



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO
SERTÃO PERNAMBUCANO
CAMPUS PETROLINA ZONA RURAL

CURSO DE BACHARELADO EM AGRONOMIA

**EFICIÊNCIA DE CORRETIVOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE
REAÇÃO PARA SOLOS SALINOS-SÓDICOS NO VALE DO
SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO**

LEONARDO LIMA DE SOUSA

PETROLINA – PE
2025

LEONARDO LIMA DE SOUSA

**EFICIÊNCIA DE CORRETIVOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE
REAÇÃO PARA SOLOS SALINOS-SÓDICOS NO VALE DO
SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao IFSertãoPE Campus
Petrolina Zona Rural, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Fabio Freire de Oliveira

Coorientador: Prof. Me. Gilberto Saraiva Tavares Filho

PETROLINA – PE
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S725 Sousa, Leonardo Lima.

 Eficiência de corretivos em função do tempo de reação para solos salinos-sódicos no vale do submédio do São Francisco / Leonardo Lima Sousa. - Petrolina, 2025.
 55 f. : il.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) -Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, 2025.

 Orientação: Prof. Dr. Fabio Freire de Oliveira.

 Coorientação: Msc. Gilberto Saraiva Tavares Filho.

 1. Ciências Agrárias. 2. Corretivos. 3. Salinos-Sódico. 4. Recuperação de Solos.
 5. Semiárido. I. Título.

CDD 630

LEONARDO LIMA DE SOUSA

**EFICIÊNCIA DE CORRETIVOS EM FUNÇÃO DO TEMPO DE
REAÇÃO PARA SOLOS SALINOS-SÓDICOS NO VALE DO
SUBMÉDIO DO SÃO FRANCISCO**

Trabalho de Conclusão do Curso
apresentado ao IFSertãoPE *Campus*
Petrolina Zona Rural, como parte dos
requisitos para a obtenção de título de
Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 02 de Julho de 2025.

Prof. Dr Fabio Freire de Oliveira - IFSertãoPE
(Presidente – Orientador)

Prof. Me Gilberto Saraiva Tavares Filho - UFPE
(Coorientador)

Prof. Dr Cicero Antônio de Sousa Araújo - IFSertãoPE
(1º Examinador)

Tec. Me. Graciene de Souza Silva - IFSertãoPE
(2º Examinador)

A Deus por estar sempre a me guiar e promover as benções em minha vida. A toda minha família, e em especial a minha mãe Maria do Carmo Lima e ao meu padrasto Sergio Reis Cavalcante por todo apoio e estímulo nessa grande trajetória.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado e me concedido saúde. Minha mãe Maria do Carmo Lima e meu padrasto Sergio Reis Cavalcante por todo o apoio, conselhos e por serem meu alicerce. Minha irmã Mirelly de Lima Rodrigues e meu cunhado Luiz Ricardo Pereira de Macedo por todo apoio, acreditarem em minha pessoa e conselhos. Minha caçula Ludmylla, ao meu Pai Lucivaldo coelho de Sousa, meus tios Luciano, Rosangela, Maria do Socorro e meu primo Leandsom por todo o apoio, conselhos e acreditarem no meu potencial. Ao meu tio Chico e Silvanice por terem me acolhido em sua casa. Meus Avós maternos e minha Avó paterna por todo carinho e apoio. Meus antigos professores pôr as palavras de incentivo e acreditarem em meu potencial. Ao meu Amigo Luiz Eduardo Pereira de Macedo por estar junto nessa trajetória, todo apoio, conselhos e disposição em me ajudar. Aos meus amigos e companheiros de quarto que sempre ajudaram e me apoiaram, Hercules Feitosa, Ramon Vieira e Wilton França. Ao meu amigo Samuel Lourival Nunes de Macedo por seus conselhos e sempre está junto para ajudar. Aos meus orientadores e amigos, Dr. Fabio Freire de Oliveira, Dr. Cicero Antônio de Sousa Araújo, Me. Gilberto Saraiva Tavares Filho por todo voto de confiança, conselhos e ensinamentos que vão me ajudar a melhorar cada vez mais. A nossa técnica de laboratório Gracienne por toda paciência e ensinamentos durante esses anos. Ao laboratório de Solos, que foi minha segunda casa durante essa trajetória. Ao Supera São Francisco e a Dr. Tatiana Neres por conceder a oportunidade de participar do projeto. Ao INOVE Sertão por parceria na confecção das unidades experimentais. Ao Sergio Victor Oliveira Possidonio e Felipe Francisco da Silva por contribuírem nas coletas do solo. A Marina Souza Pereira Matos por toda contribuição e ajuda nas análises. A todos Meus amigos, equipe do laboratório de solo, e aqueles que fizeram parte, mesmo que pouco, dessa trajetória. Agradeço aqueles que fizeram parte da minha história, agregaram no meu crescimento pessoal ou profissional, meu muito obrigado.

“Eu sou parte de uma equipe. Então, quando venço, não sou eu apenas quem vence. De certa forma termino o trabalho de um grupo enorme de pessoas.”

Ayrton Senna.

Os que se encantam com a prática
sem a ciência são como os timoneiros que
entram no navio sem timão nem bússola,
nunca tendo certeza do seu destino.

Leonardo Da Vinci

RESUMO

A salinização e a sodificação dos solos constituem um desafio iminente relevante para a manutenção da agricultura no Vale do Submédio São Francisco, região de clima semiárido e forte dependência de irrigação, condições que, junto as características pedogênicas apresentam grande risco de serem afetadas por problemas de excesso de sais e sodificação. Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência e o tempo de reação de diferentes corretivos químicos (gesso agrícola, cloreto de cálcio, ácido sulfúrico e enxofre elementar) em função do tempo de reação, na recuperação de solos salino-sódicos. O experimento foi realizado no IFSertãoPE - Campus Petrolina Zona Rural em condições de laboratório, utilizando colunas de solo tratadas com os corretivos, com em três períodos de incubação (20, 40 e 60 dias). Foram analisados variáveis como pH, condutividade elétrica, fósforo disponível, cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), percentual de sódio trocável (PST), condutividade hidráulica e grau de dispersão e floculação das argilas. Os resultados demonstraram que em condições de 100% da capacidade de campo todos os corretivos foram eficazes na redução do PST e do sódio trocável já aos 20 dias. Com destaque para o gesso, que apresentou maior eficiência na floculação das argilas e na melhoria estrutural do solo ao longo do tempo. O ácido sulfúrico promoveu resposta imediata, elevando a condutividade hidráulica, mas requer cuidados operacionais em função de seu caráter corrosivo. Conclui-se que para escolha do corretivo o gesso agrícola apresentou ser alternativa mais indicada para recuperação gradual e sustentável de solos salino-sódicos na área estudada, e o ácido sulfúrico tendo boa eficiência na correção e também atuando na redução imediata do pH do solo.

Palavras-chave: Salinidade; Sodicidade; Corretivos; Recuperação do solo; Semiárido.

ABSTRACT

The salinization and sodification of soils is an imminent challenge for the maintenance of agriculture in the São Francisco Valley, a region with a semi-arid climate and a strong dependence on irrigation, conditions which, together with pedogenic characteristics, present a great risk of being affected by problems of excess salts and sodification. The aim of this study was to evaluate the efficiency and reaction time of different chemical correctives (agricultural gypsum, calcium chloride, sulphuric acid and elemental sulphur) in the recovery of saline-sodic soils. The experiment was carried out at IFSertãoPE - Campus Petrolina Zona Rural under laboratory conditions, using soil columns treated with the correctives, with three incubation periods (20, 40 and 60 days). Variables such as pH, electrical conductivity, available phosphorus, cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}), percentage of exchangeable sodium (PST), hydraulic conductivity and degree of dispersion and flocculation of the clays were analyzed. The results showed that under conditions of 100% field capacity, all the amendments were effective in reducing PST and exchangeable sodium after 20 days. Gypsum was the most effective at flocculating the clays and improving the soil's structure over time. Sulphuric acid provided an immediate response, increasing hydraulic conductivity, but requires operational care due to its corrosive nature. In conclusion, agricultural gypsum proved to be the most suitable alternative for the gradual and sustainable recovery of saline-sodic soils in the area studied, with sulphuric acid having good efficiency in correction and also acting in the immediate reduction of soil pH.

Keywords: Salinity; Sodicity; Amendments; Soil recovery; Semi-arid.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação da disposição dos tratamentos durante o experimento.	25
Figura 2 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável do pH.....	29
Figura 3 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de P_{disp} (fósforo disponível).....	31
Figura 4 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de K^+ (potássio).	33
Figura 5 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de Mg^{2+} (magnésio).	34
Figura 6 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de Na^+ (sódio).	36
Figura 7- Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de PST (percentual de sódio trocável).....	38
Figura 8-Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de grau de Dispersão de Argilas.....	39
Figura 9- Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de grau de Floculação das Argilas.	41
Figura 10 -Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a K_o do solo (condutividade hidráulica).....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos solos afetados por sais com base em critérios químicos.	17
Tabela 2 - Atributos químicos do solo empregado no experimento.	23
Tabela 3 - Atributos físicos do solo empregado no experimento.	24
Tabela 4 - Análise de variância entre os fatores de estudo e as variáveis de estudo, pH, Condutividade elétrica (C.E), Fosforo (P), Sódio (Na ⁺), Potássio (K ⁺), Calcio (Ca ²⁺) , Magnésio (Mg ²⁺), Percentual de sódio trocável (PST), Condutividade hidráulica (K ₀), Grau de dispersão das argilas (° de Dispersão), Grau de floculação das argilas (° de Floculação).	28
Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos físicos e químicos do solo e atributos químicos da solução do solo.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS.....	15
2.1 Objetivo geral	15
2.2 Objetivos específicos	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 Formação de Solos Afetados por Sais.....	16
3.2 Efeitos da Salinidade e Sodicidade nas propriedades físico-químicas do solo	18
3.3 Efeitos da Salinidade e Sodicidade nas plantas	18
3.4 Recuperação de Solos Afetados por Sais.....	19
4 MATERIAL E MÉTODOS	23
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
6 CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

A região Nordeste do Brasil destaca-se nacionalmente pela produção agropecuária, com ênfase no setor de hortifrúti, especialmente no Polo Irrigado do Vale do Submédio do São Francisco. Essa área caracteriza-se pelo clima semiárido, quente e seco, com médias térmicas superiores a 25 °C, alta taxa de evapotranspiração anual (cerca de 2.000 mm) e baixos índices pluviométricos, além de distribuição irregular das chuvas (SÁ & SILVA, 2010).

Segundo Pedrotti (2015), tais condições, somadas à composição geológica local e à exploração agrícola inadequada, favorecem processos de salinização e/ou sodificação dos solos, sobretudo pela presença dos íons Na^+ e Cl^- , e alto acúmulo de Ca^{2+} e Mg^{2+} , que, devido à baixa lixiviação, tendem a acumular-se no perfil do solo (PAIVA et al., 2016).

O solo, é compreendido como um ecossistema dinâmico, em constantes transformações das feições morfológicas por meio de processos de adição, remoção, translocação e transformação de matéria (Oliveira, 1997). Nesse contexto, práticas de manejo adequadas são essenciais para garantir a sustentabilidade e a produtividade agrícola.

Áreas degradadas por acúmulo excessivo de sais apresentam propriedades físico-químicas desfavoráveis, como alta salinidade, elevados teores de sódio trocável, densidade aparente elevada e baixa condutividade hidráulica. Esses fatores comprometem a infiltração de água, dificultam o crescimento das raízes e reduzem a eficiência produtiva (TAVARES FILHO, 2010).

De acordo com a FAO (2021), mais de 833 milhões de hectares em todo o mundo estão afetados pela salinidade, o que representa cerca de 8,7 % da superfície terrestre, com maior ocorrência nas regiões áridas e semiáridas da África, Ásia e América Latina. Ainda segundo a organização, sistemas de irrigação mal manejados podem agravar esse problema, independentemente do clima.

Os efeitos do excesso de sais na planta esta ligada a redução do potencial osmótico, dificultando a absorção de água pelas raízes, interferência metabólica e inibição de atividades de enzimas, causado por a substituição parcial de íons

essenciais como potássio e cálcio por sódio e cloro (AZEVEDO et al., 2017; PEDROTTI et al., 2015).

