



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

PAULA KATHERINE LEONEZ DA SILVA VALENÇA

**GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO E
RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO**

MOSSORÓ

2023

PAULA KATHERINE LEONEZ DA SILVA VALENÇA

**GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO E
RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologias em Nutrição de Plantas e Soluções para Convivência com a Seca e Salinidade

Orientador: Prof. D.Sc. Miguel Ferreira Neto

Coorientadores: Prof. D.Sc. Francisco Vanies da Silva Sá e D.Sc. Tayd Dayvison Custódio Peixoto

MOSSORÓ

2023

© 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. 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.

V152g Valença, Paula Katherine Leonez da Silva.
GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO DE SOLO SALINO-
SÓDICO E RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO / Paula
Katherine Leonez da Silva Valença. - 2023.
59 f. : il.

Orientador: Miguel Neto Ferreira .
Coorientador: Francisco Vanies da Silva Sá.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em ,
2023.

1. salinidade do solo. 2. condicionador de
solo. 3. Zea mays L.. 4. crescimento. 5. trocas
gasosas foliares. I. Neto Ferreira , Miguel,
orient. II. Sá, Francisco Vanies da Silva, co-
orient. III. 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

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PAULA KATHERINE LEONEZ DA SILVA VALENÇA

**GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO DE SOLO SALINO-SÓDICO E
RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DO MILHO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologias em Nutrição de Plantas e Soluções para Convivência com a Seca e Salinidade

Defendida em: 28 / 12 / 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Miguel Ferreira Neto (UFERSA)
Presidente – Orientador

Dr. Tayd Dayvison Custódio Peixoto (PDJ/CNPq/UFERSA)
Coorientador

Prof. Dr. Neyton de Oliveira Miranda (UFERSA)
Membro Examinador

Prof. Dr. José Francismar de Medeiros (UFERSA)
Membro Examinador

Dra. Jucirema Ferreira da Silva (FAPERN)
Membro Examinador

*Ao meu Deus e
à minha família de sangue e em Cristo.*
Dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por sua misericórdia ao ter enviado seu Filho Jesus Cristo para trazer salvação para mim e para todos aqueles que o receberem de coração. Muito obrigada por ter me dado forças todas as vezes em que pensei que não iria suportar todas os obstáculos!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Miguel Ferreira Neto, por ter me recebido como orientanda e me dado a oportunidade de desenvolver o trabalho em uma área tão encantadora.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr. Francisco Vanies da Silva Sá e Dr. Tayd Dayvison Custódio Peixoto, por todo o empenho e ajuda em cada etapa do trabalho. Não tenho palavras para expressar minha profunda gratidão. Que Deus os abençoe grandemente!

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, por todo conhecimento e experiência compartilhada.

Ao meu esposo, Raniere Valença, e às minhas filhas, Rebeca e Bianca, por todo o apoio e paciência para me suportar nos momentos difíceis e à minha ausência. Vocês são minha base, presentes de Deus!

Aos meus pais, Luiz e Iraci, por tudo que fizeram por mim durante toda a vida e pelo apoio em todos os momentos. Sem vocês, não teria chegado até aqui!

A toda a minha família, que se alegrou com as minhas conquistas e sempre orou para que conseguisse vencer essa etapa.

Aos meus irmãos em Cristo, da igreja em Mossoró, por todo o auxílio e oração durante esse processo.

Aos meus colegas do laboratório, Kariolania, Ricardo, Paula, Francisca das Chagas, Saulo, Elisa, Joyce, Clara, Karen, Bronisson, Carlos Eduardo, Mirna, por toda a ajuda na execução do trabalho, tornando o fardo mais leve, dividindo-o comigo. Vocês me ensinaram o que é verdadeiramente um trabalho em equipe!

Aos meus colegas de turma, Christiane, Samylle, Helena, Alcivan, Jandeilson, Isabella, Rodrigo, Talita, Luciara, pelo aprendizado e companheirismo durante as disciplinas do curso.

Às técnicas do Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP), Valdete, Kaline e Paula Romyne, pela ajuda e orientação na execução das análises.

Aos membros da Banca Examinadora, por todas as contribuições dadas neste trabalho. Meus sinceros agradecimentos.

À Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA) e ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA), pela oportunidade de cursar o doutorado.

“Todas as coisas foram feitas por intermédio
dEle, e, sem Ele nada do que foi feito se fez.”

Jo 1:3

RESUMO

Um dos principais desafios da agricultura contemporânea é a salinização dos solos, principalmente nas regiões semiáridas, devido às baixas precipitações pluviométricas e alta taxa de evapotranspiração. A lavagem do solo para lixiviação de sais e uso de materiais como gesso e biochar têm sido alternativas para a recuperação desses solos. Desta forma, objetivou-se avaliar a utilização de gesso e biochar de eucalipto comercial para a correção de um solo salino-sódico e, em seguida, avaliar qual tipo de condicionador e qual combinação de condicionadores de recuperação de solo proporcionam melhorias no crescimento inicial, nas trocas gasosas foliares e na homeostase iônica do milho cultivado em solo salino-sódico corrigido com esses condicionadores. Foram montados dois experimentos para realização do trabalho em casa de vegetação, o primeiro foi feito com solo salino-sódico, utilizando delineamento inteiramente casualizado, sendo sete tratamentos e seis repetições, totalizando 42 unidades experimentais. Os tratamentos foram: T1- SSC - Solo Sem Corretivos; T2- 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (NG); T3 - 100% do biochar; T4- biochar + 25% da NG; T5- biochar + 50% da NG; T6- biochar + 75% da NG; T7- biochar + 100% da NG. O segundo experimento realizado com cultivo de milho híbrido BM3066PRO2 em vasos contendo solo salino-sódico corrigido com técnicas de lixiviação de sais e corretivos. Foram distribuídos em delineamento inteiramente casualizado, com sete tratamentos e seis repetições, 42 vasos no total e cada vaso contendo 5,2 dm³ de solo. O biochar associado às doses de gesso foi mais eficiente na recuperação do solo do que apenas gesso. Os tratamentos com biochar + 25% da NG e biochar + 75% da NG reduziram a salinidade e sodicidade do solo, corrigindo-o para solo normal. O milho cultivado em solo normal, o qual utilizou biochar + 75% da NG, proporcionou os maiores valores de massa fresca das folhas, massa seca das folhas e massa seca total. Os tratamentos que utilizaram o biochar e o gesso beneficiaram o aumento da área foliar do milho, com valor superior no tratamento com biochar + 100 % da NG. As trocas gasosas foliares do milho não foram influenciadas pelos tratamentos estudados. Doses de 75 e 100% de gesso associadas ao biochar resultaram em maiores teores de clorofila total no milho. O acúmulo de sódio, cálcio e magnésio nas folhas do milho foi maior nos solos salino-sódico e salino, tratamentos T3 e T5, respectivamente. A maior concentração de sódio e magnésio nos colmos do milho foi observada no solo sem correção. Os tratamentos com biochar e gesso a 75 e 100% da necessidade de gesso provocaram o menor acúmulo de sódio, cálcio e magnésio nos colmos.

Palavras-chave: salinidade do solo, condicionador de solo, *Zea mays* L., crescimento, trocas gasosas foliares.

ABSTRACT

One of the main challenges facing contemporary agriculture is soil salinization, especially in semi-arid regions, due to low rainfall and high evapotranspiration rates. Soil washing to leach salts and the use of materials such as gypsum and biochar have been alternatives for recovering these soils. The aim of this study was to evaluate the use of gypsum and commercial eucalyptus biochar to correct a saline-sodic soil and then to assess which type of conditioner and which combination of conditioners for soil recovery provides improvements in initial growth, leaf gas exchange and ion homeostasis of maize grown in saline-sodic soil corrected with these conditioners. Two experiments were set up to carry out the work, the first was done with saline-sodic soil, using a completely randomized design, with seven treatments and six replications, totaling 42 experimental units. The treatments were: T1- SSC - Soil Without Correctives; T2- 100% NG - 100% of Gypsum Need (NG); T3 - 100% of biochar; T4- biochar + 25% of NG; T5- biochar + 50% of NG; T6- biochar + 75% of NG; T7- biochar + 100% of NG. The second experiment was conducted in a greenhouse with hybrid maize BM3066PRO2 grown in pots containing saline-sodic soil corrected using salt leaching and corrective techniques. They were distributed in a completely randomized design, with seven treatments and six replications, 42 pots in total and each pot containing 5.2 dm³ of soil. The biochar associated with the doses of gypsum was more efficient in recovering the soil than gypsum alone. The treatments with biochar + 25% of NG and biochar + 75% of NG reduced the salinity and sodicity of the soil, correcting it to normal soil. Maize grown in normal soil, which used biochar + 75% NG, gave the highest values for fresh leaf mass, dry leaf mass and total dry mass. The treatments using biochar and gypsum increased the leaf area of the maize, with a higher value in the treatment with biochar + 100% of NG. Maize leaf gas exchange was not influenced by the treatments studied. Doses of 75 and 100% gypsum associated with biochar resulted in higher total chlorophyll levels in maize. The accumulation of sodium, calcium and magnesium in maize leaves was higher in saline-sodic and saline soils, treatments T3 and T5, respectively. The highest concentration of sodium and magnesium in the corn stalks was observed in the uncorrected soil. The treatments with biochar and gypsum at 75 and 100% of the gypsum requirement caused the lowest accumulation of sodium, calcium and magnesium in the stalks.

Keywords: soil salinity, soil conditioner, *Zea mays L.*, growth, leaf gas exchange.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I: GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO EM SOLO SALINO-SÓDICO

Tabela 1. Atributos químicos e físicos do solo salino-sódico utilizado no experimento.	26
Tabela 2. Composição do biochar disponibilizada pelo fabricante.	27
Tabela 3. Doses de corretivos adicionadas em cada tratamento e valor por vaso.	28
Tabela 4. Caracterização da água de abastecimento utilizada no experimento.	29
Tabela 5. Teste F e teste de médias LSD para nitrogênio (N, g kg ⁻¹), matéria orgânica (M.O, g Kg ⁻¹), fósforo (P, mg dm ⁻³), potássio (K ⁺ , cmol _c dm ⁻³), sódio (Na ⁺ , cmol _c dm ⁻³), cálcio (Ca ²⁺ , cmol _c dm ⁻³) e magnésio (Mg ²⁺ , cmol _c dm ⁻³), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE, dS m ⁻¹), soma de bases (SB, cmol _c dm ⁻³), capacidade de troca catiônica (CTC, cmol _c dm ⁻³), porcentagem de sódio trocável (PST, %), umidade na capacidade de campo (UCC, 0,033 Mpa - kg kg ⁻¹) e umidade no ponto de murcha (UPM, 1,5 Mpa - kg kg ⁻¹) do complexo sortivo do solo tratado com gesso biochar, após a lavagem.	30
Tabela 6. Teste F e teste de médias LSD para o potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dS m ⁻¹), potássio (K ⁺ , mmolc L ⁻¹), sódio (Na ⁺ , mmolc L ⁻¹), cálcio (Ca ²⁺ , mmolc L ⁻¹), magnésio (Mg ²⁺ , mmolc L ⁻¹), cloreto (Cl ⁻ , mmol _c dm ⁻³), , bicarbonato (HCO ₃ ⁻ , mmol _c dm ⁻³), sulfato (SO ₄ ²⁻ , mmol _c dm ⁻³) e razão de adsorção de sódio (RAS, (mmol _c dm ⁻³) ^{0.5}) do extrato de saturação do solo tratado com gesso e biochar, após a lavagem.	33
Tabela 7. Classificação dos solos após tratamento e lavagem para lixiviação de sais.	35

CAPÍTULO II: CRESCIMENTO INICIAL, TROCAS GASOSAS FOLIARES E HOMEOSTASE IÔNICA DO MILHO CULTIVADO EM SOLO SALINO-SÓDICO CORRIGIDO COM BIOCHAR E GESSO

Tabela 1. Análise química e física do solo utilizado no experimento.	47
Tabela 2. Análise química da água de abastecimento e do extrato de saturação da pasta do solo do experimento.	47
Tabela 3. Parâmetros de salinidade e sodicidade e classificação do solo de cada tratamento após a lavagem.	49
Tabela 4. Resumo do teste F e teste de médias para altura de planta (AP, cm), diâmetro do colmo (DC, mm), número de folhas (NF), massa fresca das folhas (MFF, g), massa fresca do	

colmo (MFC, g), massa fresca total (MFT, g), massa seca das folhas (MSF, g), massa seca do colmo (MSC, g), massa seca total (MST, g) e área foliar (AF, cm²) do milho aos 38 dias após a semeadura.....53

Tabela 5. Resumo do teste F e teste de médias para taxa de assimilação de CO₂ (A_N, μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹), condutância estomática (gs, mol (H₂O) m⁻² s⁻¹), transpiração (E, mmol (H₂O) m⁻² s⁻¹), clorofila a (Clo a), clorofila b (Clo b), clorofila total (Clo total) e teor de água nos tecidos (TA, %) do milho aos 38 dias após a semeadura.....54

Tabela 6. Resumo do teste F e teste de médias para o acúmulo de sódio (Na⁺, mg por planta), potássio (K⁺, mg por planta), cálcio (Ca²⁺, mg por planta) e magnésio (Mg²⁺, mg por planta), e as relações sódio/potássio (Na⁺/K⁺), sódio/cálcio (Na⁺/Ca²⁺) e sódio/magnésio (Na⁺/Mg²⁺) nas folhas e nos colmos do milho aos 38 dias após a semeadura.....55

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO EM SOLO SALINO-SÓDICO

Figura 1. Lote 01 do Distrito Irrigado do Baixo-açu (DIBA) apresentando indicativos de salinização secundária.....	25
Figura 2. Preparação do solo para a caracterização.....	26
Figura 3. Adição dos corretivos e adição de água em 70% da cc.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS.....	17
CAPÍTULO I - GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO EM SOLO SALINO-SÓDICO	20
RESUMO	20
ABSTRACT.....	21
1 INTRODUÇÃO	22
2 MATERIAL E MÉTODOS	24
3 RESULTADOS.....	30
4 DISCUSSÃO.....	35
5 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIAS.....	38
CAPÍTULO II - CRESCIMENTO INICIAL, TROCAS GASOSAS FOLIARES E HOMEOSTASE IÔNICA DO MILHO CULTIVADO EM SOLO SALINO-SÓDICO CORRIGIDO COM BIOCHAR E GESSO	41
RESUMO	41
ABSTRACT.....	42
1. INTRODUÇÃO	43
2 MATERIAL E MÉTODOS	45
3 RESULTADOS.....	51
4 DISCUSSÃO.....	54
5 CONCLUSÕES.....	56
REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO GERAL

Atualmente, a salinização dos solos tem-se tornado um grande desafio. dos solos. Potencializando o problema, tem-se como aliados alterações climáticas, secas persistentes e elevação do nível do mar (NEGACZ et al., 2022). De acordo com a FAO (2021), os solos superficiais (0-30 cm) afetados pelos sais no mundo equivalem a 424 milhões de hectares e os subsolos, na camada de 30 a 100 cm, chegam a 833 milhões de hectares. Estudos mostram que até 2050 mais de 50% das terras agrícolas mundiais podem ser salinizadas, sendo a maior parte delas em regiões áridas e semiáridas (ZHAO et al., 2023).

No Brasil, existe alta demanda hídrica, principalmente para o uso na irrigação, utilizando cerca de 50% da água (ANA, 2022). Projeções realizadas pela ANA (2019) mostram que haverá até o ano de 2030 aumento da demanda hídrica de retirada para suprimento de água de 2.000%, num período de 100 anos, onde o consumo de água para irrigação atingirá a vazão de $2.500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Em relação a esse consumo hídrico, no semiárido nordestino do Brasil, foram instalados os distritos irrigados, contribuindo para impulsionar a agricultura e economia local, totalizando 79 projetos, perfazendo uma área de 218,8 mil ha, dentre eles o Distrito Irrigado do Baixo Açu (DIBA), situado no estado do Rio Grande do Norte (ANA, 2017).

