

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

EMANUELLE MARIA DA SILVA

**REVEGETAÇÃO COM ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA E
ALTERAÇÕES NAS PROPRIEDADES DE SOLO DEGRADADO NO
SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO**

RECIFE

2022

Emanuelle Maria da Silva
Engenheira Agrônoma

Revegetação com espécies nativas da Caatinga e alterações nas propriedades de solo degradado no semiárido de Pernambuco

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutora em Ciência do Solo.

Orientador: Prof.^a Dr.^a M^a Betânia G. dos S. Freire

Coorientadores: Dr. Josimar Gurgel Fernandes
Dr.^a Giselle Gomes Monteiro Fracetto

**Recife
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S586r Silva, Emanuelle Maria da
Revegetação com espécies nativas da Caatinga e alterações nas propriedades de solo degradado no semiárido de Pernambuco / Emanuelle Maria da Silva. - 2022.
137 f. : il.
- Orientadora: Maria Betania Galvao dos Santos Freire.
Coorientador: Josimar Gurgel Fernandes.
Inclui referências e apêndice(s).
- Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Recife, 2022.
1. Desertificação. 2. Solo afetado por sais. 3. Ksat. 4. Mecanismos de tolerância. 5. Atividade enzimática. I. Freire, Maria Betania Galvao dos Santos, orient. II. Fernandes, Josimar Gurgel, coorient. III. Título

EMANUELLE MARIA DA SILVA

Revegetação com espécies nativas da Caatinga e alterações nas propriedades de solo degradado no semiárido de Pernambuco

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciência do Solo.

Aprovada em 28 de março de 2022

Prof^a. Dr^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

Orientadora

Universidade Federal Rural de Pernambuco

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Hidelblandi Farias de Melo

Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Luiz Guilherme Medeiros Pessoa

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Giselle Gomes Monteiro Fracetto

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Mateus Rosas Ribeiro Filho

Universidade Federal Rural de Pernambuco

Aos meus pais que sempre foram os meus
maiores apoiadores e incentivadores. E
sempre me ensinaram a importância da
educação e do conhecimento.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Trago muita gratidão em meu peito durante esta longa e árdua jornada que foi o doutorado. Não foi um período nada fácil e eu não teria conseguido sozinha. E sou muito grata primeiramente a Deus, que sempre me fez sentir seu cuidado ao longo deste tempo, de diferentes formas, principalmente colocando tantas pessoas em meu caminho (verdadeiros anjos) que foram essenciais para que eu superasse cada obstáculo e chegasse até aqui.

Aos meus pais, Elenice e Divanildo, que sempre cuidaram de mim com tanto amor, que acreditaram em mim, que me apoiaram a cada segundo em todos os momentos, em todas as decisões, mesmo sem entender muitas vezes. Vocês foram e são essenciais em todas as minhas conquistas, e a razão por eu nunca desistir de tentar. Eu amo vocês!

Ao meu irmão, Davidson, e as minhas sobrinhas, Maria Sophia e Maria Alice, por todo amor e carinho que sempre me proporcionaram e por em tantos momentos entenderem minhas ausências. Vocês são a motivo da minha alegria, e eu amo muito vocês!

A todos os meus familiares (avô, tias, tios, primas, primos e madrinha), por toda torcida e companheirismo, e por toda inspiração que vocês me trouxeram. Minha escolha em seguir uma carreira acadêmica se deve muito ao fato de vir de uma família de professores. Vocês sempre me mostraram extrema dedicação no que fazem, apesar das dificuldades que sempre encontraram de ser professor em um país que muitas vezes não os valorizam. De forma especial, agradeço a minha prima Kelly Amanda, com quem compartilhei um lar ao longo desses anos, e que sempre me apoiou e incentivou em tantos momentos.

A minha orientadora professora Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, que me acompanha desde a graduação e sempre foi minha maior incentivadora dentro desta Universidade. Agradeço por toda orientação ao longo destes mais de 10 anos, por todo apoio e valiosos ensinamentos, por toda paciência e empatia e por acreditar em mim quando nem eu mesma, muitas vezes, acreditava. Lhe admiro muito!

Ao meu coorientador Dr. Josimar Gurgel Fernandes, por todo apoio que foi essencial para a condução de todo o experimento em campo.

A Cinthya, Flávio, Danúbia e Hidelblandi que tanto me auxiliaram durante esta pesquisa, por toda paciência e disponibilidade em tirar minhas dúvidas.

Ao Sr. Evandro, proprietário da Fazenda Santa Maria, que gentilmente cedeu uma área para que pudéssemos instalar o experimento, e que sempre se mostrou tão solícito conosco, nos acolhendo da melhor forma possível juntamente com seus funcionários, Adriano, Sr. Neco, Búiu e dona Luciene.

A todos os professores do programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos valiosos ensinamentos, por toda a ajuda e aconselhamentos em especial a Izabel Galindo, Giselle Fracetto, Felipe Fracetto, Brivaldo Almeida, Edivan Souza, Fernando Freire, Valdomiro Souza Júnior e Ana Dolores Freitas.

As funcionárias ligadas ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Socorro e Vânia, por todo carinho e amizade, por sempre nos ajudarem e nos acolherem em tantos momentos

Aos técnicos dos laboratórios de Química e Física do Solo, Pedro e Eudes que tanto me auxiliaram durante a pesquisa.

A todos os meus colegas e amigos do Laboratório de Química do Solo, Paulo, Gabrielle, Lucca, Giovanna, Grazielle, Pedro, Clarissa, Luara, Tamires, Thiago, Patrick, Adão e Roberto por toda ajuda que me deram ao longo destes anos, em campo e em laboratório, pelos ensinamentos, pelo companheirismo e por todas as risadas também. Vocês fizeram os dias serem um pouco mais leves.

De forma muito especial, agradeço a Paulo, você foi essencial em minha trajetória, meu braço direito e esquerdo em muitos momentos, muito mais que um estagiário você foi um verdadeiro amigo, que tanto me aconselhou, me ensinou, me incentivou, que me contagiava com a sua alegria e não me deixou desistir. Você foi um verdadeiro anjo enviado por Deus na minha vida.

Aos amigos feitos por meio da Pós-Graduação, Amanda Lima, Mayame Brito, Aglair Cardoso, Danilo Rodrigues, Tiago Santos, Eduardo Santana, Cinthia Atanasio, Jaciane Rosa, William Ramos, Cíntia Gouveia, Marilya Gabryella, Nara Núbia, Isamor Gomes, Stella Carvalho, Lucía Nuñez, Luiz Henrique, Yure Romero, e de modo especial a Juliet Sousa, Petrônio Mendes, Adriana Bezerra, Glêvia Lima, Leandro Reis e Sueide Karina por todo ensinamento, momentos compartilhados, risadas, alegrias, tristezas e palavras de conforto. Vocês foram essenciais em meu caminho.

A Universidade Federal Rural de Pernambuco, casa onde me formei Engenheira Agrônoma, Mestra, e se Deus quiser, em breve doutora, pela formação de qualidade que recebi ao longo de todos estes anos.

A FACEPE pela concessão da bolsa, imprescindível para realização de meu doutorado.
Ao CNPq pelo apoio financeiro, de grande importância para realização do trabalho.

CAATINGA

Há um tempo.
Em que o tempo.
Não ajuda.
A chuva não pinga.
As nuvens não carregam.
E também secam.
Seco é o ar.
Céu parado.
Acabaram as farturas.
Semear o que,
Se o tempo já se fez.
Nada que vai nascer.
Terra que vai padecer.
Esperança de um tempo.
De uma renovada vegetação.
Para a vida no sertão.

Germano Gonçalves

Revegetação com espécies nativas da Caatinga e alterações nas propriedades de solo degradado no semiárido de Pernambuco

RESUMO GERAL

Mudanças no uso do solo tem provocado a degradação de extensas áreas no semiárido do Nordeste do Brasil, que, associada com os baixos índices e má distribuição da precipitação pluvial e elevada evapotranspiração, pode favorecer o acúmulo de sais no solo, apresentando uma série de estressores para as plantas e aumentando o risco de desertificação. Com a revegetação dessas áreas seria possível manter o equilíbrio ambiental neste ecossistema tão suscetível à degradação. Espécies nativas, devido ao seu alto grau de resiliência, têm potencial para uso em condições de estresse hídrico e salino, além de serem um importante regulador do clima, da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Porém, poucos estudos são realizados com estas espécies, principalmente em condições de campo e quanto a suas respostas bioquímicas para atenuação dos estresses abióticos. Assim, com o objetivo de avaliar o potencial de espécies nativas na recuperação de um solo salino no semiárido de Pernambuco, um experimento foi montado em blocos casualizados, com oito tratamentos (cultivo de seis espécies nativas, de *Atriplex nummularia* L., e o tratamento sem cultivo de planta), em quatro repetições. Amostras de solo foram coletadas, em diferentes tempos, totalizando 48 meses de acompanhamento, em diferentes profundidades (0-5, 5-25 e 25-50 cm) para avaliar alterações nos atributos físicos e químicos do solo, e 0-20 cm para avaliar alterações nos atributos microbiológicos. E, apenas ao final do acompanhamento em campo, foram coletadas folhas do terço médio das plantas, para a realização das análises bioquímicas. Os resultados foram submetidos à análise de variância e, quando significativos, suas médias foram testadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) e o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para identificar relações entre a salinidade e os atributos biológicos do solo. Os resultados mostraram que o uso de espécies arbóreas da Caatinga, como Catingueira, Mulungu e Pau Ferro, foram mais eficientes na melhoria dos atributos físicos do solo, sobretudo condutividade hidráulica (K_{sat}) e porosidade total (P), melhorando a permeabilidade do solo. Os valores de condutividade elétrica (CE), relação de adsorção de sódio (RAS) e porcentagem de sódio trocável (PST) permaneceram acima dos usados para classificar os solos como salinos e/ou sódicos, indicando que nenhuma espécie foi eficiente na atenuação da salinidade do solo, sendo necessário mais tempo de acompanhamento. O Na^+ trocável e a CE podem afetar negativamente o teor de carbono orgânico total (COT) e a atividade das enzimas β -Glucosidase e Urease. As espécies nativas podem se adaptar à salinidade, apresentando um sistema de defesa enzimático e não enzimático eficientes, e neste estudo tiveram desempenho superior à *Atriplex nummularia*. O Umbuzeiro apresentou o sistema de defesa antioxidante enzimático mais eficiente, com altas produções das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX), enquanto Aroeira e Pau-Ferro apresentaram um sistema de defesa antioxidante não enzimático mais eficiente, acumulando prolina e carboidratos solúveis que auxiliam no ajustamento osmótico.

Palavras-chave: Desertificação. Solo afetado por sais. K_{sat} . Mecanismos de tolerância. Atividade enzimática.

