2008), que são proporções semelhantes às encontradas nas plantas da caatinga (Silva; Sampaio, 2008), resultando em 17.301,4 kg /MS.

### **2.3.5 Biomassa Acumulada (BA)**

A BA é aquela que se acumula na estrutura aérea e radicular das espécies perenes. Para a biomassa acumulada foram consideradas biomassa da raiz de leguminosas, capim e plantas espontâneas. Para as plantas espontâneas obteve-se a BVS de 23.616,25 kg/MS e subtraiu-se pelo possível consumo extra pelos animais a 10% adicionais da sua ingestão total (36.573 kg/MS). Ou seja, mesmo com uma dieta balanceada, os animais podem consumir de 5% a 10% adicionais da sua ingestão total de MS se houver disponibilidade de biomassa extra, como plantas espontâneas. Assim,  $36.573 \times 0,10 = 3.657,3$  kg MS/ano. Logo,  $23.616,25 - 3.657,3$  resultando em 19.958,95 kg MS/ano de biomassa acumulada de plantas espontâneas. Para o cálculo da relação R:S considerou-se que as raízes representam 35% da biomassa total. Logo, obtendo 6.985,63 kg/ MS/ano.

Para a biomassa do capim foi considerado a BVS da matéria fresca do capim e dividiu-se pela relação da biomassa aérea: biomassa radicular que pode variar entre 4:1 e 5:1. O que significa que para cada 4 a 5 kg de biomassa aérea, há

aproximadamente 1 kg de biomassa de raiz (Fageria et al., 2008; Almeida et al., 2023). Logo,  $57.544,65 / 4,5$ , resultando em 12.787,7 kg/MF.

Para o cálculo da biomassa das leguminosas arbóreas foi considerado o levantamento de espécies vegetais que ocorreu *in situ* pelo método do transecto (20 m) a cada 2 m registrava-se um ponto de coleta das espécies presentes em três repetições na área de manejo regenerativo de 10 anos, tendo sido encontrado 22 indivíduos entre leucena, gliricidea, algaroba e sabiá. Mediante o número de indivíduos fez-se a projeção para 336 m<sup>2</sup> (área total) resultando em 123,2. Em seguida calculou-se para 7 hectares, sendo a quantidade total de 862,4 indivíduos. Assumindo que cada planta tem uma biomassa aérea média em torno de 10 kg de MS (isso pode variar a depender do tamanho, idade e condições de cultivo) e que a biomassa subterrânea é 60% da biomassa aérea (Schroth, Sinclair, 2003; Vogt et al., 1998) foi multiplicada a biomassa subterrânea por indivíduo pelo número total de indivíduos para obter a biomassa acumulada total de raízes. Logo,  $10 \text{ kg} \times 0,60 = 6 \text{ kg}$  de raiz por indivíduo, sendo multiplicado por 862,4 é igual a 5.174,4 kg de MS de raiz de leguminosas arbóreas.

### 2.3.6 Fluxo externo

Para calcular o investimento pela irrigação por gotejamento realizado no sistema, obteve-se o gasto de 648 m<sup>3</sup>/ha junto aos agricultores e transformou-se em energia bruta em MJ/há. Da mesma forma ocorreu para o uso da maquinária em campo (trator). Mediante modelo do trator Massey Ferguson 2640 (Ano 1980 – 1985) obtido com os agricultores, obteve-se o peso do mesmo em 5640 kg. A partir disso, o peso foi multiplicado por 78 MJ/kg que corresponde o consumo energético por quilo de maquinária, resultando em 439.920 MJ/kg/há (Gúzman et al., 2017). Para medir o consumo do trabalho humano foram somadas as horas de trabalho em campo, incluindo as atividades de manejo e preparo do solo, do composto e dos animais. No caso do solo, incluindo o plantio e a colheita que ocorrem apenas em uma determinada época correspondente ao período chuvoso. Com o resultado 772 h/há/ano multiplicou-se pelo equivalente energético da atividade de trabalho humano manual que é de 1,95 MJ (Tabatabaeefar et al., 2009) obtendo a energia bruta de 1.505,4 MJ/há.

Para a estimativa do consumo elétrico, a partir do gasto aproximado mensal de R\$ 500,00 de acordo com informação transmitida pelos agricultores foi feita a

estimativa do consumo. Para tal, foi considerada uma tarifa média de R\$ 0,80 /kWh para consumidores rurais. Depois com o valor de 500 aplicou-se uma divisão ( $500/0,80$ ) resultando em 625 kWh. Sabe-se que 1 kWh corresponde a 3,6 MJ. Logo, o consumo mensal em MJ será  $625 \times 3,6$  que é igual a 2.250 MJ/mês. Para conversão a ano multiplicou-se por 12 e obteve-se o resultado de 27.000 MJ/ano. Para a conversão do investimento feito em sementes no valor de R\$ 100,00 /ano foi considerado um preço médio de R\$ 15,00/kg para diferentes sementes (feijão, milho, sorgo) e então dividiu-se  $100/15$ , o resultado em 6,67 kg é a quantidade aproximada de sementes. Em seguida, mediante o conteúdo energético médio das sementes que podem variar considerou-se uma média de 15 MJ/kg (NRC, 2012). Logo,  $6,67 \times 15 = 100$  MJ de energia bruta em gasto com sementes.

## **2.4 CONVERSORES DE ENERGIA**

No estudo do Metabolismo Social Agrário (MSA), os conversores de energia são usados para estimar a quantidade de energia armazenada e transformada na biomassa. O fator de conversão energético da biomassa permite calcular a quantidade de energia bruta (MJ/kg) disponível em diferentes componentes presentes no agroecossistema. Para realização do referido trabalho buscou-se na literatura fatores de conversão compatíveis aos componentes pesquisados, incluindo referências produzidas no Brasil e, em particular, no semiárido. No entanto, a base de dados mais utilizada foi da Sociedade Española de Historia Agraria - Documentos de Trabalho DT-SEHA n. 1406 Guzmán et al 2014 (Tabela 1).

## **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

De acordo com a aplicação dos conversores energéticos, foi possível encontrar a Produtividade Primária Líquida (PPL) e os respectivos valores das categorias de Biomassa Vegetal Socializada (BVS), Biomassa Reutilizada (BR), Biomassa não Colhida (BnC) e Biomassa Acumulada (BA) (Tabela 2).

Tabela 1 – Fatores de conversão utilizados para o cálculo da quantidade de energia bruta (MJ/kg) dos componentes da biomassa.