Um dos processos que geralmente ocorrem nos distritos irrigados é a salinização dos solos. A salinização pode ser primária, ocasionada pelo intemperismo das rochas ou devido aos ventos costeiros que transportam os sais para os solos, ou secundária, devido às ações antrópicas, como as que ocorrem nos distritos irrigados, devido ao manejo de irrigação inadequado, práticas de cultivo e a fertirrigação aplicada sem controle (MEDEIROS et al., 2016; HASSANI; AZAPAGIC; SHOKRI, 2020). Agrava-se o problema quando há no solo aumento da concentração de sódio, e o sódio solúvel passa a ser adsorvido no complexo de troca, precipitando o cálcio e o magnésio, começando o processo de sodificação. Os solos salinos e sódicos podem ser encontrados em várias regiões do Brasil, dentre elas: Rio Grande do Sul, Pantanal mato-grossense e principalmente no semiárido nordestino (RIBEIRO et al., 2016).

Dessa forma, grandes impactos econômicos e ambientais são gerados, pois devido ao processo de salinização e sodificação o solo muitas vezes torna-se improdutivo e essas áreas são abandonadas, provocando o fenômeno da desertificação, que nos dias atuais, equivalem a 20% da população mundial (CHISTIAN et al., 2018; DE MORAES; WANDERLEY;

DELGADO, 2023). Devido ao clima semiárido, à alta taxa de evapotranspiração e à baixa pluviosidade, comumente ocorre o acúmulo de sais nas superfícies desses solos, principalmente o Na^+ , provocando dispersão de argilas, obstruindo os poros, diminuindo a infiltração e retendo água no solo, afetando a fertilidade do solo e o crescimento normal das culturas, favorecendo, desse modo, a desertificação dessas áreas (LI et al., 2022). Outro agravante gerado devido à presença do sódio no solo é o estresse salino, que afeta diretamente o crescimento das plantas, provocando redução do potencial osmótico, interferindo nas trocas gasosas das plantas, diminuindo a taxa fotossintética e atividade enzimática, condutância estomática, condutividade hidráulica das raízes, além de provocar os efeitos tóxicos dos íons, causando deficiência de macro e micronutrientes (SÁ et al., 2013; HASSANI; AZAPAGIC; SHOKRI, 2020).

Para recuperação dos solos salinizados, técnicas de manejo como lavagem para lixiviação dos sais e adição de corretivos são largamente utilizadas. Comumente se usa o gesso, devido à eficiência já comprovada em inúmeros trabalhos e ao custo baixo (ILYAS; QURESHI; QADIR, 1997; SÁ et al., 2013; MAO et al., 2016; SUNDHA et al., 2020; ZHANG et al., 2020). Ele é uma fonte moderadamente solúvel de nutrientes para as plantas, Ca^{2+} e SO_4^{2-} , melhorando o seu crescimento, altera as propriedades físico-químicas do solo, principalmente por meio da manutenção de uma concentração favorável de eletrólitos na solução do solo, promovendo a floculação da argila e a estabilidade da estrutura do solo, ao substituir o Na^+ pelo Ca^{2+} , no complexo de troca (RASOULI; POUYA; KARIMIAN, 2013).

Para melhorar a eficiência na correção e qualidade do solo, o gesso tem sido utilizado associado a corretivos orgânicos, pois ele sozinho não é capaz de restaurar as atividades biológicas do solo, que são a base da sua fertilidade sustentável (GUPYTA et al., 2016). A matéria orgânica afeta positivamente as propriedades químicas, físicas e biológicas dos solos, como a capacidade de retenção de água, permeabilidade, adsorção de cátions, capacidade de troca catiônica (CTC), formação e estabilidade de agregados, disponibilidade de nutrientes para as plantas, aumentando vigor e crescimento da raiz, que, por sua vez, melhora a estrutura do solo, criando canais de água que facilitam o deslocamento da água no solo, além de ser fonte de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis (EL HASINI et al., 2019). Outra característica importante de solos com alto teor de matéria orgânica é que raramente apresentam comportamento sódico, devido ao aumento da hidrofobicidade causada pela presença de grupos funcionais que não possuem afinidade química para se ligarem ao Na^+ (RENGASAMY; OLSSON, 1991; SAIFULLAH et al., 2018).

O biochar é uma nova alternativa de condicionador que tem surgido no intuito de corrigir os solos salinos-sódicos e estudos recentes têm demonstrado a sua eficácia (JOSEPH et al., 2021; ORTIZ-LIÉBENA et al., 2023; ZHAO et al., 2023), além de ser uma alternativa sustentável, pois participa ativamente do sequestro de carbono do solo. Ele é produzido pela pirólise da matéria orgânica, de origem natural, especialmente resíduos agrícolas, numa temperatura que varia entre 300 e 1000°C, em atmosfera inerte ou com pouco oxigênio (WANG et al., 2022). Quando aplicado no solo, pode gerar diversas alterações de propriedades físico-químicas do solo, tais como: estabilidade dos agregados, porosidade, condutividade hidráulica, capacidade de retenção de água, densidade das partículas, disponibilidade de nutrientes, capacidade de troca catiônica, pH e condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) (PARKASH; SINGH, 2020).

A composição química e a estrutura do biochar variam com a sua matéria prima e a temperatura de queima, o que pode afetar bastante a sua eficiência, porém algumas propriedades são comuns em todos os biocarvões, tais como alto teor de carbono (C) (TRAZZI et al., 2018). O biochar produzido com matérias-primas não lenhosas, como adubos (esterco bovino, lodo, esterco de cama de frango) e resíduos vegetais, é mais rico em nutrientes, tem pH mais elevado e carbono menos estável do que aqueles produzidos com matérias-primas lignocelulósicas, como a madeira e, caso a pirólise seja lenta, ela produzirá maior quantidade de sítios ativos, tornando o material mais adsorvente, em comparação aos que são produzidos por pirólise rápida (SAIFULLAH et al., 2018).

Além de interagir com o solo, promovendo a redução da sua salinidade, o biochar tem sido eficiente na redução do estresse salino das plantas, minimizando a absorção de Na^+ pelas plantas. De acordo com Akhtar et al. (2015), o biochar se liga transitoriamente com o Na^+ para reduzir sua absorção pela planta, aumenta a disponibilidade de água no solo, reduzindo o estresse osmótico, e aumenta a lixiviação dos sais, reduzindo a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), melhorando as propriedades físicas do solo, favorecendo o crescimento das raízes e ajudando na absorção de nutrientes.

Aliado ao uso de corretivos no solo, o cultivo de espécies tolerantes à salinidade potencializa o processo de recuperação dos solos salino-sódicos. O milho (*Zea mays* L.) está entre os cereais mais produzidos do mundo, se adaptando a vários climas e manejo (ALMEIDA et al., 2017). Em 2022, foram colhidas no Brasil cerca de 109 milhões de toneladas de milho em duas safras, com produtividade média de 5.533 kg ha⁻¹ na primeira safra e 5.339 kg ha⁻¹ na segunda safra. O estado do Mato Grosso obteve as maiores produções,

com 38,3 milhões de toneladas. A região Nordeste produziu 8,8 milhões de toneladas em 2022, e o estado do Rio Grande do Norte produziu 28.509 toneladas de milho (IBGE, 2023).

Considerado moderadamente sensível à salinidade, o milho tem sido amplamente estudado, no intuito de melhorar as suas respostas ecofisiológicas diante de situações de estresse salino. A cultura do milho exige alta demanda de água no estágio de crescimento inicial, porém é muito eficiente em seu uso, gerando uma elevada quantidade de matéria seca por unidade de água absorvida (CAVALCANTI JÚNIOR et al., 2018). O biochar, por sua vez, aumenta a tolerância das plantas à salinidade, pois regula a fisiologia das plantas, melhorando a exclusão do Na^+ e absorção de K^+ , regulando níveis hormonais e aliviando estresses oxidativos, além de aumentar a fotossíntese (YUAN et al., 2023).

Portanto, de acordo com as pesquisas realizadas, o gesso e o biochar apresentam boa eficiência na recuperação dos solos salino-sódicos, além do biochar aumentar a tolerância das plantas à salinidade. Diante do exposto, objetivou-se avaliar a utilização de gesso e biochar de eucalipto para a correção de um solo salino-sódico e, em seguida, avaliar qual tipo de condicionador e qual combinação de condicionadores de recuperação de solo proporciona melhorias no crescimento inicial, nas trocas gasosas foliares e na homeostase iônica do milho cultivado em solo salino-sódico corrigido com biochar de eucalipto e gesso.

REFERÊNCIAS

AKHTAR, S. S.; ANDERSEN, M. N.; LIU, F. Residual effects of biochar on improving growth, physiology and yield of wheat under salt stress. **Agricultural water management**, v. 158, p. 61–68, 2015.

ALMEIDA, A. C. dos S. et al. Produtividade e eficiência de uso da água em milho cultivado com diferentes estratégias de manejo hídrico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 11, n. 3, p. 1448–1457, 2017.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Atlas irrigação: uso da água na agricultura irrigada**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021: relatório pleno**. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico: ANA, 2022. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjunturas-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf. Acesso em: 11 dez. 2023.

ANA. Agência Nacional de Águas (Brasil). **Plano Nacional de Segurança Hídrica**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019. Disponível em: <https://arquivos.ana.gov.br/pnsh/pnsh.pdf>. Acesso em: 11 dez. 2023.

CHRISTIAN, B. A.; DHINWA, P. S.; AJAI. Long term monitoring and assessment of desertification processes using medium & high resolution satellite data. **Applied Geography**, v. 97, p. 10–24, 2018.

DE MORAES, J. B.; WANDERLEY, H. S.; DELGADO, R. C. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural hazards (Dordrecht, Netherlands)**, v. 116, p. 1463-1483, 2022.

EL HASINI, S. et al. Organic and inorganic remediation of soils affected by salinity in the Sebkhha of Sed El Mesjoune – Marrakech (Morocco). **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 153–160, 2019.

FAO - The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture – **Maapeo de suelos afectados por salinidad - Manual técnico**, 2021.

GUPTA, M. et al. Use of a Bioaugmented Organic Soil Amendment in Combination with Gypsum for *Withania somnifera* Growth on Sodic Soil. **Pedosphere**, v. 26, n. 3, p. 299–309, 2016.

HASSANI, A.; AZAPAGIC, A.; SHOKRI, N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 52, p. 33017–33027, 2020.

IBGE. **Levantamento Sistemático da Produção Agrícola**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/milho-em-grao/br>. Acesso em: 11 nov. 2023.

ILYAS, M.; QURESHI, R. H.; QADIR, M. A. Chemical changes in a saline-sodic soil after gypsum application and cropping. **Soil technology**, v. 10, n. 3, p. 247–260, 1997.

JOSEPH, S. et al. How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. **Global change biology. Bioenergy**, v. 13, n. 11, p. 1731–1764, 2021.

LI, S. et al. Synergistic improvement of carbon sequestration and crop yield by organic material addition in saline soil: A global meta-analysis. **The Science of the total environment**, v. 891, p. 164530, 2023.

LI, X. et al. Analysis of spatial-temporal variation of the saline-sodic soil in the west of Jilin Province from 1989 to 2019 and influencing factors. **Catena**, v. 217, p. 106492, 2022.

MAO, Y. et al. Remediation of saline-sodic soil with flue gas desulfurization gypsum in a reclaimed tidal flat of southeast China. **Journal of environmental sciences (China)**, v. 45, p. 224–232, 2016.

MEDEIROS, J. F. et al. Manejo do solo-água-planta em áreas afetadas por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. (org.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados**. 2. ed. Fortaleza, INCTSal, 2016. p. 321-335.

NEGACZ, K. et al. Saline soils worldwide: Identifying the most promising areas for saline agriculture. **Journal of arid environments**, v. 203, p. 104775, 2022.

ORTIZ-LIÉBANA, N. et al. Improved organic fertilisers made from combinations of compost, biochar, and anaerobic digestate: Evaluation of maize growth and soil metrics. **Agriculture**, v. 13, n. 8, p. 1557, 2023.

PARKASH, V.; SINGH, S. Potential of biochar application to mitigate salinity stress in eggplant. **HortScience: a publication of the American Society for Horticultural Science**, v. 55, n. 12, p. 1946–1955, 2020.

RASOULI, F.; KIANI POUYA, A.; KARIMIAN, N. Wheat yield and physico-chemical properties of a sodic soil from semi-arid area of Iran as affected by applied gypsum. **Geoderma**, v. 193–194, p. 246–255, 2013.

RENGASAMY, P., OLSSON, K.A. **Sodicity and soil structure**. Soil Res. 29, 935–952, 1991.

RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudo básico e aplicados**. 2 ed. Fortaleza, INCTSal, 2016. p. 9-20.

SÁ, F. V S. et al. Crescimento inicial de arbóreas nativas em solo salino-sódico do nordeste brasileiro tratado com corretivos. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 388–396, 2013.

SAIFULLAH et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. **The Science of the total environment**, v. 625, p. 320–335, 2018.

SUNDHA, P. et al. Can conjunctive use of gypsum, city waste composts and marginal quality water rehabilitate saline-sodic soils? **Soil & tillage research**, v. 200, p. 104608, 2020.

TRAZZI, P. A. et al. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. *Ciência Florestal*. **Ciência Florestal**, v. 28, p. 875–887, 2018.

WANG, S. et al. Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: Effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield. **Soil use and management**, v. 38, n. 4, p. 1679–1692, 2022.

YUAN, Y. et al. Biochar as a sustainable tool for improving the health of salt-affected soils. **Soil & Environmental Health**, v. 1, n. 3, p. 100033, 2023.

ZHANG, Y. et al. Short-term effects of biochar and gypsum on soil hydraulic properties and sodicity in a saline-alkali soil. **Pedosphere**, v. 30, n. 5, p. 694–702, 2020.

ZHAO, H. et al. Physicochemical properties and salinization characteristics of soils in coastal land reclamation areas: A case study of China-Singapore Tianjin Eco-City. **Heliyon**, v. 8, n. 12, p. e12629, 2022.

CAPÍTULO I - GESSO E BIOCHAR PARA CORREÇÃO EM SOLO SALINO-SÓDICO

RESUMO

A salinização dos solos nas regiões áridas e semiáridas é um problema crescente devido às altas taxas de evapotranspiração e às baixas precipitações pluviais ao longo do ano. Em perímetros irrigados, o problema é acentuado devido ao manejo inadequado, ocasionando excesso de sais no solo. Nesse sentido, objetivou-se a avaliar a utilização de gesso e biochar de eucalipto para a correção de um solo salino-sódico. O solo salino-sódico foi coletado em distrito irrigado para aplicação das técnicas de recuperação do solo. O experimento foi conduzido em casa de vegetação, utilizando o delineamento inteiramente casualizado, sete tratamentos e seis repetições, totalizando 42 unidades experimentais. Os tratamentos foram constituídos pela combinação do gesso e o biochar de eucalipto. A necessidade de gesso (NG) foi calculada para diminuir a porcentagem de sódio trocável (PST - final) do solo para 5%. Os tratamentos foram: T1- SSC - Solo Sem Corretivos; T2- 100% da necessidade de gesso; T3 - 100% do Biochar; T4- Biochar + 25% da NG; T5- Biochar + 50% da NG; T6- Biochar + 75% da NG; T7- Biochar + 100% da NG. A lavagem do solo foi eficiente para reduzir a salinidade e a sodicidade devido à lixiviação dos sais. Os tratamentos com Biochar + 25% da NG e Biochar + 75% da NG reduziram a salinidade e sodicidade do solo, alterando o solo para a classe normal.

Palavras-chave: recuperação de solo, salinidade, corretivos de salinidade.

CHAPTER I - GYPSUM AND BIOCHAR IN THE RECOVERY OF SALINE-SODIC SOIL

ABSTRACT

Soil salinization in arid and semi-arid regions is a growing problem due to high evapotranspiration rates and low rainfall throughout the year. In irrigated perimeters, the problem is accentuated due to inadequate management, causing excess salts in the soil. The aim was to evaluate the use of gypsum and eucalyptus biochar to correct a saline-sodic soil. The saline-sodic soil was collected from an irrigated district for the application of soil recovery techniques. The experiment was conducted in a greenhouse, using a completely randomized design, seven treatments and six replications, totalling 42 experimental units. The treatments consisted of a combination of gypsum and eucalyptus biochar. The need for gypsum (NG) was calculated to reduce the percentage of exchangeable sodium (PST - final) in the soil to 5%. The treatments were: T1- SSC - Soil Without Correctives; T2- 100% of the gypsum requirement; T3 - 100% of Biochar; T4- Biochar + 25% of NG; T5- Biochar + 50% of NG; T6- Biochar + 75% of NG; T7- Biochar + 100% of NG. Washing the soil was effective in reducing salinity and sodicity due to the leaching of salts. The treatments with Biochar + 25% of NG and Biochar + 75% of NG reduced the salinity and sodicity of the soil, changing the soil to the normal class.