O excesso de íons de sódio no solo provoca a expansão e contração das argilas, resultando na desagregação do solo devido à dispersão das partículas (BRESLER et al., 1982). Esse processo compromete a estrutura do solo ao reduzir a quantidade de macroporos anteriormente formados por agregados, o que, aliado ao aumento da camada difusa, eleva a densidade do solo, dificulta o desenvolvimento das raízes e diminui a retenção de água (DIAS & BLANCO, 2010; FERREIRA et al., 2010). Além disso, concentrações elevadas de sódio aumentam a viscosidade da água no solo, o que, somado à desagregação estrutural, reduz significativamente a condutividade hidráulica e a permeabilidade (KEREN, 1988). Esses efeitos limitam o movimento da água no perfil do solo, dificultando a recuperação de áreas salinizadas, que dependem da lixiviação eficiente do Na^+ após sua liberação em solução pelas reações químicas promovidas por corretivos.

A mitigação da salinização e sodificação em áreas irrigadas requer estratégias de remediação que envolvem o uso de espécies vegetais tolerantes e de condicionadores químicos capazes de reduzir a porcentagem de sódio trocável (PST), a condutividade elétrica e o pH do solo (QADIR et al., 2007). Dentre os corretivos utilizados, destacam-se resíduos orgânicos, sulfato ferroso, cloreto de cálcio, gesso agrícola, ácido sulfúrico e enxofre elementar (PITMAN & LÄUCHLI, 2002; QADIR et al., 2007; SOUSA et al., 2012).

O gesso destaca-se como corretivo de solos salino-sódicos devido à sua ampla disponibilidade e eficácia comprovada na redução do sódio trocável, como relatam Shainberg et al. (1989), Barros et al. (2004, 2005a, 2006), Melo et al. (2008), Tavares Filho et al. (2012) e Miranda et al. (2011). Por ser um sal neutro, dissocia-se em Ca^{2+} e SO_4^{2-} , e o cálcio, mais fortemente adsorvido, substitui o sódio, deslocando-o para a solução (RAIJ, 1992). O sulfato neutraliza o sódio, formando sulfato de sódio decaidratado, que, com a irrigação, migra para camadas mais profundas, deixando as superficiais aptas ao crescimento das plantas (SANTOS, 1995). Já o cloreto de cálcio, embora mais caro, é altamente solúvel e eficaz em solos com elevado sódio trocável, pois gera alta concentração de eletrólitos e maior taxa de infiltração de água. Contudo, sua alta solubilidade favorece a lixiviação, reduzindo o tempo de troca iônica de Ca^{2+} por Na^+ (SANTOS & HERNÁNDEZ, 1997).

O ácido sulfúrico é outra opção, agindo como condicionador químico ao reagir com carbonato de cálcio e formar gesso in situ ou atuando diretamente na liberação do H^+ , além de poder ser obtido a partir de resíduos de minas e indústrias (SANTOS & HERNÁNDEZ, 1997). O enxofre elementar, por sua vez, necessita de oxidação microbológica para gerar ácido sulfúrico, reação dependente da atividade microbiana, tornando o processo mais lento (FASSBENDER, 1986). A aplicação de ácidos tem ainda a vantagem de reduzir o pH do solo e aumentar a disponibilidade de nutrientes como fósforo, zinco, manganês e ferro (SANTOS & HERNÁNDEZ, 1997).

A escolha do corretivo mais adequado, visando a eficiência e o curto período para correção, portanto, deve considerar as características físico-químicas do solo, sua condição atual e a disponibilidade. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivos avaliar a influência das doses práticas dos principais corretivos para solos salino-sódicos sobre os aspectos físico-químicos do solo, bem como analisar a influência de distintos períodos de incubação dos corretivos associados à lâmina de lixiviação, visando identificar estratégias mais eficientes e sustentáveis para a recuperação desses solos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência e o tempo de reação de diferentes corretivos químicos (gesso agrícola, cloreto de cálcio, ácido sulfúrico e enxofre elementar) na recuperação de solos salino-sódicos, com foco na melhoria dos atributos físico-químicos do solo.

2.2 Objetivos específicos

Definir entre os tempos (20,40 ou 60 dias) qual é o menor necessário para correção e condicionamento de melhorias químico-física para o solo.

Definir entre os corretivos qual obteve maior eficiência dentro das condições estabelecidas e variáveis analisados.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Formação de Solos Afetados por Sais

O aumento populacional tem ampliado a demanda global por alimentos, gerando pressões significativas sobre os ecossistemas e seus processos naturais. Dentre os impactos ambientais mais relevantes, a degradação dos solos se sobressai como uma das questões mais críticas enfrentadas atualmente. Nesse cenário, a salinização dos solos surge como problemática à produção agrícola sustentável em escala global (ARAÚJO, 2023), afetando diretamente o rendimento das culturas e a estabilidade dos sistemas produtivos.

A formação dos solos afetados por sais pode resultar de fatores naturais ou ações humanas. Entre os elementos naturais, processo conhecido como salinização primária, destacam-se o relevo da região, o material de origem, a deficiência de drenagem e as condições climáticas, especialmente em áreas áridas e semiáridas, que favorecem o acúmulo de sais no perfil do solo, uma vez que os valores da evaporação anual superam os valores de precipitação, fazendo com que os sais presentes na água se concentrem no solo. Por outro lado, a salinização secundária está associada a práticas inadequadas de manejo agrícola, como a utilização de água de irrigação com alta salinidade e o uso excessivo ou mal planejado de fertilizantes ricos em sais (ARAÚJO, 2023). Essas práticas podem intensificar os efeitos da salinização natural, agravando a degradação do solo e diminuindo sua capacidade produtiva.

Solos com excesso de sais são aqueles cuja concentração de íons compromete o crescimento e a produtividade da maioria das espécies vegetais cultivadas (SEVERO, 2017; SILVEIRA, 2022). Os solos classificados como salinos ou sódicos são formados a partir da acumulação de sais solúveis e/ou trocáveis, cujas causas podem estar relacionadas a fenômenos naturais ou a intervenções humanas. Os solos salinos são definidos pela presença elevada de sais solúveis em água, sendo os principais íons envolvidos potássio, cálcio, magnésio, sódio, cloreto, sulfato e bicarbonato. Por sua vez, os solos sódicos apresentam altos níveis de íons sódio, os quais afetam de maneira adversa as características físicas e químicas do solo.

Quando ocorrem simultaneamente altas concentrações de sais solúveis, sódio trocável e valores elevados de pH, tem-se um solo classificado como salino-sódico. Esse fenômeno resulta em mudanças importantes nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, podendo provocar sua degradação gradual e, em situações extremas, levar à desertificação (OLIVEIRA NETO et al., 2010).

A identificação dos solos salinizados, como mostrado na tabela 1, é realizada com base em três variáveis principais: a condutividade elétrica (CE), o pH e o percentual de sódio trocável (PST) (IPA, 2008, p. 76). A CE, expressa em dS/m, representa a quantidade total de sais dissolvidos no solo, sendo que valores mais altos indicam maior salinidade. O pH informa se o solo é ácido ou alcalino, sendo que solos com alto teor de sódio costumam apresentar pH acima de 8,5. Já o PST aponta a porcentagem de sódio trocável presente na CTC (capacidade de troca de cátions); valores elevados estão ligados à dispersão de partículas argilosas e à degradação do solo. A interpretação conjunta desses parâmetros possibilita uma classificação precisa quanto à salinidade e à sodicidade do solo, o que é essencial para orientar intervenções corretivas eficazes. Compreender os fatores responsáveis por essa gênese é fundamental para definir estratégias eficientes de manejo e recuperação, contribuindo para a conservação do solo e a sustentabilidade da produção agrícola em regiões vulneráveis.

Tabela 1 - Classificação dos solos afetados por sais com base em critérios químicos.

Critério	Solo Normal	Solo Salino	Solo Sódico	Solo Salino-Sódico
CE (dS m ⁻¹ a 25 °C) ¹	< 4	> 4	< 4	> 4
PST (%) ²	< 15	< 5	> 15	> 15
RAS ³	< 13	< 13	> 13	> 13
pH	< 8,5	< 8,5	> 8,5	> 8,5

¹CE = Condutividade elétrica da pasta de saturação.

² PST = Percentual de Sódio Trocável.

³ RAS = Relação de Adsorção de Sódio ($\text{Na}^+ / \sqrt{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})}$)

Fonte: Adaptado de Richard (1969).

3.2 Efeitos da Salinidade e Sodicidade nas propriedades físico-químicas do solo

A presença excessiva de sais solúveis e de sódio trocável no solo altera substancialmente suas propriedades físicas e químicas, impactando diretamente sua capacidade de sustentar o crescimento vegetal. A sodificação, em particular, está associada à substituição de cátions básicos como cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) por sódio (Na^+) no complexo de troca catiônica. Quando o sódio se torna predominante, ocorre a dispersão da fração argilosa, resultando na desagregação estrutural do solo e na formação de uma camada superficial selada, de baixa porosidade e elevada densidade aparente (PEDROTTI et al., 2015; BRASIL et al., 2020).

Essa desestruturação compromete a condutividade hidráulica, fazendo com que os solos sódicos e salino-sódicos tenham limitações à infiltração e à percolação, o que contribui para o acúmulo de sais na zona radicular e agrava o processo de salinização (SOUSA et al., 2024; GHARAIBEH et al., 2009). Além disso, essa limitação afeta a aeração do solo e reduz o teor de água disponível para as plantas, mesmo em condições de irrigação.

Do ponto de vista químico, solos salino-sódicos apresentam condutividade elétrica elevada, pH alcalino e alta porcentagem de sódio trocável, esse ambiente químico dificulta a absorção de nutrientes pelas plantas, reduz a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva e pode promover a precipitação de nutrientes em formas não disponíveis, como é o caso de micronutrientes em pH elevado (ARAÚJO et al., 2015). A interação entre esses efeitos físicos e químicos leva à degradação funcional do solo, comprometendo sua fertilidade, sua biodiversidade microbiana e sua capacidade de suportar sistemas agrícolas sustentáveis (ESWAR et al., 2021; PEDROTTI et al., 2015).

3.3 Efeitos da Salinidade e Sodicidade nas plantas

As plantas cultivadas em solos salinos e/ou sódicos estão sujeitas a múltiplos fatores de estresse. Em primeiro lugar, a alta concentração de sais na solução do solo reduz o potencial osmótico, dificultando a absorção de água pelas raízes. Esse estresse osmótico leva à desidratação celular e ao fechamento estomático, reduzindo

a taxa fotossintética e a assimilação de carbono (AZEVEDO et al., 2017). Em segundo lugar, a presença de íons tóxicos, como o sódio (Na^+) e o cloro (Cl^-), interfere no metabolismo celular, substituindo íons essenciais como potássio (K^+) e cálcio (Ca^{2+}) em processos bioquímicos vitais. A competição iônica pode inibir a atividade de enzimas dependentes de cálcio e comprometer a integridade das membranas celulares, promovendo distúrbios nutricionais, necrose foliar e clorose (PEDROTTI et al., 2015).

O impacto da salinidade é variável entre espécies e estágios fenológicos, sendo mais intenso em fases iniciais do ciclo de vida das plantas. Na germinação, o alto teor de sais interfere na captação de água pelas sementes e reduz significativamente a taxa de emergência (AZEVEDO et al., 2017). Em estágios posteriores, observa-se menor desenvolvimento radicular, redução na área foliar e diminuição da biomassa total como verificado em estudos com culturas como *Pithecellobium dulce* e *Sorghum bicolor* (SOUSA et al., 2024; ALBUQUERQUE et al., 2018).

Portanto, a salinidade e a sodicidade afetam as plantas tanto de forma direta por toxicidade e estresse osmótico, quanto indiretamente por degradação das condições edáficas. Esses efeitos comprometem a produtividade agrícola e evidenciam a necessidade de estratégias de prevenção e mitigação adaptadas às condições locais.

3.4 Recuperação de Solos Afetados por Sais

Devido aos impactos da salinidade nas propriedades do solo e na produção vegetal, torna-se essencial compreender as técnicas empregadas na sua correção. Atualmente, os corretivos mais utilizados são o gesso agrícola, o enxofre, o ácido sulfúrico e o cloreto de cálcio (MELO et al., 2008).