Revegetation with native species of the Caatinga and changes in the properties of degraded soil in the semiarid region of Pernambuco

GENERAL ABSTRACT

Land use changes have caused degradation of extensive areas in the semiarid region of Northeast Brazil. Associated with low rates and poor distribution of rainfall and high evapotranspiration, this can favor the accumulation of salts in soil, by stressors for plants and increasing the desertification risk. With the revegetation of these areas, it would be possible to maintain the environmental balance in this ecosystem that is so susceptible to degradation. Native species, due to their high degree of resilience, have potential for use under water and saline stress conditions, in addition to being an important regulator of climate, biodiversity, biogeochemical cycles and the physical, chemical and biological properties of the soil, however few studies are carried out with these, mainly under field conditions and regarding their biochemical responses to attenuate abiotic stresses. Thus, with the objective of evaluating the potential of native species in the recovery of a saline soil in the semiarid region of Pernambuco, an experiment was set up in randomized blocks, with eight treatments (cultivation of six native species and *Atriplex nummularia* L., and the treatment without cultivation of plant) in four replications. Soil samples were collected at different times, totaling 48 months of follow-up, at different depths (0-5, 5-25 and 25-50 cm) to assess changes in physical and chemical soil attributes, and 0-20 cm for evaluate changes in microbiological attributes. And leaves were collected from the middle third of the plants, for biochemical analysis at the end of field monitoring . The results were subjected to analysis of variance and when significant, their means were tested by Tukey's test ($p < 0.05$) and Pearson's correlation coefficient was calculated to identify relationships between salinity and biological attributes of the soil. The results showed that the use of Caatinga tree species, such as Catingueira, Mulungu and Pau Ferro, were more efficient in improving the physical attributes of the soil, especially hydraulic conductivity (Ksat) and porosity (P), improving soil permeability. Electrical conductivity (EC), sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) values remained above those used to classify soils as saline and/or sodic, indicating that no species was efficient in attenuating soil salinity, requiring more time to be monitored. Exchangeable Na^+ and EC may negatively affect total organic carbon (TOC) content and the activity of β -Glucosidase and Urease enzymes. Native species can adapt to salinity, presenting an efficient enzymatic and non-enzymatic defense system, and in this study they performed better than *Atriplex nummularia*. Umbuzeiro presented the most efficient enzymatic antioxidant defense system, with high production of superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX) enzymes, while Aroeira and Pau-Ferro presented a more efficient non-enzymatic antioxidant defense system, accumulating proline and soluble carbohydrates that help in the osmotic adjustment.

Keywords: Desertification. Salt affected soils. Ksat. Tolerance mechanisms. Enzymatic activity.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 3

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo.....	48
Figura 2 - Distribuição da precipitação pluvial no município de Caruaru – PE ao longo do ano, no período de 2016 a 2020.....	49
Figura 3 - Perfil do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco mésico estudado no semiárido de Pernambuco.....	50
Figura 4 - Disposição das plantas na parcela e na área útil de amostragem.....	55
Figura 5 - Planta de jatobá com sintomas de toxicidade por excesso de sais, planta de jatobá morta e raiz de jatobá aparentando primeiros sinais de impedimento no crescimento cultivadas em em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	62
Figura 6 - Diferença ao longo do tempo da condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.....	63
Figura 7 - Diferença ao longo do tempo da porosidade total (P) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.....	66
Figura 8 - Diferença ao longo do tempo da porosidade total (P) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.....	66
Figura 9 - Diferença ao longo do tempo da macroporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.....	67
Figura 10 - Diferença ao longo do tempo da macroporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.....	67
Figura 11 - Diferença ao longo do tempo da mesoporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.....	68
Figura 12 - Diferença ao longo do tempo na umidade da capacidade de campo (CC) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.....	68

Figura 13 – Condutividade elétrica de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex ao longo do tempo, na camada de 0-5 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	73
Figura 14 - Sódio (Na^+) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	79
Figura 15 - Potássio (K^+) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	79
Figura 16 - Cálcio (Ca^{2+}) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	80
Figura 17 - Magnésio (Mg^{2+}) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	80
Figura 18 - Relação de adsorção de sódio (RAS) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	81
Figura 19 – Potássio (K^+) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 0-5 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	85
Figura 20 - Cálcio (Ca^{2+}) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 0-5 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	86
Figura 21 - Magnésio (Mg^{2+}) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 25-50 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	86
Figura 22 - Porcentagem de sódio trocável (PST) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 25-50 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	89
Figura 23 – Matriz de correlação de Pearson entre a salinidade e os atributos microbiológicos de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.....	96

CAPÍTULO 4

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo.....	110
Figura 2 - Disposição das plantas na parcela e na área útil de amostragem.....	111
Figura 3 – Teores de clorofila a (Chl a), b (Chl b) e carotenoides em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	116
Figura 4 – Teores de proteína em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	117
Figura 5 – Teores de prolina em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	118
Figura 6 – Teores de aminoácidos e carboidratos em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	119
Figura 7 – Concentração de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	120
Figura 8 – Teor de malondialdeído (MDA) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	121
Figura 9 – Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	122
Figura 10 – Atividade das enzimas catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.....	123

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Caracterização química inicial da área de estudo.....	48
Tabela 2 - Atributos morfológicos do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco méxico do estudo no semiárido de Pernambuco.....	52
Tabela 3 - Composição granulométrica da TFSA, argila dispersa em água (ADA) e grau de floculação (GF) do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco méxico do estudo no semiárido de Pernambuco.....	53
Tabela 4 – Atributos químicos do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco méxico do estudo no semiárido de Pernambuco.....	54
Tabela 5 - Densidade do solo (D_s), condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}) e resistência mecânica à penetração das raízes na capacidade de campo (RP) de um PLANOSSOLO NÁTRICO degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	60
Tabela 6 - Porosidade total (P), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso) e capacidade de campo (CC) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	64
Tabela 7 - Valores médios de pH em água ($pH_{(H_2O)}$) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	70
Tabela 8 - Valores médios de pH da pasta saturada ($pH_{(P.S.)}$) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	71
Tabela 9 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	72

Tabela 10 - Valores médios dos cátions solúveis de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	75
Tabela 11 - Valores médios da relação de adsorção de sódio (RAS) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	78
Tabela 12 - Valores médios dos cátions trocáveis de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	82
Tabela 13 - Valores médios da porcentagem de sódio trocável (PST) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	88
Tabela 14 - Valores médios de carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (C-Mic), respiração basal do solo (C-CO ₂), quociente metabólico (qCO ₂) e quociente microbiano (qMic) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8 e 48 meses após o transplântio (MAT), na camada de 0-20 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	90
Tabela 15 - Valores médios das enzimas do solo de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e <i>Atriplex</i> , aos 0, 8 e 48 meses após o transplântio (MAT), na camada de 0-20 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.....	94

CAPÍTULO 4

Tabela 1 - Caracterização química inicial da área de estudo.....	109
Tabela 2 – Taxa de mortalidade de espécies nativas e <i>Atriplex nummularia</i> cultivadas em um solo degradado por sais no semiárido de Pernambuco.....	115

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	18
1.1 Hipótese	19
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral	19
1.2.2 Objetivos Específicos	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 O Semiárido de Pernambuco e a Caatinga	20
2.2 Mudanças no uso do solo da Caatinga e sua degradação	22
2.3 Indicadores de qualidade do solo	24
2.4 Efeitos dos sais nas plantas e seus mecanismos de tolerância a estresses abióticos	26
2.5 Fitorremediação e <i>Atriplex nummularia</i> L.	28
2.6 Espécies nativas da Caatinga.....	29
Referências Bibliográficas.....	30
3 PLANOSSOLO NÁTRICO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO POR ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA: ATRIBUTOS DO SOLO	44
Resumo	44
Abstract.....	45
3.1 Introdução.....	46
3.2 Material e Métodos.....	47
3.2.1 Área de estudo	47
3.2.2 Classificação do solo	50
3.2.3 Condução do experimento	54
3.2.4 Análises químicas do solo	56
3.2.5 Análises físicas do solo	56
3.2.6 Análises microbiológicas do solo	57
3.2.7 Análises estatísticas	58

3.3 Resultados e Discussão	58
3.3.1 Atributos físicos	58
3.3.2 Atributos químicos	69
3.3.3 Atributos microbiológicos.....	89
3.4 Conclusões	96
Referências Bibliográficas	97
4 BIOQUÍMICA DE PLANTAS NATIVAS DA CAATINGA E <i>Atriplex nummularia</i> LINDL. CULTIVADAS EM SOLO DEGRADADO POR SAIS NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO.....	105
Resumo.....	105
Abstract	106
4.1 Introdução	107
4.2 Material e Métodos	109
4.2.1 Área de estudo.....	109
4.2.2 Condução do experimento	110
4.2.1 Pigmentos fotossintéticos.....	111
4.2.2 Solutos orgânicos	112
4.2.3 Peroxidação lipídica e quantificação de peróxido de hidrogênio	112
4.2.3 Enzimas antioxidantes.....	113
4.2.3 Análise estatística.....	114
4.3 Resultados e Discussão	114
4.3.1 Mortalidade das plantas	114
4.3.2 Pigmentos fotossintéticos.....	115
4.3.3 Solutos orgânicos	117
4.3.4 Acúmulo de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica	119
4.3.5 Enzimas antioxidativas	122
4.4 Conclusões	123
Referências Bibliográficas	124

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	131
APÊNDICE A – Fotos do experimento.....	132

1 INTRODUÇÃO GERAL

A Caatinga, bioma exclusivamente brasileiro, é a vegetação predominante no semiárido que possui uma enorme biodiversidade. Mas, apesar de sua importância, é um dos biomas mais negligenciados no Brasil, de modo que apenas 1% do seu território é protegido por leis que garantam sua preservação.

Nas últimas décadas, a exploração deste ambiente tem se intensificado com a exploração inadequada da madeira e com o desmatamento para criação de áreas de cultivo e de pasto. Estas mudanças no uso do solo têm contribuído com a degradação de inúmeras áreas, que, aliada às condições climáticas locais, com baixos índices e má distribuição da precipitação pluvial e elevada demanda atmosférica, favorecem processos que levam à desertificação. Estas características também facilitam a formação de solos salinos, principalmente com a adoção de práticas inadequadas de manejo de irrigação e drenagem.

Nestas condições, a maioria das espécies convencionais e de interesse agrícola não consegue se desenvolver. Diversos estudos têm sido conduzidos ao longo dos anos utilizando espécies halófitas tolerantes ao estresse hídrico e salino, para reconduzir estes solos ao estado produtivo. A tolerância dessas espécies é o resultado de uma coordenação eficaz das vias fisiológicas e metabólicas, que incluem a homeostase dos íons, a osmorregulação e a defesa antioxidativa e, dentre elas, espécies do gênero *Atriplex* têm sido amplamente estudadas e recomendadas para recuperação de solos em ambiente salino e de déficit hídrico.

A fitorremediação, além de promover a revegetação de áreas abandonadas, aumento da biodiversidade e conservação do ambiente, pode proporcionar, a depender da espécie utilizada, uma renda por meio de oferta de madeira e biomassa vegetal para alimentação animal, créditos de carbono, etc., sendo uma solução viável economicamente para agricultores de baixa renda.

Ao revegetar estas áreas, as plantas contribuem além de benefícios nas propriedades químicas e físicas do solo, com o aporte de matéria orgânica, diminuem o risco de erosão, auxiliam numa maior captação e retenção de água no solo, de modo que a remediação é mais uniforme e atinge maiores profundidades no solo.

No entanto, poucos estudos têm sido conduzidos com espécies arbóreas no semiárido brasileiro e, principalmente, com plantas nativas da Caatinga. Muitas das espécies deste ecossistema têm potencial para usos múltiplos, para servir como fonte de alimento, combustível, forragem, fibra, resina, óleos essenciais e produtos farmacêuticos, mas os estudos sobre sua adaptabilidade às condições de estresse hídrico e salino ainda são escassos, principalmente em condições de campo.