Energy conversion factor used in				
biomass components			Reference	
Biomass	Raw Energy <sup>1</sup>	MJ/kg		
		Raw Energy <sup>2</sup>	MF/MS	
			1	2
Green bean	15,59			
Bean	15,59			
Corn / Maize	14,44			
Pumpkin / Squash	1,04		Gúzman et al., 2014	
Watermelon	0,9			
Peanut	26,77			
Cassava	6,92			
Forage cactus	14	0,17	Rodríguez et al.,2010	Bezerra et al., 2024
Spontaneous plants	13,16		Gúzman et al., 2014	
Green Panic grass	17,57	0,35	Gúzman et al., 2014	Sousa et al.,1998
Forage trees	14,52	0,54	Gúzman et al., 2014	Olive tree em Gúzman et al., 2014
<i>Solanum</i>			Olive tree, pruning em	
<i>paniculatum</i>	13,16	0,17	Gúzman et al., 2014	Aran et al., 2015
<i>Cochlospermum</i>			Olive tree, pruning em	
<i>vitifolium</i>	13,16	0,17	Gúzman et al., 2014	Aran et al., 2015
<i>Agave sisalana</i>	13,16	0,67	Gúzman et al., 2014	Olive tree, pruning em IRes Castor em Gúzman et al., 2014
<i>Aloe barbadensis</i>	13,16	0,67	Gúzman et al., 2014	Olive tree, pruning em IRes Castor em Gúzman et al., 2014
Wood	14,52			
Underground tree biomass	17,57			
Covered aerial biomass	17,57			
Root biomass	17,57		Gúzman et al., 2014	
Straw (maize)	15,48			
Straw (grass)	15,48			
Root biomass (Grass)	17,57			
Root biomass (Spontaneous plants)	15,48			

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 2 – Produtividade primária líquida (PPL ou PPN neta) e seus componentes em energia bruta. BVS= Biomassa Vegetal socializada; BR= Biomassa Reutilizada; BnC = biomassa não colhida; BA =biomassa acumulada.

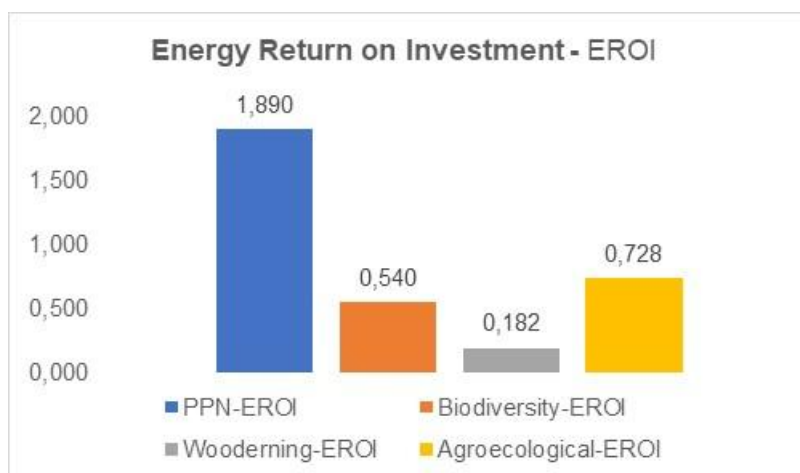
	Cultivos produzidos	Matéria fresca (kg/ano)	Matéria seca (kg/ano)	MF/MS Conversor	Conversor energia	Energia bruta	Energia bruta (MJ/ha/ano)		
<b>BVS</b>	Feijão verde	320,00	313,60	0,98	15,59	4889,0	<b>1112954,19</b>		
	Feijão	350,50	320,71	0,92	15,59	4999,8			
	Milho	476,00	426,97	0,90	14,44	6165,5			
	Abóbora	900,00	97,20	0,11	1,04	101,1			
	Melancia	1.200,00	68,40	0,06	0,90	61,6			
	Amendoim	21,00	19,22	0,92	26,77	514,4			
	Mandioca	20,00	8,32	0,42	6,92	57,6			
	Palma forrageira	30.514	5187,38	0,17	14,00	72623,3			
	Plantas espontâneas		23616,25		13,16	310789,9			
	Capim <i>Green Panic</i>	57.544,65	20140,63	0,35	17,57	353870,8			
Árvores forrageiras	45.771	24716,34	0,54	14,52	358881,3				
<b>BR</b>	Feijão	109,50	100,19	0,92	15,59	1562,0	<b>674500,31</b>		
	Palma forrageira	30514	4577,10	0,15	14,00	64079,4			
	Milho	1.095,00	985,50	0,90	14,44	14230,6			
	<i>Solanum paniculatum</i> ( <i>Jurubeba</i> )	50,00	8,50	0,17	13,16	111,860			
	<i>Cochlospermum vitifolium</i> ( <i>lazinha</i> )	10,00	1,70	0,17	13,16	22,372			
	<i>Agave sisalana</i> ( <i>Sisal</i> )	36,00	24,12	0,67	13,16	317,419			
	<i>Aloe barbadensis</i> ( <i>babosa</i> )	50,00	33,50	0,67	13,16	440,860			
	Madeira (estaca)	3.500	1750,00	0,50	14,52	25410,0			
	Palhada (milho)	714,0	592,62	0,83	15,48	9173,758			
	Capim <i>Green Panic</i> (pasto)	7.325	2563,87	0,35	17,57	45047,1			
	Palhada (capim)		10070,30		15,48	155888,2			
	<b>BnC</b>	Biomassa subterrânea árvores		29659,80		17,57		521122,6	<b>825108,28</b>
		Biomassa aérea coberta		17301,40		17,57		303985,5	
<b>BA</b>	B raiz (leguminosas)		5174,40		17,57	90914,20	<b>277689,72</b>		
	B raiz (capim)	12.788	4475,70	0,35	17,57	78637,96			
	B raiz (plantas esp)		6985,63		15,48	108137,5			
	<b>TOTAL</b>		<b>183.890</b>				<b>2.890.252,51</b>		

Fonte: Elaborado pela autora.

Os resultados mostraram que o balanço energético foi positivo para a Produção Primária Líquida PPN – EROI (Figura 5), com um índice de 1,890. Isso

reflete que para cada 1 MJ de energia investida tem-se quase o dobro da energia gerada, evidenciando assim a eficiência energética associada ao crescimento de plantas e biomassa no agroecossistema. É possível sugerir que o sistema consegue gerar mais biomassa vegetal do que consome, o que viabiliza a recuperação do solo, a produtividade e biodiversidade do agroecossistema. Por se tratar de solos arenosos do semiárido, este resultado é ainda mais importante, pois revela a eficiência energética atribuída a um manejo regenerativo de base agroecológica em condições edafoclimáticas específicas. Essa eficiência indica ainda que o manejo está proporcionando melhores condições de fertilidade e retenção de água para o solo.

Figura 5 - Índices do Energy Return on Investment (EROI) demonstrando a eficiência energética do agroecossistema em Jardins Marizá, Tucano – BA.