O gesso, nome comercial da gipsita, é um mineral composto por sulfato de cálcio dihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), encontrado na natureza em abundância. Na agricultura, esse produto é utilizado como condicionador de solo, fertilizante e corretivo. O Brasil é responsável por aproximadamente 11% da produção mundial de gesso, cujos principais depósitos estão localizados em bacias sedimentares (BRASIL; LIMA; CRAVO, 2020). O gesso agrícola se destaca principalmente pela sua eficiência

na correção de solos salino-sódicos e sódicos, devido à capacidade de fornecer cálcio (Ca^{2+}) solúvel. Ao ser aplicado no solo, dissolve-se rapidamente, liberando os íons cálcio (Ca^{2+}) e sulfato (SO_4^{2-}). O cálcio, por sua vez, entra no complexo de troca catiônica, substituindo o sódio (Na^+) adsorvido nas partículas de argila e na matéria orgânica. Uma vez deslocado, esse sódio passa a estar presente na solução do solo, onde pode reagir com o sulfato, formando sulfato de sódio (Na_2SO_4), um composto altamente solúvel e facilmente removido pela água (FARIA et al., 2003). Além de promover a remoção do sódio, o aumento dos teores de cálcio no solo favorece a floculação das partículas de argila, melhorando a estrutura, a agregação e a permeabilidade do solo (BRASIL; LIMA; CRAVO, 2020). Como resultado, há uma melhoria significativa nas condições físicas, que contribui para o desenvolvimento radicular e a produtividade das culturas. Para que esse processo seja eficaz, é essencial que haja aplicação de lâminas de água, seja por irrigação ou chuvas, em cerca de 3 vezes o volume de poros, que possibilitem a lixiviação do Na_2SO_4 para fora da zona radicular (RUIZ ET AL., 2004.)

O ácido sulfúrico concentrado pode ser utilizado diretamente no solo ou na água de irrigação com o objetivo de acelerar a formação de gesso in situ pela liberação direta de H^+ para a solução do solo, sendo especialmente eficiente em solos ricos em carbonato de cálcio (calcário). A reação química entre o ácido sulfúrico (H_2SO_4) e o carbonato de cálcio (CaCO_3) presente no solo resulta na formação de sulfato de cálcio (gesso), dióxido de carbono e água, conforme a equação: $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{CaSO}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$. Esse processo libera íons cálcio (Ca^{2+}) solúveis, os quais substituem o sódio (Na^+) trocável presente nos complexos de troca catiônica do solo, reduzindo a sodicidade (ZIA et al., 2007; SADIQ et al., 2007).

Além disso, a reação provoca uma redução imediata do pH do solo e converte parte do carbonato de cálcio em gesso, melhorando de forma significativa as propriedades químicas e físicas do solo (ZIA et al., 2007; SADIQ et al., 2007). Estudos demonstram que a aplicação de ácido sulfúrico foi altamente eficiente na redução tanto do pH quanto da relação de adsorção de sódio (RAS), sendo particularmente eficaz nas camadas mais profundas do perfil do solo, onde a lixiviação dos sais é mais limitada. Isso torna a técnica uma estratégia promissora para a recuperação de solos calcários salino-sódicos (ZIA et al., 2007; SADIQ et al., 2007).

Os resultados indicam ainda que, embora o ácido sulfúrico apresente um efeito ligeiramente inferior na redução do sódio solúvel em comparação ao gesso aplicado diretamente, ele é mais eficiente na correção da alcalinidade do solo, promovendo uma redução mais acentuada no pH (ZIA et al., 2007; SADIQ et al., 2007). Isso evidencia seu potencial como corretivo químico, principalmente quando o objetivo é simultaneamente reduzir a alcalinidade e a sodicidade do solo. Contudo, os autores destacam que o uso do ácido sulfúrico exige precauções rigorosas no manuseio, considerando sua natureza altamente corrosiva, os riscos ambientais envolvidos e o potencial de provocar queimaduras nas plantas se não for devidamente diluído ou corretamente aplicado (ZIA et al., 2007; SADIQ et al., 2007). Dessa forma, recomenda-se que sua utilização seja baseada em cálculos precisos da saturação de carbonatos do solo e sob condições de manejo controladas. Portanto, embora tecnicamente viável e eficaz, o uso do ácido sulfúrico em larga escala ainda é limitado por fatores logísticos, operacionais e ambientais, sendo mais indicado para áreas específicas e manejadas com monitoramento adequado.

O enxofre elementar (S^0) é um corretivo indireto que atua por meio de reações biológicas (STAMFORD et al. 2007). No solo, bactérias quimiolitotróficas (gênero *Acidithiobacillus*) oxidam o enxofre a sulfato, formando ácido sulfúrico (H_2SO_4) localmente. Esse ácido orgânico dissocia e efetivamente reduz o pH do solo, reagindo com carbonatos e disponibilizando Ca^{2+} de fontes calcárias naturais. Segundo Araújo et al. (2015), solos tratados com S^0 apresentam redução gradual de pH e da PST, assim como aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis. Estudos confirmam que doses adequadas de enxofre elementar podem diminuir significativamente a salinidade e alcalinidade de solos degradados, elevando a disponibilidade de nutrientes alcalinos (Ca, Mg) e promovendo a precipitação interna de sais excessivos (ARAÚJO, 2015). A desvantagem é que o processo depende da atividade microbiana e de boas condições de umidade, sendo relativamente lento (tipicamente meses para oxidação completa). Em contrapartida, o enxofre elementar é barato e de aplicação simples, podendo ser uma opção de baixo custo quando há tempo para a reação microbiológica. De acordo com Melo e Alleoni (2022), os sulfatos prontamente solúveis (como gesso, sulfato de alumínio, sulfato férrico) não acidificam o solo diretamente, atuando apenas fornecendo ânions SO_4^{2-} ; destes, apenas o gesso tem efeito corretivo duradouro na sodicidade, enquanto outros podem ter uso restrito.

O cloreto de cálcio é um corretivo alternativo de Ca que, diferentemente do gesso, é altamente solúvel em água. Em solução, o CaCl_2 dissocia-se completamente, produzindo uma solução de alta força iônica. Essa característica torna o CaCl_2 muito eficiente na reposição rápida de Ca^{2+} em solos sódicos, permitindo a substituição do Na^+ no complexo de troca com menores volumes de água e em tempo menor do que o gesso. Estudos demonstram que aplicações de soluções de CaCl_2 levam a forte redução da PST em curto prazo, corrigindo parcialmente o solo salino-sódico tratável (GHARAIBEH; ELTAIF; SHUNNAR, 2009). Além disso, o Ca^{2+} promove o encurtamento da camada dupla elétrica ao redor das partículas de argila, ajudando a flocular o solo e a recuperar sua permeabilidade. Entretanto, o uso do CaCl_2 apresenta algumas limitações: seu alto custo comercial pode inviabilizar a correção em larga escala. O excesso de Cl^- resultante também exige cuidado ambiental, pois pode acumular-se ou lixiviar para os aquíferos, além de possivelmente afetar culturas sensíveis ao cloro. Por essas razões, o CaCl_2 costuma ser empregado em casos específicos (por exemplo, tratamentos localizados via água de irrigação ou hidroponia) e não substitui o gesso como prática principal de remediação em campo aberto (GHARAIBEH; ELTAIF; SHUNNAR, 2009).

Diante do exposto, fica evidente que a recuperação de solos salino-sódicos depende da escolha adequada dos corretivos, bem como do entendimento dos processos físico-químicos que ocorrem no solo durante sua aplicação e posterior lixiviação. Cada corretivo apresenta características distintas em relação à solubilidade, velocidade de reação, efeito sobre a sodicidade e impacto na estrutura do solo, sendo fundamental avaliar seu desempenho sob condições práticas de manejo.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Instituto Federal do Sertão Pernambucano – Campus Petrolina Zona Rural, localizado nas coordenadas geográficas 9° 20' 12" S e 40° 41' 21" W.

O solo utilizado foi coletado na profundidade de 0–20 cm, na Fazenda Barreiras, localizada na comunidade de Riacho Seco, no município de Curaçá – BA (8° 46' 36" S e 39° 40' 10" W). Para a caracterização inicial (Tabela 2), a amostra foi seca ao ar (TFSa), destorroada e peneirada em malha de 2 mm. Posteriormente, foi encaminhada ao laboratório para análises conforme metodologia descrita pela Embrapa (2011).

As análises incluíram: determinação do pH em água (1:2,5); condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes), em extrato 1:5; cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}), extraídos em solução de KCl 1 mol L⁻¹ e quantificados por espectrofotometria de absorção atômica; potássio (K^+) e sódio (Na^+), extraídos com solução de Mehlich-1 e quantificados por fotometria de chama; fósforo (P), extraído também com a solução Mehlich-1 e quantificado por espectrofotometria; hidrogênio mais alumínio (H+Al), extraído com acetato de cálcio 1 M (pH 7), determinado por titulação com NaOH 0,1 N, utilizando fenolftaleína a 3% como indicador.

Tabela 2 - Atributos químicos do solo empregado no experimento.

pH (1:1,25)	CE _{es} (1:5)	MO	P _{disp}	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H+Al	PST
H ₂ O	dS m ⁻¹	g kg ⁻¹	mg dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----						%
7,30	37,97	9,10	90,16	1,02	14,17	27,70	11,90	0,00	0,00	25,85

Onde - CE_{es}, P_{disp}, K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, H+Al, MO, PST, correspondem a Condutividade Elétrica do extrato de saturação do solo; Fósforo disponível; Potássio, Sódio, Cálcio, Magnésio, Alumínio, Hidrogênio mais Alumínio, Matéria Orgânica, Percentual de Sódio Trocável, respectivamente.

Fonte: Soloagri, 2025.

A porcentagem de sódio trocável (PST) foi calculada com base nos resultados da análise da fertilidade do solo (equação 1). A matéria orgânica (MO) foi determinada pelo método da mufla, segundo a metodologia descrita pela Embrapa (2011).

$$PST = \frac{Na^+}{CTC} \times 100$$

(Eq. 1)

Onde:

PST= percentagem de sódio trocável (%);

Na^+ = concentração de sódio trocável ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$);

CTC= capacidade de troca de cátions ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$).

Também foram determinados os atributos físicos do solo (Tabela 3), conforme o manual da Embrapa (2011), incluindo: granulometria, pelo método da dispersão total; densidade de partículas, pelo método do balão volumétrico; densidade do solo, pelo método da proveta; condutividade hidráulica saturada e grau de flocculação das argilas pelo método da pipeta.

Tabela 3 - Atributos físicos do solo empregado no experimento.

Areia	Silte	Argila	Ds	Dp	Pt	K _o	Targ	Gflo	Classe
g kg ⁻¹			g cm ⁻³		m ⁻³ m ⁻³	cm h ⁻¹	g kg ⁻¹	%	
445,35	428,75	125,90	1,32	2,45	0,46	1,09	61,85	50,88	Franca

Onde - Ds, Dp, Pt, K_o, Targ, Gflo, correspondem a Densidade do Solo, Densidade de Partículas, Porosidade Total, Condutividade Hidráulica, Argila Dispersa em Água, Grau de Flocculação, respectivamente.

Fonte - Autor, 2025.

O experimento foi conduzido em delineamento experimental inteiramente casualizado, em arranjo fatorial 4x3 (quatro tipos de corretivos e 3 tempos de incubação), com 4 repetições, totalizando 48 unidades experimentais (Figura 1). Cada tratamento consistiu na aplicação da dose prática de 100% do corretivo necessário para reduzir a PST do solo para 10% (equação 2), sendo utilizado a densidade do solo de 1,32 g/cm³, e o peso equivalente do corretivo foi de 86, 73, 49 e 16 para os corretivos gesso, cloreto de cálcio, ácido sulfúrico e enxofre, respectivamente. Foram aplicados os seguintes tratamentos, avaliados aos 20, 40 e 60 dias após a aplicação: gesso agrícola (CaSO₄·2H₂O), cloreto de cálcio (CaCl₂), ácido sulfúrico (H₂SO₄) e enxofre elementar (S).

$$Dt = \frac{(PSTf - PSTi)CTC.h.Pe.da}{100} \text{ kg / ha} \quad (\text{Eq. 2})$$

(RICHARDS, 1954)

Onde:

Dt = dose teórica de corretivo (kg/há);

PSTf e PSTi = percentagem de sódio trocável final e inicial, respectivamente (%);

CTC = capacidade de troca catiônica (cmol_c.dm⁻³);

h = profundidade do perfil que se deseja corrigir (cm);

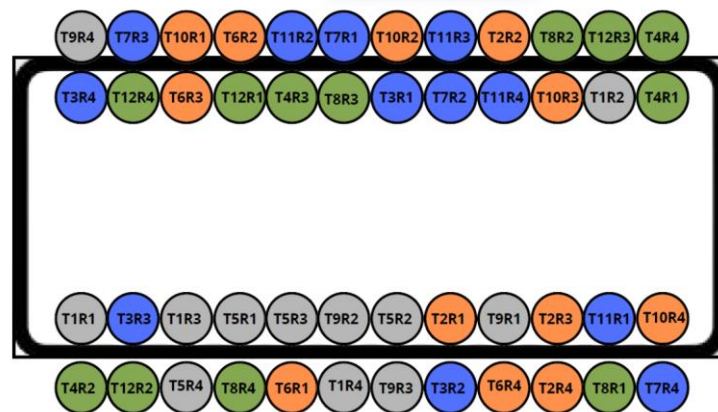
Pe = peso equivalente do corretivo;

da = densidade aparente do solo (g.cm⁻³).

$$Dp = f . Dt$$

f = fator de correção que depende do corretivo usado (Gesso=1,2; Cl₂Ca.2H₂O=1,10; Enxofre=1,25; H₂SO₄=1,10; e sulfatos de ferro e alumínio=1,10).