1.1 Hipótese

- Espécies nativas da Caatinga e *Atriplex nummularia* possuem mecanismos de tolerância a estresses abióticos que lhe conferem a capacidade de se aclimatar e se desenvolver em ambientes suscetíveis a salinidade e estresse hídrico;
- Espécies nativas da Caatinga e *Atriplex nummularia* podem ser usadas na revegetação de áreas de solos degradados por sais, aumentando a cobertura vegetal e colaborando para o aporte de matéria orgânica do ambiente;
- Com um sistema radicular bem desenvolvido e capaz de alcançar grandes profundidades, as espécies arbóreas nativas da Caatinga serão eficientes para promover melhorias nos atributos físicos do solo, sobretudo naqueles relacionados ao fluxo de água no solo;
- Na revegetação e recuperação de solo afetado por sais no semiárido de Pernambuco as espécies nativas da Caatinga terão um desempenho superior em relação a *Atriplex nummularia*;

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar a adaptabilidade de espécies vegetais nativas da Caatinga em solo afetado por sais no semiárido.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Estudar variações nas propriedades químicas e físicas do solo em função do tempo e do cultivo das plantas;
- Verificar a influência das diferentes espécies vegetais na atividade dos microorganismos, por meio de variações no carbono da biomassa microbiana, respiração basal do solo e atividade enzimática;
- Monitorar o desenvolvimento e a ecofisiologia das plantas sob condições salinas com o tempo de cultivo sob condições naturais em campo;
- Avaliar se existem mecanismos de proteção a estresses ambientais nas espécies nativas do estudo;

- Comparar a eficiência das plantas nativas na recuperação de solo degradado em relação à *Atriplex nummularia* L.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Semiárido de Pernambuco e a Caatinga

O semiárido brasileiro, com área de 1.128.697 km² e compreendendo 1.427 municípios, de acordo com a Resolução 150, de 13 de dezembro de 2021 da Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), é uma das regiões secas mais populosas do mundo com mais de 27 milhões de habitantes (IBGE, 2011; MARENGO, 2008; SUDENE, 2021). E o semiárido de Pernambuco ocupa uma área de 86.341 km² com 137 municípios e população de 3.993.975 habitantes (IBGE, 2011; SUDENE, 2021).

A região possui alto potencial agrícola, porém, é afetada pela escassez de água e chuvas irregulares com uma precipitação média anual variando de 300 a 1.000 mm, concentrada em um período de 3 a 4 meses, seguido por uma estação seca estendida com duração de 8 a 9 meses (OLIVEIRA; SANTOS E SILVA; LIMA, 2017; PAGOTO et al., 2015). Isso, aliado às altas taxas de evapotranspiração, entre 1.500 e 2.000 mm ano⁻¹, produzem longos períodos de seca e alto índice de aridez (FERREIRA; SILVA; RUIZ, 2016; PAGOTO et al., 2015). Em Pernambuco, de modo particular, a precipitação média anual varia no Agreste entre 400 e 900 mm, e no Sertão alguns pontos entre 200 mm e 600 mm no Sertão do São Francisco, e de 400 a 900 mm nos Sertões do Araripe, Moxotó e Pajeú (APAC, 2019).

A seca é uma característica marcante do semiárido que faz parte da variabilidade climática natural da região e, de acordo com as projeções de mudanças climáticas, continuará a ocorrer e, provavelmente, se intensificará no futuro, com projeções que indicam possíveis aumentos de temperatura de 2 a 4 °C e redução de chuvas de 10 a 20% (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

O aumento da concentração de gases de efeito estufa e as mudanças no uso do solo na região são os principais fatores envolvidos nas mudanças climáticas e mostram uma tendência que pode resultar em uma mudança de regime climático de semiárido para árido (MARENGO; BERNASCONI, 2015). Uma possível aridificação da região no futuro, juntamente com uma deterioração do meio ambiente devido a práticas não sustentáveis de uso do solo, pode resultar em um aumento do risco de desertificação na região. Enquanto a aridez é uma característica

permanente de um clima seco, a desertificação é uma degradação do solo em áreas semiáridas e subúmidas secas, que pode ser ou não permanente (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017).

Nas últimas décadas, os períodos de seca anual no semiárido brasileiro têm sido comumente observados, sendo o período entre os anos de 2012 a 2016 considerado um dos mais graves com seca severa. Estes frequentes períodos de seca têm aumentado sua severidade e extensão espacial, proporcionando condições climáticas e hidrológicas extremas, com baixa pluviosidade e aumento da escassez de água (BARBOSA et al., 2018; MARENGO et al. 2013). Este cenário a longo prazo, juntamente com a salinidade da água e do solo, pode exacerbar a degradação ambiental, afetando o crescimento das plantas, além de ter grande impacto social e econômico na população, criando situações de riscos à segurança hídrica, energética e alimentar (EAKIN; LEMOS; NELSON, 2014; MARTIN-GUAY et al., 2018; SCHERER; VERBURG; SCHULP, 2018).

A salinidade e a sodicidade do solo são uma das principais causas de degradação e desertificação do solo em regiões de clima árido e semiárido, como o Nordeste brasileiro, pois a precipitação é insuficiente para impedir a lixiviação natural de sais liberados das rochas (BOUAZIZ et al., 2018; GORJI et al., 2020; MUNNS, 2002; TAGHADOSI; HASANLOU, 2017).

O aumento da concentração de sais no perfil do solo altera as propriedades físicas e químicas, promovendo perda de fertilidade e reduzindo a infiltração e o armazenamento de água no solo, o que leva ao escoamento superficial e à erosão (RIBEIRO et al., 2016b). Além de dificultar a absorção de água pelas raízes das plantas, devido ao aumento da pressão osmótica na solução do solo (MOHAMED et al., 2018; SANTOS et al., 2016). Devido aos solos da região serem, de modo geral, pouco profundos e pouco evoluídos, com presença de minerais facilmente alteráveis e argilominerais do tipo 2:1, muitas vezes rochosos e com baixa capacidade de infiltração e de armazenamento de água, este acúmulo de sais é favorecido (PAGOTO et al., 2015; SANTOS et al., 2012).

O levantamento de solos do estado de Pernambuco indica que os Neossolos Litólicos prevalecem no semiárido e cobrem uma área de 20.047 km², seguidos pelos Planossolos, cuja ocorrência está praticamente restrita ao semiárido, que ocupam uma área de 15.174 km². Outras classes com ocorrência na região semiárida são os Luvisolos (8.313 km²) e os Neossolos Regolíticos (4.900 km²) (ACCIOLY et al., 2017; ARAÚJO FILHO et al., 2000).

A vegetação predominante do semiárido é a Caatinga, um bioma exclusivo do Brasil que abrange uma área de cerca de 844.453 km² correspondendo a 10% do território brasileiro (GARIGLIO et al., 2010; KOCH; ALMEIDA-CORTEZ; KLEINSCHMIT, 2017). É

classificada como floresta tropical sazonalmente seca (PENNINGTON; LAVIN; OLIVEIRA-FILHO, 2009), florestas que possuem estações secas (definidas como o número de meses com precipitação ≤ 100 mm) com duração de seis meses ininterruptos (ALLEN et al., 2017; DEL CASTILLO et al., 2018; MURPHY; LUGO, 1986).

Sua vegetação é composta principalmente por plantas xerófitas, lenhosas, espinhosas, decíduas e semidecíduas com uma predominância de árvores e arbustos morfológicamente adaptados para suportar o estresse hídrico (MENDES et al., 2017; SÁNCHEZ et al., 2018).

Possui enorme biodiversidade endêmica, sendo considerada uma das florestas secas com maior biodiversidade contendo particularmente mais de 4.000 espécies de plantas, 962 gêneros e 153 famílias de plantas com flores (FERNANDES et al., 2020; KOCH; ALMEIDA-CORTEZ; KLEINSCHMIT, 2017; LEAL et al., 2005; SANTOS et al., 2014), de modo que cerca de 50% de sua cobertura vegetal original permanece relativamente intacta, apesar da alta densidade populacional humana e altas taxas de desmatamento (GARIGLIO et al., 2010). Além disso, este bioma foi identificado como uma das 37 maiores áreas silvestres do planeta (MITTERMEIER et al., 2003). No entanto, menos de 1% deste bioma é protegido como reserva natural (KOCH; ALMEIDA-CORTEZ; KLEINSCHMIT, 2017; RIBEIRO et al., 2016a; SÁNCHEZ et al., 2018; TOMASELLA et al., 2018).

Áreas naturalmente ocupadas pela Caatinga vem sendo desmatadas para uso dos recursos vegetais e expansão da exploração agropecuária com baixo controle, deixando os solos desprotegidos e suscetíveis à degradação. É preciso um maior esforço para a ampliação de trabalhos de revegetação que possibilitem a melhoria da qualidade ambiental como um todo, com o uso de espécies nativas e adaptadas ao clima semiárido.

2.2 Mudanças no uso do solo da Caatinga e sua degradação

A provável intensificação de secas extremas tem mostrado a importância de medidas proativas para aumentar a resiliência da população aos impactos esperados das secas. No entanto, embora a seca possa contribuir para a desertificação, as principais razões para ela são o sobrepastoreio, o aumento da frequência de incêndios, o desmatamento e a sobre-exploração das águas subterrâneas (MARENGO; TORRES; ALVES, 2017; TOMASELLA et al., 2018; SILVA et al., 2019a, 2019b, 2020). A Caatinga ocupa o terceiro lugar como o ecossistema mais degradado e destruído no Brasil, depois da Mata Atlântica e do Cerrado, tendo de 30 a 52% de sua cobertura vegetal alterada por atividades humanas (LEAL et al., 2005).

Devido ao baixo fornecimento hídrico é muito importante adotar um sistema de produção sustentável com práticas eficientes de manejo. Contudo, o que se observa na agricultura de subsistência desenvolvida na região é um sistema de corte e queima, onde o solo permanece exposto sem aporte de nutrientes e cobertura vegetal, levando a um alto índice de escoamento superficial durante o período chuvoso (MAIA et al., 2007; SOUSA et al., 2012).

Com esta vulnerabilidade agrícola atrelada às mudanças climáticas, a pecuária surge como a principal atividade da população rural, sendo precursora da substituição sistemática da vegetação nativa por pastagens e responsável por graves problemas ambientais como perda de biodiversidade e desertificação (ALMEIDA et al. 2017; LEAL et al. 2005; OLIVEIRA FILHO et al., 2019; SILVA et al., 2017a; SOUSA et al., 2012).

O sobrepastoreio é a prática mais prejudicial nos solos da Caatinga, pois reduz a vegetação nativa, leva à perda de matéria orgânica que pode afetar diretamente as comunidades microbianas, bem como a disponibilidade de nutrientes no solo (DONG et al., 2021; LI et al., 2016; WANG et al., 2020a; ZHOU et al., 2019). Conseqüentemente, aumenta os riscos de erosão, aumenta a compactação do solo por meio do pisoteio dos animais, o que diminui a porosidade do solo e aumenta a densidade, reduzindo as taxas de infiltração de água, gerando impactos negativos para as plantas e seres humanos (OLIVEIRA FILHO et al., 2019; PEREIRA et al., 2021; SCHULZ et al., 2016; YUAN et al., 2019; ZHU et al., 2018).