Fonte: Elaborado pela autora.

Verifica-se que a maior representatividade na BVS é de espécies perenes, incluindo palma forrageira, capim *Green Panic* e as árvores forrageiras, com exceção das plantas espontâneas ou adventícias que apesar de serem em grande parte perenes, podem ser decíduas e anuais. As plantas espontâneas além de serem manejadas no agroecossistema como melhoradoras de solo, também compõem parte da dieta da família. A soma da produtividade destas espécies representou 98,4% da energia bruta total da BVS, ou seja, as espécies agrícolas anuais (feijão, milho, abóbora, melancia, mandioca, amendoim) representaram apenas 1,5% deste total. Os agricultores relataram que não investem no plantio de culturas anuais para a venda e sim para subsistência. De qualquer forma esta

decisão é uma estratégia para a melhoria dos solos. Conforme descreveu a agricultora:

Não plantamos culturas de campo para venda. Nossos solos são pobres demais para compensar o investimento. Em vez disso, plantamos policulturas como estratégia de recuperar áreas degradadas, e como maneira de implantar capim para pastos futuros.<sup>1</sup>

Dentre essas policulturas estão a palma e as árvores forrageiras típicas de um sistema sintrópico de agrofloresta catingueiro. Geralmente, apenas a fração que recebeu um valor de troca monetária de uso para a sociedade é quantificada em um sistema, quando na sua integralidade a necessidade é de quantificar toda biomassa produzida pelos agroecossistemas. Já que uma parte significativa dela é responsável pela recirculação na agricultura e nos ecossistemas, exercendo papel fundamental para o seu funcionamento e para a manutenção de numerosas populações de organismos heterotróficos que habitam o planeta (Gúzman et al., 2014).

Em um estudo para avaliar a biomassa de colheita da parte aérea da cana de açúcar na Mata Atlântica, os autores identificaram que o sistema convencional teve valor superior (78%) ao do sistema orgânico (46%). Por outro lado, em termos de matéria seca total, o sistema orgânico superou o convencional, já que houve grande contribuição da biomassa do resíduo agrícola deixado no solo pela cana – de – açúcar (Menezes Neto et al., 2023). Ou seja, reforça o sentido de importância que nem toda biomassa produzida irá atender um critério de produção agrícola, elevando os valores de colheita. No entanto, toda biomassa produzida é importante energeticamente e deve ser quantificada em um agroecossistema, especialmente aquelas que não são trocadas por um valor monetário. Em relação a energia bruta da biomassa total, somando os fluxos energéticos (BVS, BR, BNC, BA), a BVS assume um percentual de 38%, já a biomassa animal socializada de 0,6%. Em uma região do semiárido do Ceará foi encontrado valores aproximados, sendo 31,94% de energia em biomassa vegetal e 1,88% de energia em biomassa animal (Matias, 2017).

O resultado do EROI biodiversidade teve o índice equivalente a 0,540. Para um solo arenoso, o qual é mais difícil a incorporação de carbono e manutenção da

---

<sup>1</sup> Entrevista realizada com agricultores.

diversidade de espécies, este resultado pode ser favorável, indicando que a biodiversidade está em processo de construção, podendo a agricultura regenerativa a partir das práticas de sustentabilidade melhorar este índice ao longo do tempo. O nível de regulação interna da função em agroecossistemas depende em grande parte do nível de biodiversidade vegetal e animal, que além da produção de alimentos realiza uma variedade de serviços ecológicos, incluindo ciclagem de nutrientes, controle biológico, regulação do microclima e dos processos hidrológicos (Altieri, 1999). Em uma área do semiárido o EROI biodiversidade mostrou índice de 0,293, apesar de o sistema apresentar consórcio de algumas espécies (Silveira, 2021). Mesmo que uma determinada área resulte em aumento de investimento em energia a partir da produtividade agrícola, se faz necessário uma análise não linear de fluxos de energia, que possa demonstrar um fluxo de reutilização da biodiversidade (Gúzman et al., 2014; Matias, 2017). No semiárido pode ser benéfico a integração do sistema lavoura-pecuária a partir de um manejo de base agroecológica. Neste sentido, os animais irão favorecer a entrada de biomassa e microrganismos no agroecossistema, o que vem a estimular a construção da biodiversidade. De acordo com o relato da agricultora é possível defender esta prática regenerativa, a qual segundo ela a maior dica para o manejo dos animais se resume em:

[...] deixe os animais sempre em movimento. Nossas vacas ficam no máximo 5 dias em cada piquete. Nunca chegam a rapar o campo, possibilitando a recuperação rápida do capim e dos matos. Os vizinhos nos criticam por ter poucas cabeças pelo espaço, mas o tamanho do nosso rebanho é em função da seca, e não da chuva. Como resultado, nossos bezerros são vendidos com 6 meses ao preço de um bezerro de 2 anos que engordou e depois emagreceu por falta de comida. O fato de manter os animais sempre em movimento melhora o solo, que se beneficia com a passagem rápida do animal. Não compramos ração para elas (vacas), mas nos empenhamos em plantar muita palma e árvores forrageiras.<sup>2</sup>

Em relação as culturas anuais milho e feijão, verifica-se que além de estarem presentes na BVS compõem também a BR. Uma vez que 70% e 23,8% delas, respectivamente é incluída na dieta das galinhas. As vacas (8) e carneiros (2) também recebem uma dieta balanceada incluindo palma forrageira, folhas de

---

<sup>2</sup> Entrevista realizada com agricultores.

árvores forrageiras e capim *Green Panic*. Os agricultores relatam que a criação de carneiros exige muita estrutura com as cercas, além dos mesmos invadirem áreas de plantio. Em um dos relatos a agricultora afirmou:

No final das chuvas, quando não tem mais nada de importante plantado, os deixamos bastante livres para engordar. Assim o manejo fica muito mais fácil, e ocupa somente algumas semanas no começo da seca, deixando o pasto descansar mais tempo. Esta raça de carneiro (Sta.Inês) é grande, e dois animais fornecem carne o suficiente para 6 meses. Sempre fazemos o abate dos dois no mesmo dia, para que nenhum seja deixado solitário. O abate acontece aqui mesmo, feito por um vizinho que tem uma maneira muito gentil de abater o animal, sem estresse.<sup>3</sup>

A criação das vacas fornece leite, o qual é elaborado iogurte e queijo, não sendo criado bois de corte. Já as galinhas fornecem os ovos. É possível verificar os componentes da biomassa animal socializada na tabela 3.

Tabela 3 - Componentes em energia bruta da Biomassa Animal Socializada (BAS) de Jardins Marizá, Tucano – BA.