Figura 1 - Representação da disposição dos tratamentos durante o experimento.



Fonte - Autor, 2025.

As unidades experimentais foram compostas por colunas confeccionadas com canos de PVC de 75 mm de diâmetro e 30 cm de altura, tampadas na parte inferior com um CAP clivado, fabricado sob medida em impressora 3D (Bambu Lab) no laboratório do INOVE-sertão, facilitando a coleta da solução lixiviada.

O solo foi pesado, homogeneizado com o corretivo e inserido nas colunas, buscando-se alcançar densidade próxima à do solo em condições naturais. A umidificação foi realizada de baixo para cima, por capilaridade, com volume de água suficiente para atingir aproximadamente 100% da capacidade de retenção. Onde essa capacidade de retenção foi determinada por a metodologia de saturar uma coluna de solo (com densidade de $1,32 \text{ g/cm}^3$), após saturação foi esperado sair toda a solução livre drenável para a pesagem do solo+água, logo após, através do volume de água que o solo conseguiu reter foi pego o índice da capacidade de retenção de água.

O solo sem corretivo apresentava baixa capacidade de percolação por conta dos seus altos níveis de sódio e PST, junto a densidade e baixa condutividade hidráulica por excesso de sais tornando as coletas do mesmo inviáveis, por conta disso os dados para a testemunha foram em estacionalidade (se utilizou os dados da primeira análise, ou seja, a testemunha não passou por o processo de incubação que cada tratamento passou).

Após o tempo de incubação determinado para cada tratamento, foram realizadas coletas conforme o seguinte procedimento: saturação da coluna de baixo para cima até formação de lâmina de água de aproximadamente 2 cm na superfície da coluna; em seguida, a lixiviação foi realizada com volume de água equivalente a duas vezes o volume de poros, utilizando o método do frasco de mariotte.

Durante o processo de coleta até se obter na solução lixiviada 2x o volume de poros o tempo foi cronometrado para fins do cálculo da condutividade hidráulica (K_o) do solo (equação 3).

$$K = \left(\frac{Q \cdot L}{A \cdot H \cdot t} \right) \quad (\text{équa. 3})$$

(EMBRAPA, 2011)

Onde:

K – Condutividade hidráulica, em cm h^{-1} ;

Q – Volume do percolado, em mL;

L – Altura do bloco do solo, em cm;

H – Altura do bloco do solo e da coluna de água, em cm;

A – Área do cilindro, em cm²;

t – Tempo de percolação, em horas;

Ao final de cada coleta, uma amostra da solução lixiviada foi armazenada para análise de Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, P, pH e condutividade elétrica. O solo remanescente nas colunas foi seco ao ar, destorroado e submetido novamente às análises químicas previamente mencionadas, incluindo grau de floculação seguindo o manual de métodos de análise da EMBRAPA (2011).

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de análise de variância fatorial (ANOVA Fatorial), com desdobramento da interação, considerando-se os fatores aplicados. Os dados obtidos foram comparados pelo teste de Tukey, a 5% de significância, utilizando o software Sisvar, versão 4.1. Para o estudo das correlações entre as variáveis e a identificação daquelas que mais contribuíram para a variação dos dados, adotou-se o critério de Cohen (1988) para a interpretação do coeficiente de correlação de Pearson, considerando correlações pequenas quando $0,10 < r \leq 0,29$, médias quando $0,30 < r \leq 0,49$ e grandes quando $0,50 < r \leq 1$, utilizando o software PAST.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A interação Corretivo × Tempo foi significativa para alguns atributos, sugerindo que a eficácia dos corretivos variou ao longo do tempo de aplicação.

A tabela 4 apresenta o grau de interação entre Corretivo x Dias, o qual significativas para as variáveis analisadas: pH, P_{disp} (fosforo disponível), K⁺ (potássio), Mg²⁺ (magnésio), ° de Dispersão (grau de dispersão das argilas) e ° de Floculação (grau de floculação das argilas) com $p < 0,001$, para Na⁺ (sódio) e K₀ (condutividade hidráulica) com $p < 0,01$ e para PST (percentual de sódio trocável) $p < 0,05$. Já para CE e Ca²⁺ não teve significância. Segundo Barros et al. (2004) e Vital et al. (2005) essa dependência mútua tem sido observada na literatura, onde os efeitos corretivos variam conforme a taxa de solubilização e lixiviação de cada material.

Tabela 4 – Resumo da análise de variância para pH, Condutividade elétrica (C.E), Fosforo (P), Sódio (Na⁺), Potássio (K⁺), Calcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Percentual de sódio trocável (PST), Condutividade hidráulica (K₀), Grau de dispersão das argilas (° de Dispersão), Grau de floculação das argilas (° de Floculação), em função do tempo de incubação dos corretivos.

FV	GL	pH	C.E	P	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺
Corretivo	4	***	***	***	***	***	***	***
Tempo	2	***	*	***	*	***	***	***
Corretivo*Tempo	8	***	ns	***	**	***	ns	***
CV (%)		1.59	10.70	8.41	9.22	3.81	5.05	2.46

FV – Fonte de variação; GL – Grau de liberdade; CV (%) – Coeficiente de variação; ns – não significativo; *** significativo a 0,1% (p<0,001); ** significativo a 1% (p<0,01), * significativo a 5% (p<0,05).

Fonte – O autor, 2025.

O tratamento com o corretivo H₂SO₄ (ácido sulfúrico) apresentou as menores médias de pH em relação aos demais corretivos: 5,8; 5,8 e 5,7 para os dias 20, 40 e 60, respectivamente, diferenciando-se estatisticamente dos outros tratamentos (Figura 2). Já o corretivo CaCl₂ (cloreto de cálcio) apresentou médias de pH de 8,2; 7,9 e 7,8 para os dias 20, 40 e 60, respectivamente, não diferindo dos resultados encontrados para o gesso: 8,0; 8,0 e 7,8. Aos 20 dias, a média de pH do enxofre foi superior (7,7) à do tratamento sem corretivo (7,3), comportamento que mudou aos 40 dias, à medida que o enxofre sofria reações, suas médias também foram se alterando, situando-se em 7,2, não diferindo do solo sem corretivo (7,3). O tratamento com enxofre foi o único que apresentou diferença progressiva ao longo dos tempos de incubação, onde o mesmo aos 20 dias se encontrava em 7,7, já aos 40 dias apresentou decréscimo para 7,2 e aos 60 dias já se encontrava com valores de pH em torno de 6,7.

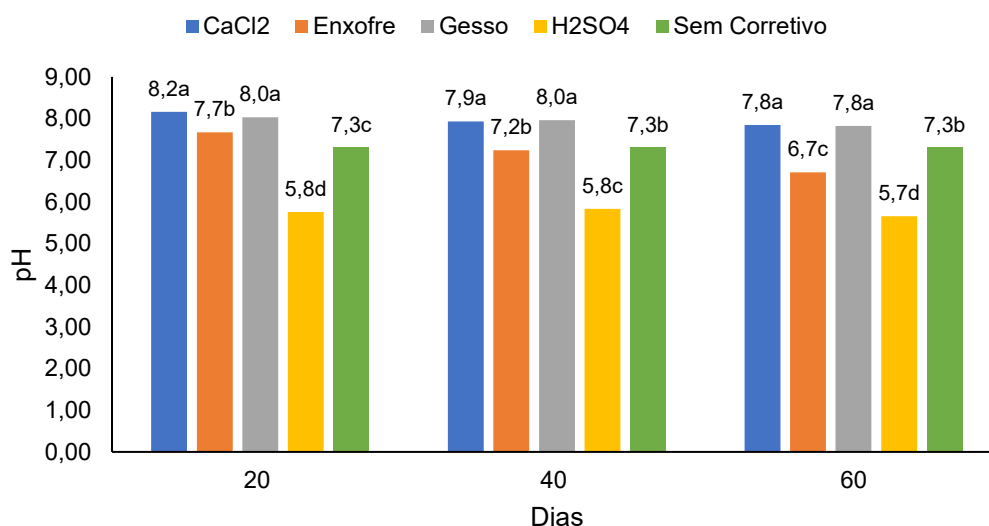
Resultado em relação ao gesso e o pH vai de acordo com que Melo e Alleoni (2022) defendem, onde os sulfatos prontamente solúveis (como gesso, sulfato de alumínio, sulfato férrico) não acidificam o solo diretamente, atuando apenas fornecendo ânions SO₄²⁻; destes, apenas o gesso tem efeito corretivo duradouro na sodicidade, enquanto outros podem ter uso restrito.

Segundo Leite et al. (2010), esse resultado deve-se ao fato de o H₂SO₄ fornecer prótons (H⁺) diretamente à solução do solo, reduzindo o pH de forma imediata; que além da liberação direta de H⁺ para troca catiônica com o Na⁺, o ácido

também reage com carbonatos e bicarbonatos presentes, neutralizando a alcalinidade e formando sulfato de cálcio, que, por sua vez, disponibiliza cálcio (Ca^{2+}) para melhorar a estrutura do solo e deslocar o sódio trocável (Na^+). Essa ação faz do H_2SO_4 um corretivo altamente agressivo e eficiente.

A redução do pH provocada pelo enxofre elementar deve-se à oxidação biológica desse produto, a qual gera ácido sulfúrico no solo (STAMFORD et al. 2007). O comportamento de redução do pH com o uso do enxofre corrobora com os resultados de Araújo et al. (2015), que afirmam que sua eficiência depende da ação de bactérias oxidantes, as quais necessitam de tempo de incubação para converter o enxofre elementar em ácido sulfúrico no ambiente do solo.

Figura 2 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável do pH.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

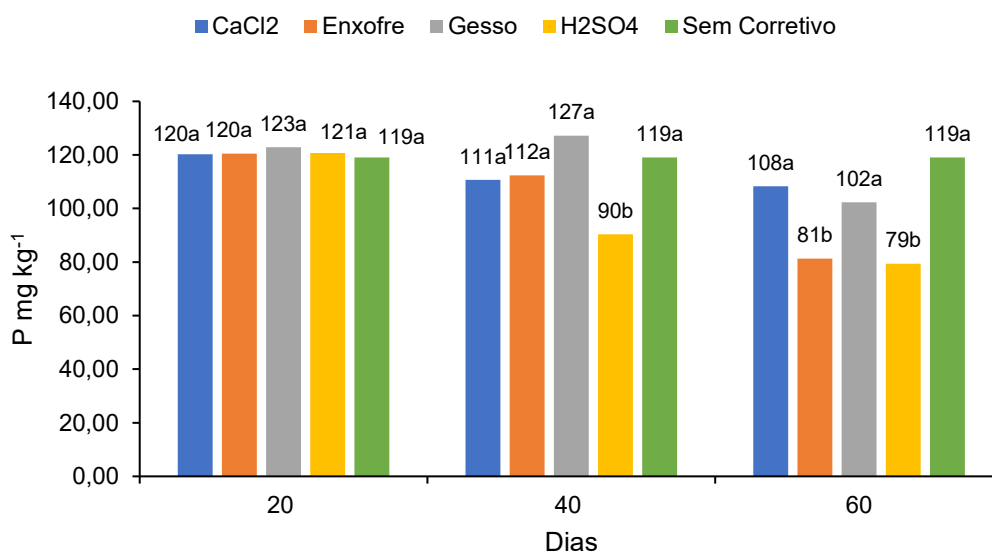
Em relação à disponibilidade de fósforo no solo, no primeiro dia de avaliação, dia 20, foi possível observar que todos os tratamentos apresentaram comportamento semelhante ao do solo sem corretivo (Figura 3), com médias de 120, 120, 123, 121 e 119 mg kg^{-1} para CaCl_2 , enxofre, gesso, H_2SO_4 e sem corretivo, respectivamente. Comportamento quase semelhante foi observado aos 40 dias, onde apenas o tratamento com ácido sulfúrico (H_2SO_4) apresentou diferença, ao diminuir a disponibilidade de fósforo para 90 mg kg^{-1} . Aos 40 dias, à medida que o enxofre acidificava o solo, também diminuiu a disponibilidade de fósforo para 81 mg kg^{-1} ,

igualando-se ao H_2SO_4 (79 mg kg^{-1}). Os demais tratamentos mantiveram médias de P_{disp} parecidas, sem diferença entre si: CaCl_2 com 101 mg kg^{-1} , gesso com 102 mg kg^{-1} e o sem corretivo com 119 mg kg^{-1} .