Keywords: soil recovery, salinity, salinity correctors.

1 INTRODUÇÃO

A salinização dos solos é um problema crescente enfrentado mundialmente, especialmente nas regiões áridas e semiáridas da África, Ásia e América do Sul (SAIFULLAH et al., 2018). No mundo, estima-se que 8,7% do solo sejam afetados por sais e que de 20% a 50% dos solos irrigados nos continentes passaram pelo processo de salinização, colocando em risco a garantia e o direito de acesso a alimentação, tornando-se uma ameaça real na luta contra a fome e a pobreza (FAO, 2021). No Brasil, nas regiões semiáridas, encontram-se áreas com excesso de sais solúveis e/ou sódio trocável, devido às baixas precipitações pluviométricas e alta taxa de evapotranspiração, além de ações antrópicas (SANTOS et al., 2019; JUSTO et al., 2021).

A salinização e sodificação produzem alterações químicas e físicas no solo, como a dispersão das argilas, diminuindo a infiltração da água pelo entupimento dos poros, restando-a, aumentando, dessa forma, a erosão, o que expõe a matéria orgânica do solo ao processo de decomposição, dificulta a respiração do solo, prejudica a ciclagem do nitrogênio e a decomposição dos microrganismos do solo (HASSANI; AZAPAGIC; SHOKRI, 2020), além de ocorrer a redução do potencial osmótico das plantas provocando a seca fisiológica, gerando espécies vegetais atrofiadas, devido ao aumento da concentração de ânions, tais como cloretos, sulfatos, carbonatos, bicarbonatos e boratos na solução do solo, além do cátion sódio (SOUSA et al., 2013; RIBEIRO et al., 2016). De acordo com Richards (1954), os solos salinizados são classificados de acordo com o potencial hidrogeniônico (pH), a condutividade elétrica (CEes) do extrato de saturação e a porcentagem do sódio trocável (PST), tendo os solos salinos-sódicos: $\text{pH} < 8,5$, $(\text{CEes}) > 4 \text{ dS m}^{-1}$ e $\text{PST} > 15$.

Os solos salino-sódicos podem ser recuperados utilizando-se condicionadores de solo, como gesso agrícola, enxofre elementar, ácido sulfúrico, resíduos orgânicos, polímeros e biochar, associados à lavagem dos sais e a técnicas como aração profunda, subsolagem, sistematização e nivelamento, dentre outras (SOUSA et al., 2013; CAVALCANTI et al., 2016; FERNANDES, et al., 2018; EL HASINI et al.; 2019; SANTOS et al, 2019; ZHANG et al., 2023; XU et al., 2023). Em solos salino-sódicos e sódicos, o gesso é amplamente utilizado como corretivo, pois é facilmente encontrado, possui baixo custo, além de sua eficiência comprovada (SOUSA et al., 2013). No solo, o Ca^{2+} presente no gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) desloca o Na^+ trocável presente no complexo de troca do solo, formando Na_2SO_4 , que, após a lavagem do solo, é lixiviado para baixo e coletado nos drenos. Desta forma, para tal ação, faz-se necessário um sistema de drenagem eficiente (RICHARDS, 1954).

O biochar é um material rico em carbono aromático e elementos minerais presentes em suas cinzas com grande área superficial específica, produzido pela queima da biomassa orgânica em atmosfera inerte (pirólise), onde não há oxigênio ou ocorre ausência parcial do gás (gaseificação) em temperaturas que variam de 300 a 1000 °C, por meio de tecnologias limpas e ambiente controlado (LEHMANN, 2007; EUROPEAN BIOCHAR FOUNDATION, 2013).

O uso do biochar como condicionador do solo pode trazer diversos benefícios, tais como: melhorar as propriedades físico-químicas e biológicas do solo, elevando a produção das culturas, diminuir a densidade do solo, aumentar a porosidade e capacidade de retenção de água, aumentar a capacidade de troca catiônica, bem como aumentar a disponibilidade de nutrientes e reduzir a perda por lixiviação, além de melhorar efetivamente a estrutura da comunidade bacteriana dos solos (XU et al., 2023). Nos últimos anos, um crescente número de literaturas tem demonstrado a aplicação de biochar sozinho ou combinado com outros corretivos para a recuperação de solos salinos/salino-sódicos. Drake et al. (2016) demonstraram que o biochar tem potencial para melhorar o reflorestamento em áreas extremamente degradadas, resultando em maiores áreas de terra que podem ser potencialmente recuperadas. Huang et al. (2019) mostraram que o biochar é uma alternativa para facilitar a utilização agrícola dos recursos hídricos e do solo de baixa qualidade nas regiões costeiras, pois beneficia a lixiviação de Na^+ e melhora o controle da salinidade desses solos.

A eficiência do biochar em recuperar solos salinos e sódicos foi demonstrada por Santos (2019), Costa et al. (2019), Sahin et al. (2020), Wang et al. (2021), Adiaha (2022), Xu et al. (2023), e Nascimento et al. (2023). A hipótese deste trabalho é de que, sendo o gesso um corretivo extensamente utilizado e eficiente em casos de solos salino-sódicos e o biochar apresentando bons resultados frente à recuperação desses solos, os tratamentos com esses corretivos separadamente ou combinados em diferentes concentrações podem ter melhor eficiência na recuperação dos solos salino-sódicos. Nesse sentido, objetivou-se a avaliar a utilização de gesso e biochar de eucalipto de maneira a corrigir um solo salino-sódico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Realizou-se o experimento numa casa de vegetação localizada na Universidade Federal Rural do Semiárido - UFERSA, campus leste, em Mossoró/RN, Brasil, no período de vinte e três de setembro a seis de novembro de 2022. As coordenadas geográficas do local são 5°12' de latitude Sul e 37°19' de latitude Oeste, com altitude média de 18 m e durante o período de incubação apresentou dados de temperaturas médias máximas e mínimas de 44,5 e 24,3 °C e, umidade relativa média de 53,6%, respectivamente.

O solo utilizado nesse estudo foi coletado no Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA), localizado na região do Vale do Açu, entre os municípios de Afonso Bezerra e Alto do Rodrigues, no Rio Grande do Norte. O solo utilizado é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático solódico (SANTOS, 2018). A área escolhida para a coleta passa por processo de salinização secundária, de acordo com o diagnóstico realizado por Justo et al. (2021), encontrando-se numa região mais baixa do perímetro, facilitando o escoamento superficial e o acúmulo de água nos períodos chuvosos. No período da coleta, o solo apresentava acúmulo de sais na superfície, com manchas esbranquiçadas, presença da espécie vegetal *Blutaparon portulacoides* A. St.-Hil, conhecida como “Pirrixiu” e matéria orgânica (Figura 1). As coordenadas geográficas do local são 5°23'28" S, 36°48'29" W e altitude de 37 m.

Figura 1. Lote 01 do Distrito Irrigado do Baixo-açu (DIBA) apresentando indicativos de salinização secundária.



Fonte: Autoria própria (2023).

O solo foi coletado no período de estiagem, em julho de 2022, na camada de 0-20cm, em pontos distintos, numa área cujo problema de salinização secundária era mais crítico. Para

realização do experimento, foram coletadas amostras de solo totalizando, aproximadamente, uma tonelada, com auxílio de ferramentas como enxada e chibanca, armazenando o solo em sacos de rafia.

As amostras de solo foram levadas para casa de vegetação no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semiárido - UFRSA, cujas coordenadas são 5°12'11,7" S 37°19'26,2" W, com altitude média de 18 m. O solo foi espalhado numa lona para secar ao ar e em seguida destorroado, sendo peneirado em peneira de malha 4 mm e armazenado em caixa d'água de 1000 L, para posterior caracterização, conforme Figura 2.

Figura 2. Preparação do solo para a caracterização.



Fonte: Autoria própria (2023).

Após preparação do solo, amostras foram coletadas e levadas para o Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta – LASAP do Departamento de Ciências Agronômicas e Florestais da Universidade Federal Rural do Semiárido – UFRSA, Campus Mossoró/RN, onde foram realizadas análises de granulometria, fertilidade e salinidade do solo (Tabela 1), conforme metodologia recomendada por Teixeira et al. (2017). Para classificação quanto à salinidade, foram avaliados os valores de pH e CE do extrato de saturação, os teores solúveis de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , razão de adsorção de sódio (RAS) (Eq. 1) e porcentagem de sódio trocável (PST) (Eq. 2), conforme Richards (1954) e Teixeira et al. (2017).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: RAS é a razão de adsorção de sódio e Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} são os teores solúveis de sódio, cálcio e magnésio, respectivamente, em $\text{mmol}_c \text{ cm}^3$.

$$PST = \frac{\text{Na}^+}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{K}^+ + \text{Na}^+ + \text{H}^+ + \text{Al}^{3+})} \times 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: PST é a porcentagem de sódio trocável em %; Na^+ é a concentração de sódio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Ca^{2+} é a concentração de cálcio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; Mg^{2+} é a concentração de magnésio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; K^+ é a concentração de potássio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; H^+ é a concentração de hidrogênio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e Al^{3+} é a concentração de alumínio em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Os valores dos cátions trocáveis do solo (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) para cálculo da PST foram obtidos por meio da diferença entre os cátions extraíveis e os cátions solúveis, conforme proposto por Richards (1954) e descrito na Equação 3.

$$\text{Cátions trocáveis} = \text{cátions extraíveis} - \frac{\text{cátions solúveis}}{10} \times \alpha \quad (\text{Equação 3})$$

Em que cátions trocáveis do solo são a concentração de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} do complexo sortivo em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$; cátions extraíveis do solo são concentração de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} medidos no sobrenadante obtido com extratores químicos, em $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, e os solúveis determinados no extrato de saturação do solo, em $\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$, e α é a porosidade total do solo em decimal.

Tabela 1. Atributos químicos do complexo sortivo e do extrato de saturação e atributos físicos à correção com gesso e biochar de um solo salino-sódico.

Atributos químicos	Valor	Atributos físicos	Valor
Complexo sortivo		Areia (kg kg^{-1})	0,49
pH	8,10	Silte (kg kg^{-1})	0,29
CE 1:2,5 (dS m^{-1})	6,41	Argila (kg kg^{-1})	0,22
N (g kg^{-1})	0,6		
M.O (g kg^{-1})	5,79		
P (mg dm^{-3})	0,25	D_s (g.cm^{-1})	1,21
K^+ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,31	D_p (g.cm^{-1})	2,6
Na^+ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	6,12	α (%)	53,46
Ca^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	19,01		
Mg^{2+} ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	2,07	Tensão da água no solo	Umidade (g g^{-1})
$\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$ ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	0,0	0,033 MPa	0,20
SB ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	27,51	1,5 MPa	0,11
CTC ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$)	27,51		
PST (%)	22		

Extrato de saturação	
pH	7,4
CEes (dS m ⁻¹)	30,12
K ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	1,61
Na ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	121,5
Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	111,0
Mg ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	61,5
Cl ⁻ (mmol _c dm ⁻³)	345,0
CO ₃ ²⁻ (mmol _c dm ⁻³)	0,0
HCO ₃ ⁻ (mmol _c dm ⁻³)	7,5
SO ₄ ²⁻ (mmol _c dm ⁻³)	25,89
RAS (mmol _c dm ⁻³) ^{0,5}	13,1

P, K⁺ e Na⁺: Extrator Mehlich⁻¹; H⁺+Al⁺³: Extrator acetato de Ca²⁺ 0,5mol L⁻¹ pH 7; Al⁺³, Ca⁺², Mg⁺²: Extrator KCl 1 mol L⁻¹; CE: condutividade elétrica; MO: matéria orgânica; SB: soma de bases; CTC: capacidade de troca de cátions; PST: porcentagem de sódio trocável; RAS: razão de adsorção de sódio;

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado (DIC), com sete tratamentos e seis repetições, totalizando 42 vasos com 6 dm³ de solo. Os tratamentos foram definidos utilizando-se a dose prática de necessidade de gesso (NG) calculada no intuito de reduzir a Porcentagem de Sódio Trocável - PST (final) do solo para 5%, adotando-se a mesma dose para a aplicação de biochar (T1 - Solo sem corretivos, T2 - 100% da NG, T3 - 100% do Biochar, T4 - Biochar + 25% da NG, T5 - Biochar + 50% da NG, T6 - Biochar + 75% da NG, T7 - Biochar + 100% da NG). Para se calcular a necessidade de gesso (NG) utilizou-se a Equação 4 (PIZARRO, 1978). Empregou-se como corretivos sulfato de cálcio P.A. (Gesso) e o biochar feito de eucalipto reflorestado, adquirido comercialmente, produzido em um forno cerâmico, numa temperatura de pirólise de 500 °C, cuja composição das cinzas fornecida pelo fabricante BIOCHAR Brasil encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2. Composição do biochar disponibilizada pelo fabricante.

Composição	Valor	
Nitrogênio (N)	4,1 g kg ⁻¹	0,41 %
Fósforo (P)	0,27 g kg ⁻¹	0,03 %
Potássio (K)	1,00 g kg ⁻¹	0,10 %
Cálcio (Ca)	2,6 g kg ⁻¹	0,26 %
Magnésio (Mg)	0,7 g kg ⁻¹	0,07 %
Enxofre (S)	0,5 g kg ⁻¹	0,05 %
Ferro (Fe)	1098 mg kg ⁻¹	0,110 %
Cobre (Cu)	2,8 mg kg ⁻¹	0,0003%
Zinco (Zn)	12,0 mg kg ⁻¹	0,001%
Manganês (Mn)	168,0 mg kg ⁻¹	0,017 %
Boro (B)	13,6 mg kg ⁻¹	0,001 %
Sódio (Na)	56,67 mg kg ⁻¹	0,006 %
Densidade	573 kg m ⁻³ (seco)	

A necessidade de gesso (NG) foi calculada conforme Equação 4 proposta por Pizarro (1978), considerando a dose teórica de gesso para a recuperação do solo e visando a reduzir a PST para 5%, diminuindo o caráter sódico do solo.

$$Dt = \frac{[(PST_i - PST_f) \times CTC \times PEq \times h \times Ds]}{100} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: Dt - Dose teórica do corretivo, kg ha⁻¹; (PST_i - PST_f) - Diferença entre a porcentagem de sódio trocável inicial e final; CTC - Capacidade de troca catiônica, cmolc dm⁻³; PEq - Peso equivalente do elemento ou composto a ser usado como corretivo (Gesso = 86); h - Profundidade do solo a ser recuperado (0-20) cm e Ds - Densidade do solo, kg dm⁻³.

Para se calcular a dose de corretivos, considerou-se a utilização total do cálcio inserido e o corretivo com 100% de pureza. Desta forma, a dose prática do corretivo pôde ser estimada conforme a Equação 5, tendo como coeficiente de eficiência de 1,46, quando os corretivos químicos empregados são pouco solúveis, como, gesso e enxofre.

$$Dp = Dt \times C \quad \text{Equação 5}$$

Em que: Dp - Dose prática, kg ha⁻¹; Dt - Dose teórica do corretivo, kg ha⁻¹; C - Coeficiente de eficiência do corretivo a ser utilizado.

A partir da dose prática da NG estimada por meio das equações descritas, obteve-se o valor de valor de 100% da NG, empregando-se 14.230,50 kg ha⁻¹ de gesso para a correção do solo. A dose de biochar utilizada assemelhou-se a 100% da NG, ou seja, 14.230,5 kg ha⁻¹, visando a comparar e avaliar o efeito desse corretivo na recuperação do solo salino-sódico.

A Tabela 3 mostra as doses de corretivo adicionadas em cada tratamento, bem como as doses por vaso, cujo volume era de 6 m³.

Tabela 3. Doses de corretivos adicionadas em cada tratamento e valor por vaso.