A área de pastagem no bioma estende-se por 293.756,4 km², representando 35,5% do bioma e 19,8% da área de pastagem no Brasil (BUSTAMANTE et al., 2012), que é uma área significativa, visto que o Brasil é um dos maiores produtores de gado do mundo. A expansão da área de pastagens resulta em parte da crescente demanda por alimentos, que tem favorecido a mudança na cobertura do solo e no uso da terra e o conseqüente aumento nas taxas de desmatamento (MENEZES et al., 2012).

Beuchle et al. (2015) mostraram, usando imagens Landsat, uma perda líquida geral de cobertura arbórea no bioma Caatinga de 15.571 km² ao longo de duas décadas (1990-2010), com apenas 63% da cobertura vegetal observada em 2010 em relação a 1990 e concluíram que o bioma Caatinga tem estado sob crescente pressão antrópica por muitos anos. A maioria das áreas foram predominantemente convertidas em pastagens e áreas de cultivo e, como conseqüência desse cenário, essas áreas podem se tornar mais suscetíveis aos processos de desertificação (SOUSA et al., 2012).

No semiárido de Pernambuco 39% do território foi modificado por atividades antrópicas, sobretudo pela agricultura e pecuária, juntas essas classes respondem por 37,5% (3.232.300 ha) dos 39% (3.376.600 ha) de áreas antropizadas da região. Dos 61% da paisagem

natural remanescente há um predomínio das áreas com Caatinga densa (32,6%) em relação às áreas de Caatinga aberta (26,5%), e observou-se uma associação entre algumas classes de cobertura do solo e o tipo de solo, de modo que as áreas de Caatinga densa ocorrem na presença de solos Litólicos, enquanto que a Caatinga aberta ocorre em áreas de solos degradados (ACCIOLY et al., 2017).

Vieira et al. (2015), trabalhando na identificação de áreas suscetíveis à desertificação com base em 11 fatores que influenciam a desertificação (pedologia, geologia, geomorfologia, topografia, uso do solo e alteração da cobertura do solo, índice de aridez, taxa de lotação do gado, densidade populacional rural, densidade de focos de incêndio, índice de desenvolvimento humano, unidades de conservação) que foram simulados para dois períodos diferentes, 2000 e 2010, mostraram que 94% da região Nordeste do Brasil está sob suscetibilidade moderada a alta à desertificação, com um aumento de 4,6% nas áreas de alta suscetibilidade à desertificação o que corresponde a 83,4 km² de 2000 a 2010.

Observa-se que o intenso uso das terras no semiárido brasileiro nas últimas décadas, tem resultado em grave degradação de seus ativos naturais, o que conduz a uma redução das oportunidades de desenvolvimento rural nessas regiões, afetando as condições socioeconômicas locais (MARENCO; TORRES; ALVES, 2017; TOMASELLA et al., 2018; SILVA et al., 2019a, 2019b, 2020).

2.3 Indicadores de qualidade do solo

O solo é um recurso não renovável com notável importância ecológica e várias funções únicas, incluindo ciclagem de nutrientes, armazenamento de água, produção de biomassa e fonte de uma grande biodiversidade de organismos (CIANCIO; GAMBONI, 2017). Porém as mudanças no uso e cobertura da terra, afetam a qualidade do solo e a capacidade dos ecossistemas de fornecer serviços ambientais, que são essenciais para a manutenção da vida (ROJAS et al., 2016).

Deste modo, para avaliar a qualidade do solo é necessária a identificação de um conjunto de atributos (físicos, químicos e biológicos) sensíveis ao manejo, que podem ser usados como indicadores da qualidade do solo (BÜNEMANN et al., 2018). Tradicionalmente, os atributos físicos e químicos têm sido os principais indicadores utilizados para avaliar a qualidade do solo. Carbono orgânico do solo, nutrientes disponíveis, pH, distribuição de tamanho de partícula, densidade do solo, água disponível, estrutura do solo e estabilidade de agregados, são sem

dúvida os parâmetros mais utilizados (DEXTER et al., 2008; REINHART; VERMEIRE, 2016; BÜNEMANN et al., 2018; HAYDU-HOUDESHELL et al., 2018).

A matéria orgânica do solo desempenha um papel importante em múltiplas funções do solo, como ciclagem de nutrientes, retenção de água, formação de agregados através da formação de complexos argilo-húmicos, fonte primária de energia para os micro-organismos e como um potencial sumidouro de carbono no quadro de mitigação das mudanças climáticas (TEIXEIRA et al., 2021).

A qualidade física do solo é um fator chave da saúde e produtividade do solo, pois controla o desenvolvimento das raízes e os fluxos e armazenamento de ar e água no solo, que por sua vez afetam a absorção de nutrientes e o crescimento das plantas (SALAZAR et al., 2022). Entre os indicadores físicos mais utilizados estão a textura, estrutura, porosidade, resistência mecânica à penetração e capacidade de infiltração de água (CAVALCANTE, et al., 2021).

As propriedades biológicas estão relacionadas aos organismos do solo envolvidos no fluxo de energia e na ciclagem de nutrientes; mudanças nessas propriedades são consideradas indicações precoces de degradação do solo, portanto, destacam-se como os mais sensíveis à mudança e têm sido cada vez mais amplamente utilizados como parâmetro para avaliar a qualidade do solo, sendo a biomassa microbiana, a respiração basal do solo e a atividade enzimática do solo os indicadores mais trabalhados (BASTIDA et al., 2008; BÜNEMANN et al., 2018).

Para reconhecer a multidimensionalidade do sistema do solo e reduzir a colinearidade variável, há uma tendência crescente de usar índices do solo baseados em uma combinação de indicadores de qualidade do solo para avaliar as mudanças do ecossistema, como o quociente metabólico (qCO_2) e microbiano ($qMic$), entre outros (RAIESI, 2017).

Indicadores dinâmicos, como atividade enzimática, atividade microbiana e biomassa, pH e nutrientes disponíveis, podem ser importantes no curto prazo para detectar as respostas iniciais do ecossistema; no entanto, devido à grande variabilidade espacial e temporal dos ecossistemas do solo, indicadores que se alteram mais lentamente, como por exemplo, estrutura do solo ou capacidade de retenção de água, pode ser mais apropriado para destacar os impactos nas características inerentes do solo (MUÑOZ-ROJAS et al., 2016a e b). No geral, a maioria dos estudos concorda que uma abordagem integrativa, incluindo monitoramento de curto e longo prazo, é essencial para aumentar o sucesso dos esforços de restauração.

2.4 Efeitos dos sais nas plantas e seus mecanismos de tolerância a estresses abióticos

Os climas árido e semiárido apresentam uma série de estressores para as plantas, baixa pluviosidade, altas temperaturas e alta demanda atmosférica, salinidade da água e do solo e baixa disponibilidade de nutrientes, limitando seu desenvolvimento (MENEZES et al., 2012; SILVA et al., 2017b; SOUZA et al., 2015). Sendo uma questão relevante afirmar que estes fatores estressores não atuam isoladamente em condições naturais, e a imposição de estresses múltiplos nas plantas ocorra com frequência (MITTLER, 2006).

Deste modo, plantas que crescem em solos afetados por sais também podem sofrer ação conjunta de outros fatores de estresse abiótico, como déficit de água e altas temperaturas, de maneira que os efeitos negativos nas plantas podem ser intensificados e o processo de revegetação dificultado (MEDEIROS et al., 2018; SILVA et al., 2016a; SILVA et al., 2017a).

Os principais problemas aos quais plantas em ambientes salinos geralmente enfrentam são a absorção de água do solo com baixo potencial osmótico e acúmulo de íons tóxicos no citoplasma, que inibem muitas reações metabólicas. Este desequilíbrio osmótico e iônico leva a uma redução na assimilação de carbono, na absorção de nutrientes e no crescimento da planta, bem como ao acúmulo de íons Na^+ e Cl^- que afetam negativamente os processos bioquímicos e fotoquímicos envolvidos na fotossíntese, podendo levar à morte da planta (BESSA et al., 2017; MUNNS; TESTER, 2008; NEDJIMI, 2009).

Sintomas como necrose e queimadura nas bordas das folhas são comumente observados em plantas que crescem em condições de salinidade, geralmente causadas por toxicidade a sais de sódio e cloro, no entanto, a redução no crescimento das plantas é a principal resposta aos efeitos tóxicos e osmóticos causados pelos sais (TAIZ; ZEIGER, 2013). O déficit hídrico afeta o aparato fotossintético por meio da redução do número de folhas, além de alterar o crescimento radicular (BARROS et al., 2019). No entanto, os efeitos do estresse salino dependem de sua severidade, duração do estresse e condições de solo e clima, bem como da espécie de planta e seu estágio de crescimento (MUNNS; TESTER, 2008; TESTER; DAVENPORT, 2003).

A fim de lidar com o estresse, algumas plantas podem desenvolver uma variedade de características para sobreviver em condições salinas. A característica mais essencial é o ajuste osmótico, onde as células acumulam solutos suficientes para equilibrar a pressão osmótica da solução do solo e manter o turgor.

Para isso, as plantas usam duas estratégias: a primeira é exclusão de íons - excluindo Na^+ e Cl^- , particularmente das folhas, e contando com solutos orgânicos para ajuste osmótico. A segunda estratégia é acumulando Na^+ e Cl^- suficientes para equilibrar aqueles na solução do

solo, mas compartimentando a maior parte em vacúolos para manter as concentrações citosólicas e organelares abaixo dos valores tóxicos, usando solutos orgânicos e K^+ para equilibrar a pressão osmótica nesses compartimentos citoplasmáticos (MUNNS; GILLIHAM, 2015; SHABALA, 2013; SHARMA et al., 2012; SHRIVASTAVA; KUMAR, 2014).

Os solutos orgânicos compatíveis são compostos de baixo peso molecular e altamente solúveis que geralmente não são tóxicos em altas concentrações celulares, e podem representar uma vantagem adaptativa à salinidade tendo em vista o papel atribuído a eles no ajuste osmótico celular, desintoxicação de espécies reativas de oxigênio, na proteção das estruturas celulares e estabilização de enzimas/proteínas (ASHRAF; FOOLAD, 2007; MELONI; GULOTTA; MARTINEZ, 2008; NEDJIMI, 2009; RADIC' et al., 2013). Além disso, como alguns desses solutos também protegem os componentes celulares dos danos por desidratação, eles são comumente chamados de osmoprotetores (ASHRAF; FOOLAD, 2007).

Outro problema acarretado pelo estresse salino é o aumento na geração de espécies reativas de oxigênio (EROs) devido à interrupção da homeostase celular, o que pode causar a peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, danos aos ácidos nucleicos, inibição de enzimas, ativação da via de morte celular programada e, por fim, podendo levar à morte das células (MITTLER, 2002; SHARMA; DUBEY, 2005; SHARMA et al., 2012).

Nas plantas, as EROs são formadas naturalmente pelo vazamento de elétrons do O_2 nas atividades de transporte de elétrons de cloroplastos, mitocôndrias e membranas plasmáticas ou como um subproduto de várias vias metabólicas localizadas em diferentes compartimentos celulares (BLOKHINA; FAGERSTEDT, 2010; DEL RÍO et al., 2006; HEYNO et al., 2011), e em baixa concentração atuam como um mensageiro de uma cascata de sinalização intracelular que comandam várias respostas nas células vegetais. O que vai definir se as EROs vão agir como moléculas sinalizadoras ou causadoras de danos é o equilíbrio entre sua produção e sua eliminação, sendo necessário que as células controlem sua produção para evitar qualquer lesão oxidativa, mas sem eliminá-las completamente (SHARMA et al., 2012).