Produtos	Matéria (kg/ano)	Matéria seca	MF/S	Conversor energia	Energia bruta	Energia bruta (MJ/ha/ano)
Ovos	324,0	76,46		0,236	2,25	172,0
Carne	40,00	15,08		0,377	11,43	172,4
Leite	15.038,00	5.639,25		0,375	3,01	16974,1
<b>BVS</b>						<b>17318,55</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

A grande maioria dos agroecossistemas de gestão familiar no semiárido brasileiro atuam mediante um metabolismo orgânico, integrando os sistemas de produção vegetal e animal, cujo este último tem função em fornecer biomassa útil para a sociedade na forma de alimentos (carne, leite, ovos etc.) ou matérias-primas

<sup>3</sup> Entrevista realizada com agricultores.

(peles, lã etc.), além de funções ecológicas e sociais relevantes, como construção da fertilidade do solo a partir dos excrementos (Silveira, 2021).

O índice EROI agroecológico foi de 0,728 indicando que o agroecossistema está avançando para uma melhor eficiência dos recursos energéticos. Com o tempo, o aumento da matéria orgânica no solo, as melhores condições físicas de agregação e retenção de umidade e a biodiversidade associada tende a melhorar cada vez mais esse índice. Este índice está vinculado diretamente a saúde do solo e do agroecossistema como um todo. Um solo saudável atua como um sistema vivo dinâmico que fornece múltiplos serviços ecossistêmicos, estando intimamente associado à agricultura sustentável. A sustentabilidade agrícola é definida como a capacidade de um sistema de produção agrícola de produzir alimentos continuamente sem degradação ambiental (Tahat et al., 2020). Para isso, as práticas agrícolas que estimulem a qualidade do solo devem ser aplicadas, assim como ocorre em Jardins Marizá, a partir do uso de composto orgânico, plantas de cobertura e rotação de cultura, policultivo, cobertura do solo, cerca-viva, consórcios entre espécies anuais e perenes, pastejo rotacionado de animais, manejo de plantas espontâneas. A partir do relato da agricultora é possível compreender o resultado acerca deste índice do ponto de vista da prática agrícola:

O aumento de carbono significa um aumento da capacidade de reter água no solo: Jardins Marizá fica mais verde várias semanas depois das terras vizinhas que são mais expostas, e se torna verde de novo 1-3 dias depois da chuva. Com isso ganhamos efetivamente mais de um mês de tempo de plantio. Este é um sistema de acúmulo de carbono, resultando em árvores, capim, e muitas raízes, moradia de fungos, bactérias e insetos, a verdadeira fonte da fertilidade do solo.<sup>4</sup>

Bem como sob a ótica do bem viver no contexto da agroecologia pela seguinte afirmação:

Trabalhamos todos os dias, mas com um ritmo tranquilo e com prazer. Nossos sistemas de manejo são suaves, e variados. Não tem monotonia, onde tem que fazer o mesmo movimento o dia todo. Estamos sempre inventando novas formas de manejo mais eficazes, e esta criatividade nos dá muita alegria.

---

<sup>4</sup> Entrevista realizada com agricultores.

Isto é um fator importante da diferença entre a agricultura industrial e a agroecologia: os sistemas ricos, dinâmicos, e biodiversos são mais interessantes! Temos prazer em ver esta terra evoluir a passos largos. Exigiu anos de dedicação e passos lentos, mas agora o sistema decolou e está evoluindo por conta própria. Temos a confiança que este conjunto de estratégias pode levar a uma evolução rápida (4-5 anos) de um espaço degradado, para uma terra próspera.<sup>5</sup>

Outro dado relevante se refere ao Woorderning-EROI que pode indicar se o agroecossistema está conseguindo resistir a degradação. O índice de 0,182 (Figura 5) indica que o agroecossistema está obtendo o suporte fundamental para reverter a desertificação nestes solos arenosos.

As fontes externas de energia foram calculadas considerando as atividades de irrigação, mecânica do solo, trabalho humano, uso de insumos (folhas e sementes) e energia elétrica em energia bruta em MJ/kg/há (Tabela 4).

Tabela 4 – Fonte externa de energia para realização de atividades e uso de insumos em Jardins Marizá, Tucano – BA.

<b>FLUXO EXTERNO</b>		
		<b>Energia bruta (MJ/kg/ha)</b>
<b>Atividades e insumos</b>	<b>Descrição</b>	
Irrigação por gotejamento	648 m <sup>3</sup> /há	1,04
Mecânica	Trator 5640 kg	439,92
Trabalho humano	772 h/ha/ano	1505,4
Folhas secas		384,27
Energia elétrica	625 kWh	27000
Sementes		100
<b>TOTAL</b>		<b>29430,63</b>

Fonte: Elaborado pela autora.

Sobre os insumos externos percebe-se que o agroecossistema detém de uma certa autonomia, garantindo entrada mínima de suplementação externa na manutenção do agroecossistema, viabilizando assim o fluxo de recirculação dos

<sup>5</sup> Entrevista realizada com agricultores.

elementos do próprio sistema, priorizando a construção da fertilidade do solo e da biodiversidade.

Sabe-se que o fator umidade é muito importante para a regulação da atividade biológica, física e química do solo em benefício a produtividade da cultura, no entanto, apesar de as culturas serem de sequeiro, fazendo uso mínimo de irrigação por gotejamento e captura de água da chuva, não provoca danos a produção de biomassa e muito menos déficits energéticos. Esta condição reforça que o manejo adotado a partir do esforço aplicado pelos agricultores tem viabilizado o acúmulo de biomassa no agroecossistema, apresentando uma eficiência energética, mesmo com a limitação da umidade. Para melhoria da convivência com a seca, muitos agricultores priorizam sistemas irrigados de produção (Oliveira, 2014), o que pode tornar o agroecossistema insustentável a depender do investimento energético desta função.

De acordo com os resultados dos componentes da biomassa, verifica-se que a BVS teve maior participação do percentual total de energia bruta (MJ/há/ano) com 38% da PPL (Tabela 5).

Tabela 5 – Descrição da energia bruta da biomassa (%) das diferentes categorias

<b>Categoria de biomassa</b>	<b>Energia bruta da biomassa (%)</b>
Biomassa vegetal socializada (BVS)	38
Biomassa animal socializada (BAS)	0,6
Biomassa reutilizada (BR)	23,3
Biomassa não colhida (BnC)	28,5
Biomassa acumulada (BA)	9,6
Total	100

Fonte: Elaborada pela autora.