Tratamento	Dose de biochar (kg ha ⁻¹)	Dose de gesso (kg ha ⁻¹)	Dose de biochar por vaso (g)	Dose de gesso por vaso (g)
T1- Solo sem corretivos	-	-	-	-
T2- 100% da NG	-	14.230,5	-	42,7
T3- 100% do Biochar	14.230,5	-	42,7	-
T4- Biochar + 25% da NG	14.230,5	3.557,6	42,7	10,7
T5- Biochar + 50% da NG	14.230,5	7.115,3	42,7	21,4
T6- Biochar + 75% da NG	14.230,5	10.672,9	42,7	32,0
T7- Biochar + 100% da NG	14.230,5	14.230,5	42,7	42,7

NG: Necessidade de gesso.

Os corretivos foram adicionados ao solo e homogeneizados. Em seguida, o solo foi colocado na umidade de 70% da capacidade de campo, a qual foi mantida por 45 dias, totalizando 1,06 L de água por vaso, sendo o volume do solo de 6 dm³. Para as reposições de

água no período de incubação e para irrigação, utilizou-se a lisimetria de pesagem. Os vasos com solo na umidade calculada foram pesados no início do experimento, e durante o período de incubação os vasos foram pesados e o conteúdo de água perdido foi repostado, baseando-se na massa inicial do vaso, conforme Figura 3.

Figura 3. Adição dos corretivos e adição de água em 70% da cc.



Fonte: Autoria própria (2023).

A água utilizada para manutenção da umidade do solo, bem como para posterior lavagem foi água de abastecimento, cuja caracterização está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4. Caracterização da água de abastecimento utilizada no experimento.

Parâmetros	Valores
pH	8,03
CE (dS m ⁻¹)	0,47
K ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	0,19
Na ⁺ (mmol _c dm ⁻³)	3,37
Ca ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	0,8
Mg ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	1,1
SO ₄ ²⁺ (mmol _c dm ⁻³)	0,98
RAS (mmol _c dm ⁻³)	3,5

CE: condutividade elétrica; RAS: razão de adsorção de sódio.

Após o período de incubação de 45 dias, lavou-se o solo com água de abastecimento com volume correspondente ao dobro do volume de poros para a lixiviação do excesso de sais (SÁ et al., 2013); retirando, posteriormente, 1 kg de solo de cada vaso para as análises de fertilidade, salinidade e umidade do solo, conforme metodologia de Teixeira et al. (2017) e Richards (1954).

Para os cálculos estatísticos, os dados passaram por análise de variância pelo teste F aos níveis de 1% ($p < 0,01$), 5% ($p < 0,05$) e 10% ($p < 0,10$) de probabilidade e teste LSD ($p < 0,05$) para comparação de médias, utilizando o programa SISVAR (FERREIRA, 2019).

Quando necessário, os dados foram transformados ($y = \log(x)$ ou $y = (x + 1)^{0,5}$) para melhorar a normalidade.

3 RESULTADOS

Os tratamentos avaliados em relação ao complexo sortivo apresentaram efeito significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$) para matéria orgânica (M.O.), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), porcentagem de sódio trocável (PST) e umidade no ponto de murcha permanente (UPM), e 5% de probabilidade ($p < 0,05$) para a umidade na capacidade de campo (UCC), não apresentando diferença significativa para os valores de N e P, conforme apresentado na Tabela 5.

O teor de matéria orgânica do solo variou entre 2,98 e 19,02 g kg⁻¹, tendo a menor média no tratamento com 100% da necessidade de gesso (T2 - 100% NG) e maior média no tratamento com Biochar + 100% da NG (T7) (Tabela 5). O P não teve diferença significativa para o teste F ($p > 0,1$), com valores variando de 0,31 a 1,04 mg.dm⁻³ (Tabela 5). Apesar de não haver diferenciação entre as médias de P, o P foi incrementado em relação ao solo inicial do Distrito Irrigado do Baixo-açu (DIBA), inicialmente com 0,25 mg dm⁻³ para 1,04 mg dm⁻³ no tratamento T1. O nitrogênio não teve diferença significativa para o teste F ($p > 0,1$), com valores variando de 0,72 a 0,85 g kg⁻¹. Ao considerar os valores iniciais de N no solo coletado no DIBA (0,6 g kg⁻¹), houve incremento dos teores (Tabelas 1 e 5).

Tabela 5. Teste F e teste de médias LSD para nitrogênio (N, g kg⁻¹), matéria orgânica (M.O, g Kg⁻¹), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K^+ , cmol_c dm⁻³), sódio (Na^+ , cmol_c dm⁻³), cálcio (Ca^{2+} , cmol_c dm⁻³) e magnésio (Mg^{2+} , cmol_c dm⁻³), potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE, dS m⁻¹), soma de bases (SB, cmol_c dm⁻³), capacidade de troca catiônica (CTC, cmol_c dm⁻³), porcentagem de sódio trocável (PST, %), umidade na capacidade de campo (UCC, 0,033 Mpa - kg kg⁻¹) e umidade no ponto de murcha (UPM, 1,5 Mpa - kg kg⁻¹) do complexo sortivo do solo tratado com gesso biochar, após a lavagem.

Teste F (Pr > Fc)							
	N*	M.O.	P*	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Tratamentos	0,2489	0,0000	0,3112	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CV (%)	3,57	18,10	15,50	11,32	8,76	6,84	17,91
Valores médios e Teste de médias LSD (p < 0,05)							
T1	0,73 a	12,58 b	1,04 a	0,36 c	0,23 d	12,15 d	5,34 a
T2	0,81 a	2,98 c	0,98 a	0,47 b	0,17 d	19,33 a	4,79 a

T3	0,84 a	11,59 b	0,79 a	0,71 a	3,49 a	12,38 d	4,68 a
T4	0,85 a	11,94 c	0,83 a	0,74 a	2,98 ab	13,18 d	3,73 b
T5	0,85 a	16,12 ab	0,31 a	0,66 a	2,36bc	15,14 c	3,64 bc
T6	0,81 a	13,01 b	0,71 a	0,66 a	1,88 c	17,13 b	2,82 c
T7	0,72 a	19,02 a	0,68 a	0,68 a	2,73 b	19,14 a	3,57 bc
Solo DIBA	0,69	5,79	0,25	0,31	6,12	19,01	
	pH	CE*	SB	CTC	PST	UCC	UPM
Tratamentos	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0138	0,0000
CV (%)	0,93	8,21	7,23	7,23	21,50	10,67	8,29
Tratamentos	Valores médios e Teste de médias LSD (p < 0,05)						
T1	8,44 a	0,88 b	18,07 c	18,07 c	1,26 d	0,20 b	0,13 b
T2	8,17 c	1,71 a	24,76 a	24,76 a	0,69 d	0,21 ab	0,13 b
T3	8,43 a	0,81 b	21,26 b	21,26 b	16,06 a	0,20 b	0,12 b
T4	8,34 b	0,70 b	20,63 b	20,63 b	14,40 a	0,20 b	0,12 b
T5	8,24 c	1,06 b	21,80 b	21,80 b	10,77 b	0,23 a	0,12 b
T6	8,20 c	1,02 b	22,50 b	22,50 b	8,36 c	0,20 b	0,15 a
T7	8,18 c	1,47 a	26,10 a	26,10 a	10,38 bc	0,20 b	0,15 a
Solo DIBA	8,10	6,41	27,51	27,51	22	0,20	0,11

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste LSD (p < 0,05).

*Dados transformados para Logaritmo de base 10.

O menor teor de K^+ foi obtido no solo sem corretivo (T1, $0,36 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e os maiores teores ocorreram nos solos que receberam o biochar (T3, T4, T5, T6 e T7), com incrementos de 83,3 a 105,5%, em relação a T1, solo sem corretivo (Tabela 5). Os maiores teores de Na^+ ocorreram nos solos que receberam o biochar (T3, T4, T5, T6 e T7), com valores variando de 1,88 a $3,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, os quais foram superiores em 8,2 a 15,2 vezes ao solo sem corretivo (T1) (Tabela 5). No entanto, em todos os tratamentos estudados houve redução em relação ao solo coletado no DIBA ($6,12 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), obtendo valor mínimo de $0,17 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para o tratamento T2 e valor máximo de $3,49 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ para os tratamentos T3. Nota-se que os tratamentos T1 ($0,23 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e T2 ($0,17 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sem a presença do biochar obtiveram maiores reduções, 96,24% e 97,22%, respectivamente, em relação ao solo do DIBA.

O Ca^{2+} dos tratamentos variou entre 12,15 e $19,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, apresentando os menores valores para tratamento T1 ($12,15 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), seguido do solo com tratamento T3 ($12,38 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e solo com tratamento T4 ($13,18 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os tratamentos T2 ($19,33 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e T7 ($19,14 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) obtiveram maiores valores, estando muito próximos da

concentração de Ca^{2+} do solo do DIBA ($19,01 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). O Mg^{2+} teve incremento na sua concentração de 158% no tratamento T1 em relação ao solo do DIBA ($2,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), sendo ela $5,34 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e para os tratamentos T2 e T3 seus valores foram 4,79 e $4,68 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, respectivamente, ao passo que sua menor concentração foi no tratamento T6 ($2,82 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) (Tabela 5).

O pH médio do solo no complexo sortivo variou entre 8,17 e 8,44, apresentando o menor valor no tratamento T2 (100% da NG), porém sem diferenciação entre os tratamentos T5 (biochar + 50 % da NG), T6 (biochar + 75 % da NG) e T7 (biochar + 100% da NG) e maiores valores nos tratamentos T1 (solo sem corretivo, 8,44) e T3 (100% do biochar, 8,43). A CE variou na faixa de 0,7 e $1,71 \text{ dS m}^{-1}$, tendo o menor valor médio no tratamento T4 com biochar + 25 % da NG ($0,7 \text{ dS m}^{-1}$), reduzindo cerca de 89% do seu valor inicial, no solo coletado no DIBA, cujo valor foi $6,41 \text{ dS.m}^{-1}$ e maior CE no tratamento T2 com 100% da NG ($1,71 \text{ dS.m}^{-1}$). Não houve diferença significativa entre os tratamentos T2 e T7, tampouco para os tratamentos T1 entre os tratamentos T3, T4, T5 e T6, respectivamente (Tabela 5).

Os valores das SB e CTC obtiveram os mesmos valores, pois os cátions H^+ e Al^{3+} estavam ausentes em todos os tratamentos realizados e ficaram com valores médios entre 18,07 e $26,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, tendo menores médias no solo com tratamentos T1 ($18,07 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Os maiores valores foram encontrados nos tratamentos T2 ($24,76 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e T7 ($26,10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), havendo pequena redução do valor do solo do DIBA ($27,51 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Em todos os solos houve redução da PST em relação ao solo do DIBA (PST = 22%), entretanto os valores médios de 1,26 e 0,69% foram encontrados no solo do T1 e T2, respectivamente. Os solos com tratamento T6 (8,36%) e T7 (10,38%) apresentaram redução de 64,0% e 52,8% do valor da PST do solo inicial. A umidade na capacidade de campo foi superior no T5 ($0,23 \text{ kg kg}^{-1}$), ao passo que a umidade no ponto de murcha teve incremento nos tratamentos T6 e T7, que obtiveram os maiores valores ($0,15 \text{ kg kg}^{-1}$), conforme Tabela 5.

Quanto aos resultados do extrato de saturação do solo, o Ca^{2+} , bicarbonato (HCO_3^-), Sulfato (SO_4^{2-}) e razão de adsorção de sódio (RAS) apresentaram efeito significativo a 1% de probabilidade ($p < 0,01$), pH a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) e Cl^- a 10% de probabilidade ($p < 0,10$), conforme Tabela 6.

A Condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes) diminuiu em todos os tratamentos após a lavagem, quando comparada a CEes do solo inicial do DIBA ($30,12 \text{ dS m}^{-1}$), apesar de não haver diferença significativa entre os tratamentos testados ($p > 0,1$), destacam-se como os menores valores os tratamentos T4 e T6, cujas médias foram $3,96 \text{ dS m}^{-1}$ e $3,94 \text{ dS m}^{-1}$, respectivamente. O potássio não teve diferença significativa para o Teste F (p

> 0,1), mas apresentou redução em todos os tratamentos em relação ao solo inicial do DIBA ($1,61 \text{ mmolc L}^{-1}$), com o T1 apresentando o menor valor médio de $0,6 \text{ mmolc L}^{-1}$ (Tabela 6). O Na^+ obtido em todos os tratamentos após a lavagem teve redução acentuada de seus valores em relação ao solo coletado no DIBA ($121,50 \text{ mmolc L}^{-1}$), mesmo não tendo diferença significativa para o Teste F ($p > 0,1$), destaca-se o solo com tratamento T4 e com o tratamento T6, reduzindo 84,56% e 87,27%, respectivamente (Tabela 6). O Mg^{2+} não teve diferença significativa para o Teste F ($p > 0,1$) e entre as médias, porém apresentou redução entre os valores em relação ao solo do DIBA ($61,5 \text{ mmolc L}^{-1}$): o menor valor encontra-se no tratamento T1 ($10,88 \text{ mmolc L}^{-1}$) e a maior concentração está no tratamento T4 ($21,48 \text{ mmolc L}^{-1}$), conforme Tabela 6.

Tabela 6. Teste F e teste de médias LSD para o potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dS m^{-1}), potássio (K^+ , mmolc L^{-1}), sódio (Na^+ , mmolc L^{-1}), cálcio (Ca^{2+} , mmolc L^{-1}), magnésio (Mg^{2+} , mmolc L^{-1}), cloreto (Cl^- , mmolc dm^{-3}), bicarbonato (HCO_3^- , mmolc dm^{-3}), sulfato (SO_4^{2-} , mmolc dm^{-3}) e razão de adsorção de sódio (RAS, $(\text{mmolc dm}^{-3})^{0,5}$) do extrato de saturação do solo tratado com gesso e biochar, após a lavagem.

Teste F (Pr>Fc)						
	pH	CE*	K ⁺ *	Na ⁺ #	Ca ²⁺	Mg ²⁺ #
Tratamentos	0,0330	0,2775	0,2180	0,2596	0,0003	0,7953
CV (%)	1,98	14,13	5,92	10,80	18,26	21,43
Tratamentos	Valores médios e Teste de médias LSD (p < 0,05)					
T1	7,69 c	4,47 a	0,60 a	22,39 a	12,04 d	10,88 a
T2	7,72 bc	5,47 a	0,89 a	23,38 a	32,00 a	13,13 a
T3	7,91 a	4,93 a	0,63 a	25,01 a	17,83 cd	15,65 a
T4	7,88 ab	3,96 a	0,65 a	18,76 a	21,42 bc	21,48 a
T5	7,80 abc	4,79 a	0,70 a	20,38 a	28,36 ab	15,94 a
T6	7,94 a	3,94 a	0,70 a	15,47 a	27,28 ab	15,98 a
T7	7,93 a	5,52 a	0,78 a	23,25 a	32,13 a	17,13 a
Solo DIBA	7,4	30,12	1,61	121,5	111,0	61,5
Teste F (Pr>Fc)						
	Cl [#]		HCO ₃ ^{-*}	SO ₄ ^{2-*}	RAS	
Tratamentos	0,0833		0,0098	0,0000	0,0000	
CV (%)	18,35		12,18	10,55	20,03	
Tratamentos	Valores médios e Teste de médias LSD (p < 0,05)					
T1	35,76 ab		4,50 c	22,08 c	6,65 a	
T2	39,50 a		6,25 bc	78,32 a	4,88 b	

T3	43,33 a	8,08 ab	29,45 c	6,37 a
T4	29,33 ab	9,17 a	58,35 b	4,33 bc
T5	23,20 ab	7,40 ab	76,48 a	4,40 b
T6	16,33 b	6,67 bc	79,57 a	3,38 c
T7	35,66 ab	7,08 ab	72,65 ab	4,71 b
Solo DIBA	345,0	7,5	25,89	13,1

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem significativamente pelo teste LSD ($p < 0,05$). * Dados transformados para Logaritmo de base 10. # Dados transformados para $(x + 1)^{0,5}$.

