



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO DE ENGENHARIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

LÍVIA CHRISTINA DE ARAÚJO SILVA MOURA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CULTIVO DE ALGODÃO, GIRASSOL E
GERGELIM COMO ESTRATÉGIA PARA O AUMENTO DO ESTOQUE DE
CARBONO NO SOLO DO SEMIÁRIDO POTIGUAR UTILIZANDO O MODELO
ROTHC**

MOSSORÓ/RN

2024

LÍVIA CHRISTINA DE ARAÚJO SILVA MOURA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CULTIVO DE ALGODÃO, GIRASSOL E
GERGELIM COMO ESTRATÉGIA PARA O AUMENTO DO ESTOQUE DE
CARBONO NO SOLO DO SEMIÁRIDO POTIGUAR UTILIZANDO O MODELO
ROTHC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semiárido como
requisito para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Frederico Ribeiro do
Carmo.

MOSSORÓ/RN

2024

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

M929a Moura, Livia Christina de Araújo Silva.
Avaliação do potencial de cultivo de algodão,
girassol e gergelim como estratégia para o
aumento do estoque de carbono no solo do
Semiárido Potiguar utilizando o modelo RothC /
Livia Christina de Araújo Silva Moura. - 2024.
46 f. : il.

Orientador: Frederico Ribeiro do Carmo.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de , 2024.

1. dinâmica de matéria orgânica. 2. sequestro de
carbono. 3. biocombustíveis. I. do Carmo,
Frederico Ribeiro, orient. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

LÍVIA CHRISTINA DE ARAÚJO SILVA MOURA

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE CULTIVO DE ALGODÃO, GIRASSOL E
GERGELIM COMO ESTRATÉGIA PARA O AUMENTO DO ESTOQUE DE
CARBONO NO SOLO DO SEMIÁRIDO POTIGUAR UTILIZANDO O MODELO
ROTHC**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semiárido como
requisito para obtenção do Título de Bacharel
em Engenharia Química.

Defendida em: 25/10/2024

BANCA EXAMINADORA

Frederico Ribeiro do Carmo, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente

Daniel Valadão Silva, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Leonardo Pacheco, Me. (Mandacaru Energia)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado forças e por guiar meus passos até este momento. Nas vezes em que pensei em desistir, Ele foi meu ânimo e fonte de perseverança, e sou grata por Sua constante presença.

Ao meu esposo, Matheus, expresso minha eterna gratidão por ser meu alicerce em todos os momentos. Obrigada por sempre me escutar, apoiar e compreender. Sua paciência e encorajamento constante foram essenciais para que eu chegasse até aqui.

Aos meus pais, Vaneliese e Rosimar, agradeço profundamente pelo apoio incondicional e incentivo ao longo desta jornada. Seus esforços incansáveis e conselhos sempre foram a base necessária para que eu seguisse em frente. Sou grata também aos meus irmãos, Ricardo e Kaio, e aos meus avós, Francisca Pereira, Edmar Ricardo e Maria Porcina, por estarem sempre ao meu lado e me apoiarem. Um agradecimento especial à minha prima Thayze Pereira, por me ouvir e aconselhar durante todo o processo.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Frederico Ribeiro, expresso minha mais sincera gratidão. Seus conselhos e incentivos foram cruciais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua orientação foi fundamental para o meu crescimento acadêmico e profissional.

Aos meus colegas do Núcleo de Pesquisa em Economia de Baixo Carbono (NPCO2), em especial Darliane Souza, Paulo Filho e Gabriel Almeida, expresso minha profunda gratidão. O apoio de vocês foi, sem dúvida, o impulso essencial para a conclusão deste trabalho. Sem suas colaborações, isso não teria sido possível. Agradeço também a Larissa Fernandes, Pedro Nogueira e Juciane Vieira pelo apoio ao longo dessa jornada.

Aos meus colegas de classe, em especial Maria Helena, com quem dividi a maior parte das disciplinas, e a Cintya Luana, Laís Tamires, Nadson Holanda, Francisco Medeiros e Fernanda Andrade, meus sinceros agradecimentos por estarem ao meu lado nos momentos difíceis dos estudos, tornando essa jornada mais leve e agradável.

Ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), ao Programa de Formação de Recursos Humanos da

ANP (PRH-ANP 55.1), Gestão FINEP, e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro à pesquisa; e à empresa Mandacaru Energia, pelo financiamento do projeto que possibilitou a realização deste trabalho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho, meus sinceros agradecimentos. Suas contribuições foram fundamentais para o sucesso deste projeto e para a minha trajetória acadêmica.

“Mas, como está escrito: As coisas que o olho não viu, e o ouvido não ouviu, e não subiram ao coração do homem, são as que Deus preparou para os que o amam.”

1 Coríntios 2:9

RESUMO

O sequestro de carbono no solo é considerado uma estratégia para a mitigação antropogênica de gases de efeito estufa (GEE). Considerando que o Brasil tem o aumento da produção de biocombustíveis como uma das formas de descarbonização de sua matriz energética, este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de sequestro de carbono no solo em cultivos de algodão, girassol e gergelim no Semiárido Potiguar utilizando o modelo de dinâmica de matéria orgânica no solo RothC. Para isso, foram simuladas as dinâmicas do carbono no solo ao longo de 20 anos, considerando as características específicas do clima e do solo da região e as práticas de manejo agrícola empregadas para cada cultura. Os resultados demonstraram que o algodão apresentou o maior potencial de sequestro de carbono (61,42 tC/ha), seguido pelo girassol (55,20 tC/ha) e gergelim (50,84 tC/ha). Essa variação é atribuída às características agronômicas de cada cultura, como taxa fotossintética e alocação de biomassa. O estudo também revelou que o cultivo dessas oleaginosas possui alto potencial para compensar as emissões de gases de efeito estufa da Bacia Potiguar, uma vez que utilizando apenas 10% da área do campo Cardeal e Colibri, o qual está sob concessão da empresa Mandacaru Energia, seria possível compensar até 55,15% das emissões de GEE geradas nas operações *onshore* da Bacia Potiguar em 2022 através do cultivo de algodão. Em conclusão, o modelo RothC mostrou-se eficaz para avaliar o sequestro de carbono no solo, e os resultados obtidos fundamentam práticas agrícolas sustentáveis. Futuros estudos poderão explorar variáveis e cultivos, ampliando a compreensão do sequestro de carbono em sistemas agrícolas. As informações deste trabalho podem possibilitar a implementação de práticas que incentivem o cultivo de oleaginosas e a utilização de biochar como estratégia de mitigação das mudanças climáticas.

Palavras-chave: dinâmica de matéria orgânica; sequestro de carbono; biocombustíveis.

ABSTRACT

Soil carbon sequestration is considered a strategy for anthropogenic mitigation of greenhouse gases (GHG). Considering that Brazil has increased biofuel production as one of the ways to decarbonize its energy matrix, this work aimed to evaluate the potential for soil carbon sequestration in cotton, sunflower and sesame crops in the semi-arid Potiguar region using the RothC soil organic matter dynamics model. To do this, soil carbon dynamics were simulated over 20 years, taking into account the specific characteristics of the region's climate and soil and the agricultural management practices employed for each crop. The results showed that cotton had the highest carbon sequestration potential (61.42 tC/ha), followed by sunflower (55.20 tC/ha) and sesame (50.84 tC/ha). This variation is attributed to the agronomic characteristics of each crop, such as photosynthetic rate and biomass allocation. The study also revealed that the cultivation of these oilseeds has a high potential for offsetting greenhouse gas emissions in the Potiguar Basin, since using just 10% of the area of the Cardeal and Colibri field, which is under the concession of the Mandacaru Energia company, it would be possible to offset up to 55.15% of GHG emissions by growing cotton. In conclusion, the RothC model proved to be effective in assessing soil carbon sequestration, and the results obtained support sound agricultural practices. Future studies may explore variables and crops, expanding the understanding of carbon sequestration in agricultural systems. The information from this work may enable the implementation of practices that encourage the cultivation of oilseeds and the use of biochar as a strategy to mitigate climate change.

Keywords: organic matter dynamics; carbon sequestration; biofuels.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Principais matérias-primas utilizadas no Brasil para a produção de biodiesel.	5
Figura 3.2 – Campo de algodão pronto para a colheita.	7
Figura 3.3 – Cultivo de girassol.	8
Figura 3.4 – Cultivo de gergelim.	9
Figura 4.1 – Estrutura do modelo RothC.	13
Figura 4.3 - Área de estudo.	16
Figura 4.4 - Localização dos Campos Cardeal e Colibri.	16
Figura 5.1 – Sequestro de carbono no solo em cultivos de algodão, girassol e gergelim ao longo de 20 anos.	23
Figura 5.2 – Sequestro de carbono no solo em 20 anos, de acordo com o cultivo.	24
Figura 5.3 – Plano de desenvolvimento dos Campos Cardeal e Colibri.	25
Figura 5.4 – Percentual das emissões de GEE da produção onshore na Bacia Potiguar em função do volume relativo de AP do campo Cardeal e Colibri.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Dados de clima utilizados na calibração do modelo.....	18
Tabela 4.2 – Dados de solo utilizados nas simulações.	18
Tabela 5.1 – Entrada de carbono para cada oleaginosa.	21
Tabela 5.2 – Dados de clima utilizados nas simulações.....	22
Tabela 5.3 – Produtividade de óleo e demanda hídrica das espécies avaliadas.	26
Tabela 5.4 – Área de cultivo, produção de óleo e sequestro de carbono em 20 anos em função do volume de AP produzido no campo Cardeal e Colibri.....	27

SUMÁRIO

RESUMO.....	VII
ABSTRACT	VIII
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS.....	3
2.1 OBJETIVO GERAL.....	3
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 REFERENCIAL TEÓRICO	4
3.1 POTENCIAL DA UTILIZAÇÃO DA ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO (AP) PARA AGRICULTURA	4
3.2 O PAPEL DO BIODIESEL NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL.....	4
3.3 POTENCIAL DAS CULTURAS OLEAGINOSAS PARA A DESCARBONIZAÇÃO	6
3.3.1 <i>Algodão</i>	6
3.3.2 <i>Girassol</i>	7
3.3.3 <i>Gergelim</i>	9
3.4 IMPORTÂNCIA DO BIOCHAR	10
3.5 MODELAGEM DA DINÂMICA DE CARBONO NO SOLO COM O MODELO ROTH C	10
4 METODOLOGIA	13
4.1 O MODELO ROTH C	13
4.2 SOILR	16
4.3 ÁREA DE ESTUDO	16
4.4 CONDIÇÕES AMBIENTAIS EMPREGADAS	17
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	20
5.1 CALIBRAÇÃO DO MODELO ROTH C PARA AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO SEMIÁRIDO POTIGUAR	20
5.2 VALIDAÇÃO DO MODELO ROTH C PARA AS CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO SEMIÁRIDO POTIGUAR	20
5.3 SIMULAÇÃO DO SEQUESTRO DE CARBONO NO SOLO UTILIZADO O MODELO ROTH C	21
5.3.1 <i>Entrada anual de carbono no solo</i>	21
5.3.2 <i>Simulação do estoque de carbono no solo</i>	21
5.4 POTENCIAL DE SEQUESTRO DE CARBONO NO SOLO.....	23
5.4.1 <i>Análise de acordo com a área do campo Cardeal e Colibri</i>	24
5.4.2 <i>Análise de acordo com o volume do campo Cardeal e Colibri</i>	25
CONSIDERAÇÕES FINAIS	28
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas tem impulsionado a necessidade de ações concretas para mitigar os impactos ambientais e limitar o aquecimento global. Segundo o sexto relatório de avaliação do Painel Intergovernamental das Mudanças Climáticas (IPCC, 2022), a temperatura da superfície terrestre pode aumentar em 1,5°C até 2030, tornando difícil restringir o aumento para menos de 2,0°C até o final do século.