A eliminação do excesso de EROs é conseguida por um sistema antioxidante eficiente que compreende os antioxidantes não enzimáticos e enzimáticos. Os antioxidantes enzimáticos incluem a superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT), enzimas do ciclo ascorbato-glutationa (AsA-GSH), como ascorbato peroxidase (APX) e glutaciona redutase (GR). Ascorbato (AsA), glutaciona (GSH), carotenoides, tocoferóis e compostos fenólicos atuam como potentes antioxidantes não enzimáticos (SHARMA et al., 2012; SHRIVASTAVA; KUMAR, 2014). De modo que tem sido observado que níveis maiores desses compostos têm sido associados a promoção de tolerância da planta a vários tipos de estresses, incluindo o estresse por salinidade

(CHEN; ZHANG; SHEN, 2010; MUNNS; GILLIHAM, 2015; SHRIVASTAVA; KUMAR, 2014; ZAEFYZADEH et al., 2009).

A forma como as espécies vegetais reagem aos ambientes sob estresse será um indicativo de sua capacidade de tolerância ao referido estresse. Assim, é importante o conhecimento da potencialidade de espécies nativas em se adaptar ao estresse salino, dentre outros, e isso deve ser melhor investigado.

2.5 Fitorremediação e *Atriplex nummularia* L.

A remediação da salinidade do solo inclui técnicas química, física e a fitorremediação, sendo a química a técnica mais comumente utilizada em solos sódicos, que se baseia na troca entre cátions monovalentes e bivalentes entre a solução do solo e o complexo de troca usando compostos à base de cálcio, como o gesso (QADIR et al., 2001).

A fitorremediação é uma alternativa ecologicamente correta, eficaz e mais barata para os agricultores considerarem, em comparação com as técnicas de remediação físicas e químicas (QADIR et al., 2001; VENTURA; SAGI, 2013). Consiste na utilização de plantas para a degradação, acumulação ou estabilização de contaminantes, podendo ser usada para reduzir a salinidade e a sodicidade de solos usando plantas tolerantes a sais, sendo uma tecnologia que melhora a qualidade biológica do solo e é adequada para aplicação em grandes áreas (CAMESELLE; GOUVEIA, 2019; LI et al., 2019; PATEL; PARIDA, 2021; QADIR; OSTER, 2002). Esta técnica possibilita a remoção uniforme de sais das camadas mais profundas do solo em comparação com a aplicação de gesso (QADIR et al., 2001).

As plantas halófitas são conhecidas por crescerem em ambientes extremos nos quais a maioria das plantas glicófitas não conseguem, e isto é possível devido à existência de uma série de mecanismos fisiológicos, bioquímicos e anatômicos que atuam de forma conjunta conferindo maior tolerância a fatores adversos (KIANI-POUYA et al., 2017).

Dentre as halófitas, o gênero *Atriplex* tem sido amplamente estudado em pesquisas devido à capacidade das plantas em tolerar altos níveis de salinidade (BANKAJI et al., 2019; LEITE et al., 2020; MELO et al., 2018; PANTA et al., 2016; SHAYGAN; BAUMGARTL; ARNOLD, 2017). A *Atriplex nummularia* L., também conhecida como erva-sal, é uma espécie forrageira com metabolismo C4 capaz de se desenvolver em solos com alta concentração de sais, destacando-se também pelo potencial de fitoextração (LEAL et al., 2008; MOURA et al., 2019; SILVA et al., 2016b; SOUZA et al., 2012). Sua tolerância à salinidade é frequentemente atribuída à presença de tricomas vesiculares que cobrem a superfície da folha (KIANI-POUYA

et al., 2017; PAULINO et al., 2020; SHABALA; BOSE; HEDRICH, 2014; SOUZA et al., 2012). Essas estruturas apresentam grande capacidade de acúmulo de sais, sendo capazes de sequestrar 1.000 vezes mais Na^+ que as células epidérmicas (SHABALA; BOSE; HEDRICH, 2014).

É importante ressaltar que, apesar de eficiente e de ser uma alternativa sustentável, a fitorremediação também apresenta algumas limitações. Algumas halófitas têm pouca adaptabilidade ao estresse de alta salinidade no estágio inicial de crescimento (GRIGORE; TOMA, 2017), além de que o processo de remediação é lento e sujeito aos ciclos biológicos, sendo necessário vários anos para que haja remediação de uma área. Desta forma, a aplicação prática da fitorremediação é limitada a locais com média ou baixa concentração de contaminantes e com baixa toxicidade, suficiente para permitir o crescimento das plantas, em que a profundidade de remediação será limitada pela profundidade da raiz da planta (CAMESELLE; GOUVEIA, 2019; WANG et al., 2020b).

Por outro lado, a espécie a ser usada na fitorremediação deve ter aceitação e conhecimento da população que conviverá com ela e, se possível, ter alguma utilidade que propicie o interesse de sua manutenção nas áreas.

2.6 Espécies nativas da Caatinga

Em muitas partes do mundo, uma extensa área de salinidade secundária é causada por práticas de manejo inadequadas, má qualidade da água e a substituição de vegetação nativa por espécies anuais de raízes superficiais, o que contribui para a elevação do lençol freático, trazendo os sais armazenados nas profundezas do perfil para a superfície do solo (DALE; DIETERS, 2007). A reintegração de árvores e outras espécies perenes pode ser uma solução para retornar as funções hidrológicas a uma condição que imita a da paisagem original (BARRETT-LENNARD, 2002).

A vegetação nativa é um importante regulador do clima, da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Além disso, a vegetação nativa atua como um sumidouro de gases de efeito estufa (CHAPUIS-LARDY et al., 2007; KIRSCHBAUM, 2003).

Mendes et al. (2020), estudando os padrões sazonais e anuais de troca de CO_2 e o balanço anual de carbono na Caatinga nos anos de 2014 e 2015, descobriram que as estimativas de respiração do ecossistema são razoavelmente baixas, enquanto a eficiência do uso do carbono é alta. Deste modo, mesmo em períodos de seca, onde o sequestro de carbono se torna

mínimo devido à escassez de água no solo, a troca líquida de CO₂ do ecossistema estava em equilíbrio e a Caatinga funcionou como um sumidouro de CO₂ atmosférico.

Espécies nativas, pelo seu alto grau de resiliência, têm potencial para uso em condições de estresse hídrico e salino (BESSA et al., 2017; LIMA et al., 2018; BARROS et al., 2019). Alguns estudos têm demonstrado tolerância moderada à salinidade em espécies desse bioma (BESSA et al., 2017; LIMA et al., 2018). No caso de déficit hídrico, são relatadas mudanças no crescimento e partição da biomassa destinada às raízes, além de redução no número de folhas (BARROS et al., 2019).

As plantas da Caatinga apresentam diversas adaptações morfofisiológicas e bioquímicas que permitem seu estabelecimento nesta região (COSTA; SIMPLICIO; SOUZA, 2015; FIGUEIREDO-LIMA et al., 2018). Avanços no estudo da ecofisiologia de plantas lenhosas de florestas tropicais sazonalmente secas demonstraram os principais mecanismos que levam à tolerância à seca, como alta eficiência do uso de água, respostas estomáticas rápidas, mudanças no metabolismo primário da folha, proteção contra danos causados por EROs e senescência foliar (OLIVEIRA et al. 2014; SANTOS et al. 2014; FALCÃO et al. 2015; FIGUEIREDO et al. 2015).

Contudo, poucos estudos com este enfoque têm sido conduzidos com espécies arbóreas no semiárido brasileiro e, principalmente, com plantas nativas da Caatinga. Muitas das espécies neste ecossistema têm potencial para usos múltiplos, medicinais, como combustível, alimentação humana e animal, aplicações paisagísticas etc. (CARTAXO; SOUZA; ALBUQUERQUE, 2010; CARVALHO et al., 2017; CHAVES et al., 2016; NASCIMENTO et al., 2015; WERDEN et al., 2017). E os estudos sobre sua tolerância à salinidade ainda são escassos, principalmente em condições de campo. Assim, estudar sua resposta às condições limitantes de déficit hídrico e alta salinidade assume grande importância ecológica e ambiental, uma vez que podem ser utilizadas em programas de reflorestamento e atividades de conservação, aumentando a cobertura vegetal e, até mesmo, incrementando o aporte de carbono ao solo.

Referências Bibliográficas

ACCIOLY, L. J. O.; SILVA, E. A.; CAVALCANTI JUNIOR, E. A.; ALVES, E. S.; PEREIRA, A. G. S.; SILVA, R. S.; RAMOS, R. R. D.; SILVA, R. R. **Mapeamento do Uso e Cobertura das Terras do Semiárido Pernambucano (escala 1:100.000)**. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2017. 100p.

ALLEN, K.; DUPUY, J. M.; GEI, M. G.; HULSOFF, C.; MEDVIGY, D.; PIZANO, C.; SALTY-NEGRET, B.; SMITH, C. M.; TRIERWEILER, A.; VAN BLOEM, S. J.; WARING, B. G.; XU, X.; POWERS, J. S. Will seasonally dry tropical forests be sensitive or resistant to future changes in rainfall regimes? **Environmental Research Letters**, v. 12, article 023001, 2017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5968>

ALMEIDA, C. L.; ARAÚJO, J. C.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M.; ANDRADE, E. M. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 24, article 20160175, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017516>

APAC. **Boletim do Clima – Síntese Climática**. Recife, Agência Pernambucana de Águas e Clima – APAC, v. 7, n. 12, 2019. 34p.

ARAÚJO FILHO, J. C.; BURGOS, N.; LOPES, O. F.; SILVA, F. H. B. B.; MEDEIROS, L. A. R.; MELO FILHO, F. H. R.; PARAHYBA, R. B. V.; CAVALCANTI, A. C.; OLIVEIRA NETO, M. B.; SILVA, F. B. R.; LEITE, A. P.; SANTOS, J. C. P.; SOUSA NETO, N. C.; SILVA, A. B.; LUZ, L. R. Q. P.; LIMA, P. C.; REIS, R. M. G.; BARROS, A. H. C. **Levantamento de reconhecimento de baixa e média intensidade dos solos do estado de Pernambuco**. Rio Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2000. 378 p.

ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, n. 2, p. 206-216, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>

BANKAJI, I.; PÉREZ-CLEMENTE, R. M.; CAÇADOR, I.; SLEIMI, N. Accumulation potential of *Atriplex halimus* to zinc and lead combined with NaCl: effects on physiological parameters and antioxidant enzymes activities. **South African Journal of Botany**, v. 123, p. 51-61, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2019.02.011>

BARBOSA, H. A.; LAKSHMI KUMAR, T.; PAREDES, F.; ELLIOTT, S.; AYUGA, J. G. Assessment of caatinga response to drought using meteosat-SEVIRI normalized difference vegetation index (2008-2016). **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 148, p. 235-252, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.12.014>

BARRETT-LENNARD, E. G. Restoration of saline land through revegetation. **Agricultural Water Management**, v. 53, n. 1, p. 213-226, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(01\)00166-4](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00166-4)

BARROS, J. P. A.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; SILVA, L. S. Partitioning and modeling of biomass in caatinga legume seedlings in different water conditions. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.034818>

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Past, present and future of soil quality indices: a biological perspective. **Geoderma**, v. 147 (2008), pp. 159-171, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.08.007>

- BESSA, M. C.; LACERDA, C. F.; AMORIM, A. V.; BEZERRA, A. M. E.; LIMA, A. D. Mechanisms of salt tolerance in seedlings of six woody native species of the Brazilian semi-arid. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 157-165, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170018>
- BEUCHLE, R.; GRECCHI, R. C.; SHIMABUKURO, Y. E.; SELIGER, R.; EVA, H. D.; SANO, E.; ACHARD, F. Land cover changes in the Brazilian Cerrado and Caatinga biomes from 1990 to 2010 based on a systematic remote sensing sampling approach. **Applied Geography**, v. 58, p. 116-127, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.01.017>
- BLOKHINA, O.; FAGERSTEDT, K. V. Reactive oxygen species and nitric oxide in plant mitochondria: origin and redundant regulatory systems. **Physiologia Plantarum**, v. 138, n. 4, p. 447–462, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2009.01340.x>
- BOUAZIZ, M.; CHTOUROU, M. Y.; TRIKI, I.; MEZNER, S.; BOUAZIZ, S. Prediction of soil salinity using multivariate statistical techniques and remote sensing tools. **Advances in Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 313-326, 2018. <https://doi.org/10.4236/ars.2018.74021>
- BÜNEMANN, E. K.; BONGIORNO, G.; BAI, Z.; CREAMER, R. E.; DE DEYN, G.; DE GOEDE, R.; FLESKENS, L.; GEISSEN, V.; KUYPER, T. W.; MADER, P.; PULLEMAN, M.; SUKKEL, W.; VAN GROENIGEN, J. W.; BRUSSARD, L. Soil quality - a critical review. **Soil biology and Biochemistry**, v. 120, p. 105–125, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.030>
- BUSTAMANTE, M. M. C.; NOBRE, C. A.; SMERALDI, R.; AGUIAR, A. P. D.; BARIONI, L. G.; FERREIRA, L. G.; LONGO, K.; MAY, P.; PINTO, A. S.; OMETTO, J. P. H. B. Estimating greenhouse gas emissions from cattle raising in Brazil. **Climatic Change**, v. 115, p. 559-577, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0443-3>
- CAMESELLE, C.; GOUVEIA, S. Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. **Journal of Hazardous Materials**, v. 361, p. 95-102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.062>
- CARTAXO, S. L.; SOUZA, M. M. A.; ALBUQUERQUE, U. P. Medicinal plants with bioprospecting potential used in semi-arid northeastern Brazil. **Journal of Ethnopharmacology**, v. 131, p. 326-342, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2010.07.003>
- CARVALHO, S. M. C.; TORRES, S. B.; BENEDITO, C. P.; NOGUEIRA, N. W.; SOUZA, A. A. T.; SOUZA NETA, M. L. Viability of *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. *ferrea*) seeds by tetrazolium test. **Journal of Seed Science**, v. 39, n. 1, p. 7-12, 2017. <https://doi.org/10.1590/2317-1545v39n1163784>
- CAVALCANTE, D. M.; FONSECA E SILVA, A. P.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, F. J.; SILVA, T. H. S.; CAVALCANTE, F. M. S. Physical soil quality indicators for environmental assessment and agricultural potential of Oxisols under different land uses in the Araripe Plateau, Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 209, article 104951, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.104951>

CHAPUIS-LARDY, L.; WRAGE, N.; METAY, A.; CHOTTE, J. L.; BERNOUX, M. Soils, a sink for N₂O? A review. **Global Change Biology**, v. 13, n. 1, p. 1-17, 2007.

<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01280.x>

CHAVES, T. P.; FERNANDES, F. H.; SANTANA, C. P.; SANTOS, J. S.; MEDEIROS, F. D.; FELISMINO, D. C.; SANTOS, V. L.; CATÃO, R. M.; COUTINHO, H. D.; MEDEIROS, A. C. Evaluation of the interaction between the *Poincianella pyramidalis* (Tul.) LP Queiroz extract and antimicrobials using biological and analytical models. **PloS One**, v. 11, article e0155532, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155532>

CHEN, Q.; ZHANG, M.; SHEN, S. Effect of salt on malondialdehyde and antioxidant enzymes in seedling roots of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.). **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 33, n. 2, p. 273–278, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0543-5>

CIANCIO, A., GAMBONI, M. Soil Biodiversity and Tree Crops Resilience. In: LUKAC, M., GRENNI, P., GAMBONI, M. (eds) **Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience. Sustainability in Plant and Crop Protection**. Springer, Cham. 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_20

COSTA, L. M.; SIMPLICIO, F. G.; SOUZA, T. P. *Libidibia ferrea* (Mart. Ex tul) L. P. Queiroz var. *Ferrea*: pharmacological, phytochemical and botanical aspects. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 7, n. 4, p. 48-53, 2015. <https://innovareacademics.in/journals/index.php/ijpps/article/view/4740>

DALE, G.; DIETERS, M. Economic returns from environmental problems: breeding salt-and drought-tolerant eucalypts for salinity abatement and commercial forestry. **Ecological Engineering**, v. 31, n. 3, p. 175-182, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2007.03.004>

DEL CASTILLO, E. G.; PAW U, K. T.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, A. Turbulence scales for eddy covariance quality control over a tropical dry forest in complex terrain. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 249, p. 390-406, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.11.014>

DEL RÍO, L. A.; SANDALIO, L. M.; CORPAS, F. J.; PALMA, J. M.; BARROSO, J. B. Reactive oxygen species and reactive nitrogen species in peroxisomes. Production, scavenging, and role in cell signaling. **Plant Physiology**, v. 141, n. 2, p. 330–335, 2006. <https://doi.org/10.1104/pp.106.078204>

DEXTER, A. R.; RICHARD, G.; ARROUAYS, D.; CZYŻ, E. A.; JOLIVET, C.; DUVAL, O. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, v. 144, p. 620–627, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.01.022>

DONG, L.; LI, J.; SUN, J.; YANG, C. Soil degradation influences soil bacterial and fungal community diversity in overgrazed alpine meadows of the Qinghai-Tibet Plateau. **Scientific Reports**, v. 11, article 11538, 2021. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-91182-7>

EAKIN, H. C.; LEMOS, M. C.; NELSON, D. R. Differentiating capacities as a means to sustainable climate change adaptation. **Global Environmental Change**, v. 27, p. 1–8, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.013>

FALCÃO, H.; MEDEIROS, C. D. B.; SILVA, B. L. R.; SAMPAIO, E. V. S. B.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; SANTOS, M. G. Phenotypic plasticity and ecophysiological strategies in a tropical dry forest chronosequence: a study case with *Poincianella pyramidalis*. **Forest Ecology and Management**, v. 340, p. 62-69, 2015.

<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.12.029>

FERNANDES, M. F.; CARDOSO, D.; QUEIROZ, L. P. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemismo. **Journal of Arid Environments**, v. 174, Article 104079, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104079>

FERREIRA, P. A.; SILVA, J. B. L.; RUIZ, H. A. Aspectos físicos e químicos de solos em regiões áridas e semiáridas. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos aplicados**, INCTSAL, Fortaleza, 2016. p. 17-34.

FIGUEIREDO, K. V.; OLIVEIRA, M. T.; ARRUDA, E. C. P.; SILVA, B. C. F.; SANTOS, M. G. Changes in leaf epicuticular wax, gas exchange and biochemistry metabolism between *Jatropha mollissima* and *Jatropha curcas* under semi-arid conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 37, p. 2–11, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11738-015-1855-2>

FIGUEIREDO-LIMA, K. V.; FALCÃO, H. M.; MELO-DE-PINNA, G. F.; ALBACETE, A.; DODD, I. C.; LIMA, A. L. A.; SANTOS, M. G. Leaf phytohormone levels and stomatal control in an evergreen woody species under semiarid environment in a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Plant Growth Regulation**, v. 85, p. 437-445, 2018.

<https://doi.org/10.1007/s10725-018-0405-5>

GARIGLIO, M. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; CESTARO, L. A.; KAGEYAMA, P. Y. **Uso sustentável e conservação Dos Recursos Florestais Da Caatinga**. Serviço Florestal Brasileiro-SFB, Brasília-DF, 2010. 368p.

GORJI, T.; YILDIRIM, A.; HAMZEHPOUR, N.; TANIK, A.; SERTEL, E. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106173, 2020.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106173>

GRIGORE, M. N.; TOMA, C. Definition and classification of halophytes. In: GRIGORE, M. N.; TOMA, C. (Eds.), **Anatomical Adaptations of Halophytes**, Springer, Cham, 2017. p. 3-28.

https://doi.org/10.1007/978-3-319-66480-4_1

HAYDU-HOUDESHELL, C. A.; GRAHAM, R. C.; HENDRIX, P. F.; PETERSON, A. C. Soil aggregate stability under Chaparral species in southern California. **Geoderma**, v. 310, p. 201-208, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.09.019>

HEYNO, E.; MARY, V.; SCHOPFER, P.; KRIEGER-LISZKAY, A. Oxygen activation at the plasma membrane: relation between superoxide and hydroxyl radical production by isolated membranes. **Planta**, v. 234, n. 1, p. 35–45, 2011. <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1379-y>

IBGE. **Sinopse do Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Rio de Janeiro, 2011. 261p.

KIANI-POUYA, A.; ROESSNER, U.; JAYASINGHE, N. S.; LUTZ, A.; RUPASINGHE, T.; BAZIHIZINA, N.; BOHM, J.; ALHARBI, S.; HEDRICH, R.; SHABALA, S. Epidermal bladder cells confer salinity stress tolerance in the halophyte quinoa and *Atriplex* species. **Plant Cell and Environment**, v. 40, p. 1900-1915, 2017. <https://doi.org/10.1111/pce.12995>

KIRSCHBAUM, M. U. F. To sink or burn? A discussion of the potential contributions of forests to greenhouse gas balances through storing carbon or providing biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 24, n. 4–5, p. 297-310, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(02\)00171-X](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(02)00171-X)

KOCH, R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KLEINSCHMIT, B. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. **Journal of Nature Conservation**, v. 35, p. 24-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.11.004>

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; FERREIRA, F. L. Use of *Atriplex nummularia* and gypsum for phytoremediation of saline-sodic soil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1065-1072, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300015>

LEAL, I. R.; SILVA, J. M.C.; TABARELLI, M.; LACHER JUNIOR, T. E. Changing the course of biodiversity conservation the Caatinga of Northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701-706, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>

LEITE, M. C.; FREIRE, M. B. G. S.; QUEIROZ, J. V. J.; MAIA, L. C.; DUDA, G. P.; MEDEIROS, E. V. Mycorrhizal *Atriplex nummularia* promote revegetation and shifts in microbial properties in saline Brazilian soil. **Applied Soil Ecology**, v. 153, p. 103574, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103574>

LI, B. C.; WANG, J. C.; YAO, L. R.; MENG, Y. X.; MA, X. L.; SI, E. J.; REN, P. R.; YANG, K.; SHANG, X. W.; WANG, H. J. *Halophyte Halogeton glomeratus*, a promising candidate for phytoremediation of heavy metal-contaminated saline soils. **Plant and Soil**, v. 442, p. 323-331, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04152-4>

LI, Y.; WANG, S.; JIANG, L.; ZHANG, L.; CUI, S.; MENG, F.; WANG, Q.; LI, X.; ZHOU, Y. Changes of soil microbial community under different degraded gradients of alpine meadow. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 222, p. 213-222, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.020>