No pH do extrato de saturação, houve aumento do seu valor em todos os tratamentos estudados em relação ao solo coletado no DIBA (7,40), com menor média de 7,69 no tratamento T1 e as maiores médias de 7,94 e 7,93 nos tratamentos T6 e T7, respectivamente (Tabela 6). A concentração do Ca^{2+} reduziu expressivamente em relação ao solo no DIBA (111,00 mmolc L⁻¹), observando-se os menores valores nos tratamentos T1, T3 e T4, tendo o tratamento T1 o valor de 12,04 mmolc L⁻¹ e os valores mais elevados foram encontrados nos solos com tratamento T2 (32,00 mmolc L⁻¹) e T7 (32,13 mmolc L⁻¹) (Tabela 6).

A concentração dos íons cloreto apresentou redução expressiva em seus teores, quando comparados com o solo inicial do DIBA (345,0 mmolc.dm⁻³), destacando-se o tratamento T6 (16,33 mmolc.dm⁻³), onde a redução foi de 95, 26 % (Tabela 6). Percebeu-se a ausência de íons carbonatos em todos os solos, desde o solo inicial do DIBA. Os íons HCO_3^- apresentaram pequena redução das suas concentrações em relação ao solo do DIBA (7,5 mmolc.dm⁻³) nos tratamentos T1 (4,5 mmolc.dm⁻³), T2 (6,25 mmolc.dm⁻³), T6 (6,67 mmolc.dm⁻³) e T7 (7,08 mmolc.dm⁻³); em contrapartida, os tratamentos T3 (8,08 mmolc.dm⁻³) e T4 (9,17 mmolc.dm⁻³) apresentaram aumento de suas concentrações (Tabela 6). Os menores teores de SO_4^{2-} foram obtidos nos tratamentos T1 e T3, com valores de 22,08 e 29,45 mmolc.dm⁻³, sendo inferiores em 72,25 e 63,0% em relação ao T6, o qual obteve o maior valor (Tabela 6).

A RAS foi reduzida em todos os tratamentos, comparando-as com a do solo do DIBA (13,1 mmolc.dm⁻³), obtendo reduções mais expressivas nos tratamentos T4 (4,33 mmolc.dm⁻³) e no T6 (3,38 mmolc.dm⁻³), equivalendo a reduções de 67% e 74,2%, respectivamente. Os maiores valores encontrados para a RAS foram nos tratamentos T1 (6,65 mmolc.dm⁻³) e no T3 (6,37 mmolc.dm⁻³) (Tabela 6).

O solo coletado no DIBA, que era classificado como salino-sódico, conforme mostrado, foi submetido a sete tratamentos utilizando gesso e biochar, em diferentes doses, sendo elas: SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso

(NG) (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Após a lavagem dos solos, foram feitas novas análises, e a Tabela 7 mostra, de acordo com os parâmetros, a classificação dos solos, de acordo com Richards (1954) (Tabela 7). Em todos os tratamentos aos quais os solos foram submetidos, houve alterações da classificação dos solos de acordo com Richards (1954), exceto no T3, com destaque para os solos dos tratamentos T4 e T6, que passaram de salino-sódico para normal.

Tabela 7. Classificação dos solos após tratamento e lavagem para lixiviação de sais.

Tratamento	CEes (dS.m ⁻¹)	PST (%)	pHes	Classificação do solo
T1	4,47	1,26	7,69	Salino
T2	5,47	0,69	7,72	Salino
T3	4,93	16,06	7,91	Salino-sódico
T4	3,96	14,40	7,88	Normal
T5	4,79	10,77	7,80	Salino
T6	3,94	8,36	7,94	Normal
T7	5,52	10,38	7,93	Salino

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (NG) (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7); CEes: condutividade elétrica no extrato de saturação do solo; PST: porcentagem de sódio trocável; pHes: potencial hidrogeniônico do extrato de saturação do solo.

4 DISCUSSÃO

A aplicação dos condicionadores de solo, gesso e biochar, e posterior lavagem proporcionaram a redução da salinidade e/ou sodicidade do solo, em todos os tratamentos. O solo obtido no Distrito Irrigado do Baixo-Açu (DIBA) foi classificado como salino-sódico, apresentando 7,4 de pH, 30,12 dS m⁻¹ de CEes e 22,00% na PST (RICHARDS, 1954). No solo sem corretivo (T1), a lavagem reduziu a 7,69 de pH, 4,47 dS m⁻¹ de CEes e 1,26% na PST, sendo o solo classificado como salino. No solo tratado com 100% da Necessidade de Gesso (T2), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,72 de pH, 5,47 dS m⁻¹ de CEes, e 0,69% na PST, sendo classificado como salino. No solo tratado com biochar (T3), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,91 de pH, 4,93 dS m⁻¹ de CEes e 16,06% na PST, sendo classificado como salino-sódico. No solo tratado com biochar mais 25% da Necessidade de Gesso (T4), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,88 de pH, 3,96 dS m⁻¹ de CEes e 14,40% na PST, resultando em solo normal (solo não salino e não sódico). No solo tratado com biochar mais 50% da Necessidade de Gesso (T5), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,80 de pH, 4,79 dS m⁻¹ de CEes e 10,77% na PST, sendo o solo salino.

No solo tratado com biochar mais 75% da Necessidade de Gesso (T6), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,94 de pH, 3,94 dS m⁻¹ de CEes e 8,36% na PST, resultando em solo normal. No solo tratado com biochar mais 100% da Necessidade de Gesso (T7), após a lavagem foram obtidos os valores de 7,93 de pH, 5,52 dS m⁻¹ de CEes e 10,38% na PST, sendo classificado como solo salino.

A eficiência da recuperação de um solo salino-sódico, cuja condutividade elétrica é elevada, assim como pH e PST, devido ao alto teor de Na⁺ trocável e solúvel, é alcançada quando, no solo, esses parâmetros após etapas de tratamento com aplicação de corretivos e lavagem para lixiviação dos sais são reduzidos, e esse solo volta a ter características de solos normais, em que a CEes < 4 dS.m⁻¹, PST < 15 e pH < 8,5 (RICHARDS, 1954). Somente a lavagem do solo para lixiviação dos sais com uma drenagem adequada proporciona a redução desses parâmetros, assim como a aplicação de gesso, que já é amplamente utilizada nesses casos (SÁ et al., 2013; SANTOS et al, 2019). A utilização do biochar como corretivo desses solos, exclusivo ou associado a corretivos como gesso, tem sido bastante estudada nesses últimos anos, pois ele altera algumas propriedades do solo como capacidade de retenção de água e porosidade, é uma fonte de Ca²⁺ e Mg²⁺ trocáveis, facilitando a lixiviação dos íons de Na⁺ no complexo de troca do solo, além de ser adsorvente, devido à alta presença de poros e sítios ativos (SAIFULLAH et al.; 2018; WANG et al., 2021). No entanto, o uso do biochar de forma exclusiva provocou a retenção do sódio trocável nos sítios ativos do insumo. Esse fato ocorreu devido à alta concentração de sódio solúvel, que, por estar em predominância na solução do solo em relação ao Ca²⁺ e Mg²⁺, observada pela RAS inicial do solo de 13,1 (mmol_c dm⁻³)^{0,5}, uma vez que, uma maior concentração do íon em solução, aumenta a força de atração do íon às cargas negativas do solo (RICHARDS, 1954).

Em todos os tratamentos aplicados, inclusive aquele cujo tratamento foi somente a lavagem do solo (T1), houve redução dos valores médios dos parâmetros acima citados, CE e PST, com exceção do pH, muito embora tenha permanecido abaixo de 8,5, quando comparados ao solo coletado no DIBA. Essa elevação do pH deve-se provavelmente ao fato, da água de abastecimento utilizada para a manutenção da umidade do solo e para lavagem dos solos, ter um pH elevado (8,03). Os solos cujos pH tiveram menor elevação, T2 (8,17) e T7 (8,18), possuíam 100% da NG, ao passo que os solos sem o gesso como corretivo (T1) com biochar (T3) e biochar associado a doses menores de gesso (T4, T5, T6) obtiveram maior pH, mostrando que o biochar não influenciou no pH do solo. Saifullah et al. (2018) explicam que o biochar tem uma característica de corrigir a acidez do solo, elevando seu pH, mas depende do tipo de matéria-prima e o tempo de contato do biochar com o solo pode afetar o pH do solo

e que muitas vezes esse corretivo não influencia na alteração do pH do solo, como foi o caso deste trabalho.

As CEes dos solos tratados tiveram redução significativa, porém os tratamentos com biochar associado ao gesso com 25% e 75% apresentaram as reduções mais significativas em comparação aos tratamentos que não utilizaram biochar. Nos solos T2 (5,47) e T7 (5,52), onde a concentração de gesso foi mais elevada, a CEes apresentou o valor mais alto, possivelmente, devido às características do biochar, adsorvendo íons de Ca^{2+} , presentes no gesso na sua superfície. A PST dos solos tratados com biochar ou biochar associado às diversas doses de gesso foi mais elevada que aqueles sem o corretivo, podendo ser explicada pelo fato do biochar ser um material adsorvente, principalmente os obtidos por meio de pirólise acima de 450 °C, favorecendo a adsorção dos cátions no biochar, impedindo maior lixiviação (TRAZZI et al., 2018).

O Na^+ trocável teve redução significativa em todos os tratamentos realizados, porém naqueles que continham biochar são notados valores mais elevados, possivelmente devido à adsorção deste cátion no material, dificultando a lixiviação. Akhtar et al. (2015) afirmam que o biochar se liga transitoriamente com o Na^+ para reduzir a sua absorção pela planta, aumenta a disponibilidade de água no solo, reduzindo o estresse osmótico e aumenta a lixiviação dos sais, reduzindo a CEes da solução do solo na zona radicular, aperfeiçoando as propriedades físicas do solo, ajudando no crescimento radicular e facilitando a absorção de nutrientes. Com relação ao Ca^{2+} , houve redução dos seus teores, mostrando que o biochar não impediu a lixiviação desses cátions, tampouco do Mg^{2+} , na medida em que, apesar de ter aumentado a concentração nos solos, os tratamentos com o biochar obtiveram menores valores médios desse cátion, quando comparados ao solo sem corretivo (T1), possivelmente devido ao tempo de ação dos corretivos não ter sido suficientes (SANTOS et al., 2019). Como os teores de Na^+ e Ca^{2+} reduziram nos solos com os tratamentos aplicados, houve redução dos valores das SB e da CTC: somente os solos com 100 % da NG (T2 e T7) obtiveram valores mais elevados, porém abaixo do solo do DIBA, devido à presença do Ca^{2+} , presente no gesso.

As umidades na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente aumentaram com a presença do biochar, porém houve diminuição da retenção de água no solo, explicada pelo fato de que o biochar altera as propriedades físicas do solo, dependendo do tipo de matéria prima, tempo de envelhecimento no solo e temperatura de pirólise, conforme relatado por Saifullah et al. (2018).

Os atributos químicos do extrato da pasta de saturação se assemelharam ao seu comportamento no complexo sortivo, houve redução das CEes, aumento de pH, diminuição

das concentrações de Na^+ e Ca^{2+} , bem como de Mg^{2+} , nesse caso, diferente do complexo sortivo. Um parâmetro extremamente importante é a RAS, e nos tratamentos realizados houve diminuição expressiva, principalmente nos tratamentos T4 e T6. O fato de somente a lavagem com o dobro do volume de poros provocar queda dos valores dos parâmetros pode ser explicado pelo teor elevado de areia em relação ao de argila, aumentando sua macroporosidade e facilitando a lixiviação dos sais, resultado semelhante ao encontrado por Sá et al. (2013).

A salinização dos solos, principalmente a secundária causada por ação antrópica, pode trazer diferentes danos para os solos, afetando diretamente as culturas, provocando ao longo dos anos a desertificação das áreas. Além da presença de sais, a alta concentração de Na^+ pode provocar estresse salino e diminuir a disponibilidade de água para planta, bem como dispersão de argila (RIBEIRO et al., 2016). Com os tratamentos aplicados, inclusive somente a lavagem, todos os solos saíram da classificação de salino-sódico, com exceção do T3, contendo 100% de Biochar, para salinos, destacando-se os tratamentos T4 e T6, cujos solos obtiveram a classificação de normais, saindo da zona de salinidade, de acordo com Richards (1954). Isto indica que o biochar apresenta maior eficiência associado ao gesso, como encontraram El Hasini et al. (2019).

5 CONCLUSÕES

A aplicação de gesso e biochar, seguida da lavagem do solo, promoveram diminuição em parâmetros do complexo sortivo ligados à salinidade do solo salino sódico, tais como CE, teor de Na e PST.

A aplicação de gesso e biochar, seguida da lavagem do solo, promoveram diminuição da CEes, dos teores da maioria dos cátions e ânions presentes no extrato de saturação do solo e da RAS.

Os tratamentos contendo biochar associado com 25 e 75% da necessidade de gesso promoveram a recuperação mais efetiva da salinidade do solo salino-sódico.

REFERÊNCIAS

ADIAHA, M. S. Stimulating tropical soils with Na^+ Cl^- radicals and reclamation of Na^+ Cl^- salinity using biochar and hydro-leaching technology: A sustainable strategy for management of saline and sodic soils under climate change. **Revista Iberoamericana de Bioeconomía y**

Cambio Climático, v. 8, n. 16, p. 1898–1928, 2022.

BARRETO, J.; HENDERSON SILVA WANDERLEY; RAFAEL COLL DELGADO. Areas susceptible to desertification in Brazil and projected climate change scenarios. **Natural Hazards**, v. 146, p. 1463–1483, 2022.

CAVALCANTE, L. F. et al. Recuperação de solos afetados por sais. Manejo da salinidade na agricultura: Estudo básico e aplicados. 2.ed. Editores: Hans Raj Gheyi, Nildo da Silva Dias, Claudivan Feitosa de Lacerda, Enéas Gomes Filho. Fortaleza, INCTSal, 2016. 504p.

COSTA, M. A. et al. Efeito do biochar sobre condutividade elétrica e ph de solos irrigados com água salina. **Revista EDUCAmazônia - Educação, Sociedade e Meio Ambiente**, v. 23, p. 189-204, 2019.

DRAKE, J. A. et al. Does biochar improve establishment of tree seedlings in saline sodic soils?: Reforestation, biochar and saline sodic soils. **Land Degradation and Development**, v. 27, n. 1, p. 52–59, 2016.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa informação Tecnológica, 2009.

EUROPEAN BIOCHAR FOUNDATION. European biochar certificate: guidelines for a sustainable production of biochar. Disponível em: www.european-biochar.org/en/download. Acesso em: 12 dez. 2013.

FERNANDES, J. D. et al. Alterations in soil salinity with the use of different biochar doses. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 89–98, 2019.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer analysis system to fixed effects split plot type designs. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529, 2019.

GREEN, H. et al. Long-term effects of gypsum on the chemistry of sodic soils. **Soil and Tillage Research**, v. 233, p. 105780, 2023.

HASSANI, A.; AZAPAGIC, A.; SHOKRI, N. Predicting long-term dynamics of soil salinity and sodicity on a global scale. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 117, n. 52, p. 33017–33027, 2020.

HUANG, M. et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil. **Scientia Horticulturae**, v. 250, p. 405–413, 2019.

JUSTO, A. et al. Identification and diagnosis of salt-affected soils in the Baixo-Açu irrigated perimeter, RN, Brazil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 25, n. 7, p. 480–484, 2021.

LEHMANN, J. A handful of carbon. **Nature**, 447, p. 143–144, 2007.

NASCIMENTO, Í. V. do et al. Biochar as a carbonaceous material to enhance soil quality in

drylands ecosystems: A review. **Environmental Research**, v. 233, p. 116489, 2023.

PARKASH, V.; SINGH, S. Potential of Biochar Application to Mitigate Salinity Stress in Eggplant. **HortScience**, v. 55, n. 12, p. 1946–1955, 2020.

PIZARRO, F. **Drenagem agrícola y recuperacion de solos salinos**. Madrid: Editora Agrícola Española, 1978.

RIBEIRO, M. R. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. (org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudo básico e aplicados**. 2 ed. Fortaleza, INCTSal, 2016. p. 9-20.

RICHARDS. **Diagnosis and Improvement of Saline and Alkali Soils**. Handbook 60: USDA: Washington DC, USA, 1954. p. 160.

SÁ, F. V S. et al. Crescimento inicial de arbóreas nativas em solo salino-sódico do nordeste brasileiro tratado com corretivos. **Revista Ceres**, v. 60, n. 3, p. 388–396, 2013.