Segundo Medeiros et al. (2011), solos com elevados teores de sódio costumam apresentar carbonatos associados a valores de pH mais altos, cuja, a aplicação direta de H_2SO_4 ou sua geração in situ pela oxidação do enxofre elementar resulta em reação com os carbonatos de cálcio, formando sulfato de cálcio e consumindo a alcalinidade residual. Esse processo então libera íons Ca^{2+} para a solução do solo, os quais se combinam com o fosfato presente, ocasionando a precipitação de fosfatos de cálcio de baixa solubilidade.

Em estudo conduzido por Albuquerque et al. (2018) com solo salino-sódico incubado, observou-se fenômeno semelhante: o H_2SO_4 aplicado reagiu com aproximadamente 665 g kg^{-1} de CaCO_3 do solo, formando gesso e liberando Ca^{2+} , que, por sua vez, precipitou o fósforo, reduzindo os teores de P extraível, pôr os métodos de Mehlich-1 e Olsen.

Figura 3 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de P_{disp} (fósforo disponível).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

De modo geral, a Figura 4 representa a redução significativa dos teores de potássio trocável no solo em comparação à amostra controle, com diferenças notáveis ao longo dos 60 dias. O solo sem corretivo manteve os maiores teores de K^+ ($1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) em todos os períodos avaliados. Aos 20 dias, os tratamentos com gesso e ácido sulfúrico apresentaram as menores médias, ambos com cerca de $1,0 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, diferindo estatisticamente dos demais corretivos. Os corretivos CaCl_2 ($1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e enxofre ($1,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) diferiram entre si e mantiveram valores intermediários entre as menores médias (H_2SO_4 e gesso) e a maior média (sem corretivo). Aos 40 dias, o ácido sulfúrico manteve-se isolado com as menores médias ($0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), seguido do CaCl_2 e do enxofre, ambos com $0,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$. O gesso, por sua vez, apresentou $0,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ de média, diferindo dos demais corretivos. Esse comportamento mudou aos 60 dias, quando o solo sem corretivo ($1,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) foi seguido pelo gesso e pelo CaCl_2 , ambos com médias de $0,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, diferindo do enxofre ($0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), que, por sua vez, obteve média superior ao H_2SO_4 ($0,6 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$).

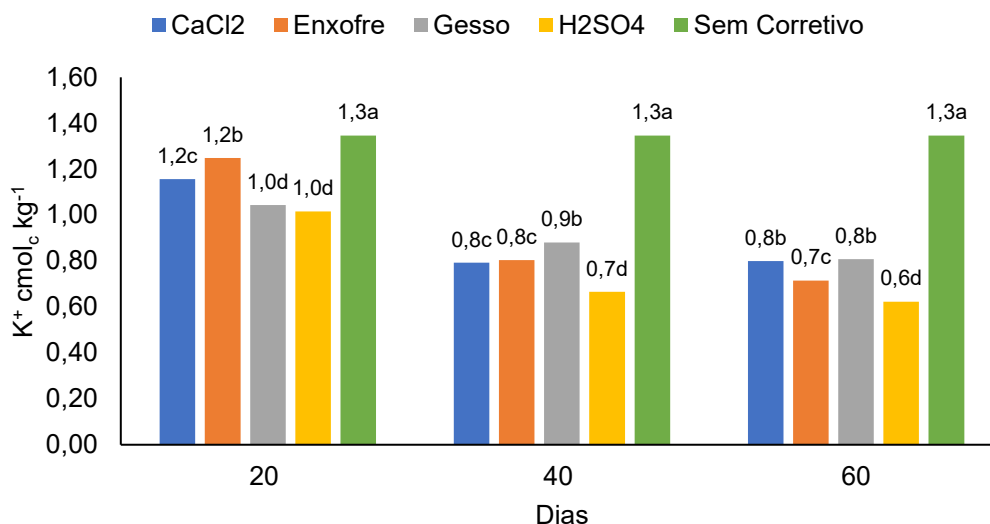
Segundo Araújo (2015), a redução de K^+ com a aplicação de ácido sulfúrico ocorre porque este corretivo diminui drasticamente o pH do solo e, em solos calcários,

dissolve carbonatos, liberando Ca^{2+} adicional. Esses processos conjugados intensificam a expulsão de cátions básicos dos sítios de troca, especialmente Na^+ e K^+ , substituídos por H^+ e Ca^{2+} . Já no caso do enxofre elementar, o mesmo requer mais tempo para ser oxidado por microrganismos, formando ácido sulfúrico in situ, o que pode ser explicado para suas respostas serem mais tardias. A introdução de Ca^{2+} pelos corretivos CaCl_2 e gesso eleva a saturação de cálcio no complexo de troca, forçando a substituição do K^+ adsorvido por novos cátions, deslocando o potássio para a solução do solo (ARAÚJO et al., 2015).

Tavares Filho et al. (2012) observaram, em experimento com colunas de solos do Nordeste, que a adição de gesso agrícola proporcionou elevada lixiviação de potássio, atribuída à fraca retenção desse elemento no complexo de troca e à abundante substituição catiônica promovida pelo Ca^{2+} do gesso. De forma semelhante, Gashi et al. (2025) relataram decréscimo nos teores de K^+ trocável após aplicação de gesso em solos sódicos, indicando que o K^+ previamente adsorvido tornou-se mais suscetível à lixiviação após a melhoria da estrutura e remoção do Na^+ .

No contexto de solos salino-sódicos, Santos et al. (2013) mencionaram que o uso de gesso, embora eficaz na substituição do Na^+ , pode também reduzir o K^+ trocável em função do forte aumento de Ca^{2+} e consequente desequilíbrio entre as bases do solo. Esse desequilíbrio, caracterizado por elevação pronunciada de Ca^{2+} e redução relativa de Na^+ , K^+ e Mg^{2+} , foi apontado também por Medeiros et al. (2015), ao destacar que a principal limitação do gesso é “elevar muito os teores de cálcio trocável”, desbalanceando as proporções dos cátions de troca.

Figura 4 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de K^+ (potássio).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

Também foram avaliados os níveis de Mg^{2+} no solo em relação à aplicação dos tratamentos e aos dias de avaliação, como mostra a Figura 5. Em todos os dias avaliados, o solo sem corretivo apresentou as maiores médias de magnésio, cerca de 15,7 $cmol_c kg^{-1}$. Aos 20 dias, os corretivos $CaCl_2$, enxofre e gesso apresentaram médias aproximadas, de 1,2, 1,1 e 1,3 $cmol_c kg^{-1}$, respectivamente, enquanto o H_2SO_4 apresentou índice de 1,5 $cmol_c kg^{-1}$, aproximando-se do gesso.

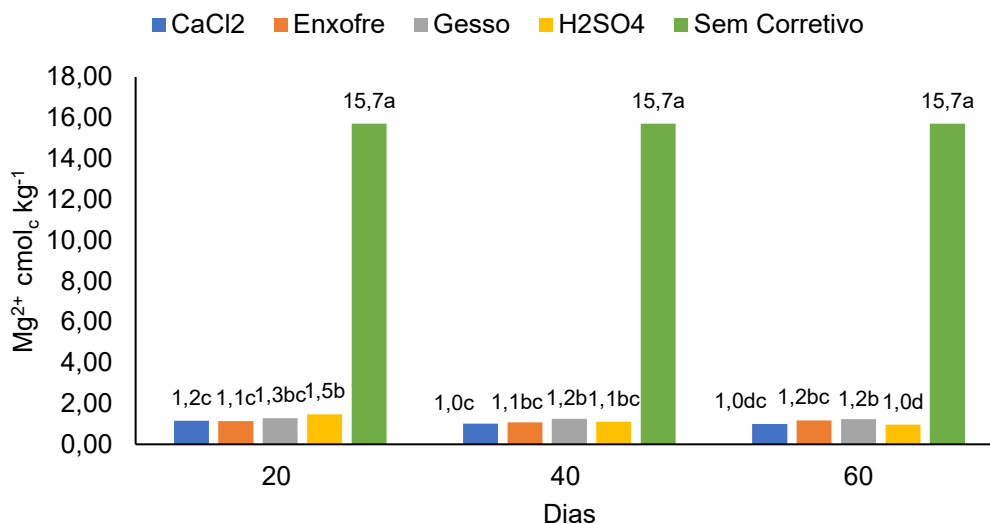
Aos 40 dias, houve pouca variação dos níveis de magnésio em relação à leitura anterior, com destaque para o ácido sulfúrico, que promoveu redução do nível de Mg^{2+} (1,1 $cmol_c kg^{-1}$), aproximando-se do enxofre (1,1 $cmol_c kg^{-1}$). Aos 60 dias, o destaque foi novamente o promovido por o ácido sulfúrico, cuja média caiu para 1,0 $cmol_c kg^{-1}$, mantendo o mesmo valor do $CaCl_2$, ambos com as menores médias. Já para o gesso, ao longo dos diferentes dias de incubação, suas medias de magnésio mantiveram-se com níveis de 1,3 a 1,2 $cmol_c kg^{-1}$.

Nos tratamentos com fontes de cálcio solúvel, como $CaCl_2$ e gesso, o Ca^{2+} adicionado compete pelos sítios de troca do solo e desloca cátions originalmente adsorvidos, incluindo o Mg^{2+} e o próprio Na^+ (MELO et al., 2008). Melo et al. (2008) afirmam que o Ca^{2+} possui maior afinidade eletrostática pelos colóides do solo em

comparação ao Mg^{2+} , em parte devido ao seu menor raio hidratado, o que faz com que permaneça no complexo de troca enquanto expulsa o Mg^{2+} para a fase líquida do solo. Esse processo de substituição catiônica explica a diminuição do Mg^{2+} trocável já nos primeiros 20 dias nos tratamentos com $CaCl_2$ e gesso. Estudos de Melo et al. (2008) em solos salino-sódicos de Pernambuco corroboram esse mecanismo, demonstrando que a adição de gesso reduziu significativamente o Mg^{2+} solúvel e trocável devido à troca iônica $Mg-Ca$ e subsequente remoção do Mg^{2+} pelas águas de lixiviação.

Em relação ao magnésio, Barros et al. (2004) relataram, em ensaios de incubação com gesso de jazida, que praticamente todo o Mg^{2+} trocável inicial foi removido do solo após as lavagens, restando apenas pequenas quantidades residuais atribuídas a impurezas de Mg contidas no próprio gesso aplicado.