LIMA, A. D.; BEZERRA, F. M. S.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, A. M. E. Response of four woody species to salinity and water deficit in initial growth phase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p. 753-757, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p753-757>

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAUJO FILHO, J. A. Organic carbon pools in a Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 71, p. 127-138, 2007. <https://doi.org/10.1007/s10457-007-9063-8>

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. *Parcerias Estratégicas*, v. 13, n. 27, p. 149–175, 2008. Disponível em: <http://seer.cgee.org.br/index.php/parcerias_estrategicas/article/view/329>

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A.; CAMARGO, H.; RIVEROS, M. P.; PABLÓ, A. D. Two contrasting severe seasonal extremes in tropical South America in 2012: flood in Amazonia and drought in Northeast Brazil. **Journal of Climate**, v. 26, n. 22, p. 9137–9154, 2013. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00642.1>

MARENGO, J. A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v. 129, p. 103–115, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, p. 1180–1200, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>

MARTIN-GUAY, M. O.; PAQUETTE, A.; DUPRAS, J.; RIVEST, D. The new Green Revolution: sustainable intensification of agriculture by intercropping. **Science of the Total Environment**, v. 615, p. 767–772, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.024>

MEDEIROS, W. J. F.; OLIVEIRA, F. I. F.; LACERDA, C. F.; CAVALCANTE, L. F.; SOUSA, C. H. C.; SILVA, A. R. A.; FERREIRA, J. F. S. Isolated and combined effects of soil salinity and waterlogging in seedlings of green dwarf coconut. **Semina: Ciências Agrárias**, v.39, p.447-457, 2018. <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2018v39n4p1459>

MELO, H. F.; SOUZA, E. R.; ALMEIDA, B. G.; MULAS, M. Water potential in soil and *Atriplex nummularia* (phytoremediator halophyte) under drought and salt stresses. **International Journal of Phytoremediation**, v. 20, p. 249–255, 2018. <https://doi.org/10.1080/15226514.2017.1374334>

MELONI, D. A.; GULOTTA, M. R.; MARTINEZ, C. A. Salinity tolerance in *Schinopsis quebracho colorado*: seed germination, growth, ion relations and metabolic responses. **Journal of Arid Environments**, v. 72, n. 10, p. 1785–1792, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2008.05.003>

MENDES, K. R.; CAMPOS, S.; DA SILVA, L. L.; MUTTI, P. R.; FERREIRA, R. R.; MEDEIROS, S. S.; PEREZ-MARIN, A. M.; MARQUES, T. V.; RAMOS, T. M.; VIEIRA, M. M. L.; OLIVEIRA, C. P.; GONÇALVES, W. A.; COSTA, G. B.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C.; BEZERRA, B. G.; SANTOS E SILVA, C. M. Seasonal variation in net ecosystem CO₂ exchange of a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Scientific Reports**, v. 10, artigo 9454, 2020. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-66415-w>

MENDES, K. R.; GRANJA, J. A. A.; OMETTO, J. P.; ANTONINO, A. C. D.; MENEZES, R. S. C.; PEREIRA, E. C.; POMPELLI, M. F. Croton blanchetianus modulates its morphophysiological responses to tolerate drought in a tropical dry forest. **Functional Plant Biology**, v. 44, n. 10, p. 1039–1051, 2017. <https://doi.org/10.1071/FP17098>

MENEZES, R.; SAMPAIO, E.; GIONGO, V.; PÉREZ-MARIN, A. Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the caatinga biome. **Brazilian Journal of Biology**, v. 72, suplemento 3, p. 643–653, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1519-69842012000400004>

- MITTERMEIER, R. A.; MITTERMEIER, C. G.; BROOKS, T. M.; PILGRIM, J. D.; KONSTANT, W. R.; FONSECA, G. A. B.; KORMOS, C. Wilderness and biodiversity conservation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 100, n. 18, p. 10309-10313, 2003. <https://doi.org/10.1073/pnas.1732458100>
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, v.11, p.15-19, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2005.11.002>
- MITTLER, R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance. **Trends in Plant Science**, v. 7, n. 9, p. 405-410, 2002. [https://doi.org/10.1016/S1360-1385\(02\)02312-9](https://doi.org/10.1016/S1360-1385(02)02312-9)
- MOHAMED, E. S.; SALEH, A. M.; BELAL, A. B.; GAD, A. Application of near-infrared reflectance for quantitative assessment of soil properties. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 21, n. 1, p. 1-14, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.02.001>
- MOURA, E. S. R.; COSME, C. R.; LEITE, T. S.; DIAS, N. S.; FERNANDES, C. S.; SOUSA NETO, O. N.; SOUSA JUNIOR, F. S.; REBOUÇAS, T. C. Phytoextraction of salts by *Atriplex Nummularia* Lindl. irrigated with reject brine under varying water availability. **International Journal of Phytoremediation**, v. 21, p. 892-898, 2019. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1583633>
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 1, p. 239-250, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
- MUNNS, R.; GILLIHAM, M. Salinity tolerance of crops – what is the cost? **New Phytologist**, v. 208, p. 668-673, 2015. <https://doi.org/10.1111/nph.13519>
- MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanisms of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, p. 651-681, 2008. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911>
- MUÑOZ-ROJAS, M.; ERICKSON, T. E.; DIXON, K. W.; MERRITT, D. J. Soil quality indicators to assess functionality of restored soils in degraded semiarid ecosystems. **Restoration Ecology**, v. 24, p. S43–S52, 2016a. <https://doi.org/10.1111/rec.12368>
- MUÑOZ-ROJAS, M.; ERICKSON, T. E.; MARTINI, D.; DIXON, K. W.; MERRITT, D. J. Soil physicochemical and microbiological indicators of short, medium and long term post-fire recovery in semi-arid ecosystems. **Ecological Indicators**, v. 63, p. 14–22, 2016b. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.038>
- MURPHY, P.; LUGO, A. Ecology of tropical dry forest. **Annual Reviews**, v. 17, p. 67-88, 1986. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.000435>
- NASCIMENTO, H. H. C.; SANTOS, C. A.; FREIRE, C. S.; SILVA, M. A.; NOGUEIRA, R. J. M. C. Ajustamento osmótico em mudas de jatobá submetidas à salinidade em meio hidropônico. **Revista Árvore**, v. 39, p. 641-653, 2015. <https://doi.org/10.1590/0100-67622015000400006>

NEDJIMI, B. Salt tolerance strategies of *Lygeum spartum* L.: a new fodder crop for Algerian saline steppes. **Flora-Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants**, v. 204, n. 10, p. 747-754, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2008.11.004>

OLIVEIRA FILHO, J. S.; VIEIRA, J. N.; SILVA, E. M. R.; OLIVEIRA, J. G. B.; PEREIRA, M. G.; BRASILEIRO, F. G. Assessing the effects of 17 years of grazing exclusion in degraded semi-arid soils: evaluation of soil fertility, nutrients pools and stoichiometry. **Journal of Arid Environments**, v. 166, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.03.006>

OLIVEIRA, M. T.; MATZEK, V.; MEDEIROS, C. D. B.; COSTA, R. R.; FALCÃO, H. M.; SANTOS, M. G. Stress tolerance and ecophysiological ability of an invader and a native species in a seasonally dry tropical forest. **PLoS ONE**, v. 9, p. 1–11, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105514>

OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 77-90, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

PAGOTO, M. A.; ROIG, F. A.; RIBEIRO, A. S.; LISI, C. S. Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. **Dendrochronologia**, v. 35, p. 14-23, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.007>

PANTA, S.; FLOWERS, T.; DOYLE, R.; LANE, P.; HAROS, G.; SHABALA, S. Growth responses of *Atriplex lentiformis* and *Medicago arborea* in three soil types treated with saline water irrigation. **Environmental and Experimental Botany**, v. 128, p. 39-50, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2016.04.002>

PATEL, M.; PARIDA, A. K. Salinity alleviates the arsenic toxicity in the facultative halophyte *Salvadora persica* L. by the modulations of physiological, biochemical, and ROS scavenging attributes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, artigo 123368, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123368>

PAULINO, M. K. S. S.; SOUZA, E. R.; LINS, C. M. T.; DOURADO, P. R. M.; LEAL, L. Y. C.; MONTEIRO, D. R.; REGO JUNIOR, F. E. A.; SILVA, C. U. C. Influence of vesicular trichomes of *Atriplex nummularia* on photosynthesis, osmotic adjustment, cell wall elasticity and enzymatic activity. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 155, p. 177-186, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.07.036>

PENNINGTON, R. T.; LAVIN, M.; OLIVEIRA-FILHO, A. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: Perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 437-457, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120327>

PEREIRA, A. P.; LIMA, L. A. L.; BEZERRA, W. M.; PEREIRA, M. L.; NORMANDO, L. R. O.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, J. G. B.; ARAÚJO, A. S. F.; MELO, V. M. M. Grazing exclusion regulates bacterial community in highly degraded semiarid soils from the Brazilian Caatinga biome. **Land Degradation and Development**, v. 32, p. 2210-2225, 2021. <https://doi.org/10.1002/ldr.3893>

QADIR, M.; OSTER, J. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. **Irrigation Science**, v. 21, p. 91-101, 2002.

<https://doi.org/10.1007/s00271-001-0055-6>

QADIR, M.; SCHUBERT, S.; GHAFOR, A.; MURTAZA, G. Amelioration strategies for sodic soils: a review. **Land Degradation and Development**, v. 12, n. 4, p. 357-386, 2001.

<https://doi.org/10.1002/ldr.458>

RADIĆ, S.; ŠTEFANIĆ, P. P.; LEPEDUŠ, H.; ROJE, V.; PEVALEK-KOZLINA, B. Salt tolerance of *Centaurea ragusina* L. is associated with efficient osmotic adjustment and increased antioxidative capacity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 87, n. 1, p. 39-48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.11.002>

RAIESI, F. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. **Ecological Indicators**, v. 75, p. 307-320, 2017.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.12.049>

REINHART, K. O.; VERMEIRE, L.T. Soil aggregate stability and grassland productivity associations in a Northern Mixed-Grass prairie. **PLoS One**, v. 11, article 0160262, 2016.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0160262>

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; SOUSA LIMA, J. R.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, 2016a.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos aplicados**, INCTSA, Fortaleza, 2016b. p. 9-15

ROJAS, R. V.; ACHOURI, M.; MAROULIS, J.; CAON, L. Healthy soils: a prerequisite for sustainable food security. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 3, p. 180, 2016.