Através da sua Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), o Brasil se comprometeu a reduzir as emissões de gases de efeito estufa em 48% até 2025 e 53% até 2030, em comparação com os níveis de 2005. Essas metas, alinhadas com o Acordo de Paris, contribuem significativamente para diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). A expansão da matriz energética com maior participação de bioenergia e fontes renováveis impulsiona o acesso à energia limpa (ODS 7), promove a produção e o consumo sustentáveis (ODS 12) e contribui para a mitigação das mudanças climáticas (ODS 13). Além disso, essas ações beneficiam os ecossistemas aquáticos e terrestres (ODS 14 e 15) (Brasil, 2022).

Diante disso, uma estratégia promissora para atingir emissões líquidas zero de CO₂ é o sequestro de carbono no solo por meio da agricultura. No Semiárido Potiguar, região caracterizada por condições climáticas severas e recursos naturais limitados, adotar práticas agrícolas que favoreçam o sequestro de carbono pode oferecer benefícios como melhoria da qualidade do solo, redução das emissões de CO₂, aumento da produtividade agrícola, bem como pode garantir a sustentabilidade ambiental (Sá e Silva, 2010).

O trabalho de Coleman e Jenkinson (1996) representa um marco fundamental na modelagem da dinâmica do carbono no solo. A partir disso, diversas pesquisas têm buscado aprimorar e aplicar esses modelos a diferentes cenários. Neste estudo, buscou-se dar continuidade a essa linha de investigação, analisando a dinâmica do estoque de carbono do solo em cultivos de algodão, girassol ou gergelim em terras semiáridas não produtivas, a fim de fornecer subsídios técnicos para a tomada de decisões sustentáveis em projetos de oleaginosas nas condições avaliadas.

As empresas petrolíferas *onshore* da região, como a Mandacaru Energia, têm reconhecido a importância de investir em projetos que minimizem os impactos ambientais de suas operações. Diante do expressivo volume de água produzida (AP) gerada durante a exploração de petróleo, essas empresas investem em soluções inovadoras que contribuam para o tratamento e reutilização da AP, promovendo a sustentabilidade e impulsionando o

desenvolvimento regional por meio da aplicação dessa água em atividades agrícolas, como a irrigação de culturas para produção de biocombustíveis (Pinheiro *et al.*, 2014).

Nesse contexto, as culturas oleaginosas emergem como matérias-primas potenciais para a produção de biocombustíveis, uma vez que, durante a fotossíntese, absorvem CO₂ da atmosfera e o convertem em biomassa, desempenhando um papel importante na mitigação dos gases de efeito estufa. Espécies como algodão, girassol e gergelim são promissoras para a região semiárida devido à sua alta produtividade de massa seca, resistência à salinidade e capacidade de tolerar o estresse hídrico. Além disso, a maior parte das plantas pode ser aproveitada como resíduo, com exceção das sementes, como no caso do girassol (Lichston e Silva, 2019).

O carbono orgânico no solo (COS) é crucial para o ciclo global do carbono. Sendo o solo o maior reservatório desse elemento na superfície terrestre, um aumento no COS resulta em uma redução da concentração de dióxido de carbono na atmosfera (Lal, 2004). Portanto, ações que promovam o sequestro de carbono no solo são essenciais para combater as mudanças climáticas. A adoção de culturas perenes em sistemas de manejo conservacionista é uma estratégia promissora para alcançar esse objetivo, pois os resíduos da colheita ajudam a preservar a estrutura do solo e a elevar o teor de matéria orgânica (Medeiros *et al.*, 2020).

A estimativa das alterações no estoque de carbono do solo é fundamental para identificar estratégias eficazes de mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em culturas energéticas. Isso é influenciado por variáveis como o manejo das culturas e do solo, que são dados essenciais na Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) de projetos de bioenergia e biocombustíveis (Nguyen; Williams; Paustian, 2017).

Mudanças no estoque de carbono do solo podem ser modeladas por meio de modelos biogeoquímicos baseados em processos, como o RothC (Coleman; Jenkinson, 1996), CENTURY (Parton *et al.*, 1987), APSIM (McCown *et al.*, 1996) e DAYCENT (Del Grosso *et al.*, 2000), que foram inicialmente desenvolvidos para pesquisa agrônômica. No entanto, muitos desses modelos têm sido utilizados com eficácia para estimativas de carbono do solo e GEE em nível nacional (Lefebvre *et al.*, 2020; Gottschalk *et al.*, 2012).

O RothC foi selecionado devido à sua frequência de uso por gestores de terras e formuladores de políticas para quantificar os impactos das mudanças no carbono orgânico do solo por meio de diferentes práticas de manejo. A Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) utiliza este modelo em suas avaliações (FAO, 2022). Países como Reino Unido, Japão, Suíça e Austrália têm adotado o RothC em seus inventários de GEE. A ampla aplicação do RothC se deve, em grande parte, ao baixo número de dados de entrada necessários para suas simulações (Shirato, 2020).

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

- avaliar o sequestro de carbono no solo de cultivos de espécies oleaginosas do Semiárido Potiguar utilizando o modelo de dinâmica de matéria orgânica no solo RothC;
- avaliar a viabilidade de implementação de projetos de cultivo de oleaginosas como uma estratégia sustentável para empresas produtoras de petróleo e gás;
- ter o cultivo de oleaginosas com foco na sustentabilidade e na possibilidade de alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU.

2.2 Objetivos específicos

- avaliar o potencial de cultivo de algodão, girassol e gergelim como estratégia para aumentar o estoque de carbono no solo do Semiárido Potiguar;
- realizar simulações para prever o sequestro de carbono no solo ao longo dos anos sob diferentes estratégias de manejo;
- desenvolver uma ambidestria técnica por meio de materiais que ofereçam recomendações para pesquisas focadas no cultivo de oleaginosas e na irrigação utilizando água produzida em campos petrolíferos, promovendo práticas sustentáveis.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Potencial da utilização da água produzida do petróleo (AP) para agricultura

A escassez hídrica é um desafio que afeta diversas partes do mundo e representa uma ameaça crescente devido a uma combinação de fatores naturais e ações antrópicas. No Brasil, esta realidade é particularmente crítica em áreas como a região Semiárida, onde a falta de água impõe sérias restrições ao desenvolvimento socioeconômico, tornando-se crucial a criação de estratégias para a utilização deste recurso natural. O consumo de água para o setor agrícola, por exemplo, corresponde a cerca de 70% do aproveitamento de fontes hídricas consideradas de boa qualidade no mundo, reforçando assim, a importância do aproveitamento da água através de fontes alternativas (Leal, 2022).

Em contrapartida, enquanto o país enfrenta desafios relacionados à escassez de água, a indústria petrolífera gera grandes volumes de água como subproduto da extração de petróleo. Esse subproduto, denominado água produzida, é resultante do processo de perfuração e pode chegar a representar mais de 50% do volume total produzido ao longo da vida útil de um poço. (Borges, 2017).

Diante disso, a reutilização da água produzida do petróleo para fins de irrigação está se tornando uma prática cada vez mais comum, uma vez que esta abordagem ajuda a reduzir a demanda por água doce, por meio da redução da extração de água de rios, lagos e aquíferos, bem como permite o uso sustentável dos recursos hídricos. (Pinto, 2016).

No estudo realizado por Pinheiro *et al.* (2014), foi detalhado um projeto experimental de reciclagem de água proveniente do Campo de Fazenda Belém, localizado entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte, a fim de cultivar oleaginosas utilizadas na produção de biodiesel. Os resultados indicaram que a água produzida demonstrou um potencial significativo para ser utilizada na irrigação de culturas oleaginosas destinadas à produção de biodiesel.

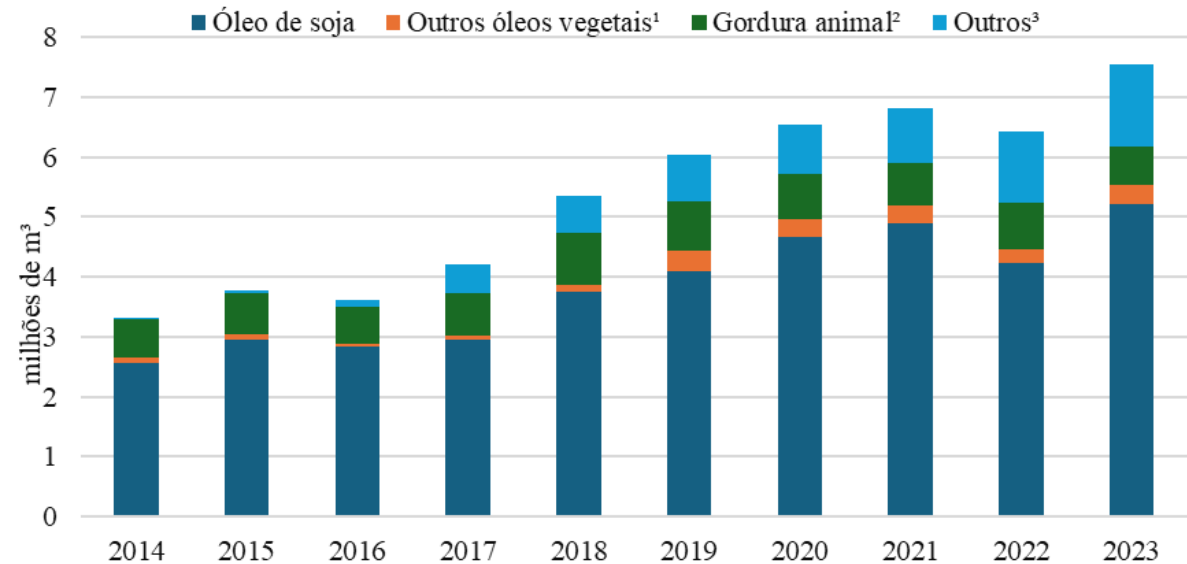
3.2 O papel do biodiesel na transição energética no Brasil

A busca por um futuro mais sustentável, motivada pela necessidade de reduzir as emissões de gases do efeito estufa, tem feito do biodiesel um aliado fundamental na transição energética. Derivado de fontes renováveis como óleos vegetais e gorduras animais, o biodiesel oferece uma alternativa sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo significativamente para a descarbonização do setor de transportes (Senusi *et al.*, 2024).

No Brasil, a produção e o consumo de biodiesel têm crescido de forma consistente. Em 2023, a produção superou os 7,5 milhões de metros cúbicos, um crescimento de 20,4% em relação ao ano anterior, impulsionado por políticas públicas como a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), que estabelece a obrigatoriedade de mistura de biodiesel ao diesel convencional, prevista para aumentar gradual para 15% até 2025, o que reforça o papel do biodiesel na transição energética e na redução das emissões de carbono (ANP, 2024).