A BVS representa a produção de alimentos, fibras, madeiras, estando diretamente relacionada a apropriação da sociedade humana, incluindo os produtos vegetais consumidos e/ou vendidos no organismo agrícola. A segunda maior categoria que representou o total da energia bruta foi a BnC em 28,5 % que representa o percentual devolvido ao agroecossistema sem o investimento do trabalho humano, incluindo resíduos de culturas, pastagens não consumidas pelo gado, os restos de árvores e a maioria dos sistemas radiculares, os quais são

recicladados por organismos heterotróficos da fauna (Fávero; Monteiro, 2021). Esta parcela da biomassa é muito importante para a biodiversidade do sistema, bem como para o aumento da fertilidade do solo e a ciclagem de nutrientes. Este resultado corrobora com aqueles encontrados no estudo dos indicadores químicos e biológicos do solo que foram apresentados nesta pesquisa nos capítulos anteriores. A soma desta parcela com a BA de 9,6% representa 38,1% da PPL. Este resultado reflete que o fluxo interno de energia alimentado pela biomassa seca daquilo que é reinvestido a partir do funcionamento ecológico do organismo agrícola é semelhante ao valor de BVS. O que significa que o que está sendo socializado e extraído do agroecossistema, está sendo devolvido na retroalimentação do mesmo, o que viabiliza o índice PPL - EROI. Silveira (2021) encontrou uma soma de 40% destes percentuais avaliando campos de Palma no semiárido. Já a BR é reintroduzida intencionalmente ao organismo agrícola com uma finalidade específica atribuída ao trabalho humano. Neste caso, ela representa 23, 3% da PPL, o que significa um esforço humano importante para reaproveitar insumos locais e devolvê-los ao organismo agrícola mediante a um novo ciclo de energia e beneficiamento, o que dialoga com os princípios da agroecologia e sustentabilidade. A partir destes resultados percebe-se que o agroecossistema está sendo manejado para alcançar um equilíbrio, o que caracteriza o objetivo principal na garantia do funcionamento a longo prazo do organismo agrícola. Já que é necessário um equilíbrio entre a energia extraída (BVS +BR) e a energia não extraída (BnC + BA) (Molina et al., 2019).

A produtividade primária líquida do agroecossistema (PPL) considerando 7 hectares foi de 183.890 Kg/MS. Este valor foi superior ao encontrado no semiárido por Silveira (2021) para uma área de 34,3 há. A partir da PPL se constroem as cadeias tróficas, já que elas exprimem o quanto que o agroecossistema tem em termos de energia acumulada (joules/hectare/ano) ou em termos de matéria orgânica sintetizada (quilogramas/hectare/ano), representando a taxa de energia realmente incorporada nos tecidos da planta, sendo um resultado oposto àquele vinculado a fotossíntese e a respiração (Molina, 2019). Assim, os estudos de quantificação da PPL são cruciais para avaliar a biomassa produzida nos agroecossistemas, mediante a conversão de fluxos de energia e nutrientes que sustentam o seu funcionamento (Gúzman et al., 2014). É válido ressaltar que as

áreas destinadas a biomassa produzida neste estudo, não seguem um padrão homogêneo de produção, uso e manejo do solo.

Conforme apresentado nos capítulos anteriores, há áreas onde as características pedológicas e florísticas se aproximam inclusive com áreas de manejo convencional. Portanto o critério de ampliar o resultado de uma determinada biomassa para o agroecossistema – considerando 7 hectares – pode ser problemático, já que não há uma garantia na reprodução do dado. Apesar deste critério ter sido descontado ao considerar a reprodução de determinados valores para tamanhos diferentes de áreas, torna-se importante obter a biomassa produzida para cada área distinta, seja em campo ou através de métodos com uso de sensores remotos, compartimentalizando assim os 7 hectares, como foi feito por Silveira (2021). Além disso, é importante espacializar este estudo para as diferentes estações: seca e úmida, já que a PPL é altamente variável no espaço e no tempo, estando a variação condicionada aos fatores de clima, distribuição da vegetação e uso do solo (Dalmago et al., 2008).

#### **4 CONCLUSÃO**

Apesar deste estudo desenvolver uma abordagem preliminar acerca da eficiência energética do agroecossistema em Jardins Marizá, Tucano BA como incentivo de validar estratégias agroecológicas da agricultura regenerativa pautada na relação de convivência com a seca, os resultados de eficiência energética estão coerentes no que diz respeito a construção da fertilidade e da biodiversidade do solo com aqueles apresentados nos capítulos anteriores. Isso demonstra que o investimento energético que vem sendo aplicado a partir do manejo regenerativo em Jardins Marizá está evoluindo para melhor eficiência do agroecossistema, validando assim as estratégias socioecológicas e de convivência com a seca vinculadas no preparo do solo, no uso da água e dos insumos, nas policulturas, manejo dos animais e na força de trabalho. Estes resultados são importantes para incentivar novas propostas agroecológicas de produção de alimentos e de animais em solos arenosos nas propriedades rurais na região do semiárido, bem como para abrir novas possibilidades de aprofundar o estudo do metabolismo social agrário em Jardins Marizá, incluindo a aplicação de índices (raiz, colheita e resíduo) que possa permitir calcular um EROI ainda mais completo para trazer respostas detalhadas

sobre o retorno energético-ecológico do agroecossistema que são especialmente importantes em estudos agroecológicos.

## 5 - REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, S. G. *As pastagens do semi-árido do Nordeste: Bovino de corte criação e manejo*. Pesq. EMBRAPA / CPATSA- Inf. Agropec., Belo Horizonte, v. 13, n. 153/154, 1988.
- ALMEIDA, R.G. Biomassa aérea e radicular de gramíneas do gênero *Brachiaria* e *Panicum* em áreas de pastagens na região sul do Amazonas. *Contribuciones a Las Ciencias Sociales*, São José dos Pinhais, v.16, n.1, p. 109-123, 2023.
- ALTIERI, M, A. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, v.74, p. 19–31, 1999.
- ARAN, Helder Denir Vhaldor Rosa. Produtividade de plantas de jurubeba (*Solanum paniculatum* L.) cultivada em vasos com adição de resíduos orgânicos e calcário. *Anais... XXXV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo*, 2015.
- BEZERRA, Francisco Mardones Servulo *et al.* *Deficit Irrigation of Forage Cactus (Opuntia stricta) with Brackish Water: Impacts on Growth, Productivity, and Economic Viability under Evapotranspiration-Based Management*. *Agronomy* 2024, 14, 1445. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agronomy14071445>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- BROWER, J. E.; ZAR, J. H. *Field and laboratory methods for general ecology*. 2. Dubuque: Wm. C. Brown Company Publishers, 1984. 226 p.
- CÂNDIDO, S. *et al.*, Pastagens no ecossistema semi-árido brasileiro: atualização e perspectivas futuras. *Anais... Simpósios da 42ª Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia*, 2005.
- DALMAGO, Genei Antonio *et al.* *Produtividade primária líquida do ambiente natural: indicador de sustentabilidade de sistemas de produção agrícola*. EMBRAPA. Documentos online ISSN 1518-6512, 2008.
- ecosystem level. *Plant and Soil* 200, p. 71–89. 1998.
- FAGERIA, N.K.; BALIGAR V. C.; LI, Y.C. The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. *Journal of Plant Nutrition*, v. 31, n. 6, 2008.
- FÁVERO, C.; MONTEIRO, F.T., *Fatores de conversão e estimativa da produtividade primária líquida na aplicação da metodologia do Metabolismo Social Agrário nas condições brasileiras*. In: *Metabolismo social e Agrário: em busca de uma agricultura sustentável*. Org: Carmen Rejane Flores; Manuel González de Molina Navarro; Valquiria Conti. Santa Maria, RS. 2021.
- GILLER, K. E., *et al.* Regenerative Agriculture: Na agronomic perspective. *Outlook on Agriculture*, v. 50, n. 1, p. 13–25. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/0030727021998063>. Acesso em: 25 out. 2024.
- GONZÁLEZ DE MOLINA, M *et al.* *Historia de la Agricultura española desde una perspectiva biofísica: 1900 – 2010*. Serie Estudios 183, Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación: España, 2019. 424p.
- GONZÁLEZ DE MOLINA, M. A Guide To Studying The Socio-Ecological Transition In European Agriculture. *Sociedad Española de Historia Agraria – Documentos de Trabajo*, Sevilla-Spain DT-SEHA n. 10-06. 2010.