SAIFULLAH et al. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: Challenges and opportunities. **The Science of the total environment**, v. 625, p. 320–335, 2018.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5 ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, P. D. et al. Saline-sodic soil treated with gypsum, organic sources and leaching for successive cultivation of sunflower and rice. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 891–898, 2019.

SOUSA, Q. F. et al. Crescimento e respostas fisiológicas de espécies arbóreas em solo salinizado tratado com corretivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 2, p. 173–181, 2012.

ÜSTÜN ŞAHİN et al. Use of a stabilized sewage sludge in combination with gypsum to improve saline-sodic soil properties leached by recycled wastewater under freeze-thaw conditions. **Journal of Environmental Management**, v. 274, p. 111171, 2020.

VIATKIN, M., N. **Mapeo de suelos afectados por salinidad - Manual técnico**. [s.l.] Food & Agriculture Org., 2021.

WANG, S. et al. Application of biochar and organic fertilizer to saline-alkali soil in the Yellow River Delta: Effects on soil water, salinity, nutrients, and maize yield. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 4, p. 1679–1692, 2022.

XU, X. et al. Mitigating soil salinity stress with titanium gypsum and biochar composite materials: Improvement effects and mechanism. **Chemosphere**, v. 321, p. 138127, 2023.

ZHANG, C. et al. Superabsorbent polymer used for saline-alkali soil water retention. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 145, p. 104830, 2023

CAPÍTULO II - CRESCIMENTO INICIAL, TROCAS GASOSAS FOLIARES E HOMEOSTASE IÔNICA DO MILHO CULTIVADO EM SOLO SALINO-SÓDICO CORRIGIDO COM BIOCHAR E GESSO

RESUMO

A salinização e a sodificação do solo impõem grandes desafios à produção agrícola, especialmente em regiões áridas e semiáridas. O milho é uma das culturas de relevante importância econômica e social que têm seu crescimento e desenvolvimento afetados pelo excesso de sais no solo. O objetivo desse estudo foi avaliar qual tipo de condicionador e qual combinação de condicionadores de recuperação de solo proporcionam melhorias no crescimento inicial, na fisiologia e na homeostase iônica do milho cultivado em solo salino-sódico corrigido com biochar de eucalipto e gesso. O experimento foi conduzido em casa de vegetação com cultivo de milho híbrido cultivar BM3066PRO2 em vasos contendo solo salino-sódico corrigido com técnicas de lixiviação de sais e corretivos, em delineamento inteiramente casualizado, sendo sete tratamentos e seis repetições, totalizando unidades experimentais compostas por 42 vasos, cada uma com 5,2 dm³ de solo. Os tratamentos foram: T1 - Solo sem corretivos, T2 - 100% da necessidade de gesso (NG), T3 - 100% do Biochar, T4 - Biochar + 25% da NG, T5 - Biochar + 50% da NG, T6 - Biochar + 75% da NG, e T7 - Biochar + 100% da NG. Os tratamentos que utilizaram o biochar e o gesso beneficiaram o aumento da área foliar do milho, com valor superior no tratamento com biochar associado a 100% da necessidade de gesso. Os maiores valores de massa fresca das folhas, massa seca das folhas e massa seca total foram constatados no milho cultivado em solo normal, que utilizou na correção do solo biochar de eucalipto na dose de 14.230,50 kg ha⁻¹ e gesso na dose de 10.672,87 kg ha⁻¹. As trocas gasosas foliares do milho não foram influenciadas pelos tratamentos estudados. O acúmulo de sais na parte aérea do milho foi maior no tratamento em que o solo não recebeu condicionadores; por outro lado, as menores concentrações ocorreram nos tratamentos com biochar e gesso a 75 e 100% da necessidade de gesso.

Palavras-chave: Milho (*Zea mays* L.), salinidade, sodicidade, condicionadores de solo.

CHAPTER II - INITIAL GROWTH, LEAF GAS EXCHANGE AND ION HOMEOSTASIS OF MAIZE GROWN IN SALINE-SODIC SOIL AMENDED WITH BIOCHAR AND GYPSUM

ABSTRACT

Soil salinization and sodification pose major challenges to agricultural production, especially in the arid and semi-arid regions. Maize is one of the crops of significant economic and social importance which has its growth and development affected by excess of salts in the soil. The aim of this study was to assess which type of conditioner and which combination of soil recovery conditioners improve the initial growth, physiology and ion homeostasis of maize grown in saline-sodic soil corrected with eucalyptus biochar and gypsum. The experiment was conducted in a greenhouse with maize grown in pots containing saline-sodic soil corrected using salt leaching techniques and correctives. The treatments carried out to correct the soil and subsequently grow hybrid maize, cultivar BM3066PRO2, were distributed in a completely randomized design, with seven treatments and six replications, making up a total of 42 experimental units, each with 5.2 dm³ of soil. The treatments were: T1 - Soil without correctives, T2 - 100% of the gypsum requirement (GR), T3 - 100% of biochar, T4 - biochar + 25% of GR, T5 - biochar + 50% of GR, T6 - biochar + 75% of GR, and T7 - biochar + 100% of GR. The treatments using biochar and gypsum benefited the increase in leaf area of the maize, with a higher value in the treatment with biochar associated with 100% of the gypsum requirement. The highest values for fresh leaf mass, dry leaf mass and total dry mass were observed in maize grown in non-saline soil, which used eucalyptus biochar at the dose of 14,230.50 kg ha⁻¹ and gypsum at dose of 10,672.87 kg ha⁻¹. Maize leaf gas exchange was not influenced by the treatments studied. The accumulation of salts in the shoot of maize was highest in the treatment in which the soil received no conditioners; on the other hand, the lowest concentrations occurred in the treatments with biochar and gypsum at 75 and 100% of the gypsum requirement.

Keywords: Maize (*Zea mays* L.), salinity, sodicity, soil conditioners.

1 INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma cultura com grande importância econômica em nível mundial, pois pode ser utilizado como alimento para seres humanos, ração animal e matéria prima para subprodutos como biocombustível, entretanto seu crescimento ou produção podem ser afetados salinização dos solos (WOOLFOLK et al., 2023). O milho é uma variedade de gramínea da família Poaceae (YOUSAF et al., 2022). É uma das espécies de cereais mais cultivadas em todo o mundo. No Brasil, é cultivado em grande escala devido à sua grande importância econômica como alimento e para a utilização na indústria de alta tecnologia (SOUZA et al., 2020).

As plantas de milho são classificadas como sensíveis à salinidade na fase inicial do crescimento e durante os estágios posteriores tornam-se mais resistentes (MAAS et al., 1983). O milho doce é sensível ao estresse salino durante no período de germinação e plântula e torna-se mais tolerante após a fase de maturidade fisiológica (HUANG et al., 2019). O milho é considerado moderadamente sensível ao excesso de sais e possui salinidade limiar com diminuição do potencial produtivo a partir de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$ no extrato de saturação do solo e $1,1 \text{ dS m}^{-1}$ na água de irrigação (AYERS & WESTCOT, 1999).

A produção agrícola na região semiárida do Brasil é limitada pelo déficit hídrico provocado pelas elevadas taxas de evapotranspiração e irregular pluviosidade, sendo necessário o uso da irrigação para suprir a demanda hídrica das culturas (SOUTO et al., 2023). Porém, as fontes de água superficiais e subterrâneas presentes na região apresentam elevada concentrações de sais, afetando a disponibilidade de água para a planta devido à influência no potencial osmótico e no equilíbrio iônico (BEZERRA et al., 2018).

O excesso de sais provoca diminuição do potencial osmótico do solo e desequilíbrio iônico na planta, que afetam a disponibilidade de elementos essenciais e água, restringindo o crescimento e causando danos oxidativos devido à produção em excesso de espécies reativas de oxigênio (SOUZA et al., 2023). Com as novas técnicas de irrigação, houve um acréscimo na produção das culturas, os métodos utilizados podem a salinização dos solos agrícolas. Em climas áridos e semiáridos, a irrigação é aplicada de forma a alcançar somente a zona radicular e não lixiviam os sais para fora dela (LITALIEN; ZEEB, 2020).

A salinização e a sodificação do solo estão entre os mais importantes problemas enfrentados pela produção agrícola, segurança alimentar e sustentabilidade nos climas áridos e semiáridos do planeta (FAO, 2022). Três importantes parâmetros classificam os solos

salinizados: a concentração de sais solúveis do extrato de saturação da pasta medida pela condutividade elétrica (CEes), a porcentagem de sódio trocável (PST) e o potencial hidrogeniônico do extrato de saturação da pasta (pHes). Existem três tipos de solos afetados por sais: solos salinos, nos quais a condutividade elétrica do extrato de saturação da pasta (CEes) $> 4 \text{ dS m}^{-1}$, $\text{pH} < 8,5$ e a porcentagem de sódio trocável (PST) < 15 . Solos salino-sódicos são aqueles com elevada CEes $> 4 \text{ dS m}^{-1}$, $\text{pH} < 8,5$ e PST > 15 , ao passo que solos sódicos são aqueles com CEes $< 4 \text{ dS m}^{-1}$, $\text{pH} > 8,5$ e PST > 15 (RICHARDS, 1954).

No caso de solos afetados por sais, faz-se necessária a utilização de estratégias de recuperação, visando à remoção do excesso de sais solúveis e de sódio trocável da camada de solo correspondente à profundidade do sistema radicular das culturas que são exploradas na área. Algumas técnicas de correção são utilizadas para melhorar as condições físicas e químicas de solos salinizados. A recuperação dessas áreas pode ser realizada pela correção química, por meio da aplicação de condicionadores de solo como gesso e matéria orgânica, bem como por lâminas de irrigação para lixiviar o excesso de sais (JESUS; BORGES, 2020).

Recentemente, o biochar foi incluído no grupo de condicionadores orgânicos alternativos que estão sendo utilizados como estratégia para recuperação de solos afetados por sais (SADEGH-ZADEH et al., 2018). Diante dessa alternativa inovadora, estudos avaliam o efeito da aplicação de biomassa carbonizada nas propriedades de sorção e melhoria nas condições hídricas para diminuir o estresse salino em plantas cultivadas em ambientes salinos (COSTA et al., 2019; FEIX, 2020).

As respostas fisiológicas e os mecanismos de resistência do milho ao estresse salino em cultivo com biochar como condicionador de solo foram estudadas (KIM et al., 2016; ALI et al., 2017; HUANG et al., 2019; HELAOUI et al., 2023). Kim et al. (2016) constataram que a adição de 5% de biochar ao solo resultou no maior rendimento de massa seca de milho, e o potássio do biochar reduziu a absorção de sódio pelo milho, atenuando o estresse salino e diminuindo a atividade de enzimas antioxidantes. Huang et al. (2019) relataram que a aplicação de biochar melhorou o desempenho fotossintético do milho doce e aliviou os danos oxidativos e o estresse salino, resultando em aumento da produção e valor comercial. O biochar pode aumentar a biomassa e a clorofila b do milho em condições de salinidade, o que o torna uma estratégia útil para reduzir os efeitos nocivos da salinidade nas plantas (HELAOUI et al., 2023).

A hipótese dessa pesquisa é de que a correção de solos salino-sódicos por meio da combinação de condicionadores, como o biochar de eucalipto e o gesso, pode resultar em melhor crescimento e desenvolvimento do milho. Portanto, o objetivo desse trabalho foi

avaliar qual tipo de condicionador e qual combinação de condicionadores de recuperação de solo proporcionam melhorias no crescimento inicial, nas trocas gasosas foliares e na homeostase iônica do milho cultivado em solo salino-sódico corrigido com biochar comercial e gesso.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A condução do experimento deu-se nos meses de junho e julho de 2023 em casa de vegetação, no Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, localizada na região semiárida do Brasil, coordenadas geográficas 5°11'16" S, 37°20'38" W e 18 m de altitude. Durante o período de experimentação, no interior da casa de vegetação, registraram-se temperaturas médias máximas e mínimas de 39,4 e 22,0 °C e umidade relativa média de 62,3%, respectivamente.

O solo utilizado no experimento foi obtido no Distrito Irrigado do Baixo-açu (DIBA), localizado nos municípios de Alto do Rodrigues e Afonso Bezerra, no Rio Grande do Norte, Brasil. A coleta foi realizada na camada de 0-20 cm, nas coordenadas geográficas 5°23'28" S, 36°48'29" W e altitude de 37 m. O solo utilizado foi classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Carbonático solódico (SANTOS, 2018). Inicialmente, o solo foi classificado como salino-sódico, de acordo com Richards (1954) (Tabelas 1 e 2), em seguida o solo foi submetido a tratamentos de maneira a corrigir a salinidade e sodicidade, bem como lixiviação dos sais. Posteriormente, o solo tratado foi utilizado nos vasos para cultivar o milho.

Tabela 1. Análise físico-química do solo utilizado no experimento.

pH	M.O. ---(g kg ⁻¹)---	N mg dm ⁻³	P mg dm ⁻³	K ⁺ (mm)	Na ⁺ (mm m ⁻¹)	Ca ²⁺ (%)	Mg ²⁺ (%)	Al ³⁺ (%)	H+Al (g kg ⁻¹)	CTC (g kg ⁻¹)	V (%)	PST (%)
8,10	5,79	0,69	0,25	0,31	6,12	19,01	2,07	0,0	0,0	27,51	100	22
CE	Ds	Umidade	Água disponível	Porosidade	Areia	Silte	Argila					
dS m ⁻¹	kg dm ⁻³	0,03 Mpa	1,5 Mpa	(mm)	(mm m ⁻¹)	(%)						
6,41	1,21	0,20	0,11	19,73	98,66	53,46		0,49		0,29		0,22

P, K⁺ e Na⁺: Extrator Mehlich-1; H⁺+Al³⁺: Extrator acetato de Ca²⁺ 0,5mol L⁻¹ pH 7; Al³⁺, Ca²⁺, Mg²⁺: Extrator KCl 1mol L⁻¹; M.O.: matéria orgânica; CTC: capacidade de troca de cátions; V: saturação por bases; PST: porcentagem de sódio trocável.

Tabela 2. Análise química da água de abastecimento e do extrato de saturação da pasta do solo do experimento.

Tipo	pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CL ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ³⁻	RAS	Cátions	ânions
	H ₂ O	dS m ⁻¹				mmolc L ⁻¹				(mmolc L ⁻¹) ^{0,5}	mmolc L ⁻¹	mmolc L ⁻¹
1	8,03	0,47	0,18	3,37	0,80	1,10	4,00	0,00	5,50	3,50	5,45	9,50

2	7,40	30,12	1,61	121,50	111,00	61,50	345,00	0,00	7,50	13,10	295,61	356,38
---	------	-------	------	--------	--------	-------	--------	------	------	-------	--------	--------

1: Água de abastecimento; 2: Extrato de saturação da pasta; CE: condutividade elétrica; RAS: Razão de adsorção de sódio.

O delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado, sendo sete tratamentos e seis repetições, totalizando 42 vasos, compostos por 5,2 dm³ de solo. Os tratamentos foram definidos utilizando-se a dose prática de necessidade de gesso (NG) calculada a fim de reduzir a Porcentagem de Sódio Trocável - PST (final) do solo para 5%; a quantidade de biochar foi equivalente à quantidade da NG calculada (T1 - Solo sem corretivos, T2 - 100% da NG, T3 - 100% do biochar, T4 - biochar + 25% da NG, T5 - biochar + 50% da NG, T6 - biochar + 75% da NG, e T7 - biochar + 100% da NG).

O cálculo da necessidade de gesso (NG) foi realizado de acordo com Pizarro (1978). Os corretivos utilizados foram o sulfato de cálcio (Gesso) e o biochar feito de eucalipto, os quais foram adquiridos comercialmente. A necessidade de gesso foi calculada, conforme equação proposta, que leva em consideração a dose teórica de gesso para recuperação do solo, Equação 1.

$$Dt = \frac{(PST_i - PST_f) \times CTC \times PEq \times h \times Ds}{100} \quad (1)$$

Em que:

Dt - Dose teórica do corretivo (kg ha⁻¹);

(PST_i - PST_f) - Diferença entre a porcentagem de sódio trocável inicial e final;

CTC - Capacidade de troca catiônica (cmolc dm⁻³);

PEq - Peso equivalente do elemento ou composto a ser usado como corretivo (Gesso, 86);

h - Profundidade do solo a ser recuperado (cm);

Ds - Densidade do solo (kg dm⁻³).