Segundo Beltrão e Oliveira (2007), a produção de biodiesel tem sido estimulada pela utilização de fontes mais sustentáveis, como oleaginosas e óleos de cozinha que seriam descartados, contribuindo para a economia circular e reduzindo a pressão sobre os recursos naturais. A Figura 1 apresenta as principais matérias-primas utilizadas no Brasil para a produção de biodiesel.

Figura 3.1 – Principais matérias-primas utilizadas no Brasil para a produção de biodiesel.



¹Inclui óleo de algodão, canola, girassol, macaúba, milho, palma e palmiste ²Inclui gordura bovina, de frango e de porco.

³Inclui óleo de fritura usado e outros materiais graxos.

Fonte: ANP (2024).

O gráfico anterior demonstra a evolução da produção de biodiesel no período de 2014 a 2023, sendo o óleo de soja o principal responsável por esse aumento. É notável que a utilização de diferentes matérias-primas está cada vez mais variada, evidenciada pelo aumento da participação de outros óleos vegetais, refletindo a busca por fontes mais sustentáveis.

3.3 Potencial das culturas oleaginosas para a descarbonização

Uma abordagem eficaz para alcançar a descarbonização é o sequestro de carbono no solo por meio da agricultura. Essa estratégia envolve a incorporação de práticas agrícolas que potencializam a captura e armazenagem de carbono, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Bordonal *et al.*, 2024).

No Semiárido, o cultivo de oleaginosas apresenta grande potencial para o sequestro de carbono, pois há espécies que são facilmente adaptadas às condições climáticas da região. Durante a fotossíntese, essas culturas são capazes de absorver o CO₂ da atmosfera e convertê-lo em biomassa, auxiliando na diminuição dos gases de efeito estufa, suas raízes profundas contribuem para a melhoria da estrutura do solo, aumentando a capacidade de retenção de água e nutrientes e promovendo a formação de matéria orgânica, o que potencializa a captura de carbono ao longo do tempo (Beltrão; Cardoso; Vale, 2007).

A produção de oleaginosas envolve uma série de processos e tecnologias que variam de acordo com a cultura, a escala de produção e as condições locais. A partir de sistemas de cultivo tradicionais, baseados em técnicas manuais e em conhecimento empírico, a cultivos mais intensivos, com mecanização moderna e uso mais extenso de insumos, demonstra uma grande diversidade nas cadeias produtivas de oleaginosas. A escolha do tipo de produção é realizada considerando fatores como o tipo de solo, clima, a demanda hídrica, infraestrutura e condições de mercado (Seixas *et al.*, 2020).

Oleaginosas como o algodão, girassol e gergelim são promissoras para o cultivo na região semiárida, devido à sua alta produtividade de massa seca, resistência à salinidade e ao estresse hídrico, tornando-as bem adaptadas às condições desafiadoras da região (Lichston e Silva, 2019).

3.3.1 Algodão

O algodoeiro (Figura 2) é uma das culturas comerciais mais importantes no cenário global, com uma produção total de 24,41 milhões de toneladas, ocupando uma área de 31,7 milhões de hectares. No contexto brasileiro, o país destacou-se como o terceiro maior produtor mundial de algodão do ano de 2023, alcançando uma produção de 3,23 milhões de toneladas em uma área cultivada de 1,67 milhão de hectares (ICAC, 2023).

Figura 3.2 – Campo de algodão pronto para a colheita.



Fonte: EMBRAPA. **Campo de algodão pronto para a colheita.** Banco de imagens. Fotografia de Fabiano José Perina. Embrapa Algodão, 2014. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/1758001/campo-de-algodao>. Acesso em: 11 ago. 2024.

Na região semiárida, o cultivo do algodão se destaca devido sua elevada adaptabilidade às condições adversas da área, caracterizada por baixos índices pluviométricos e solos salinos, uma vez que a cultura possui notável tolerância à salinidade e ao estresse hídrico. Ademais, o algodoeiro apresenta alta produtividade de massa seca, fundamental para a sustentabilidade agrícola na região semiárida. (Oliveira *et al.*, 2012).

Além de sua relevância na produção de fibras, o algodão apresenta um notável potencial para o sequestro de carbono. Suas raízes profundas e a possibilidade de cultivar várias plantas por hectare durante o ciclo de cultivo promovem a captura de carbono no solo, operando como um sumidouro natural eficiente. De acordo com Beltrão *et al.* (2007), em cultivos de algodão, pode-se sequestrar mais de 35 toneladas de CO₂ por hectare.

Entre as aplicações do algodão, o óleo extraído das suas sementes é bastante utilizado na fabricação de biodiesel. Esse óleo pode ser obtido através de processos de extração das sementes de algodão, que possuem um teor de óleo de aproximadamente 15%. Estima-se que a produção de óleo das sementes alcance entre 0,1 e 0,2 toneladas por hectare anualmente, sendo 98,3% desse óleo convertido em biodiesel, evidenciando a importância do óleo de algodão na produção sustentável de energia (Varão *et al.*, 2018).

3.3.2 *Girassol*

O girassol (Figura 3) é uma oleaginosa amplamente cultivada em todos os continentes, ocupando uma área que chega a cerca de 29 milhões de hectares. Em 2022, foi produzido globalmente 54,28 milhões de sementes de girassol, um aumento de 28,29% em comparação

ao ano de 2015. No contexto brasileiro, foram produzidas 60,15 mil toneladas de girassol no ano de 2022, ocupando uma área de aproximadamente 37 mil hectares (FAO, 2022).

Figura 3.3 – Cultivo de girassol.



Fonte: EMBRAPA. **Cultivo de girassol**. Banco de imagens. Fotografia de Luis Wagner Rodrigues Alves. Embrapa Amapá, 2019. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/4616001/cultura-de-girassol>. Acesso em: 11 ago. 2024.

O cultivo do girassol na região semiárida é altamente recomendável devido à sua notável resistência ao estresse hídrico e adaptabilidade a solos de baixa fertilidade, típicos dessa área. Ele possui um sistema radicular profundo, que maximiza a absorção de água, e sua capacidade de crescer em ambientes com restrição hídrica o torna ideal para climas áridos. (Castro *et al.*, 1997).

O sequestro de carbono no cultivo de girassol ocorre principalmente por meio do solo e da fotossíntese realizada pelas plantas. O girassol, ao crescer, absorve dióxido de carbono (CO_2) da atmosfera, transformando-o em biomassa vegetal e ajudando a reduzir a concentração de gases de efeito estufa. Além disso, o girassol contribui para a retenção de carbono no solo, especialmente quando há práticas agrícolas sustentáveis. (Suardi *et al.*, 2024).

No estudo realizado por Suardi *et al.* (2024), foi analisada a pegada de carbono dos óleos de cânhamo e girassol. Os resultados indicaram que a produção de óleo de girassol é consideravelmente menos poluente do que a produção de óleo de cânhamo. Especificamente, para cada quilo de óleo de girassol produzido, são emitidos 4,24 kg de CO_2 , o que representa uma emissão quatro vezes menor em comparação ao óleo de cânhamo.

Ademais, o girassol representa uma alternativa viável para a produção de biocombustíveis, uma vez que os seus grãos contêm um elevado teor de óleo, que varia entre 38% e 53%, podendo ser convertido em biodiesel. (Castro *et al.*, 1997).

3.3.3 *Gergelim*

Em 2022, a produção global de gergelim (Figura 4) alcançou 6,74 milhões de toneladas, distribuídas por uma área de 12,83 milhões de hectares, um aumento de 17,62% em comparação ao ano de 2015. No Brasil, a produção de gergelim também registrou um avanço significativo, com 165 mil toneladas colhidas em uma área cultivada de 307 mil hectares (FAO, 2022).

Figura 3.4 – Cultivo de gergelim.



Fonte: EMBRAPA. **Cultivo de gergelim**. Banco de imagens. Fotografia de Sebastião Lemos. Embrapa Algodão, 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-imagens/-/midia/5154001/plantacao-de-gergelim>. Acesso em: 11 ago. 2024.

O gergelim se adapta bem às condições climáticas e de solo do Nordeste e possui uma alta demanda tanto no mercado interno quanto externo, oferecendo preços atraentes para seu cultivo. É uma oleaginosa de fácil cultivo que se desenvolve bem durante períodos de seca. Suas sementes são altamente nutritivas e podem ser usadas em diversos produtos alimentícios, além de permitir a extração de óleo, com um teor de 40% a 60% de óleo por semente (Cruz *et al.*, 2019).

O óleo de gergelim surge como uma alternativa viável para a produção de biocombustível, classificando-se como um óleo vegetal. Em comparação com o diesel, ele apresenta diversas vantagens significativas. Primeiramente, é um recurso renovável e possui um elevado valor energético. Além disso, possui baixo teor de enxofre e um menor conteúdo aromático, o que contribui para sua biodegradabilidade (Silva, 2016).

3.4 Importância do biochar

O biochar, um carvão vegetal produzido a partir da pirólise de biomassa, tem emergido como uma tecnologia de captura e armazenamento de carbono com grande potencial. Ao transformar matéria orgânica em um sólido rico em carbono, o biochar permite que o CO₂ seja retirado da atmosfera e armazenado no solo por longos períodos. Esse processo se baseia na capacidade das plantas de fixar o carbono atmosférico por meio da fotossíntese e na subsequente conversão desse carbono em biochar. (Weber et al., 2018).

A produção de biochar pode ser integrada a sistemas de bioenergia, gerando energia limpa e renovável a partir da biomassa residual, em um modelo conhecido como bioenergia com captura e armazenamento de carbono (BECCS), que permite otimizar o uso de recursos e maximizar os benefícios ambientais e socioeconômicos. (Woolf, Lehmann e Lee, 2016).

A fim de entender e prever o potencial do biochar como estratégia de mitigação de gases de efeito estufa, deve-se levar em consideração a diversidade dos tipos de biochar que podem ser produzidos e os diferentes efeitos das condições sobre a eficácia da produção. As características do biochar, como a capacidade de retenção de carbono, variam de acordo com a forma como ele é produzido, com o tipo de biomassa utilizada como matéria-prima e as condições da pirólise. Cada combinação de fatores refere-se a biochars com propriedades específicas, que podem depender da forma distinta dos solos onde são aplicados. Lefebvre *et al.* (2020).

Além de contribuir para a mitigação das mudanças climáticas, o biochar oferece uma série de benefícios para os ecossistemas e a agricultura, como a melhoria da fertilidade do solo, a retenção de água e nutrientes, e a promoção do crescimento das plantas.

3.5 Modelagem da dinâmica de carbono no solo com o modelo RothC

A modelagem é uma técnica utilizada para simular o comportamento de sistemas reais por meio de modelos matemáticos ou computacionais, permitindo a previsão de seus resultados em diversas condições sem a necessidade de experimentação direta. No contexto da dinâmica de carbono no solo, a modelagem oferece uma maneira eficiente de estudar os processos envolvidos no sequestro e emissão de carbono, contribuindo para o entendimento de como o solo armazena e libera carbono ao longo do tempo. (Santos, 2019).