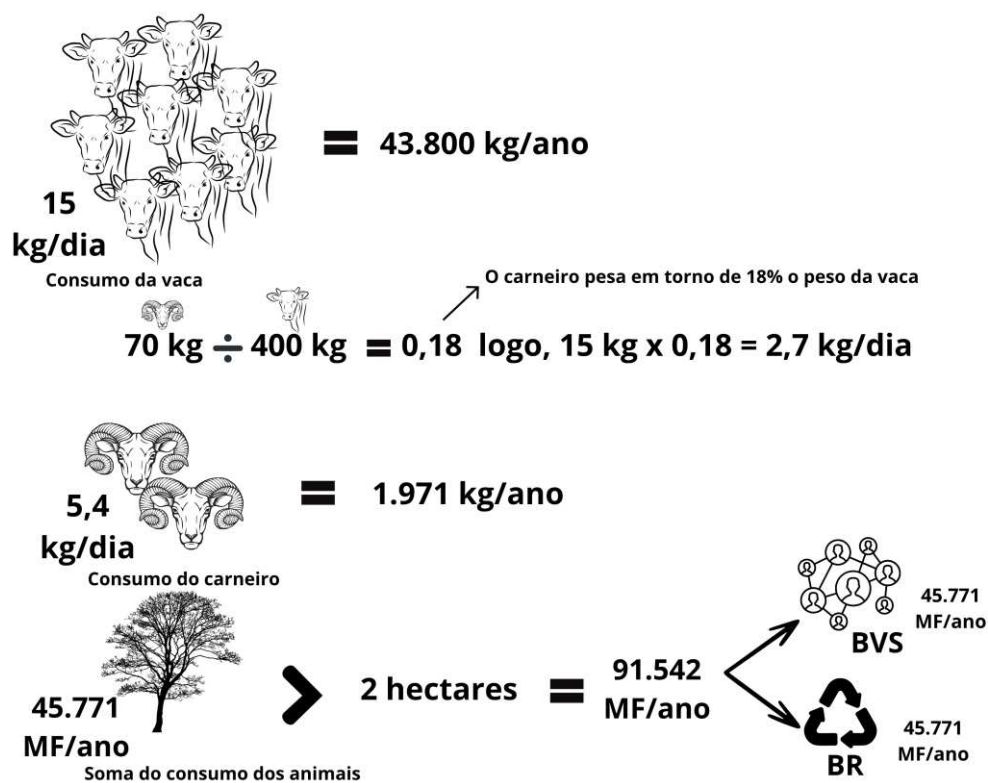
- GONZÁLEZ de MOLINA, M.G. *Historia de la agricultura española desde una perspectiva biofísica, 1900-2010*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019. 424p
- GUZMÁN, G. I. *et al. Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity of historical and contemporary agroecosystems (I)*. Sociedad Española de Historia Agraria. 2014. 52 p.
- GUZMÁN, G. I. *et al. Spanish agriculture from 1900 to 2008: a long-term perspective on agroecosystem energy from an agroecological approach*. Springer-Verlag, 2017.
- GUZMÁN, G. I.; GONZÁLEZ DE MOLINA, M. M. *Energy efficiency in agrarian systems from an agroecological perspective*. v. 39, p. 924-952, 2015. doi: 10.1080/21683565.2015.1053587.
- GUZMÁN, G.I. *et al. Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity historical and contemporary agro-ecosystems (I)*. Sociedad Española de Historia Agraria-Documentos de Trabajo 1406. 2014. Disponível em: [www.seha.info](http://www.seha.info). 52 pp. Acesso em: 20 nov 2024.
- GUZMÁN, G.I. *et al. Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity historical and contemporary agro-ecosystems (I)*. Sociedad Española de Historia Agraria-Documentos de Trabajo 1406. 2014. Disponível em: [www.seha.info](http://www.seha.info). 52 pp. Acesso em: 20 nov 2024.
- GUZMÁN, Gloria Guzmán *et al. Methodology and conversion factors to estimate the net primary productivity of historical and contemporary agroecosystems*. Sociedad Española de Historia Agraria, Documento de trabajo, DT- SEHA N. 1406, 2014.
- GUZMÁN, Gloria I.; Molina, Manuel González de. Energy Efficiency in Agrarian Systems From an Agroecological Perspective, *Agroecology and Sustainable Food Systems*, v.39, n.8, p. 924-952, 2015.
- HALL, C.A. *EROI and Industrial Economies*. In: Hall, C.A; Kent, A. K. Energy Return on Investment. New York: Springer International Publishing, p. 107-117. 2017.
- HARRISON, J.H.; BLAUWIEKEL, R.; STOKES, M.R. Fermentation and utilization of grass silage. *J. Dairy Sci*, v.77, p.3209-3235, 1994.
- LANGE, A., et al., Pasto, silagem e palhada no sistema de integração lavoura-pecuária na região norte do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v.12, n.3, p. 293-306, 2013.
- LUJAN SOTO, R., CUELLAR PADILLA, M., VENTE, J. de. Participatory selection of soil quality indicators for monitoring the impacts of regenerative agriculture on ecosystem services. *Ecosystem Services*, v. 45. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101157>. Acesso em: 2 out. 2024.
- MOLINA, González de, M.; TOLEDO, V.: Metabolismos, naturaliza e história: hacia una teoría de las transformaciones socioecológicas. Barcelona: Icaria, *Perspectivas Agroecológicas*, 2011.
- MOLINA, M. G; ALIER, J M. *Naturaleza transformada*. Barcelona: Icaria Editorial. Coleção, p. 20. 2001.