Figura 5 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias de reação em relação a variável de Mg^{2+} (magnésio).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

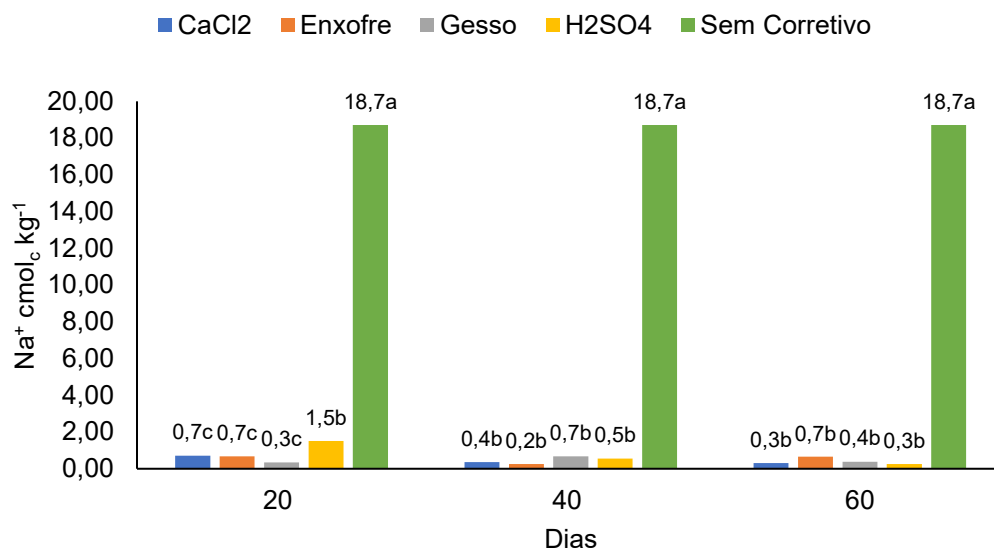
Em relação aos níveis de Na^+ no solo, o tratamento Sem Corretivo apresentou o maior teor de Na^+ no solo ($18,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), diferindo significativamente dos demais tratamentos em todos os períodos avaliados (20, 40 e 60 dias) (Figura 6). Aos 20 dias,

entre os corretivos aplicados, o H_2SO_4 resultou no maior valor de Na^+ ($1,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), seguido por CaCl_2 e enxofre (ambos com $0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e, por fim, o gesso, com o menor teor ($0,3 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Aos 40 e 60 dias esse padrão de redução foi mantido. O tratamento sem corretivo continuou apresentando o maior teor de Na^+ ($18,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), enquanto os solos que receberam corretivos apresentaram teores inferiores a $1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$.

Essa remoção acelerada do sódio adsorvido deve-se ao mecanismo de troca iônica $\text{Ca}^{2+}\text{--Na}^+$: os corretivos fornecem íons Ca^{2+} que deslocam o Na^+ dos sítios de troca, liberando-o para a solução do solo na forma de sais solúveis. O gesso agrícola e o cloreto de cálcio agem diretamente pelo suprimento de Ca^{2+} ao solo; o cálcio liberado ocupa as cargas negativas do solo no lugar do Na^+ , formando sulfato de sódio (no caso do gesso) ou cloreto de sódio (no caso do CaCl_2), já os de natureza acida exercem sua ação principalmente por meio da redução do pH do solo e da mobilização de cálcio presente nos minerais (DE SOUSA et al., 2012).

Vários trabalhos destacam reduções semelhantes de sodicidade em condições controladas. Miranda et al. (2008) demonstrou a eficácia de soluções de CaCl_2 em substituir Na^+ por Ca^{2+} no complexo de troca, recuperando um solo salino-sódico e favorecendo o crescimento de plantas. Da mesma forma, Melo et al. (2008) e Barros et al. (2009) relataram sucesso na diminuição do PST com a aplicação de gesso agrícola em solos salino-sódicos.

Figura 6 - Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de Na⁺ (sódio).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

Em relação ao PST (Figura 7), o comportamento foi semelhante. O solo sem corretivo apresentou os maiores valores em todos os tempos avaliados (25,9%), diferindo significativamente dos tratamentos com corretivos. Aos 20 dias, o tratamento com H₂SO₄ proporcionou o maior valor entre os corretivos (5,8%), seguido por CaCl₂ (4,0%) e enxofre (3,7%), enquanto o gesso mostrou o menor PST (1,4%). Aos 40 dias, o gesso continuou se destacando com o menor valor (1,5%), enquanto CaCl₂, enxofre e H₂SO₄ apresentaram valores intermediários, entre 2,4% e 3,1%. Por fim, aos 60 dias, os tratamentos com H₂SO₄ (1,2%) e gesso (1,6%) mostraram os menores valores de PST, seguidos por CaCl₂ (2,0%) e enxofre (3,5%), mantendo a tendência observada nos períodos anteriores.

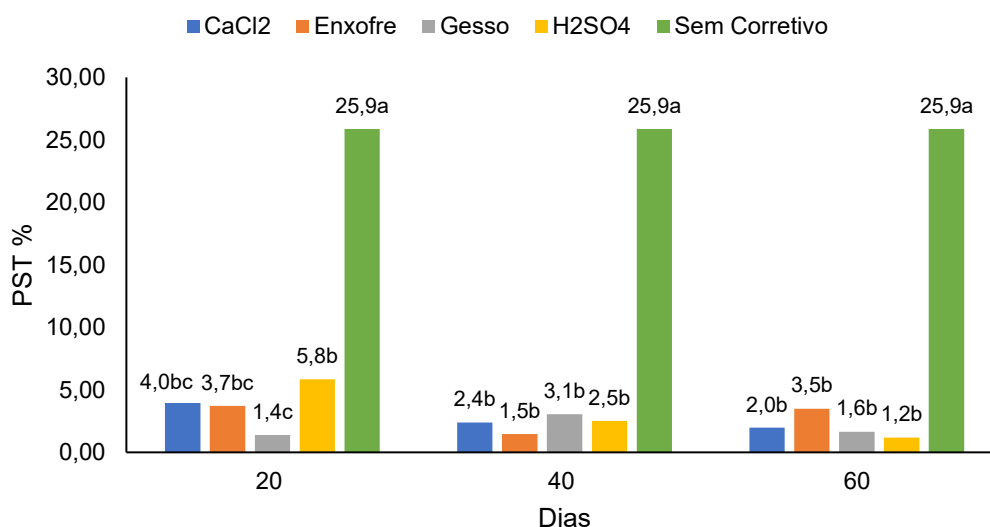
As mudanças observadas na PST decorrem essencialmente de reações de troca catiônica e solubilização mineral. No caso dos corretivos à base de cálcio (CaCl₂ e gesso), o mecanismo predominante é a substituição do Na⁺ por Ca²⁺ no complexo de troca, assim, o Ca²⁺ liberado pelo corretivo ocupa sítios de troca originalmente ocupados por Na⁺, que passa para a solução do solo, este Na⁺ é então eliminado pela lavagem, sobretudo como NaCl (quando proveniente de CaCl₂) ou como Na₂SO₄ (quando proveniente de gesso), em solos contendo carbonatos de cálcio (calcita,

dolomita), o aporte de H^+ pelo enxofre oxidado ou pelo ácido sulfúrico solubiliza esses minerais, liberando Ca^{2+} adicional para troca e formando gesso secundário (LUCENA et al., 2015).

Outros trabalhos, como Miranda et al. (2008), verificaram que a aplicação de solução de $CaCl_2$ reduziu a PST após 60 dias, continuando em declínio até 120 dias, evidenciando a eficácia do Ca^{2+} solúvel no curto prazo. Sá et al. (2013) também observaram redução linear de pH e PST com doses crescentes de enxofre elementar, acompanhada de aumento de Ca^{2+} e Mg^{2+} no solo. Já Leite et al. (2010) compararam gesso e ácido sulfúrico em solo irrigado e concluíram que ambos diminuíram a PST e o pH, mas que o gesso foi mais eficiente na remoção de sódio trocável do que o H_2SO_4 . Caso que se confirmou com Marrocco-Bento et al. (2017) onde observaram, em incubação de 30 dias, que o sulfato de cálcio reduziu mais eficientemente a porcentagem de sódio trocável (PST) do que o enxofre elementar, indicando maior eficácia do gesso na troca $Na^+ - Ca^{2+}$.

Nesse sentido, os resultados demonstram que todos os corretivos utilizados foram eficazes na redução do teor de sódio trocável ao longo do tempo, quando comparados ao solo sem tratamento. Essa redução tem reflexo direto nos valores de PST, uma vez que esse parâmetro representa a proporção de sódio trocável (Na^+) em relação ao total de cátions trocáveis presentes no solo.

Figura 7- Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de PST (percentual de sódio trocável).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

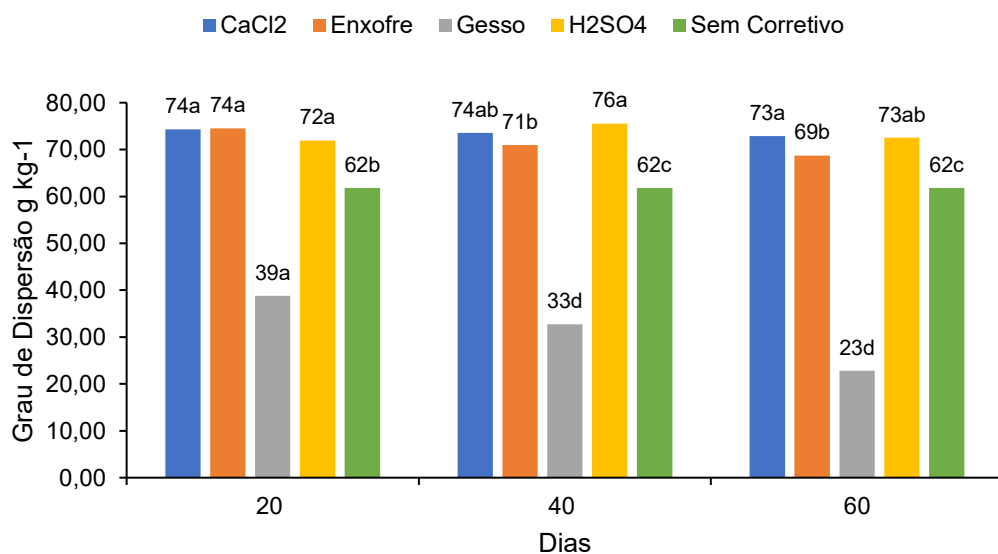
Sobre os aspectos de grau de dispersão das argilas, o tratamento com gesso, sobre os aspectos físicos do solo, conseguiu se sobressair, como no caso do grau de dispersão das argilas, onde se destacou por apresentar os menores índices, diferindo estatisticamente dos demais: 39, 33 e 23 g kg⁻¹ no dia 20, 40 e 60, respectivamente, conforme mostra a Figura 8. Em contrapartida, aos 20 dias, os corretivos CaCl₂ (74 g kg⁻¹), Enxofre (74 g kg⁻¹) e H₂SO₄ (72 g kg⁻¹) apresentaram médias superiores ao tratamento Sem Corretivo (62 g kg⁻¹), evidenciando maior taxa de dispersão de argilas por quilograma de solo. Aos 40 dias, as médias da variável analisada manteve-se similar ao da avaliação anterior, com redução no índice do Enxofre para 71 g kg⁻¹ e do Gesso para 33 g kg⁻¹, enquanto o ácido sulfúrico se encontrou com média de dispersão de 76 g kg⁻¹.

Aos 60 dias, o tratamento com Enxofre apresentou igualdade estatística apenas ao ácido sulfúrico, aproximando-se também do CaCl₂. O mecanismo de ação para a melhoria da estrutura está relacionado ao fato de que o solo salino-sódico contém excesso de Na⁺, o qual promove a dispersão das argilas, reduzindo a porosidade e a infiltração (VITAL et al., 2005). A aplicação de gesso agrícola (CaSO₄·2H₂O) fornece Ca²⁺ à solução do solo, que substitui o Na⁺ nos sítios de troca

catiônica, o Na^+ liberado forma Na_2SO_4 solúvel, sendo posteriormente removido por lixiviação (BRASIL et al., 2020). Como consequência, a fração coloidal do solo torna-se saturada em Ca^{2+} , em substituição ao Na^+ , os cátions bivalentes comprimem a camada dupla difusa nas superfícies das argilas, reduzindo sua espessura, onde essa compressão eletrostática promove a floculação das partículas de argila, agregando a fração coloidal antes dispersa (DE HOLANDA LEITE, 2022).

Conforme observado por Ferreira (1997), a aplicação de gesso em solo disperso por sódio aumenta a condutividade hidráulica, pois a substituição do Na^+ pelo Ca^{2+} reduz a espessura da dupla camada difusa, de forma que a fração coloidal do solo, antes dispersa, agrega-se, restabelecendo a porosidade e melhorando a permeabilidade do solo. Por outro lado, observações no Nordeste brasileiro indicam que o enxofre, ao promover acidificação, melhora atributos químicos, mas necessita de suprimento de Ca^{2+} para alcançar máxima eficiência (ARAÚJO et al., 2015).