A construção de modelos matemáticos se fundamenta em um conjunto de equações diferenciais que descrevem as relações entre as variáveis de um sistema. Ao serem resolvidas,

essas equações descrevem o comportamento do sistema ao longo do tempo permitindo a análise de diferentes cenários e a previsão de resultados. Sua aplicação bem-sucedida depende de um processo de calibração, que ajusta os parâmetros para que melhor representem os dados reais, e de validação, onde é avaliada a capacidade do modelo para prever novos dados. (Jordon *et al.*, 2022).

Entre os modelos matemáticos mais relevantes, destacam-se o DayCent (Del Grosso *et al.*, 2000), Century (Parton *et al.*, 1987) e RothC (Coleman; Jenkinson, 1996). O DayCent, embora ofereça uma simulação abrangente de processos agroecossistêmicos, requer maior complexidade computacional. Já o Century concentra-se em ecossistemas terrestres e mudanças climáticas, mas pode apresentar limitações em sistemas agrícolas intensivos. O RothC, por sua vez, é utilizado para simular a decomposição da matéria orgânica no solo, considerando fatores como o tipo de solo, clima e práticas de manejo, sendo uma ferramenta essencial para prever o impacto das práticas agrícolas no armazenamento de carbono no solo. (Santos, 2019; Afzali *et al.*, 2019).

Diante disso, o modelo RothC foi escolhido para este trabalho devido à sua robustez e eficácia na simulação da dinâmica da matéria orgânica no solo. Este modelo tem se destacado na previsão do comportamento do carbono ao longo do tempo, permitindo também avaliar como diferentes práticas de manejo agrícola influenciam os estoques de carbono no solo. (Lefebvre *et al.* 2020).

Uma proposta de generalização dos modelos foi proposta por Sierra, Müller e Trumbore (2012), conforme expresso pela Equação 3.1.

$$\frac{dC(t)}{dt} = I(t) + A(t)C(t) \quad (3.1)$$

Em que $C(t)$ é um vetor de estoques de carbono em m reservatórios em um determinado momento t ; $A(t)$ é uma matriz quadrada $m \times m$ com taxas de decomposição dependentes do tempo e dos coeficientes de transferência entre os reservatórios; e $I(t)$ é um vetor coluna dependente do tempo que descreve a quantidade de entradas para cada reservatório. A matriz $A(t)$ é crucial, pois define a estrutura do modelo e os efeitos externos sobre as taxas de decomposição e transferência (Sierra; Müller; Trumbore, 2012).

Uma forma alternativa da Equação 3.1 é dada por:

$$\frac{dC(t)}{dt} = I(t) + \varepsilon(t)AC(t) \quad (3.2)$$

Em que $\varepsilon(t)$ é um escalar dependente do tempo que incorpora os efeitos ambientais sobre as taxas de decomposição.

Os modelos que descrevem os compartimentos de decomposição da matéria orgânica podem assumir várias configurações, como paralelo, em série e feedback. Cada configuração descreve como um compartimento libera carbono e CO₂ para outro. As entradas na diagonal representam a decomposição taxa k_j para cada compartimento j . Uma condição exigida é que todo $k_j \geq 0$ (Sierra; Müller; Trumbore, 2012).

Os parâmetros $a_{i,j}$ são coeficientes de transferência de material do reservatório j para o reservatório i , condição requerida é que $a_{i,j} \geq 0$. Uma característica importante das entradas é que $a_{i,j} = \alpha_{i,j} k_i$, em que $\alpha_{i,j}$ representa a taxa de decomposição do reservatório i para o reservatório j .

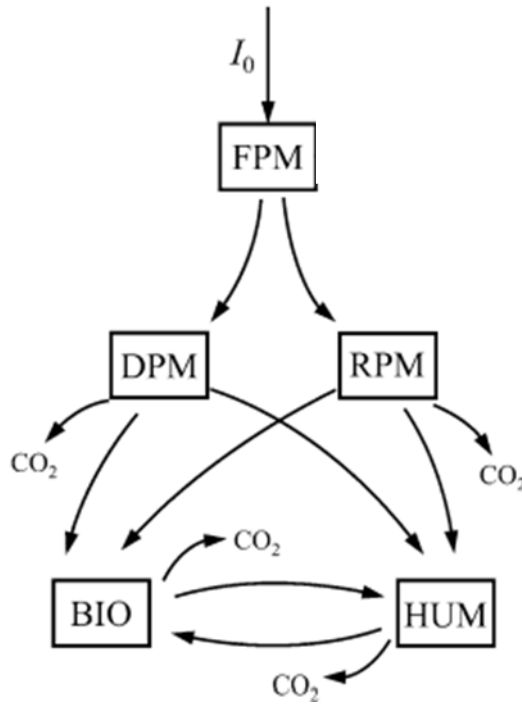
4 METODOLOGIA

4.1 O modelo RothC

No modelo RothC, o FPM (*fresh plant material*, em português, material vegetal fresco), é inicialmente dividido em dois *pools* de decomposição, denominados DPM (*decomposable plant material*, em português, material vegetal decomponível) e RPM (*recalcitrant plant material*, em português, material vegetal recalcitrante). Estes compartimentos se decompõem posteriormente em dois diferentes *pools* de carbono orgânico do solo, BIO (biomassa microbiana) e HUM (matéria orgânica humificada).

A decomposição ocorre com cinética de primeira ordem em cada um desses *pools*, e durante cada fase de transformação entre os compartimentos, uma fração do carbono é liberada na forma de CO₂ (Figura 4).

Figura 4.1 – Estrutura do modelo RothC.



Fonte: Adaptado de Lefebvre *et al.* (2020).

O modelo RothC é descrito pelo seguinte conjunto de equações diferenciais (Jenkinson; Adams; Wild, 1991; Coleman; Jenkinson, 1996):

$$\frac{dc_1}{dt} = \gamma I - k_1 C_1 \quad (4.1)$$

$$\frac{dC_2}{dt} = (1 - \gamma)I - k_2C_2 \quad (4.2)$$

$$\frac{dC_3}{dt} = \alpha_{3,1}k_1C_1 + \alpha_{3,2}k_2C_2 - k_3C_3 + \alpha_{3,3}k_3C_3 + \alpha_{3,4}k_4C_4 \quad (4.3)$$

$$\frac{dC_4}{dt} = \alpha_{4,1}k_1C_1 + \alpha_{4,2}k_2C_2 - \alpha_{4,3}k_3C_3 - k_4C_4 + \alpha_{4,4}k_4C_4 \quad (4.4)$$

$$\frac{dC_5}{dt} = 0 \quad (4.5)$$

Em que I denota a quantidade anual de insumos de carbono, C_1 representa o reservatório de material vegetal decomponível (DPM); C_2 o reservatório de material vegetal resistente (RPM); C_3 o de biomassa microbiana (BIO), C_4 o de matéria orgânica humificada (HUM) e C_5 o de matéria orgânica inerte (IOM). As taxas de decomposição em cada reservatório (k_1 , k_2 , k_3 , e k_4) são dadas por experimentos de longa duração apresentados originalmente no trabalho de Jenkinson *et al* (1987, 1990), que já foi validado em muitos trabalhos em diferentes propriedades do clima e do solo (Farina; Coleman; Whitmore, 2013; Shirato, 2020). Seus valores são constantes e dados por (Coleman, Jenkinson, 1996; Jenkinson, 1990): $k_1 = 10$, $k_2 = 0,3$, $k_3 = 0,66$, e $k_4 = 0,02$.

Os parâmetros $\alpha_{i,j}$ são os coeficientes de transferência, que são determinados em função da textura do solo. A expressão utilizada para os coeficientes de transferência do reservatório de biomassa microbiana é a seguinte:

$$\alpha_{3,j} = k_j \frac{0,46}{x+1} \quad (4.6)$$

Em que x é a proporção de material decomposto que é respirado como CO_2 , o qual é calculado pela seguinte expressão:

$$x = 1,67[1,85 + 1,60 \exp \exp (-0,0786p\text{Clay})] \quad (4.7)$$

Em que $p\text{Clay}$ é a porcentagem de argila no solo mineral (Jenkinson, 1990).

Os coeficientes de transferência para o reservatório humificado são dados por:

$$\alpha_{4,j} = k_j \frac{0.54}{x + 1} \quad (4.8)$$

A partição do material vegetal de entrada é determinada pela razão DPM/RPM, que por sua vez é definida de acordo com o sistema ambiental. Para terras áridas, DPM/RPM é igual a 0,67, sendo $\gamma = 0,40$. (Coleman, Jenkinson, 2014).

$$\frac{DPM}{RPM} = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \quad (4.9)$$

Para contabilizar os efeitos da temperatura, umidade e cobertura do solo, a taxa de decomposição é modificada por meio da seguinte expressão:

$$k_j^{modificada} = k_j \cdot a \cdot b \cdot c \quad (4.10)$$

Em que $k_j^{modificada}$ é a taxa de decomposição modificada pelos fatores da temperatura (a), da umidade (b) e da cobertura do solo (c). (Sierra, Müller e Trumbore, 2012)

O parâmetro a denota o efeito modificador da temperatura na decomposição do carbono orgânico, conforme apresentado na Equação 4.11. (Coleman; Jenkinson, 2014)

$$a = \frac{47,91}{1 + e^{\left(\frac{106,06}{T+18,27}\right)}} \quad (4.11)$$

Em que T é a média mensal da temperatura do ar em °C.

O efeito modificador da umidade na decomposição do carbono orgânico (b), devido à evapotranspiração e à precipitação (Coleman; Jenkinson, 2014), é calculado de acordo com o déficit de umidade da camada superficial do solo ($TSMD$) acumulado e máximo a partir da seguinte forma:

Se $acc.TSMD < 0,444 \cdot max.TSMD$, então

$$b = 1 \quad (4.12)$$

Senão

$$b = 0,2 + (1,0 - 0,2) \frac{(max.TSMD - acc.TSMD)}{(max.TSMD - 0,444 max.TSMD)} \cdot c \quad (4.13)$$

Em que *TSMD* é o déficit de umidade da camada superficial do solo (0-23cm); *max.TSMD* é o *TSMD* máximo e *acc.TSMD* é o *TSMD* acumulado de um mês para outro.

O *max.TSMD* é calculado a partir do percentual de argila no solo (*pClay*) e da profundidade da amostra de solo utilizada, em *cm*, conforme apresentando na Equação 4.14.

$$TSMD = -[20 + 1,3(pClay) - 0,01(pClay)^2] \frac{(\text{profundidade do solo})}{(23 \text{ cm})} \quad (4.14)$$

Para camadas de solo de diferentes espessuras, *max.TSDM* deve ser dividido por 23 e multiplicado pela espessura da camada, em *cm*.

O parâmetro *c* da Equação 4.14 é o fator modificador da taxa de cobertura do solo, onde *c* = 0,6 para solo coberto (vegetado) e *c* = 1,0 para solo sem cobertura.