- MURPHY D. J. et al., Order from chaos: a preliminary protocol for determining the EROI of fuels. *Sustainability*, v. 3, p.1888–1907, 2011.
- NRC (National Research Council). *Nutrient Requirements of Swine. Tenth. Revised Edition*. NationalAcademic Press, Washington, D.C. 20418 USA. 2012.
- OLIVEIRA, L.C. *Sustentabilidade da produção agropecuária e das tecnologias de captação e armazenamento de água da comunidade Paus Brancos, Assentamento 25 de maio em Madalena/CE*. Monografia (Graduação em Agronomia). Departamento de Economia Agrícola da Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2014.
- OSTROM, E. A general Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems. *Specialsection Science*. UCO / Hemeroteca Cientifica / Universidad de Cordoba, v. 325, 2009. Acesso em: <https://www.science.or> Acesso em: 08 out. 2024.
- PAUL, K. I. *et al.* Predicting growth and sequestration of carbon by plantations growing in regions of low rainfall in southern Australia. *Forest Ecology and Management*, v. 254, n.2, p. 205-216, 2008.
- PEICHL, M.; ARAIN, M. A. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management*, v. 253, n.1-3, p. 68-80, 2007.
- RODRÍGUEZ, J.M.P. *et al.* Effects of cladode age on biomass yield and nutritional value of intensively produced spineless cactus for ruminants. *S Afr. J. Anim. Sci.*, v. 40, n. 3, 2010.
- SALIS, S. M. et al. Estimating the aboveground biomass and wood volume of savanna woodlands in Brazil's Pantanal wetlands based on allometric correlations. *Forest Ecology and Management*, v. 228, n. 1-3, p. 61-68, 2006.
- SANTOS, A. P. P. *Características de carcaça e carne de ovinos mestiços Dorper x Santa Inês imunocastrados*. Goiânia: Kelps, 58 p. 2022.
- SCHEIDEL, Arnim; SORMAN, Alevgul. Energy transitions and the global land rush: ultimate drivers and persistent consequences". *Global Environmental Change*, v. 22, n. 3, p. 588-595, ago. 2012.
- SCHREEFEL, L. *et al.* Regenerative agriculture – the soil is the base, *Global Food Security*, v. 26, 2020.
- SCHROTH, G., SINCLAIR, F. L. *Trees, Crops and Soil Fertility: Concepts and Research Methods*, 2003.
- SILVA, G. C.; SAMPAIO., E.V de S B. *Biomassas de partes aéreas em plantas da Caatinga*. R. Árvore, Viçosa-MG, v.32, n.3, p.567-575, 2008.
- SOUSA, F.B. e CARVALHO, F.C.de; ARAÚJO FILHO, J.A. de. *Capim-gramão: uma opção para o Nordeste brasileiro*. Sobral: EMBRAPA- CNPC, 1998.
- TABATABAEFAR, A.; EMAMZADEH, H.; VARNAMKHASTI, M.G.; RAHIMIZADEH, R., KARIMI, M., 2009. *Comparison of energy of tillage systems in wheat production*. *Energy*, n. 34, p. 41–45. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.09.023>. Acesso em. 25 jan. 2023.

- TELLO, E. *et al.* *A Proposal for a Workable Analysis of Energy Return On Investment (EROI): Agroecosystems, Part I: Analytical Approach*. Social Ecology Working Paper. Vienna: Institute of Social Ecology, 2015. 110p.
- TELLO, E. *Opening the black box of energy throughputs in farm systems: a decomposition analysis between the energy returns to external inputs, internal biomass reuses and total inputs consumed (the Vallès County, Catalonia, c.1860 and 1999)*. *Ecological economics*, 2016, v. 121, p. 160-174.
- TOLEDO V., M., M. GONZÁLEZ DE MOLINA. *El metabolismo social entre la sociedad y la naturaleza*. In: Paradigmas ecológicos en las ciencias sociales. España: Editorial Trotta, 2005. 23 p.
- TOLEDO, V. M. El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones*, v. 136, p. 41-71. 2013.
- TOLEDO, V. M. Metabolismos rurales: hacia una teoría económico-ecológica de la apropiación de la naturaleza. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. v.7, p.1-26, 2008.
- TOMMASO, S. *et al.* Estimating the contribution of crop residues to soil organic carbon conservation. *Environmental Research Letters*, v., 14, n. 9, 2019.
- VAN SOEST, P.J. *Nutritional ecology of the ruminant*. 2.ed. Ithaca: Cornell University, 1994. 476p.
- VOGT, K.A.; VOGT, D.J.; BLOOMFIELD, J. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forests at an

## 6 - APÊNDICE

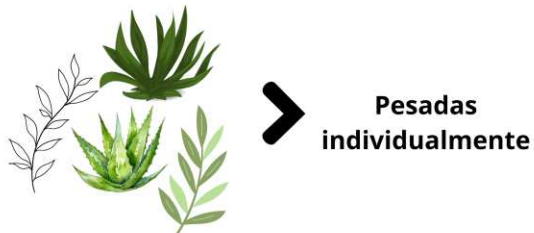
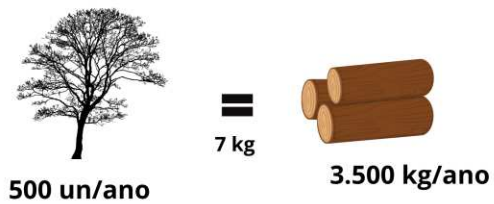
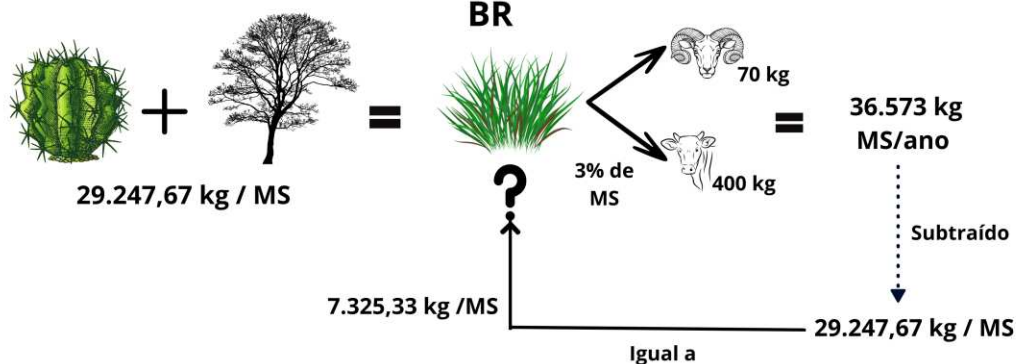
Descrição dos cálculos das categorias de biomassa (BVS, BAS, BR, BnC, BA) em Jardins Marizá, BA.