A dose dos corretivos foi calculada considerando-se utilização de todo o cálcio adicionado e o corretivo com pureza de 100%. Desta forma, a dose prática do corretivo pôde ser estimada conforme a Equação 2, onde o coeficiente de eficiência é 1,46 para corretivos químicos utilizados pouco solúveis (gesso) (PIZARRO, 1978).

$$D_p = D_t \times C \quad (2)$$

Em que:

D_p - Dose prática (kg ha^{-1});

D_t - Dose teórica do corretivo (kg ha^{-1});

C - Coeficiente de eficiência do corretivo a ser utilizado, 1,46.

Posteriormente ao cálculo da dose prática da NG, obteve-se o valor de 100% da NG, 14.230,50 kg ha^{-1} , quantidade de gesso a ser utilizado na correção do solo com as demais proporções em função desse valor. No intuito de comparar e avaliar o efeito do biochar de eucalipto no processo de recuperação do solo, utilizou-se para a dose do biochar o valor semelhante a 100% da NG, ou seja, 14.230,50 kg ha^{-1} de biochar, sendo 42,7 g/vaso as doses máximas de corretivos.

Depois de adicionar os corretivos, manteve-se o solo por 45 dias a 70% da umidade da capacidade de campo. Posteriormente, o solo foi lavado com água de abastecimento, com quantidade equivalente ao dobro do volume de poros para a lixiviação do excesso de sais (SÁ et al., 2013). Logo após esse processo, procedeu-se às análises do complexo sortivo e do extrato de saturação da pasta (RICHARDS, 1954).

Na Tabela 3, estão descritos os parâmetros do extrato de saturação do solo e a porcentagem de sódio trocável com a respectiva classificação quanto à salinidade e sodicidade, de acordo com Richards (1954), de cada tratamento utilizado para o cultivo do milho.

Tabela 3. Parâmetros de salinidade e sodicidade e classificação do solo de cada tratamento após a lavagem.

Tratamentos	pHes	CEes	PST	RAS	Classificação
	H ₂ O	dS m ⁻¹	(%)	(mmolc L ⁻¹) ^{0,5}	
T1	7,69	4,47	1,26	6,65	Salino
T2	7,72	5,47	0,69	4,88	Salino
T3	7,90	4,93	16,06	6,37	Salino-sódico
T4	7,88	3,96	14,40	4,33	Normal
T5	7,80	4,79	10,77	4,67	Salino
T6	7,94	3,94	8,36	3,38	Normal
T7	7,93	5,52	10,38	4,71	Salino

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7); pHes: potencial hidrogeniônico do extrato de saturação; CEes: condutividade elétrica do extrato de saturação; PST: porcentagem de sódio trocável; RAS: razão de adsorção de sódio.

A semeadura com o milho híbrido, cultivar BM3066PRO2, foi realizada em 19 de junho de 2023, e as avaliações foram efetuadas em 27 de julho de 2023, totalizando 38 dias de cultivo. Foram semeadas nove sementes por vaso a uma profundidade de 1,0 cm, sendo que a emergência das plântulas se estabilizou no quinto dia após a semeadura (DAS). O primeiro desbaste foi realizado aos 7 DAS, deixando apenas três plantas por vaso. O segundo desbaste ocorreu aos 15 DAS, retirando-se mais uma planta por vaso, e o terceiro desbaste, o qual deixou apenas uma planta por vaso, foi realizado aos 18 DAS.

O manejo da cultura, as práticas fitossanitárias e a monitorização regular foram feitas para evitar o crescimento de ervas daninhas, infestação de pragas e controle de doenças durante o experimento.

As plantas foram irrigadas diariamente com água de abastecimento, de forma manual, para repor o volume da capacidade de campo do solo. O peso de máxima retenção de água foi previamente estabelecido, antes da semeadura, com os vasos a 100% da capacidade de campo. O volume de referência foi determinado baseado na evapotranspiração média da cultura obtida pela pesagem dos vasos em cada tratamento, e os demais volumes de irrigação foram calculados em relação àquele desde o primeiro dia após a semeadura.

O volume de água aplicado (V_a) por vaso foi obtido pela diferença entre o peso médio dos vasos em condições de máxima retenção de água (P_{mr}) e o peso médio dos vasos na condição atual (P_a) dividido pelo número de vasos (n) equação 3.

$$V_a = \frac{P_{mr} - P_a}{n} \quad (3)$$

Em que:

V_a - volume aplicado (L);

P_{mr} - retenção máxima de água (kg);

P_a - peso atual (kg); e,

n - número de vasos.

A fertilização com macronutrientes foi dividida em três aplicações. A primeira aplicação foi feita em fundação com 50% da dose total. As demais aplicações foram divididas em duas vezes com 25% da dose total, realizadas em conjunto com a irrigação. A segunda adubação com macronutrientes foi realizada aos 15 DAS, a terceira foi realizada aos 25 DAS. No total, foram aplicados 50 mg de N, 127 mg de P_2O_5 , 75 mg de K_2O , 29 mg de Ca, 18 mg

de Mg e 30 mg SO_4^- por dm^{-3} de solo. As fontes de nutrientes foram: Fosfato Monoamônico (MAP), nitrato de cálcio, sulfato de Magnésio, sulfato de potássio e cloreto de potássio. Quanto à adubação com micronutrientes, foi realizada uma aplicação de produto comercial, de acordo com a recomendação do fabricante com 3 ml L^{-1} de calda.

Realizaram-se duas adubações extras devido a sintomas de deficiência de fósforo no início do crescimento do milho. Foram aplicados 50% da dose total de MAP ($104,15 \text{ mg dm}^{-3}$) e foi realizada uma adubação foliar com fosfato de potássio com $0,044 \text{ g L}^{-1}$ de calda, aos 18 DAS.

As seguintes variáveis de crescimento foram avaliadas aos 38 DAS: altura de planta (AP), diâmetro de colmo (DC), número de folhas (NF), massa fresca das folhas (MFF), massa fresca do colmo (MFC), massa fresca total (MFT), massa seca das folhas (MSF), massa seca do colmo (MSC), massa seca total (MST) e área foliar (AF), determinada pelo somatório do cálculo da área foliar de cada folha em cm^2 , estimada usando a equação proposta por Elings (2000) (Equação 4).

$$AF = C \times L \times 0,75 \quad (4)$$

Em que:

AF - área foliar (cm^2);

C - comprimento da folha (cm); e

L - largura máxima da folha (cm).

Após as avaliações das variáveis de crescimento nas plantas, a parte aérea foi coletada e dividida em folhas e colmos para determinação da massa fresca das folhas (MFF) e massa fresca do colmo (MFC) em balança analítica ($0,0001 \text{ g}$). Em seguida, a matéria fresca foi acondicionada em sacos de papel do tipo Kraft, armazenada em estufa a 65°C com circulação de ar forçada, até o peso ficar constante, obtendo-se a massa seca das folhas (MSF) e a massa seca do colmo (MSC) em gramas por planta.

Realizou-se a determinação do teor de água nos tecidos (TA) baseando-se nos dados da parte aérea de massa fresca total (MFT) e da massa seca total (MST) conforme a equação 5, com resultados expressos em porcentagem.

$$TA = \frac{MFT - MST}{MFT} \times 100 \quad (5)$$

Em que:

TA – teor de água nos tecidos (%);

MFT – massa fresca total (g); e

MST – massa seca total (g).

Determinaram-se as trocas gasosas com o auxílio de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (“GFS-3000” – WALZ Ltd.), operando com controle de temperatura a 25 °C, irradiação de 1200 μmol de fótons $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e vazão de ar de 400 mL min^{-1} no nível atmosférico de CO_2 , para obter as seguintes variáveis: taxa de assimilação de CO_2 (A_N) em $\mu\text{mol (CO}_2\text{) m}^{-2} \text{s}^{-1}$, condutância estomática (gs) em $\text{mol (H}_2\text{O) m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e transpiração (E) em $\text{mmol (H}_2\text{O) m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (SÁ et al., 2019).

Nas mesmas folhas em que foram avaliadas as trocas gasosas foliares, com o auxílio de um clorofiLOG (“CFL1030” – FALKER Ltd.) foram determinados os teores dos pigmentos fotossintetizantes: clorofila a (Clo a), clorofila b (Clo b) e clorofila total (Clo total).

A matéria seca da parte aérea, folhas e colmos foi triturada em moinho de aço do tipo Willey e armazenada em sacos de papel identificados, os quais foram levados ao laboratório. Em seguida, o material passou por digestão em ácido nítrico (HNO_3 65% p.a.) em forno de micro-ondas para a obtenção do extrato. Esse extrato foi utilizado para a leitura das concentrações foliares e dos colmos totais de sódio (Na^+) e potássio (K^+) com as leituras realizadas em espectrofotômetro de chama, cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) com as leituras determinadas em espectrofotômetro de absorção atômica (EMBRAPA, 2009). Com esses dados foram estimadas a quantidade de gramas por planta e as relações sódio/potássio (Na^+/K^+), sódio/cálcio ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$) e sódio/magnésio ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$) nas folhas e nos colmos do milho aos 38 dias após a semeadura.

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F aos níveis de 1% ($p < 0,01$), 5% ($p < 0,05$) e 10% ($p < 0,10$) de probabilidade e teste LSD ($p < 0,05$) para comparação de médias, com auxílio do programa SISVAR (FERREIRA, 2019). Quando necessário, os dados foram transformados ($y = \log(x)$ ou $y = (x + 1)^{0,5}$) para melhorar a normalidade.

3 RESULTADOS

Houve efeito significativo dos tratamentos com biochar e gesso para o milho na massa fresca das folhas ($p < 0,05$), massa fresca total ($p < 0,1$), massa seca das folhas ($p < 0,01$), massa seca dos colmos ($p < 0,1$), massa seca total ($p < 0,05$) e área foliar ($p < 0,05$), entretanto para as variáveis altura da planta, diâmetro do colmo, número de folhas e massa fresca do colmo não houve efeito significativo (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo do teste F e teste de médias para altura de planta (AP, cm), diâmetro do colmo (DC, mm), número de folhas (NF), massa fresca das folhas (MFF, g), massa fresca do colmo (MFC, g), massa fresca total (MFT, g), massa seca das folhas (MSF, g), massa seca do colmo (MSC, g), massa seca total (MST, g) e área foliar (AF, cm²) do milho aos 38 dias após a semeadura.

Valores médios e Teste F ($Pr > F_c$)										
	AP	DC	NF	MFF	MFC	MFT	MSF	MSC	MST	AF*
Tratamentos	0,5542	0,4804	0,7669	0,0136	0,1966	0,0947	0,0059	0,0767	0,0114	0,0348
CV (%)	9,73	11,19	9,83	14,03	16,30	14,56	15,37	20,67	15,51	11,80
Teste de médias LSD ($p < 0,05$)										
T1	38,43 a	13,16 a	10,00 a	23,55 c	33,25 a	56,80 b	3,45 c	2,90 bc	6,37 c	765,02 b
T2	38,77 a	13,36 a	9,50 a	23,30 bc	32,68 a	58,98 b	3,98 bc	3,11 abc	7,07 bc	843,11 b
T3	38,16 a	12,68 a	10,33 a	26,15 bc	33,73 a	59,87 b	3,87 bc	2,87 c	6,73 bc	876,70 b
T4	40,33 a	12,75 a	10,16 a	29,48 ab	36,38 a	65,83 ab	4,48 ab	3,07 bc	7,55 abc	974,06 ab
T5	40,90 a	13,32 a	10,20 a	29,86 ab	36,38 a	66,30 ab	4,60 ab	3,48 abc	8,03 ab	971,73 ab
T6	41,28 a	13,22 a	10,33 a	31,13 a	36,55 a	67,67 ab	4,90 a	3,68 ab	8,55 a	1052,53 ab
T7	41,63 a	14,48 a	10,33 a	29,62 ab	41,83 a	71,43 a	4,63 ab	3,90 a	8,53 a	1265,41 a

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem pelo teste LSD ($p < 0,05$). * Dados transformados para Logaritmo de base 10.

O maior acúmulo de massa fresca das folhas do milho ocorreu no solo que recebeu o tratamento com biochar e 75% da necessidade de gesso (T6) (31,13 g), e o menor acúmulo foi observado no solo do tratamento T2 (23,305 g), no qual foi utilizado apenas gesso, um aumento do T6 em relação ao T2 equivalente a 33,61% (Tabela 4). A massa fresca total apresentou maior valor no solo do tratamento T7 (71,43 g), o qual utilizou biochar e 100% da necessidade de gesso. Em contrapartida, os menores acúmulos de massa fresca total ocorreram no T1 (56,80 g), T2 (58,98 g) e T3 (59,87 g), tratamentos em que o biochar não foi associado ao gesso (Tabela 4).

Em relação à massa seca das folhas, o maior valor foi observado no tratamento com biochar e 75% da necessidade de gesso T6 (4,90 g) com o menor valor de massa seca das folhas obtido no tratamento T1 (3,45 g), representando aumento de 42,02% de massa seca das folhas do tratamento T6 em relação ao T1 (Tabela 4). A massa seca dos colmos foi superior no tratamento T7 (3,90 g), com acréscimo equivalente a 34,02% em relação ao obtido no T1

(2,90 g) (Tabela 4). A massa seca total do milho apresentou os maiores valores nos tratamentos T6 e T7, com 8,55 e 8,53 g por planta, respectivamente (Tabela 4).

A área foliar do milho foi beneficiada pelos tratamentos que utilizaram biochar e gesso, apresentando maior valor no tratamento T7 com 1265,41 cm², sendo 65,41% superior ao T1 (7654,02 cm²) (Tabela 4).

Quanto às trocas gasosas foliares, teores de clorofila e teor de água nos tecidos, houve efeito significativo apenas para a variável Clo total ($p < 0.01$), com destaque para os tratamentos T7 e T6, os quais obtiveram os maiores valores (29,94 e 29,59, respectivamente). O menor valor foi constatado no tratamento T2 (25,53), o qual utilizou apenas gesso com 100% da NG para a correção do solo (Tabela 5). O teor de água nos tecidos apresentou maior valor médio no tratamento T1 (88,81%) e menor valor no tratamento T6 (87,31%), representando diminuição de 1,69% do tratamento T1 em relação ao T6 (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo do teste F e teste de médias para taxa de assimilação de CO₂ (A_N, μmol (CO₂) m⁻² s⁻¹), condutância estomática (gs, mol (H₂O) m⁻² s⁻¹), transpiração (E, mmol (H₂O) m⁻² s⁻¹), clorofila a (Clo a), clorofila b (Clo b), clorofila total (Clo total) e teor de água nos tecidos (TA, %) do milho aos 38 dias após a semeadura.

Valores médios e Teste F (Pr>Fc)							
	A _N	gs	E	Clo a	Clo b	Clo total	TA
Tratamentos	0,8396	0,5496	0,9327	0,6149	0,7781	0,0038	0,33170
CV (%)	14,25	12,43	19,62	6,36	12,79	7,84	1,35
Teste de médias LSD (p < 0,05)							
T1	26,98 a	221,33 a	4,08 a	26,91 a	7,00 a	26,67 b	88,81 a
T2	27,06 a	196,62 a	3,70 a	26,65 a	6,69 a	25,53 b	88,09 a
T3	25,01 a	206,23 a	3,89 a	26,40 a	6,54 a	26,07 b	88,74 a
T4	25,40 a	207,84 a	3,96 a	25,32 a	6,32 a	26,72 b	88,51 a
T5	26,27 a	220,35 a	4,02 a	25,78 a	6,64 a	26,48 b	87,93 a
T6	25,65 a	223,18 a	4,26 a	26,90 a	7,02 a	29,59 a	87,31 a
T7	24,35 a	217,63 a	4,08 a	26,33 a	6,54 a	29,94 a	87,88 a

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem pelo teste LSD ($p < 0,05$).

Nas folhas, houve efeito significativo dos tratamentos com biochar e gesso para o acúmulo de sódio ($p < 0,001$), cálcio ($p < 0,001$), magnésio ($p < 0,001$) e para as relações sódio/potássio ($p < 0,001$) e sódio/cálcio ($p < 0,05$) e não significativo para potássio e sódio/magnésio (Tabela 6). Nos colmos, houve efeito significativo dos tratamentos no acúmulo de sódio ($p < 0,01$), cálcio ($p < 0,001$), magnésio ($p < 0,001$) e para as relações sódio/potássio ($p < 0,001$), sódio/cálcio ($p < 0,001$) e sódio/magnésio ($p < 0,05$) e não significativo para potássio (Tabela 6).