4.2 SoilR

Sierra, Müller e Trumbore (2012) desenvolveram uma biblioteca da linguagem de programação R com diversos modelos de dinâmica de carbono no solo, a qual foi utilizada para a realização das simulações deste trabalho. Intitulada de *SoilR*, a referida biblioteca juntamente com as funcionalidades da programação R, possibilita a simulação do armazenamento e da liberação de carbono orgânico no solo ao longo do tempo, facilitando a análise da durabilidade, das trocas de carbono entre diferentes compartimentos do solo, além das respostas às mudanças climáticas e práticas de manejo agrícola.

4.3 Área de estudo

A área de estudo escolhida localiza-se nas proximidades do Campo Cardeal (5°16'12.0"S 37°31'48.0"W) sob concessão da empresa Mandacaru Energia, o qual integra a Bacia Potiguar, reconhecida como uma das principais regiões de exploração *onshore* do Brasil devido sua contribuição significativa para a produção nacional de petróleo.

O Campo Cardeal cobre uma área de 82 km² de desenvolvimento e está situado a cerca de 30 km do município de Mossoró, Rio Grande do Norte. A localização estratégica da área

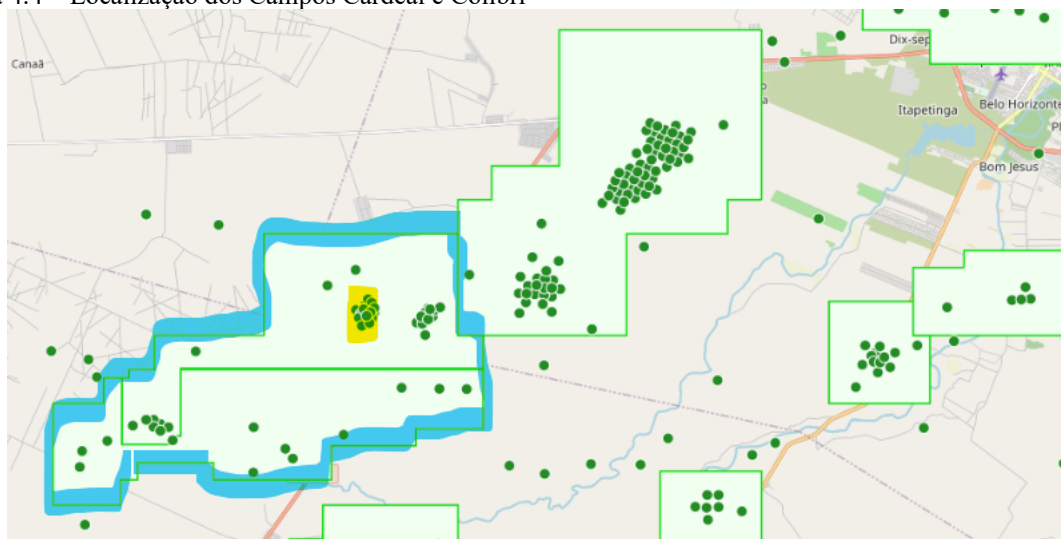
facilita o desenvolvimento de projetos direcionados à exploração de recursos energéticos, além de favorecer a implementação de estudos relacionados à sustentabilidade e ao uso racional dos recursos naturais energéticos.

Figura 4.3 – Área de estudo



Fonte: Mandacaru Energia (2024).

Figura 4.4 – Localização dos Campos Cardeal e Colibri



Fonte: GeoMaps ANP. Disponível em: <https://geomaps.anp.gov.br/>. Acesso em 31 out 2024.

4.4 Condições ambientais empregadas

O modelo RothC requer um conjunto de dados específicos para sua execução. São utilizadas informações sobre o clima, que inclui a precipitação mensal, temperatura média mensal do ar e evapotranspiração mensal. Também é necessário a utilização de parâmetros para

o solo, onde são considerados: o teor de carbono orgânico, teor de argila, profundidade do solo, densidade aparente do solo, coeficiente de partição e quantidade de estrume adicionada.

Os dados climáticos utilizados para a calibração referem-se ao ano de 2005 e foram obtidos da Ferramenta AQUASTAT (FAO, 2024), correspondendo à área de estudo nas proximidades do Campo Cardeal da Mandacaru Energia, em Mossoró-RN, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados de clima utilizados na calibração do modelo.

Mês	Temperatura/°C	Precipitação/ (mm/mês)	Evapotranspiração/ (mm/mês)
Janeiro	24	29	137
Fevereiro	24	34	133
Março	24	130	142
Abril	24	39	141
Mai	24	69	142
Junho	23	32	127
Julho	22	4	124
Agosto	22	1	119
Setembro	22	1	115
Outubro	23	1	125
Novembro	23	5	127
Dezembro	23	10	134

Fonte: FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **AQUASTAT Climate Information Tool**. FAO, 2024. Disponível em: <https://aquastat.fao.org/climate-information-tool/climatedata?lat=23.5557714&lon=46.6395571&filterParams=%7B%22fromDate%22%3A1644785334757,%22toDate%22%3A%222023-01-01T02%3A59%3A59.999Z%22%7D>. Acesso em: 18 out. 2024.

Os dados de solo utilizados estão apresentados na Tabela 4.2. O coeficiente de partição, que expressa a fração entre os estoques de material vegetal decomponível (DPM) e recalcitrante (RPM) foi determinado com base em Coleman e Jenkinson (2014). Os autores recomendam um valor de 0,67 para solos sem cobertura vegetal, o qual foi adotado neste trabalho.

Tabela 4.2 – Dados de solo utilizados nas simulações.

Parâmetro	Valor
Tipo de solo	<i>Eutric Cambisols</i>
Teor de argila (%)	21
Densidade do solo (kg/m ³)	1500

Profundidade do Solo(m)	0,3
Teor de carbono no solo (%)	0,6
Entrada de estrume (FYM) (Mg C/ha)	0
Coefficiente de partição (DR)	0,67

Fonte: FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Harmonized World Soil Database v2.0**. FAO, 2024. Disponível em: <https://www.fao.org/soils-portal/data-hub/soil-maps-and-databases/harmonized-world-soil-database-v20/en/>. Acesso em: 9 out. 2024.

O estoque de carbono orgânico do solo (SOC) das camadas de solo de 0 a 30 cm de profundidade foi quantificado utilizando a Equação 4.15, a partir dos dados empregados na Tabela 4.2.

$$SOC \left(\frac{tC}{ha} \right) = \text{Densidade do solo} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot \text{Profundidade do solo (m)} \cdot \frac{\text{Teor de carbono no solo (\%)}}{100} \cdot \left(\frac{1 t}{1000 kg} \right) \cdot \left(\frac{10000 m^2}{1 ha} \right) \quad (4.15)$$

A matéria orgânica inerte (IOM), caracterizada por materiais orgânicos complexos e de decomposição lenta, como húmus e fragmentos vegetais altamente decompostos, desempenha um papel crucial na dinâmica do carbono no solo. Ao atuar como um reservatório de carbono de longo prazo, ela influencia significativamente a estabilidade do carbono orgânico e a fertilidade do solo. A IOM presente na camada de 0 a 30 cm do solo foi calculada utilizando a Equação 4.16, proposta por Falloon *et al.* (1998).

$$IOM \left(\frac{tC}{ha} \right) = 0,049 \cdot SOC^{1,139} \quad (4.16)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Calibração do modelo RothC para as condições ambientais do Semiárido Potiguar

A calibração do modelo levou em consideração a metodologia descrita por Francaviglia *et al.* (2012), em que o modelo RothC foi executado em modo inverso, a fim de calcular a quantidade de carbono retornada ao solo a partir do resíduo vegetal anual até atingir o estado de equilíbrio.

Para as condições específicas da região, o modelo foi executado por um período de 500 anos, considerando as condições climáticas, vegetacionais e de solo empregadas nas Tabelas 4.1 e 4.2. O processo de calibração ajustou as entradas de carbono até que o estoque de SOC simulado se igualasse ao estoque de SOC calculado, o qual foi calculado a partir da Equação 4.15.

Considerando um conteúdo de IOM de 2,09 tC/ha, calculado a partir do SOC, foi possível calibrar o modelo RothC no estado de equilíbrio, em que o valor simulado correspondeu ao valor calculado de 27 tC/ha no ano de 2005. Além disso, uma entrada de carbono de 2,47 tC/ha foi necessária para atingir o conteúdo de SOC de 27 tC/ha, conforme demonstra a Tabela 4.3.

Tabela 5.3 – Dados de SOC calculado e simulado, IOM e entrada de carbono para o solo em estudo

Solo	SOC calculado (tC/ha)	SOC simulado (tC/ha)	Entrada de carbono (tC/ha)	Matéria orgânica inerte (IOM) (tC/ha)
<i>Eutric Cambisols</i>	27	27	2,47	2,09

Fonte: Autoria própria (2024)

5.2 Validação do modelo RothC para as condições ambientais do Semiárido Potiguar

Para avaliar a calibração do modelo RothC, foi realizada a validação no modo "forward", onde o modelo projeta valores futuros com base em dados iniciais. O valor de referência utilizado foi o estoque de carbono orgânico do solo (SOC) de 26,8 tC/ha, conforme relatado por EMBRAPA (2017). A partir desse dado, foi possível confrontá-lo com o SOC simulado referente ao ano de 2017, o qual obteve valor igual a 27,04 tC/ha.

A proximidade entre o valor da literatura e o valor simulado reflete um ajuste adequado do modelo aos dados reais. Além disso, o erro quadrático médio, calculado a partir da Equação 5.2, apresentou um valor de 0,12, reforçando a confiabilidade do modelo.

$$\text{Erro quadrático médio} = \frac{\sqrt{(SOC_{literatura} - SOC_{calculado})^2}}{2} \quad (5.2)$$

Em que $SOC_{literatura}$ é o SOC da literatura e o $SOC_{calculado}$ é o simulado pelo modelo RothC.

5.3 Simulação do sequestro de carbono no solo utilizado o modelo RothC

5.3.1 Entrada anual de carbono no solo

Considerou-se como resíduo toda a biomassa restante após a remoção das sementes, uma vez que o óleo de algodão, girassol e gergelim é extraído das sementes, ricas em óleo e com potencial para produção de biodiesel. Assim, todo o resíduo gerado será aproveitado integralmente no campo. Para o cálculo da entrada de carbono no solo por conta dos resíduos dos cultivos, utilizou-se a Equação 5.3. Os valores utilizados são apresentados na Tabela 5.1.

$$E_C = P \cdot T_C \cdot AC \quad (5.3)$$

Em que E_C é a entrada de carbono anual no campo, em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$; P é a produtividade de massa seca, em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$; T_C é o percentual de carbono na biomassa seca e AC é a aplicação no campo, em $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$.

Tabela 5.1 – Entrada de carbono para cada oleaginosa.

Oleaginosa	$P /$ $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$	T_C (%)	$AC /$ $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ (100%)	$E_C /$ $t \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$
Algodão	18,99	55	10,44	10,44
Girassol	20,00	45	9,00	9,00
Gergelim *	17,00	47	7,99	7,99

Fonte: Gomes *et al.* (2011), Gyori, Sipos e Elek (2005), Batista *et al.* (2010) e Santos (2019). * Dados estimados por inteligência artificial a partir de outras oleaginosas.

5.3.2 Simulação do estoque de carbono no solo

A simulação foi realizada utilizando os mesmos parâmetros da calibração, com exceção dos dados climáticos, pois, embora os parâmetros da calibração tenham permanecido os

mesmos, as condições climáticas variam de um ano para outro.