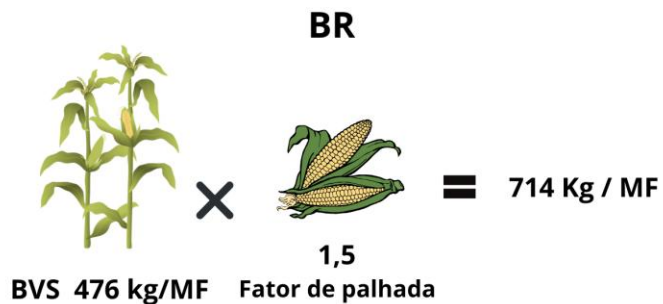


**BAS**

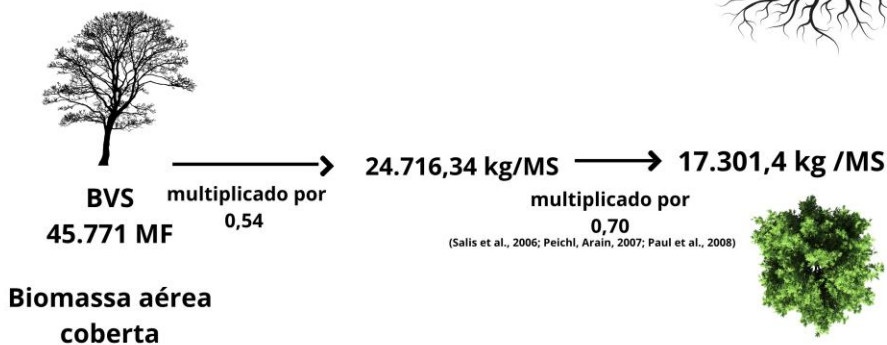
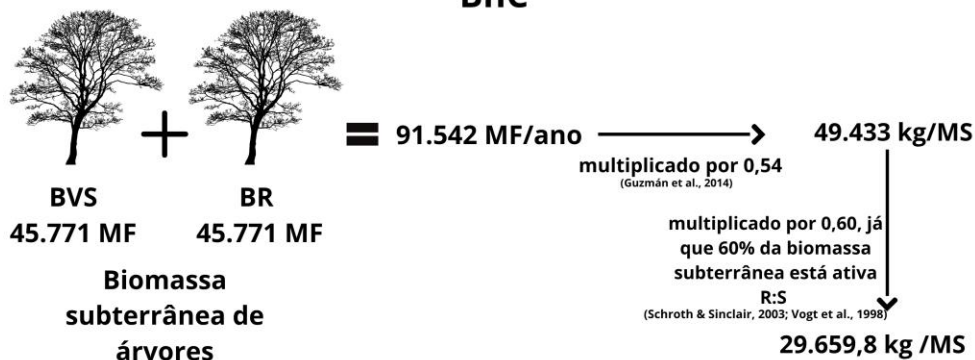


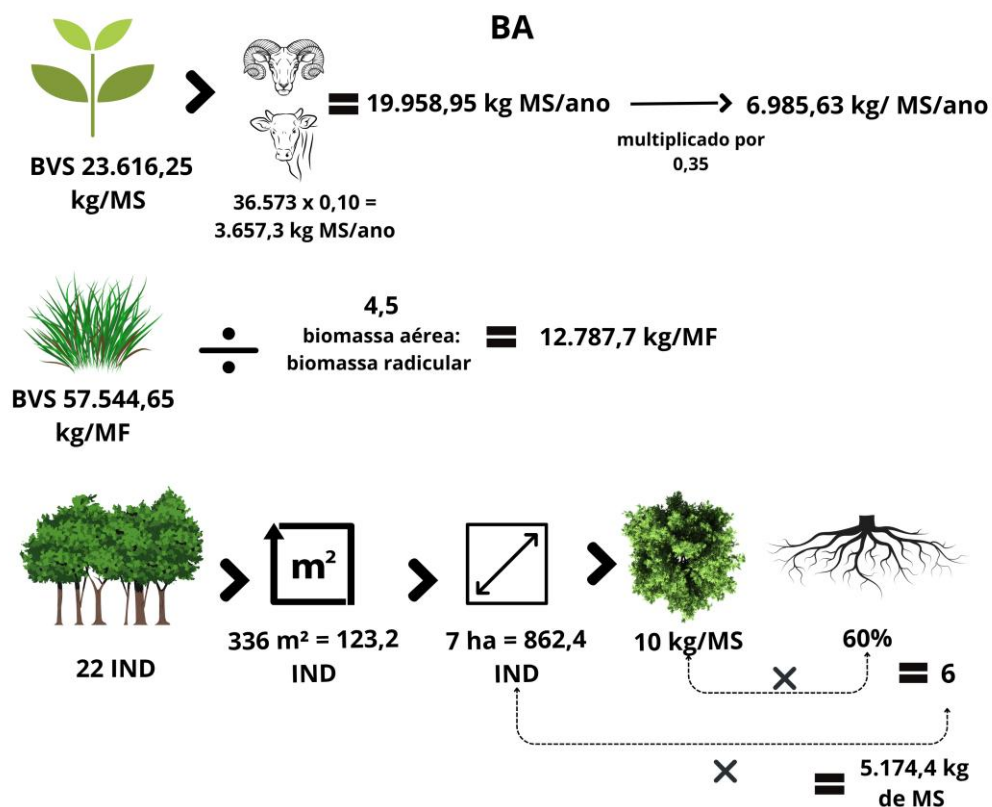
**BR**





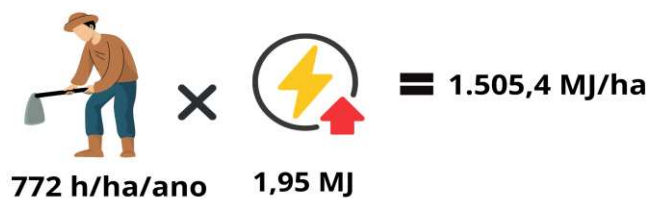
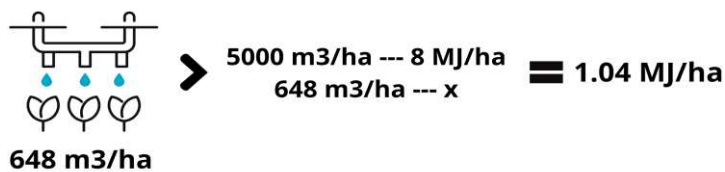
**BnC**





Descrição dos cálculos do fluxo externo em Jardins Marizá, BA

### Fluxo externo



## Fluxo externo