O acúmulo de sódio nas folhas de milho foi maior no T3 (61,47 mg por planta). No entanto, o menor acúmulo de sódio (17,80 mg por planta) foi constatado no T6, solo tratado com biochar e 75% da necessidade de gesso, representando diminuição de 60,85% no acúmulo de sódio em relação ao tratamento T1 (45,47 mg por planta) (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo do teste F e teste de médias para o acúmulo de sódio (Na^+ , mg por planta), potássio (K^+ , mg por planta), cálcio (Ca^{2+} , mg por planta) e magnésio (Mg^{2+} , mg por planta), e as relações sódio/potássio (Na^+/K^+), sódio/cálcio ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$) e sódio/magnésio ($\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$) nas folhas e nos colmos do milho aos 38 dias após a semeadura.

Folhas							
Valores médios e Teste F ($\text{Pr} > \text{Fc}$)							
	Na^{+*}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+/\text{K}^{+*}$	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+*}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+*}$
Tratamentos	0,0009	0,4218	0,0000	0,0000	0,0009	0,0236	0,1310
CV (%)	23,45	13,95	26,64	17,87	1,08	6,01	7,70
Teste de médias LSD ($p < 0,05$)							
Tratamentos							
T1	45,47 ab	684,11 a	123,83 a	63,43 a	0,06 ab	0,36 abc	0,71 a
T2	26,80 bc	580,40 a	116,52 a	52,26 b	0,04 bc	0,22 bc	0,50 a
T3	61,47 a	673,76 a	122,78 a	64,07 a	0,09 a	0,50 a	0,86 a
T4	27,47 bc	656,50 a	121,70 a	54,80 ab	0,04 bc	0,22 bc	0,51 a
T5	21,60 bc	650,98 a	144,86 a	38,92 c	0,03 c	0,19 c	0,59 a
T6	17,80 c	639,24 a	60,90 b	31,11 cd	0,02 c	0,30 abc	0,58 a
T7	21,80 bc	694,47 a	51,51 b	27,69 d	0,03 c	0,42 ab	0,81 a
Colmos							
Valores médios e Teste F ($\text{Pr} > \text{Fc}$)							
	Na^{+*}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	$\text{Na}^+/\text{K}^{+*}$	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+*}$	$\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+*}$
Tratamentos	0,0019	0,4190	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000	0,0126
CV (%)	15,05	10,02	6,90	16,79	1,15	6,78	10,34
Teste de médias LSD ($p < 0,05$)							
Tratamentos							
T1	125,46 a	1005,09 a	118,78 b	85,30 a	0,12 a	1,06 b	1,50 abc
T2	79,30 bc	1098,28 a	117,28 b	76,93 ab	0,07 bc	0,66 c	1,11 c
T3	85,13 b	1025,80 a	110,76 b	68,69 b	0,08 b	0,76 bc	1,27 bc
T4	81,13 b	1101,73 a	226,95 a	78,92 ab	0,07 bc	0,35 d	1,06 c
T5	73,60 bc	1110,71 a	83,10 c	41,24 c	0,07 bc	0,89 bc	1,86 ab
T6	51,46 c	1122,44 a	51,48 d	38,47 c	0,04 c	1,01 b	1,39 bc
T7	76,13 bc	1074,12 a	52,46 d	36,98 c	0,07 bc	1,44 a	2,07 a

SSC - Solo Sem Corretivos (T1); 100% NG - 100% da Necessidade de Gesso (T2); 100% do biochar (T3); biochar + 25% da NG (T4); biochar + 50% da NG (T5); biochar + 75% da NG (T6); biochar + 100% da NG (T7). Médias seguidas de letras iguais na coluna não diferem pelo teste LSD ($p < 0,05$). * Dados transformados para Logaritmo de base 10.

O cálcio apresentou acúmulo nas folhas, com maiores valores no T1 ao tratamento T5, variando de 116,52 a 144,86 mg por planta. Por outro lado, o menor acúmulo de cálcio ocorreu nos tratamentos T6 (60,90 mg por planta) e T7 (51,51 mg por planta), respectivamente (Tabela 6). Os menores acúmulos de magnésio nas folhas do milho ocorreram nos tratamentos T6 (31,11 mg por planta) e T7 (27,69 mg por planta) (Tabela 6).

A relação Na^+/K^+ nas folhas apresentou maior valor no T3 (0,09), o qual utilizou apenas biochar. Os menores valores foram observados nos tratamentos que utilizaram biochar e gesso nas proporções de 50, 75 e 100% (T5, T6 e T7), com menor valor no tratamento T5

(0,02), uma diminuição de 77,78% em relação ao T3. A relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ nas folhas do milho apresentou o maior valor no T3 (0,50), no qual foi utilizado apenas biochar na correção do solo, e menor valor no tratamento T5 (0,19), que utilizou biochar e gesso na proporção de 50% da necessidade de gesso (Tabela 6).

O acúmulo de sódio nos colmos do milho foi maior no tratamento T1 (125,46 mg por planta), o qual passou pela lixiviação dos sais, mas não teve uso de corretivos. O menor acúmulo de sódio nos colmos foi constatado no tratamento T6 (51,46 mg por planta), uma diminuição de 58,98% em relação ao T1. O cálcio acumulou nos colmos em maior quantidade no T4 (226,95 mg por planta). Por outro lado, os menores acúmulos de cálcio ocorreram nos tratamentos T6 e T7 (51,48 e 52,46 mg por planta), uma diminuição de 77,32 e 76,88%, respectivamente, em comparação ao T4 (Tabela 6). O acúmulo de magnésio nos colmos foi maior no T1 (85,30 mg por planta). Os menores valores foram obtidos nos tratamentos T5, T6 e T7, representando uma diminuição média de 54,64% em relação ao tratamento T1 (Tabela 6).

A relação sódio/potássio nos colmos apresentou o maior valor no tratamento T1 (0,12). O menor valor foi obtido no tratamento T6 (0,04), não diferindo estatisticamente dos tratamentos T2, T4, T5 e T7. A relação sódio/cálcio foi maior no tratamento T7 (1,44) e menor do tratamento T4 (0,35), representando aumento de 311,43% do T7 em comparação com o T4. A relação sódio/magnésio apresentou resultados semelhantes à relação sódio/cálcio, com o tratamento T7 obtendo o maior valor (2,07) e o tratamento T4 com o menor (1,06), representando aumento de 95,28% do tratamento com biochar e 100% da necessidade de gesso (T7) em comparação com o tratamento com biochar e gesso a 25% da necessidade de gesso (T4) (Tabela 6).

4 DISCUSSÃO

O estresse salino causa prejuízos em mais de 950 milhões de hectares de terras agrícolas em todo o mundo, dos quais 250 milhões praticam a irrigação. Isso representa em torno de 33% da área total de terras agrícolas no mundo (MEHRA; BENNETT, 2022; FU; YANG, 2023). A presente pesquisa com o cultivo de milho em solo salino-sódico corrigido com biochar de eucalipto e gesso é essencial para revelar respostas da cultura e apontar alternativas de uso de resíduos orgânicos pirolisados para serem utilizados em conjunto com o gesso. Neste trabalho, os resultados apontam como os sais do solo, após os tratamentos de

correção com condicionadores, podem afetar o crescimento, os parâmetros de trocas gasosas foliares e a concentração de íons na parte aérea do milho.

O crescimento e o desenvolvimento das culturas são afetados por elevadas concentrações de sais no solo (TAHA et al., 2020; KTHIRI et al., 2022). Os resultados obtidos apontam para um melhor desempenho do crescimento do milho nos tratamentos em que se utilizou a combinação de biochar e gesso como condicionadores de solo. Estes resultados confirmam a hipótese desse estudo, segundo a qual o biochar associado ao gesso pode melhorar o crescimento do milho após a correção da salinidade e sodicidade do solo.

A fotossíntese e as trocas gasosas foliares do milho são afetadas negativamente em condições sob estresse salino (ZHU et al., 2017). No entanto, nos resultados desse presente estudo os tratamentos não proporcionaram diferença significativa para o milho na fotossíntese e nas trocas gasosas foliares, mesmo com a concentração de íons na parte aérea sendo influenciada significativamente pelo tipo de solo. Além disso, o maior acúmulo de sais na parte aérea também ocorreu nos tratamentos que mais afetaram negativamente o crescimento do milho. Os tratamentos não influenciaram significativamente os teores de pigmentos fotossintetizantes, exceto a clorofila total, a qual foi superior nos tratamentos que combinaram biochar e gesso nas maiores doses da necessidade de gesso. O aumento do teor de clorofila total coincide com as maiores áreas foliares do milho, que, apesar de não afetar as trocas gasosas, proporcionaram os maiores acúmulos de massa seca, indicando que o aumento de área foliar do milho associado à manutenção da taxa fotossintética é importante na identificação de tratamentos eficazes de correção de solos salino-sódicos. A fisiologia das células depende do equilíbrio das concentrações de íons no seu interior. As células têm de regular adequadamente o fluxo de íons de forma a adquirir os necessários e a manter baixas as quantidades de íons prejudiciais (ZHU, 2003). Vários minerais distintos são necessários para as atividades metabólicas vitais nas plantas, contudo o acúmulo pode ser prejudicial e levar à toxicidade (MULET et al., 2020). As maiores áreas foliares dos tratamentos T6 e T7 auxiliaram no efeito de diluições de íons na folha, diminuindo os danos no aparato fotossintético e conservando o teor de clorofila total.

Os resultados indicam que o acúmulo de sódio na parte aérea do milho ocorreu em virtude do teor de sódio no solo dos respectivos tratamentos. Soothar et al. (2021) avaliaram a aplicação de biochar na concentração de nutrientes da parte aérea do milho sob estresse salino, constatando que a concentração de sódio na parte aérea diminuiu em 43,8% pela aplicação de biochar. O biochar possui características específicas como a estrutura dos poros e grande área superficial específica, as quais favorecem a adsorção dos íons e não os liberam

para a solução do solo para serem absorvidos pelas plantas (BLANCO-CANQUI, 2017; JIN et al., 2018). Embora tenha havido maior acúmulo de sais nas folhas do milho em alguns tratamentos em detrimento de outros, esse acúmulo não foi suficiente para prejudicar a fotossíntese, pois não houve diminuição significativa da condutância estomática nem transpiração entre os tratamentos avaliados.

5 CONCLUSÕES

O milho cultivado em solo classificado como normal, que utilizou biochar e 100% da NG (T6), proporcionou os maiores valores de massa fresca das folhas, massa seca das folhas e massa seca total.

Os tratamentos que possuíam biochar e o gesso beneficiaram o aumento da área foliar do milho, com valor superior no tratamento com biochar e 100 % da NG (T7).

As trocas gasosas foliares do milho não foram influenciadas pelos tratamentos estudados. Doses de 75 e 100% de gesso associadas ao biochar resultaram em maiores teores de clorofila total no milho.

O acúmulo de sódio, cálcio e magnésio nas folhas do milho foi maior nos solos salino-sódico e salino, tratamentos T1, T3 e T5. O maior teor de sódio e magnésio nos colmos do milho foi observada no solo sem correção (T1).

Para melhor aplicação, sugere-se uma futura análise econômica do uso dos condicionadores de solo aplicados neste estudo.

REFERÊNCIAS

- ALI, S. et al. Biochar soil amendment on alleviation of drought and salt stress in plants: a critical review. **Environmental science and pollution research international**, v. 24, n. 14, p. 12700–12712, 2017.
- BEZERRA, I. L. et al. Interaction between soil salinity and nitrogen on growth and gaseous exchanges in guava. **Ambiente e Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 13, n. 3, p. 1, 2018.
- ELINGS, A. Estimation of leaf area in tropical maize. **Agronomy journal**, v. 92, n. 3, p. 436–444, 2000.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa informação Tecnológica, 2009.

FEIX, B. L. **Efeito do uso de biochar e zeólitos na dinâmica do fósforo no solo e na produtividade do milho**. Instituto Politécnico de Bragança (Portugal). ProQuest Dissertations Publishing, 2020. 29016913.

FERREIRA, D. F. Sisvar: A computer analysis system to fixed effects split plot type designs: Sisvar. **Revista Brasileira de Biometria**, v. 37, n. 4, p. 529–535, 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Water quality criteria for European freshwater fish**: Report on nickel & freshwater fish. Lanham, MD: Bernan Press, 1985.

FU, H.; YANG, Y. How plants tolerate salt stress. **Current issues in molecular biology**, v. 45, n. 7, p. 5914–5934, 2023.

HELAOUI, S. et al. Biochar application mitigates salt stress on maize plant: Study of the agronomic parameters, photosynthetic activities and biochemical attributes. **Plant Stress**, v. 9, n. 100182, p. 100182, 2023.

HUANG, M. et al. Effect of biochar on sweet corn and soil salinity under conjunctive irrigation with brackish water in coastal saline soil. **Scientia horticultruae**, v. 250, p. 405–413, 2019.

JESUS, J. J. et al. Salinização de solos em Portugal. **Revista de ciência elementar**, v. 8, n. 3, 2020.

KIM, H.-S. et al. Effect of biochar on reclaimed tidal land soil properties and maize (*Zea mays* L.) response. **Chemosphere**, v. 142, p. 153–159, 2016.

LITALIEN, A.; ZEEB, B. Curing the earth: A review of anthropogenic soil salinization and plant-based strategies for sustainable mitigation. **The Science of the total environment**, v. 698, n. 134235, p. 134235, 2020.

MAAS, E. V. et al. Salt sensitivity of corn at various growth stages. **Irrigation science**, v. 4, n. 1, p. 45–57, 1983.

MEHRA, P.; BENNETT, M. J. A novel Ca^{2+} sensor switch for elevated salt tolerance in plants. **Developmental cell**, v. 57, n. 17, p. 2045–2047, 2022.

PIZARRO, F. **Drenagem agrícola y recuperacion de solos salinos**. Madrid: Editora Agrícola Española, 1978. 521p.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Riverside: USDA. United States Salinity Laboratory, 1954. 160 p. (Agriculture Handbook, 60).

SÁ, F. V. DA S. et al. Crescimento inicial de arbóreas nativas em solo salino-sódico do nordeste brasileiro tratado com corretivos. **Revista CERES**, v. 60, n. 3, p. 388–396, 2013.

SÁ, F. V. DA S. et al. Ecophysiology of west indian cherry irrigated with saline water under phosphorus and nitrogen doses. **Bioscience journal: BJ**, p. 211–221, 2019.

SADEGH-ZADEH, F. et al. Rehabilitation of calcareous saline-sodic soil by means of biochars and acidified biochars. **Land Degradation and Development**, v. 29, n. 10, p. 3262–3271, 2018.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: EMBRAPA, 2018.

SOUTO, A. G. L. et al. Salinity and mulching effects on nutrition and production of grafted sour passion fruit. **Plants**, v. 12, p. 1-18, 2023.

SOUZA, W. B. B. DE et al. Potassium fertilization as salt stress attenuator in sour passion fruit. **Ciência rural**, v. 53, n. 9, 2023.

SOUZA, W. C. L.; SILVA, L. G.; SILVA, L. E. B.; SILVA, R. L. V.; LIMA, L. L. C.; BRITO, D. R. Comparative aspects between maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench): differences and similarities. **Diversitas journal**, Santana do Ipanema/AL. v. 5, n. 4, p. 2337-2357, 2020.

The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture 2021 – Systems at breaking point. [s.l.] FAO, 2022.

WOOLFOLK, S. W.; MATTHEWS, G. A.; WILLIAMS, W. P. Evaluation of germplasm lines of maize for resistance to fall Armyworm1 and southwestern corn Borer2 leaf-feeding damage. **The Southwestern entomologist**, v. 48, n. 2, 2023.

YOUSAF, U. et al. Interactive effect of biochar and compost with Poaceae and Fabaceae plants on remediation of total petroleum hydrocarbons in crude oil contaminated soil. **Chemosphere**, v. 286, n. 131782, p. 131782, 2022.