Assim, foram coletados os dados climáticos do ano de 2022, provenientes da mesma área de estudo, os quais estão apresentados na Tabela 5.2. Quanto aos dados de solo, manteve-se os mesmos da Tabela 4.2, uma vez que a localização não sofreu alterações.

Tabela 5.2 – Dados de clima utilizados nas simulações.

Mês	Temperatura/°C	Precipitação/ (mm/mês)	Evapotranspiração/ (mm/mês)
Janeiro	28	96	233
Fevereiro	28	38	225
Março	27	224	213
Abril	27	131	190
Maiο	27	106	192
Junho	26	46	172
Julho	27	33	196
Agosto	28	6	224
Setembro	28	1	241
Outubro	29	3	277
Novembro	29	51	243
Dezembro	28	18	246

Fonte: FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **AQUASTAT Climate Information Tool**. FAO, 2024. Disponível em: <https://aquastat.fao.org/climate-information-tool/climatedata?lat=23.5557714&lon=46.6395571&filterParams=%7B%22fromDate%22%3A1644785334757%2C%22toDate%22%3A1644785334757%2C%22crop%22%3A%222023-01-01T02%3A59%3A59.999Z%22%7D>. Acesso em: 18 out. 2024.

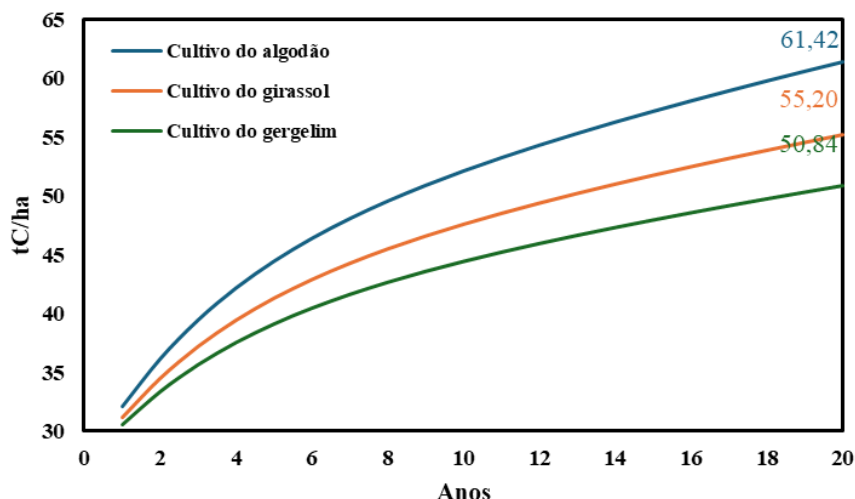
A Figura 5.1 apresenta o resultado das simulações do sequestro de carbono no solo para as três culturas oleaginosas estudadas (algodão, girassol e gergelim) nas condições climáticas do Semiárido Potiguar.

Ao longo de um período de 20 anos, o algodão se destacou como a cultura que apresentou maior acúmulo de carbono no solo, atingindo um estoque de 61,42 tC/ha, um valor 11,27% superior ao cultivo do girassol e 20,81% superior ao do gergelim. Esse resultado sugere que o algodão possui características agrônômicas que potencializam a captura e o armazenamento de carbono em comparação com as demais culturas estudadas.

No estudo realizado por Ferreira *et al.* (2018), analisou-se a influência das práticas de manejo do algodão em solos arenosos do bioma Cerrado e a rotação de culturas no sequestro de carbono, para contribuir com a meta global de aumentar em 0,4% ao ano o estoque de carbono. Os resultados mostraram um aumento de 37,7%, superando a meta da 21ª Conferência

das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, com uma taxa anual de incremento de 2,3 Mg/ha, evidenciando a eficácia do cultivo de algodão em promover a sustentabilidade e o sequestro de carbono no solo.

Figura 5.1 – Sequestro de carbono no solo em cultivos de algodão, girassol e gergelim ao longo de 20 anos.



Fonte: Autoria própria (2024)

O girassol, por sua vez, apresentou um acúmulo de carbono de 55,20 tC/ha, enquanto o gergelim demonstrou o menor potencial de sequestro dentre as três culturas, alcançando um valor de 50,84 tC/ha. A diferença no acúmulo de carbono entre as espécies pode ser atribuída a diversos fatores, como características intrínsecas das plantas, tais como taxa fotossintética, alocação de biomassa e longevidade das raízes, além de práticas de manejo adotadas.

5.4 Potencial de sequestro de carbono no solo

Nesta seção é realizada uma análise do potencial de sequestro de carbono no solo nos cultivos das oleaginosas estudadas, considerando a área do campo Cardeal e Colibri e o volume de água produzida (AP) gerada na produção desse campo.

Os cálculos realizados consideram que a quantidade de dióxido de carbono sequestrado é calculada a partir da seguinte equação estequiométrica da combustão do carbono atômico:



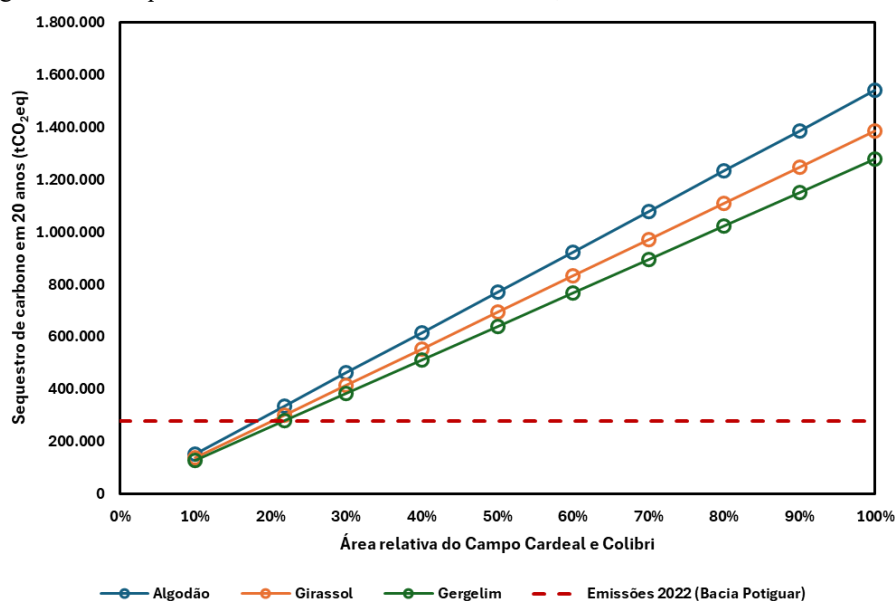
A partir da Equação 3.14 e sabendo as massas moleculares do C e CO₂ são, respectivamente, 12,01 g/mol e 44,01 g/mol, tem-se que para cada tonelada de carbono sequestrado 3,66 toneladas de CO₂ são evitadas.

5.4.1 Análise de acordo com a área do campo Cardeal e Colibri

Conforme já mencionado, o campo Cardeal e Colibri é utilizado como a área-modelo deste estudo. Este campo apresenta uma área de aproximadamente 82 km² (8.200 hectares) (MANDACARU ENERGIA, 2024).

A Figura 5.2 apresenta a quantidade de carbono sequestrado no solo após 20 anos de acordo com cultivo das espécies avaliadas em função do percentual da área do campo Cardeal e Colibri. Além disso, na mesma figura é representada as emissões de gases de efeito estufa (GEE) das operações *onshore* da Bacia Potiguar em 2022, considerando os escopos 1 e 2 dos inventários de carbono apresentados à ANP (2024b) pelas operadoras.

Figura 5.2 – Sequestro de carbono no solo em 20 anos, de acordo com o cultivo.



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir da Figura 5.2, observa-se com 10% da área (820 hectares) é possível compensar 55,15%, 49,64% e 45,78% das emissões de GEE das operações *onshore* da Bacia Potiguar em 2022, em 20 anos de cultivos de algodão, girassol e gergelim, respectivamente.

A totalidade das emissões de GEE geradas em 2022 nas operações *onshore* da Bacia Potiguar (279.210,93 tCO₂eq) poderiam ser plenamente compensadas com 20 anos de cultivos

de algodão, girassol ou gergelim utilizando, respectivamente, 18,13% (1.487,79 ha), 20,13% (1.650,34 ha) e 21,84% (1.791,20 ha) da área do campo Cardeal e Colibri.

5.4.2 *Análise de acordo com o volume do campo Cardeal e Colibri*

Campos marginais são áreas de produção de petróleo e gás que, devido à baixa produtividade ou alto custo de operação, apresentam menores opções econômicas, especialmente em comparação com campos de maior rendimento. Campos maduros, por outro lado, são aqueles onde o pico de produção já foi atingido e o volume extraído encontra-se em declínio, embora ainda haja potencial de aproveitamento.

Segundo o sumário executivo da ANP, os campos Cardeal e Colibri, situados na porção noroeste da Bacia Potiguar, tiveram suas reservas declaradas comerciais em 2009. Devido às especificidades de seus projetos, foram enquadrados como campos marginais pela Resolução ANP nº 877/2022.

A proposta de utilizar a água produzida nesses campos para o cultivo de oleaginosas representa um avanço significativo para o setor de petróleo e gás. Além de otimizar a produção de óleo, essa iniciativa contribui para a transição para um modelo de produção mais sustentável, com redução das emissões de carbono e alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Ao mesmo tempo, ela pode reduzir a “marginalidade” dos campos, aumentando a eficiência e prolongando sua vida útil, o que favorece as previsões econômicas desses investimentos.

Figura 5.3 – Plano de desenvolvimento dos Campos Cardeal e Colibri

Cardeal	
Nº do Contrato:	48610.008000/2004
Operador do Contrato:	Partex Brasil Ltda.
Estado:	Rio Grande do Norte
Bacia:	Potiguar
Localização:	Terra
Lâmina d' água:	-
Fluido Principal:	Óleo
Área:	35,91 km ²
Situação:	Em produção
Descoberta:	10/2007
Declaração de Comercialidade:	05/2009
Início de Produção:	05/2009
Previsão de Término da Produção:	2036 (término do contrato)

Fonte: ANP. Planos de Desenvolvimento. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/desenvolvimento-e-producao/planos-de-desenvolvimento>. Acesso em: 31 out. 2024.

Segundo a ANP (2024b), a produção diária de hidrocarbonetos do campo Cardeal Colibri, entre 31 de março de 2023 e 31 de março de 2024, foi de 309,97 boe/d, enquanto a produção de água foi de 5.059,67 bbl/d (804,42 m³/d). Considerando que a produção de água tenha sido mantida com esse patamar por 360 dias nesse período, foi gerado um total de 289.591,2 m³ de água produzida no período mencionado.

A água gerada no Campo Cardeal e Colibri é considerada de boa qualidade para irrigação, uma vez que apresenta salinidade moderada (CE = 0,62 dS/m). Esta salinidade é adequada para a produção das espécies estudadas, uma vez que suas salinidades limiares estão bem acima desse valor (Dias *et al.*, 2016; Tanji e Kielen, 2003): 7,7 dS/m para o algodão; 4,8 dS/m para o girassol; e em torno de 3,0 dS/m para o gergelim. É importante mencionar que esses valores podem variar com a variedade da planta, as condições de manejo e o ambiente em que estão sendo cultivadas. Para práticas de manejo adequadas, é sempre recomendável monitorar a salinidade do solo e a qualidade da água de irrigação.