Figura 8-Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de grau de Dispersão de Argilas.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

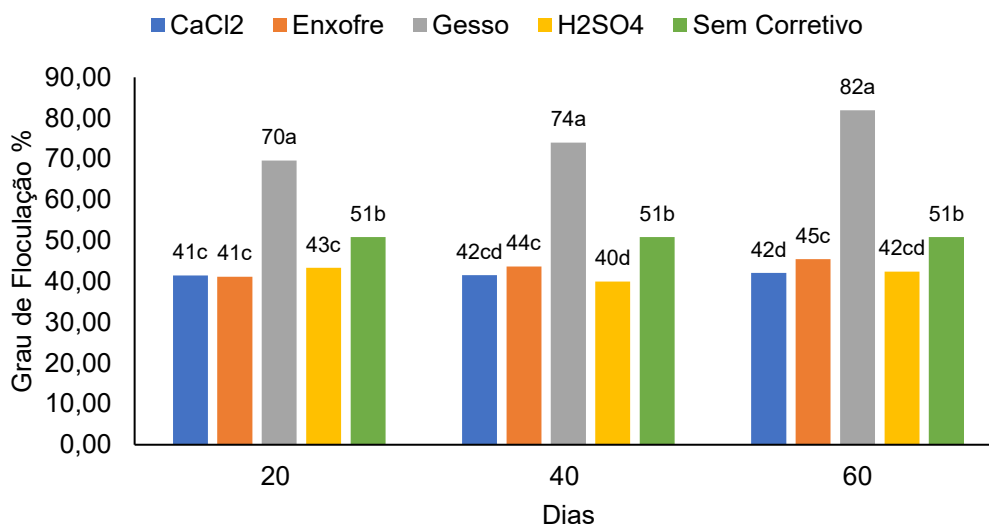
Quanto ao grau de floculação das argilas (Figura 9), o gesso obteve, em todos os dias avaliados, valores médios superiores aos demais corretivos: 70%, 74% e 82%

para os dias 20, 40 e 60, respectivamente. Os corretivos CaCl_2 e Enxofre, ambos aos 20 dias, obtiveram médias de 41%, seguidos do ácido sulfúrico com 43%, enquanto o tratamento sem uso de corretivos se diferenciou de todos, com 51%. Aos 40 dias, os tratamentos com CaCl_2 (42%) e Enxofre (45%) apresentaram igualdade estatística, com o mesmo CaCl_2 se aproximando do H_2SO_4 (40%) e o Gesso se isolando com 74%.

Aos 60 dias, o Gesso aumentou a floculação para 82%. Já o Cloreto de Cálcio (CaCl_2) se manteve com 42% e o ácido sulfúrico (H_2SO_4) com 42% obtiveram igualdade estatística, com o H_2SO_4 desta vez também se igualando ao Enxofre. Esses resultados demonstram eficiência relativa distinta: o gesso superou amplamente os demais, enquanto o CaCl_2 e as fontes ácidas mantiveram floculação aproximada à do solo inicial.

O gesso libera gradualmente Ca^{2+} na solução do solo, promovendo troca iônica com o Na^+ adsorvido e deslocando-o do complexo de troca. Esse processo aumenta a atividade de Ca^{2+} e SO_4^{2-} no meio, deslocando o Na^+ para a solução (DOS SANTOS et al., 2005). Shainberg e Letey (1984) alertam que a retirada abrupta de sais da solução do solo pode induzir dispersão coloidal, possivelmente explicando o desempenho insatisfatório do CaCl_2 nesses resultados. De forma semelhante, Araújo et al. (2017), em estudos com solo de Pernambuco, relataram elevado grau de floculação em amostras de solo salino-sódicos incubadas com 100% da necessidade de gesso, faixa compatível com os percentuais obtidos neste trabalho, corroborando que doses adequadas de gesso, onde o mesmo promove forte floculação das argilas.

Figura 9- Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a variável de grau de Floculação das Argilas.



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

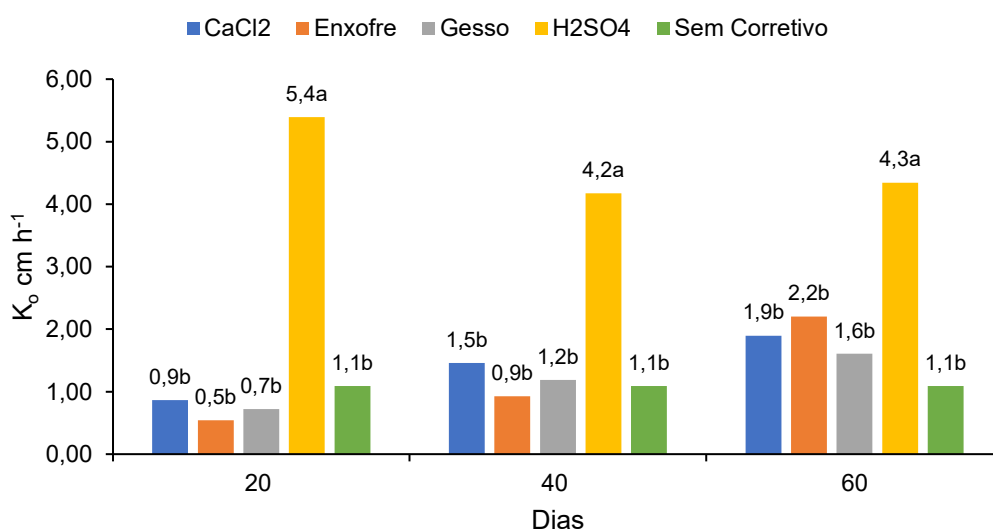
A Figura 10 mostra a relação dos diferentes corretivos para solos salino-sódicos em relação as médias de condutividade hidráulica (K_o) e dos dias de avaliação (20, 40 e 60 dias). Já na primeira avaliação, aos 20 dias, nota-se que o tratamento com ácido sulfúrico aumentou de imediato a condutividade hidráulica do solo ($5,4 \text{ cm h}^{-1}$), diferentemente dos demais corretivos CaCl_2 ($0,9 \text{ cm h}^{-1}$), Enxofre ($0,5 \text{ cm h}^{-1}$) e Gesso ($0,7 \text{ cm h}^{-1}$) que não diferiram significativamente do tratamento Sem Corretivo ($1,1 \text{ cm h}^{-1}$). Essa situação persistiu até a última avaliação do experimento; porém, observa-se um notável acréscimo na condutividade hidráulica para os corretivos CaCl_2 ($1,9 \text{ cm h}^{-1}$), Enxofre ($2,2 \text{ cm h}^{-1}$) e Gesso ($1,6 \text{ cm h}^{-1}$). O oposto ocorreu com o H_2SO_4 , que apresentou um decréscimo para $4,3 \text{ cm h}^{-1}$.

Essa resposta rápida se deve ao fato da ação do ácido sulfúrico sobre as características químicas do solo serem de imediato, atuando também na rápida redução do pH do solo e disponibilidade para reação dos demais nutrientes (DE ARAÚJO et al. 2017).

Além disso, há evidências de que a acidificação provocada pelo H_2SO_4 pode solubilizar compostos de alumínio e ferro que auxiliam na estabilização dos agregados (PRATHER et al., 1978). Esse comportamento corrobora estudos prévios realizados

em solos sódicos calcários, nos quais o H_2SO_4 se mostrou mais eficaz que o gesso na rápida redução da sodicidade e na recuperação da permeabilidade do solo (PRATHER et al., 1978). Ressalta-se, entretanto, que o uso de ácido sulfúrico envolve custos e cuidados operacionais elevados, o que, na prática, pode limitar sua aplicação, apesar de sua comprovada eficiência técnica. A relação negativa entre sodicidade e condutividade hidráulica aqui observada é consistente com os resultados obtidos por Freire et al. (2003), que, em diferentes solos de Pernambuco, constataram redução acentuada da K_0 relativa com o aumento da relação de adsorção de sódio (RAS) da água de percolação e do percentual de sódio trocável.

Figura 10 -Representação da média dos corretivos em diferentes dias em relação a K_0 do solo (condutividade hidráulica).



Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Fonte – O autor, 2025.

A Tabela 5 mostra a análise dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis avaliadas, onde permitiu identificar relações significativas segundo os critérios de classificação de Cohen (1988), que define valores de correlação como pequenos ($0,10 < r \leq 0,29$), médios ($0,30 < r \leq 0,49$) e grandes ($0,50 < r \leq 1,00$).

Houve uma correlação negativa forte entre o pH do solo e a condutividade hidráulica ($r = -0,84$), indicando que, à medida que o pH diminui, a condutividade hidráulica aumenta. Embora esse resultado possa parecer incomum, já que a redução do pH favorece a dispersão de argilas, como demonstrado pela correlação negativa moderada entre pH e grau de dispersão, esse processo, que normalmente leva à

obstrução dos poros e consequente redução da condutividade, pode ter sido influenciado por outros fatores. Um deles é o tempo entre a dispersão e a medição da condutividade hidráulica: se o selamento dos poros ainda não tiver ocorrido de forma efetiva, é possível observar um aumento transitório na condutividade hidráulica. Assim, embora a teoria aponte para menor condutividade hidráulica em solos mais ácidos, os resultados observados refletem condições dinâmicas específicas do solo analisado, como também discutido por Suarez et al. (1984), que destacam a influência direta do pH na condutividade hidráulica e na dispersão das argilas.

A condutividade elétrica do solo (CE) apresentou correlações negativas com os teores de cálcio e potássio na solução do solo. Apesar de fracas, essas correlações sugerem que à medida que os teores desses cátions aumentam na solução do solo (são lixiviados) a uma tendência de os níveis da condutividade elétrica do solo diminuir.

Ao analisarmos separadamente os teores desses nutrientes no solo e na solução, observou-se uma correlação negativa forte entre o potássio no solo e na solução, indicando que o processo de lixiviação foi efetivo. O cálcio apresentou tendência semelhante, mas com correlação fraca. Para o sódio, a correlação entre solo e solução foi positiva e forte. Embora esse comportamento é o inverso do esperado, uma vez que com a lixiviação do sódio esperava-se uma correlação negativa entre as variáveis solo e solução do solo para esse elemento. Já os teores de sódio no solo foram determinados pelo extrator Mehlich-1, que pode solubilizar também formas não trocáveis, superestimando os valores. Esse tipo de interferência também foi discutido por Santos et al. (2015), que apontam a capacidade do Mehlich-1 em extrair tanto formas trocáveis quanto fracamente retidas. O mesmo padrão foi observado para o magnésio, sugerindo que um comportamento semelhante também pode ter ocorrido com esse nutriente.

Tabela 5 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os atributos físicos e químicos do solo e atributos químicos da solução do solo.

	pH	C.E	P _{disp.}	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	PST	K _o	Grau de Dispersão	Grau de Floculação	pHSS	CESS	K ⁺ SS	Na ⁺ SS	Ca ²⁺ SS
C.E	-0,04															
Psolo	0,51	0,27														
Na⁺	0,02	0,99	0,28													
K⁺	0,34	0,73	0,63	0,75												
Ca²⁺	-0,04	0,96	0,26	0,95	0,70											
Mg²⁺	0,04	0,99	0,27	1,00	0,75	0,95										
PST	0,01	0,98	0,31	0,99	0,77	0,93	0,98									
K_o	-0,84	-0,20	-0,40	-0,24	-0,46	-0,18	-0,26	-0,22								
Grau de Dispersão	-0,41	-0,03	-0,23	-0,01	-0,02	-0,21	-0,02	0,02	0,28							
Grau de Floculação	0,42	0,02	0,23	0,01	0,03	0,21	0,02	-0,02	-0,28	-1,00						
pHSS	0,77	-0,31	0,46	-0,12	0,32	0,10	0,11	-0,10	-0,52	-0,55	0,56					
CESS	0,68	-0,25	0,46	-0,05	0,40	-0,28	0,03	0,05	-0,60	-0,09	0,09	0,42				
K⁺SS	0,00	-0,12	-0,38	-0,32	-0,77	-0,20	-0,34	-0,29	-0,03	-0,17	0,16	-0,11	0,10			
Na⁺SS	0,22	0,08	0,49	0,38	0,87	0,16	0,41	0,38	-0,17	0,06	-0,05	0,23	0,21	-0,91		
Ca²⁺SS	0,59	-0,15	0,58	0,22	0,58	-0,19	0,22	0,27	-0,42	0,01	0,00	0,48	0,83	-0,25	0,51	
Mg²⁺SS	0,41	0,10	0,50	0,19	0,52	0,00	0,34	0,22	-0,42	-0,10	0,11	0,15	0,82	-0,10	0,39	0,76

Onde: pH (pH no solo); pH (pH na solução do solo); C.E (condutividade elétrica no solo); C.ESS (condutividade elétrica da solução do solo); P_{disp.} (fosforo disponível no solo), Na⁺ (sódio no solo); Na⁺SS (sódio na solução do solo); K⁺ (potássio no solo); K⁺SS (potássio na solução do solo); Ca²⁺ (cálcio no solo); Ca²⁺SS (cálcio na solução do solo); Mg²⁺ (magnésio no solo); Mg²⁺ (magnésio na solução do solo); PST (percentual de sódio trocável); K_o (Condutividade hidráulica); ° de dispersão (grau de dispersão das argilas); ° de floculação (grau de floculação das argilas).