A partir de valores da demanda hídrica de cada espécie avaliada, é possível avaliar o potencial da água produzida no campo Cardeal e Colibri no sequestro de carbono no solo e na produção de óleo para biodiesel. A Tabela 5.3 apresenta dados médios de produtividade de óleo e demanda hídrica das espécies avaliadas e a Tabela 5.4 apresenta os valores estimados para a área de cultivo, produção anual de óleo e sequestro de carbono em 20 anos, em relação ao volume relativo da AP produzida entre 31/03/2023 e 31/03/2024.

Tabela 5.3 – Produtividade de óleo e demanda hídrica das espécies avaliadas.

Espécie	Produtividade de óleo/ kg · ha⁻¹ · ano⁻¹	Demanda hídrica/ mm³ · ha⁻¹ · ano⁻¹
Algodão	250	5.000,00
Girassol	500	4.500,00
Gergelim	450	4.000,00

Fonte: Beltrão e Oliveira (2007), Beltão, Cardoso e Vale (2007), Castro *et al.* (1997), Cruz *et al.* (2019) e Lichston e Silva (2019).

A partir dos valores da Tabela 5.4, observa-se que, apesar de o girassol e gergelim precisarem de uma área maior que o algodão para a utilização do mesmo volume de água, suas produções anuais de óleo são maiores. O girassol e o gergelim apresentam produção de óleo 222% e 225% maiores que o algodão.

Tabela 5.4 – Área de cultivo, produção de óleo e sequestro de carbono em 20 anos em função do volume de AP produzido no campo Cardeal e Colibri.

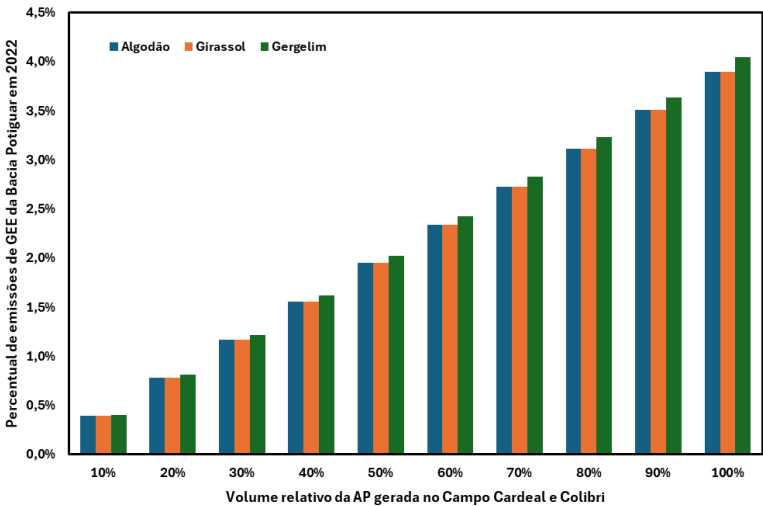
VR*	Área de cultivo/ha			Produção de óleo/ kg · ano ⁻¹			Sequestro de C em 20 anos/ tCO _{2eq}		
	Algodão	Girassol	Gergelim	Algodão	Girassol	Gergelim	Algodão	Girassol	Gergelim
10%	5,79	6,44	7,24	1.448	3.218	3.258	1.088	1.088	1.129
20%	11,58	12,87	14,48	2.896	6.435	6.516	2.175	2.175	2.257
30%	17,38	19,31	21,72	4.344	9.653	9.774	3.263	3.263	3.386
40%	23,17	25,74	28,96	5.792	12.871	13.032	4.351	4.351	4.514
50%	28,96	32,18	36,20	7.240	16.088	16.290	5.438	5.438	5.643
60%	34,75	38,61	43,44	8.688	19.306	19.547	6.526	6.526	6.771
70%	40,54	45,05	50,68	10.136	22.524	22.805	7.614	7.614	7.900
80%	46,33	51,48	57,92	11.584	25.741	26.063	8.701	8.702	9.028
90%	52,13	57,92	65,16	13.032	28.959	29.321	9.789	9.789	10.157
100%	57,92	64,35	72,40	14.480	32.177	32.579	10.877	10.877	11.285

*Volume relativo à produção de água produzida do campo Cardeal e Colibri entre 31/03/2023 e 31/03/2024.

Fonte: Autoria própria (2024).

A Figura 5.3 apresenta o percentual das emissões de GEE da produção *onshore* de 2022 em função do percentual de AP do campo Cardeal e Colibri a ser utilizado nos cultivos das oleaginosas estudadas. Observa-se que para o mesmo volume de água, o gergelim apresenta potencial de sequestro de carbono 3,76% maior que o algodão e o girassol.

Figura 5.4 – Percentual das emissões de GEE da produção *onshore* na Bacia Potiguar em função do volume relativo de AP do campo Cardeal e Colibri.



Fonte: Autoria própria (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo calibrar, simular e validar o modelo RothC para estimar o sequestro de carbono no solo em cultivos de oleaginosas na região do Semiárido Potiguar. A calibração, realizada em modo inverso, permitiu calcular a quantidade de carbono retornada ao solo a partir do resíduo vegetal anual, visando atingir o estado de equilíbrio do estoque de carbono orgânico do solo (SOC). Os resultados obtidos demonstraram que o modelo RothC se ajustou de forma satisfatória às condições específicas da região.

A análise do potencial de sequestro de carbono revelou que, ao longo de 20 anos, o algodão se destacou como a cultura com maior acúmulo de carbono no solo, alcançando 61,42 tC/ha, seguido pelo girassol e gergelim, que apresentaram, respectivamente, 55,20 tC/ha e 50,84 tC/ha. Esses resultados sugerem que o algodão, devido suas características agrônômicas, possui um maior potencial para a captura e armazenamento de carbono em comparação às outras culturas estudadas, quando considerado o sequestro por hectare.

Os dados sobre o potencial de compensação de emissões de gases de efeito estufa (GEE) demonstraram que com 10% da área do campo Cardeal e Colibri (820 hectares) seria possível compensar 55,15%, 49,64% e 45,78% das emissões de GEE geradas nas operações *onshore* da Bacia Potiguar em 2022, em 20 anos de cultivos de algodão, girassol e gergelim, respectivamente.

Além disso, a totalidade das emissões de GEE geradas em 2022 poderia ser plenamente compensada utilizando 18,13%, 20,13% e 21,84% da área do campo Cardeal Colibri para o algodão, o girassol e o gergelim, respectivamente. Esses resultados ressaltam o potencial das oleaginosas estudadas na mitigação das emissões de GEE, tornando-as opções viáveis para práticas agrícolas sustentáveis.

Adicionalmente, a análise da qualidade da água produzida no campo Cardeal e Colibri revelou que sua salinidade moderada ($CE = 0,62$ dS/m) é adequada para o cultivo das espécies avaliadas, que apresentam tolerância a salinidades maiores que esse valor. A produção de água produzida do campo Cardeal e Colibri, estimada em 289.591,2 m³ ao longo do período de 360 dias, mostra-se promissora para irrigação e, assim, pode contribuir tanto para o sequestro de carbono no solo quanto para a produção de óleo para biodiesel.

A partir dos dados de produtividade de óleo e demanda hídrica, observou-se que, apesar de girassol e gergelim requererem áreas maiores que o algodão, suas produções anuais de óleo são significativamente superiores, o que destaca a importância de avaliar não apenas o sequestro de carbono, mas também a eficiência produtiva das culturas.

É importante salientar que a incorporação de biochar ao solo pode potencializar ainda mais o sequestro de carbono, melhorando a estrutura do solo, aumentando a retenção de água e promovendo a biodiversidade microbiana. Ao explorar a utilização de biochar em áreas de cultivo, é possível aumentar o armazenamento de carbono e melhorar a fertilidade do solo e a eficiência no uso de recursos hídricos.

Em conclusão, o modelo RothC mostrou uma ferramenta eficaz para a avaliação do sequestro de carbono no solo, e os resultados obtidos oferecem boa compreensão para a implementação de práticas agrícolas que favoreçam a sustentabilidade e a conservação do solo. Futuros estudos podem explorar outras variáveis e cultivos, ampliando ainda mais a compreensão sobre o sequestro de carbono em diferentes sistemas de cultivo.

As informações geradas neste trabalho podem servir como base para projetos de irrigação de oleaginosas com água produzida do campo Cardeal e Colibri, visando a produção de óleo para produção de biodiesel e o sequestro de carbono, sendo uma ação de ESG promissora para a Mandacaru Energia.

Para estudos futuros, recomenda-se comparar o modelo RothC com outros métodos de avaliação do sequestro de carbono no solo, a fim de ampliar as estimativas de captura de carbono no Semiárido Potiguar e oferecer *insights* sobre a eficiência e a aplicabilidade de modelos em diferentes contextos de cultivo. Além disso, explorar outras culturas de oleaginosas e variedades de capim adaptadas à região pode revelar novas possibilidades para melhorar o sequestro de carbono, atendendo tanto às necessidades econômicas quanto ambientais da região.

Outra linha promissora de pesquisa envolve avaliar como a utilização de oleaginosas no manejo agrícola pode apoiar as metas dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS). A introdução dessas culturas pode favorecer o ODS 2 (fome zero e agricultura sustentável), promovendo práticas agrícolas que garantem a segurança alimentar e a sustentabilidade dos recursos naturais; e o ODS 13 (ação contra a mudança global do clima), fomentando ações e projetos que visem mitigar os impactos das mudanças climáticas. Dessa forma, o desenvolvimento de programas que integrem esses objetivos pode ser interessante para empresas comprometidas com a sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFZALI, S. F. *et al.* Using RothC model to simulate soil organic carbon stocks under different climate change scenarios for the rangelands of the arid regions of southern Iran. **Water**, v. 11, n. 10, p. 2107, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11102107>.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2024**. Rio de Janeiro: ANP, 2024a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/dados-abertos/anuario/anuario-estatistico-2024-dados-abertos>. Acesso em: 20 ago. 2024.

ANP – AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (Brasil). **Painel dinâmico de produção de petróleo e gás natural**. Produção média. Rio de Janeiro: ANP, 2024b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/paineis-dinamicos-da-anp/paineis-dinamicos-sobre-exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas>. Acesso em: 16 out. 2024.

BATISTA, C. H. Teor de nutrientes e produtividade do algodoeiro herbáceo com a aplicação de fósforo nos cultivos de sequeiro ou irrigado. **Bioscience Journal**, v. 27, n. 2, 2011.

BELTRÃO, N. E. M.; CARDOSO, G. B.; VALE, L. S. **Balço energético e “sequestro” de carbono em culturas oleaginosas**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/277417/1/DOC177.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2024.

BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, M. I. P. **Oleaginosas potenciais do nordeste para a produção de biodiesel**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/277417/1/DOC177.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2024.