Fonte: Autor, 2025.

6 CONCLUSÃO

Todos os corretivos químicos utilizados, dentro das condições de 100% da capacidade de retenção de água, foram eficientes na correção do solo salino-sódico já aos 20 dias de incubação.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, A. S. et al. Aplicação de corretivos alternativos em solo salinizado com cultivo de *Sorghum bicolor* L. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 13, n. 4, p. 452–458, 2018.
- ALBUQUERQUE, A. S. et al. Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*. **Revista de Ciências Agrárias (Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences)**, Belém, v. 61, n. 13, p. 1–8, 2018.
- ARAÚJO, A. H. C. de. **Biorremediação de solos salinizados: uma alternativa para o semiárido brasileiro**. 2023. 36 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Instituto Federal da Paraíba, Campus Picuí, 2023.
- ARAÚJO, J. L. et al. Enxofre elementar ou sulfato de cálcio para remediação de solos salino-sódicos? **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 388–396, 2015. Disponível em: <https://www.agro.ufg.br/pat>. Acesso em: 26 maio 2025.
- AZEVEDO, P. R. L. et al. Efeito dos sais e da qualidade da água no solo e na planta. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 1, n. 1, p. 1–12, 2017.
- BARROS, M. de F. C. et al. Influência da aplicação de gesso para correção de um solo salino-sódico cultivado com feijão caupi. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 9, n. 1, p. 77–82, 2009.
- BARROS, M. F. C. et al. Aplicação de gesso e calcário na recuperação de solos salino-sódicos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 320–326, 2005.
- BARROS, M. F. C. et al. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, p. 59–64, 2004.

BARROS, M. de F. C. **Recuperação de solos salino-sódicos pelo uso do gesso de jazida e calcário**. 2001. 112 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001.

BARROS, M. F. C. et al. Avaliação de níveis de gesso para correção de sodicidade de solos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 1, p. 17–21, 2006.

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The Nature and Properties of Soils**. 14. ed. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2008. 975 p.

BRASIL, E. C. et al. Uso de gesso na agricultura. In: RIBEIRO, A. C. et al. (org.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes na Amazônia: 5ª aproximação**. Belém: Embrapa, 2020. p. 135–147.

DE ARAÚJO, M. M. et al. Técnicas utilizadas na recuperação de solos afetados por sais. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 1, n. 2, p. 1–11, 2017.

DE HOLANDA LEITE, M. J. **Gesso e rejeitos de mineração na correção de um solo salino-sódico e no crescimento inicial do maracujazeiro amarelo**. [S.l.]: Amplla Editora, 2022.

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

DE VASCONCELOS, R. R. A. et al. Características físicas de solos salino-sódicos do semiárido pernambucano em função de diferentes níveis de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, p. 1318–1325, 2013.

DIAS, N. D. et al. Efeitos dos sais no solo e na planta. In: GHEYI, H. R. et al. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCT Sal, 2010. v. 1, p. 129–141.

DIAS, A. S. et al. Crescimento e produção de algodoeiro de fibra colorida cultivado em solo salino-sódico e adubação orgânica. **Irriga**, Fortaleza, v. 1, n. 1, p. 260, 2016.

DOS SANTOS, M. de F. G. et al. Solo sódico tratado com gesso agrícola, composto de lixo urbano e vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 307–313, 2005.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.

ESWAR, D. et al. Drivers of soil salinity and their correlation with climate change. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 50, p. 310–318, 2021. DOI: 10.1016/j.cosust.2020.10.015.

FAO. 1,5 bilhões de pessoas vivem com solos salgados demais para ser fértil. **Nações Unidas Brasil**, 20 out. 2021. Disponível em: <https://brasil.un.org/>. Acesso em: 26 abr. 2025.

FARIA, C. M. B. et al. Ação de calcário e gesso sobre características químicas do solo e na produtividade e qualidade do tomate e melão. **Horticultura Brasileira**, v. 21, p. 615–619, 2003.

FASSBENDER, W. H. **Química de suelos**. San José: IICA, 1986. 398 p.

FERREIRA, P. A. et al. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R. et al. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura**. Fortaleza: INCT Sal, 2010. p. 21–41.

FREIRE, M. B. G. dos S. et al. Condutividade hidráulica de solos de Pernambuco em resposta à condutividade elétrica e RAS da água de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, p. 45–52, 2003.

GHARAIBEH, M. A. et al. Leaching and reclamation of calcareous saline-sodic soil by moderately saline and moderate-SAR water using gypsum and calcium chloride. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, p. 713–719, 2009. DOI: 10.1002/jpln.200800254.

GUPTA, R. K.; ABROL, I. P. Salt affected soils: their reclamation and management for crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 11, p. 223–288, 1990.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE PERNAMBUCO – IPA. **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**. Recife: IPA, 2008. 406 p.

KEREN, R. et al. Settling and flocculation value of sodium montmorillonite particles in aqueous media. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 76–80, 1988.

KOBIYAMA, M. et al. Áreas degradadas e sua recuperação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 22, n. 210, p. 10–17, 2001.

LEITE, E. M. et al. Redução da sodicidade em solo irrigado com a utilização de ácido sulfúrico e gesso agrícola. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 2, p. 110–116, 2010.

LUCENA, F. T. et al. Enxofre elementar melhora os atributos químicos de um solo degradado pelo excesso de sais e de sódio. In: **Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**, 2015.

MAJOR, I.; SALES, J. C. **Mudanças climáticas e desenvolvimento sustentável**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2012.

MEDEIROS, W. P. Atributos químicos em solo salino-sódico e efeito do ácido sulfúrico no crescimento da *Prosopis juliflora*.

MELO, M. R. et al. Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso mineral. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 376–380, 2008.

MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. **Química e mineralogia do solo. Volume 1: conceitos básicos e aplicações**. 3. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2022. 638 p.

MIRANDA, M. A. et al. Condicionadores químicos e orgânicos na recuperação de solo salino-sódico em casa de vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, 2011.

MIRANDA, M. F. A. et al. Correção de solo salino-sódico com soluções de cloreto de cálcio cultivado com sorgo sudanense. **Revista Caatinga**, v. 21, n. 5, p. 18–25, 2008.

OLIVEIRA, M. **Gênese, classificação e extensão de solos afetados por sais**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

OLIVEIRA NETO, M. B. et al. Degradação dos solos por sais numa área do Vale do Submédio do Rio São Francisco. In: **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, 29., 2010, Guarapari. Anais [...]. Viçosa: SBCS, 2010. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/871011>. Acesso em: 07 maio 2025.

PEDROTTI, A. et al. Causas e consequências do processo de salinização dos solos. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 2, p. 1308–1324, 2015.

PITMAN, M. G.; LÄUCHLI, A. Global impact of salinity on agricultural ecosystems. In: LÄUCHLI, A.; LÜTTGE, U. (Org.). **Salinity: environment – plants – molecules**. New York: Springer, 2002. p. 3–20.

PRATHER, R. J. et al. Efficient amendment use in sodic soil reclamation. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, n. 5, p. 782–786, 1978.

QADIR, M. et al. Phytoremediation of sodic and saline sodic soils. **Advances in Agronomy**, v. 96, n. 1, p. 197–247, 2007.

QUEIROZ, J. E. et al. **Avaliação e monitoramento da salinidade do solo**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

RAIJ, B. VAN. Algumas reflexões sobre análise de solo para recomendação de adubação. In: **Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas**, 20., 1992, Piracicaba. Anais [...]. Piracicaba: SBCS, 1992. p. 71–87.

RIBEIRO, M. R. et al. Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: GHEYI, H. R. et al. (Org.). **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. Fortaleza: INCT Sal, 2010. p. 12–19.

RHOADES, J. D. et al. **Uso de águas salinas para produção agrícola**. Campina Grande: UFPB, 2000. 117 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, n. 48).

RUIZ, H. A. et al. Características químicas de solos salino-sódicos submetidos a parcelamento da lâmina de lixiviação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, p. 1119-1126, 2004.

SÁ, J. F. et al. **Nutrição vegetal em solos salinos**. Salvador: UFBA, 2015.

SADIQ, T. et al. Amelioration of saline-sodic soils with tillage implements and sulfuric acid application. **Pedosphere**, v. 17, n. 2, p. 182–190, 2007. DOI: 10.1016/S1002-0160(07)60022-7.

SANTOS, J. et al. Eficiência de extratores de potássio disponível em solos do estado da Paraíba com graus de desenvolvimento pedogenético diferentes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, e0140055, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/TDWYPsQStThx63YkZVJXbwG/>. Acesso em: 27 jun. 2025.

SANTOS, R. V. dos; HERNÁNDEZ, F. F. **Recuperação de solos afetados por sais**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

SANTOS, R. V. dos; MURAOKA, T. **Interações salinidade e fertilidade do solo**. [S.l.]: [s.n.], 1997.

SANTOS, R. V. dos. **Correção de um solo salino-sódico e absorção de nutrientes pelo feijoeiro vigna (*Vigna unguiculata* (L.) Walp)**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1995. 120 f. Tese (Doutorado).

SEVERO, P. J. da S. et al. Incubação e doses de enxofre elementar sobre os atributos químicos de um solo com excesso de sais e sódio. [S.l.]: [s.n.], 2017.

SHAINBERG, I. et al. Use of gypsum on soils: a review. [S.l.]: Springer US, 1989. 111 p.

SILVA, J. L. A. et al. Evolução da salinidade em solos representativos do Agropólo Mossoró-Assu cultivado com meloeiro com água de diferentes salinidades. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 7, n. 4, p. 26–31, 2011.

SILVEIRA, A. P. P. da. **Solos e recursos hídricos**. São Paulo: Editora Senac São Paulo, 2022. 174 p.

SOUSA, I. T. et al. Atuação de diferentes corretivos na recuperação de solo salino-sódico cultivado com *Pithecellobium dulce* (Roxb.) Benth. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 1, p. 626–637, 2024.

SUAREZ, D. L. et al. Effect of pH on saturated hydraulic conductivity and soil dispersion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, n. 1, p. 50–55, 1984. DOI: 10.2136/sssaj1984.03615995004800010010x.

STAMFORD, N. P. et al. Efeito do enxofre inoculado com *Thiobacillus* na correção de solos salinos e no crescimento de leguminosas como feijão-caupi e inhame. **The Journal of Agricultural Science**, v. 139, n. 3, p. 275–281, 2002.

STAMFORD, N. P. et al. Effectiveness of sulfur with *Acidithiobacillus* and gypsum in chemical attributes of a Brazilian sodic soil. **World Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 23, n. 10, p. 1433–1439, 2007.

TAVARES FILHO, A. N. et al. Incorporação de gesso para correção da salinidade e sodicidade de solos salino-sódicos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 247–252, 2012.

TAVARES FILHO, A. N. et al. Níveis da necessidade de gesso sobre as características físico-químicas e na correção de solos salino-sódicos do perímetro irrigado de Ibimirim (PE). [S.l.]: [s.n.], 2010.

VITAL, A. F. M. et al. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso e fósforo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 9, p. 30–36, 2005.

ZIA, M. H. et al. Effectiveness of sulphuric acid and gypsum for the reclamation of a calcareous saline-sodic soil under four crop rotations. **Journal of Agronomy & Crop Science**, v. 193, p. 262–269, 2007. DOI: 10.1111/j.1439-037X.2007.00262.x.