BORDONAL, R. DE O. *et al.*; TENELLI, S.; OLIVEIRA, D.M.; CHAGAS, M.F.; CHERUBIN, M.R.; WEILER, D.A.; CAMPBELL, E.; GONZAGA, L.C.; BARBOSA, L.C.; CERRI, C.E.P.; CARVALHO, J.L.N. (2024). Carbon savings from sugarcane straw-derived bioenergy: Insights from a life cycle perspective including soil carbon changes. **Science of the Total Environment**, v. 947, Article ID 174670, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174670>

BORGES, B.B.G. Tratamento da água produzida do petróleo para injeção em mananciais. Trabalho de Conclusão de Curso, UFRN, Natal, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima. **NDC - a ambição climática do Brasil**. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mma/pt-br/assuntos/mudanca-do-clima/NDC>. Acesso em: 14 out. 2023.

CASTRO, C. *et al.*; CASTIGLIONI, V. B. R.; BAILA, A.; LEITE, R. M. V. B. C.; KARAM, D.; MELLO, H. C.; GUEDES, L. C. A.; FARIAS, J. R. B. **A cultura do girassol**. Londrina: Embrapa Soja. Londrina, 1997. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/951393/a-cultura-do-girassol>. Acesso em: 15 out. 2024.

COLEMAN, K.; JENKINSON, D. **RothC**: a model for the turnover of carbon in soil. Model description and users guide (Windows version). Harpenden: Rothamsted Research, 2014. Disponível em: https://repository.rothamsted.ac.uk/download/fd44cfb2f973ef234b1e7d5341ced2a1aaa500ce26044b12430d1f6c181c5a8a/993510/RothC_guide_WIN.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S. RothC-26.3-aA Model model for the turnover of carbon in soil. *In: Evaluation of soil organic matter models: using existing long-term datasets*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. p. 237-246. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61094-3_17.

CRUZ, N. F. F. S. *et al.* Características e tratos culturais do gergelim (*Sesamum indicum* L.). **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, p. 665- 675, 2019.

DEL GROSSO, S. J. *et al.* General model for N₂O and N₂ gas emissions from soils due to denitrification. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 14, n. 4, p. 1045-1060, 2000. DOI: <https://doi.org/10.1029/1999GB001225>.

DIAS, N. da. S. *et al.* Efeitos dos sais na planta e tolerância das culturas à salinidade. *In: GHEYI, H. R. et al. (Eds.). Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados*. Fortaleza: INCTSal, 2016. p. 151-162.

EMBRAPA. **Sistema de informação de solos brasileiros**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. Disponível em: https://www.bdsolos.cnptia.embrapa.br/consulta_publica.html. Acesso em: 15 out. 2024.

FALLOON, P. *et al.* Estimating the size of the inert organic matter pool from total soil organic carbon content for use in the Rothamsted carbon model. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 30, p. 1207-1211, 1998.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Global soil organic carbon sequestration potential map – GCOSseq v.1.1**. Technical report. Rome: FAO, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb9002en>.

FAO –: Food and Agriculture Organization of the United Nations. **FAOSTAT: Crops and livestock products**. Sesame seed and Sunflower seed. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 15 out. 2024.

FARINA, R.; COLEMAN, K.; WHITMORE, A. P. Modification of the RothC model for simulations of soil organic C dynamics in dryland regions. **Geoderma**, v. 200, p. 18-30, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.01.021>.

FERREIRA, A. C. B. *et al.* **Sequestro de carbono em diferentes sistemas de produção de algodão no cerrado da Bahia**. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://fundacaoba.com.br/wp-content/uploads/2019/09/alexandre-barcellos-embrapa.pdf>. Acesso em: 1 out. 2024.

FRANCAVIGLIA, R. *et al.* Changes in soil organic carbon and climate change—application of the rothc model in agro-silvo-pastoral mediterranean systems. **Agricultural Systems**, v. 112, 48-54, 2012.

GOMES, E. P. *et al.* Produtividade de grãos, óleo e massa seca de girassol sob diferentes lâminas de irrigação suplementar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n.3, p. 237-246, 2012.

GOTTSCHALK, P. How will organic carbon stocks in mineral soils evolve under future climate? Global projections using RothC for a range of climate change scenarios. **Biogeosciences**, v. 9, n. 8, p. 3151-3171, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/bg-9-3151-2012>.

GYORI, Z.; SIPOS, P.; ELEK, A. Investigation of carbon content of sunflower parts during the vegetation period. **Cereal Research Communications**, v. 33, n. 1, p. 213-216, 2005.

ICAC – International Cotton Advisory Committee. **Cotton production data portal**. Data book 2023. ICAC, 2023. Disponível em: <https://icacdatabook.de.r.appspot.com/DataPortal/ChartsDetails?subGroupKey=SGK0001&chartKey=CHR0003>. Acesso em: 11 ago. 2024.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2022: mitigation of climate change**. Working Group III Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 19 ago. 2024.

JENKINSON, D. S. *et al.* Modelling the turnover of organic matter in long-term experiments at Rothamsted. **Intecol Bulletin**, v. 15, p. 1-8, 1987.

JENKINSON, D. S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences**, v. 329, n. 1255, p. 361-368, 1990. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.1990.0177>.

JENKINSON, D. S.; ADAMS, D. E.; WILD, A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. **Nature**, v. 351, n. 6324, p. 304-306, 1991. DOI: <https://doi.org/10.1038/351304a0>.

JORDON, M. W.; SMITH, P.; LONG, P.R.; BÜRKNER, P.; PETROKOFISKY, G.; WILLIS, K.J. 2022. *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, Article ID 153955. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153955>. . pp 9. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153955

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.032>.

LANDGRAF, L. **Girassol é alternativa para produção de biocombustível**. Embrapa, 2008. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/18022355/girassol-e-alternativa-para-producao-de-biocombustivel>. Acesso em: 27 jul. 2024.

LEAL, A.M. O uso da água na agricultura. Pet Agronomia: UFSM, Roraima, 2022. Disponível em: <https://maissoja.com.br/o-uso-da-agua-na-agricultura/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

LEFEBVRE, D. *et al.* Modelling the potential for soil carbon sequestration using biochar from sugarcane residues in Brazil. **Scientific Reports**, v. 10, Article ID 19479, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76470-y>.

LICHSTON, J. E.; SILVA, R. A. D. Potencial do Nordeste Brasileiro na produção de oleaginosas para bioquerosene. In: CONGRESSO DA REDE BRASILEIRA DE BIOQUEROSENE E HIDROCARBONETOS RENOVÁVEIS, 1., 2019, Natal. **Anais [...]**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2019. p. 7. Disponível em: <https://www.monferrer.com.br/METALLUM/bioquerosene/PDF/01-031.pdf#:~:text=Para%20a%20inser%C3%A7%C3%A3o%20do%20Nordeste%20na%20cadeia%20produtiva,com%20o%20desenvolvimento%20econ%C3%B4mico%20e%20social%20da%20regi%C3%A3o..> Acesso em: 14 out. 2024.

MANDACARU ENERGIA. **Operações**. Campos Cardeal & Colibri. 2024. Disponível em: <https://mandacaruenergia.com.br/operacoes/campos-cardeal-colibri/>. Acesso em: 16 out. 2024.

MCCOWN, R. L. *et al.* APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. **Agricultural Systems**, v. 50, p. 255-271, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(94\)00055-V](https://doi.org/10.1016/0308-521X(94)00055-V).

MEDEIROS, A. S. *et al.* Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 287, Article ID 106690, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>.

NGUYEN, T. H.; WILLIAMS, S.; PAUSTIAN, K. Impact of ecosystem carbon stock change on greenhouse gas emissions and carbon payback periods of cassava-based ethanol in Vietnam. **Biomass and Bioenergy**, v. 100, p. 126-137, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.02.009>.

OLIVEIRA, F. A. *et al.* Cotton yield as a function of salinity and seeds treatment with growth regulator. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, n. 2, p. 279-287, Fortaleza, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1806-66902012000200010>.

PARTON, W. J. *et al.* Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 1173-1179, 1987. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100050015x>.

PINHEIRO, R., *et al.* Projeto piloto de irrigação com água produzida no campo de Fazenda Belém. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE, 2014, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás, 2014. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/111139/1/AAC14001.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024.

PINTO, F.V.S., et al. **Reuso de água produzida para fins de irrigação no Semiárido**. Apresentação de Congresso, CONIDIS, Paraíba, 2016.

SÁ, I. B.; SILVA, P. C. G. **Semiárido Brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/busca-de-publicacoes/-/publicacao/861895/semiarido-brasileiro-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao>. Acesso em: 27 jul. 2024.

SANTOS, E. **Plantio direto do algodoeiro aumenta estoque de carbono no solo em 20%**. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/plantio-direto-do-algodoeiro-aumenta-estoque-de-carbono-no-solo-em-20%>>. Acesso em: 18 out. 2024.

SANTOS, S. J. **Avaliação do efeito do uso da terra sobre os estoques de carbono em solos da caatinga utilizando o modelo Century**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ecologia) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, Sergipe, 2019. Disponível em: <http://ri.ufs.br/jspui/handle/riufs/12730>. Acesso em: 15 out. 2024.

SEIXAS, C.D.S; NEUMAIER, N.; JUNIOR, A.A.B.; KRZYZANOWSKI, F.C.; LEITE, R.M.V.B.C. **Tecnologias de produção de soja**. Embrapa Soja. Londrina, PR, 2020. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/223209/1/SP-17-2020-online-1.pdf>. Acesso em 01 nov 2024.

SENUSSI, W. et al. Comparative assessment for biodiesel production from low-cost feedstocks of third oil generation. **Renewable Energy**, v. 236, Article ID 121369, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121369>.

SHIRATO, Y. Use of models to evaluate carbon sequestration in agricultural soils. **Soil Science and Plant Nutrition**, v. 66, n. 1, p. 21-27, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/00380768.2019.1702477>.

SIERRA, C. A.; MÜLLER, M.; TRUMBORE, S. E. Models of soil organic matter decomposition: the SoilR package, version 1.0. **Geoscientific Model Development**, v. 5, n. 4, p. 1045-1060, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-5-1045-2012>.

SILVA, A. C. (2016). **Biodiesel de gergelim (*Sesamum indicum L.*)**: Uum estudo de equilíbrio ternário. 2016. Dissertação de Mestrado(Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Alagoas, Maceió. Maceió, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/1446>. Acesso em: 15 out. 2024.

SUARDI, A. *et al.* Carbon footprint of hemp and sunflower oil in southern Italy: Aa case study. **Ecological Indicators**, v. 160, Article ID 111786, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.111786>.

TANJI, K. K.; KEILEN, N. C. **Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas**. Rome: FAO, 2003. Disponível em: <https://www.fao.org/4/y4263e/y4263e0e.htm>. Acesso em: 16 out. 2024.

VARÃO, L. H. R. *et al.* Óleo de algodão como matéria-prima para a indústria brasileira de biodiesel. **Revista Brasileira de Energia**, v. 24, n. 1, p. 88-108, 2018.

WEBER, K.; QUICKER, P. Properties of biochar. **Fuel**, v. 217, p. 240-261, 2018.

WOOLF, D.; LEHMANN, J.; LEE, D. R. Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. **Nature Communications**, v. 7, Article ID 13160, 2016. DOI: 10.1038/ncomms13160.