<https://doi.org/10.1007/s12665-015-5099-7>

SALAZAR, M. P.; LOZANO, L. A.; VILLARREAL, R.; IRIZAR, A. B.; BARRACO, M.; POLICH, N. G.; SORACCO, C. G. Capacity and Intensity Indicators to evaluate the effect of different crop sequences and cover crops on soil physical quality of two different textured soils from Pampas Region. **Soil and Tillage Research**, v. 217, article 105268, 2022.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105268>

SÁNCHEZ, A. S.; ALMEIDA, M. B.; TORRES, E. A.; KALID, R. D. A.; COHIM, E.; GASPARATOS, A. Alternative biodiesel feedstock systems in the Semi-arid region of Brazil: implications for ecosystem services. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2744-2758, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.080>

- SANTOS, J. C. B.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; CORRÊA, M. M.; RIBEIRO, M. R.; ALMEIDA, M. C.; BORGES, L. E. P. Caracterização de neossolos regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 683-696, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000300001>
- SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; HAWK, H. M.; AHMADI, E. C. P.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; SAMPAIO, E. V. S. B.; OMETTO, J. H. B.; MENEZES, R. C. S.; OLIVEIRA, A. F. M.; POMPELLI, M. F.; ANTONINO, A. C. D. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83-99, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>
- SANTOS, R. V.; CAVALCANTE, L. F.; VITAL, A. F. M.; LACERDA, C. F.; SOUZA, E. F.; LIMA, G. S. Interação da salinidade-fertilidade do solo. GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos aplicados**, INCTSAL, Fortaleza, 2016. p. 277-293
- SCHERER, L. A.; VERBURG, P. H.; SCHULP, C. J. E. Opportunities for sustainable intensification in European agriculture. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 43-55, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.009>
- SCHULZ, K.; VOIGT, K.; BEUSCH, C.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KOWARIK, I.; WALZ, A.; CIERJACKS, A. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 367, p. 62-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>
- SHABALA, S. Learning from halophytes: physiological basis and strategies to improve abiotic stress tolerance in crops. **Annals of Botany**, v. 112, p. 1209-1221, 2013. <https://doi.org/10.1093/aob/mct205>
- SHABALA, S.; BOSE, J.; HEDRICH, R. Salt bladders: do they matter? **Trends in Plant Science**, v. 19, p. 687-691, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2014.09.001>
- SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, Article ID 217037, 26p., 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>
- SHARMA; P.; DUBEY, R. S. Drought induces oxidative stress and enhances the activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings. **Plant Growth Regulation**, v. 46, n. 3, p. 209-221, 2005. <https://doi.org/10.1007/s10725-005-0002-2>
- SHAYGAN, M.; BAUMGARTL, T.; ARNOLD, S. Germination of *Atriplex halimus* seeds under salinity and water stress. **Ecological Engineering**, v. 102, p. 636-640, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.02.050>
- SHRIVASTAVA, P.; KUMAR, R. Soil salinity: a serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. **Saudi Journal of Biological Sciences**, v. 22, n.2, p. 123-131, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001>

- SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F. DE; SOUSA, C. H. C.; BEZERRA, M. A. Physiological responses of dwarf coconut plants under water deficit in salt-affected soils. **Revista Caatinga**, v.30, p.447-457, 2017a. <https://doi.org/10.1590/1983-21252017v30n220rc>
- SILVA, A. R. A.; BEZERRA, F. M. L.; LACERDA, C. F.; LIMA, R. M. M.; ARAUJO, M. E. B.; SOUSA, C. H. C. Establishment of young dwarf green coconut plants in soil affected by salts and under water deficit. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 38, p. 1-12, 2016a. <https://doi.org/10.1590/0100-29452016206>
- SILVA, Y. J. A. B.; SILVA, Y. J. A. B.; FREIRE, M. B. G. S.; LOPES, E. A. P. L.; SANTOS, M. A. *Atriplex nummularia* Lindl. As alternative for improving salt-affected soils conditions in semiarid environments: a field experimente. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v. 76, p. 343-348, 2016b. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392016000300012>
- SILVA, J. L. B.; BEZERRA, A. C.; SILVA, T. T. F.; DIAS, P. H. D.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O. Quantification Caatinga vegetable coverage and water availability by remote sensing in the Brazilian semiarid. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 9, p. 166-176, 2019a. <https://doi.org/10.29150/jhrs.v9.4.p166-176>
- SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; LOPES, P. M. O.; SILVA, E. F. F.; ORTIZ, P. F. S.; SILVA, D. A. O.; SILVA, M. V.; GUEDES, R. V. S. Spatial-temporal monitoring of the risk of environmental degradation and desertification by remote sensing in a Brazilian semiarid region. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, p. 544-563, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p544-563>
- SILVA, J. L. B.; MOURA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, T. T. F.; LINS, F. A. C.; SILVA, D. A. O.; ORTIZ, P. F. S. Spatial-temporal dynamics of the Caatinga vegetation cover by remote sensing in municipality of the Brazilian semi-arid. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, p. 1-10, 2019b. <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a7128>
- SILVA, P. F.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, R.; SOUZA, E. S.; SILVA, J. R. I.; ALVES, E. M. Seasonal patterns of carbon dioxide, water and energy fluxes over the Caatinga and grassland in the semi-arid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 147, p. 71-82, 2017b. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2017.09.003>
- SOUSA, F. P.; FERREIRA, T. O.; MENDONÇA, E. S.; ROMERO, R. E.; OLIVEIRA, J. G. B. Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soils undergoing desertification. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 148, p. 11-21, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.11.009>
- SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. G. S.; CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; RUIZ, H. A.; LINS, C. M. T. Biomass, anatomical changes and osmotic potential in *Atriplex nummularia* Lindl. cultivated in sodic saline soil under water stress. **Environmental and Experimental Botany**, v. 82, p. 20-27, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.03.007>

SOUZA, L. S. B. S.; MOURA, M. S. B.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, T. G. F. Balanço de radiação em ecossistema de Caatinga preservada durante um ano de seca no semiárido Pernambucano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 1, p. 41-055, 2015. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v8.1.p041-055>

SUDENE – Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste. Delimitação do semiárido, 2021. Disponível em: < <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-condel/sudene-n-150-de-13-de-dezembro-de-2021-370970623>>. Acessado em: 10 de maio de 2022.

TAGHADOSI, M. M.; HASANLOU, M. Trend analysis of soil salinity in different land cover types using Landsat time series data (case study Bakhtegan Salt Lake). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-4/W4, p. 251-257, 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-251-2017>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. Fisiologia vegetal. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.
TEIXEIRA, F.; BASCH, G.; ALAOUI, A.; LEMANN, T.; WESSELINK, M.; SUKSEL, W.; LEMESLE, J.; FERREIRA, C.; VEIGA, A.; GARCIA-ORENES, F.; MORUGÁN-CORONADO, A.; MATAIX-SOLERA, J.; KOSMAS, C.; GLAVAN, M.; ZOLTÁN, T.; HERMANN, T.; VIZITIU, O. P.; LIPIEC, J.; FRAC, M.; REINTAM, E.; XU, M.; FU, H.; FAN, H.; FLESKENS, L. Manuring effects on visual soil quality indicators and soil organic matter content in different pedoclimatic zones in Europe and China. **Soil and Tillage Research**, v. 212, article 105033, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105033>

TESTER, M.; DAVENPORT, R. Na⁺ tolerance and Na⁺ transport in higher plants. **Annals of Botany**, v. 91, n. 5, p. 503-527, 2003. <https://doi.org/10.1093/aob/mcg058>

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>

VENTURA, Y.; SAGI, M. Halophyte crop cultivation: the case for Salicornia and Sarcocornia. **Environmental Experimental Botany**, v. 92, p. 144-153, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.07.010>

VIEIRA, R. M. S. P.; TOMASELLA, J.; ALVALÁ, R. C. S.; SESTINI, M. F.; AFFONSO, A. G.; RODRIGUEZ, D. A.; BARBOSA, A. A.; CUNHA, A. P. M. A.; VALLES, G. F.; CREPANI, E.; DE OLIVEIRA, S. B. P.; DE SOUZA, M. S. B.; CALIL, P. M.; DE CARVALHO, M. A.; VALERIANO, D. M.; CAMPELLO, F. C. B.; SANTANA, M. O. Identifying areas susceptible to desertification in the Brazilian northeast. **Solid Earth**, v. 6, p. 347–360, 2015. <https://doi.org/10.5194/se-6-347-2015>

WANG, L.; DELGADO-BAQUERIZO, M.; ZHAO, X.; ZHANG, M.; SONG, Y.; CAI, J.; CHANG, Q.; LI, Z.; CHEN, Y.; LIU, J.; ZHU, H.; WANG, D.; HAN, G.; LIANG, C.; WANG, C.; XIN, X. Livestock overgrazing disrupts the positive associations between soil biodiversity and nitrogen availability. **Functional Ecology**, v. 34, n. 8, p. 1713-1720, 2020a. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13575>

WANG, X. G.; SUN, R. B.; TIAN, Y. P.; GUO, K.; SUN, H. Y.; LIU, X. J.; CHU, H. Y.; LIU, B. B. Long-term phytoremediation of coastal saline soil reveals plant species-specific patterns of microbial community recruitment. **mSystems**, v. 5, n. 2, e. 00741-19, 2020b. <https://doi.org/10.1128/mSystems.00741-19>

WERDEN, L. K.; WARING, B. G.; SMITH-MARTIN, C. M.; POWERS, J. S. Tropical dry forest trees and lianas differ in leaf economic spectrum traits but have overlapping water-use strategies. **Tree Physiology**, v. 38, n. 4, p. 517-530, 2017. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpx135>

YUAN, Z-Q.; JIANG, X-J.; LIU, G-J.; JIN, H-J.; CHEN, J.; WU, Q-B. Responses of soil organic carbon and nutrient stocks to human-induced grassland degradation in a Tibetan alpine meadow. **Catena**, v. 178, p. 40-48, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.03.001>

ZAEFYZADEH, M.; QULIYEV, R. A.; BABAYEVA, S. M.; ABBASOV, M. A. The effect of the interaction between genotypes and drought stress on the superoxide dismutase and chlorophyll content in durum wheat landraces. **Turkish Journal of Biology**, v. 33, n. 1, p. 1-7, 2009. <https://doi.org/10.3906/biy-0801-12>

ZHOU, H.; ZHANG, D.; JIANG, Z.; SUN, P.; XIAO, H.; YUXIN, W.; CHEN, J. Changes in the soil microbial communities of alpine steppe at Qinghai-Tibetan Plateau under different degradation levels. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 2281-2291, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.336>

ZHU, G.; TANG, Z.; CHEN, L.; SHANGGUAN, Z.; DENG, L. Overgrazing depresses soil carbon stock through changing plant diversity in temperate grassland of the loess plateau. **Plant, Soil and Environment**, v. 64, p. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.17221/610/2017-PSE>

3 PLANOSSOLO NÁTRICO NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO EM PROCESSO DE RECUPERAÇÃO POR ESPÉCIES NATIVAS DA CAATINGA: ATRIBUTOS DO SOLO

Resumo

O semiárido brasileiro é caracterizado por baixos índices e má distribuição da precipitação pluvial com uma alta taxa de evapotranspiração que, associada a mudanças no uso do solo, tem provocado a degradação de extensas áreas. Estas características podem favorecer o acúmulo de sais no solo, aumentando o risco de desertificação. Com a revegetação dessas áreas, seria possível manter o equilíbrio ambiental neste ecossistema tão susceptível à degradação. Assim, com o objetivo de avaliar alterações na qualidade de um solo salino no semiárido de Pernambuco e sua recuperação, um experimento foi montado em blocos casualizados, com oito tratamentos (cultivo de seis espécies nativas, de *Atriplex nummularia* L., e tratamento sem cultivo de planta), em quatro repetições. Amostras de solo foram coletadas, em diferentes tempos, totalizando 48 meses de acompanhamento, em diferentes profundidades (0-5, 5-25 e 25-50 cm) para avaliar alterações nos atributos físicos e químicos do solo; e 0-20 cm para avaliar alterações nos atributos microbiológicos. Para avaliar os atributos químicos, foram feitas análises de pH, condutividade elétrica (CE), cátions solúveis e trocáveis, e calculadas a relação de adsorção de sódio (RAS) e porcentagem de sódio trocável (PST). Para avaliar os atributos físicos foram determinadas a composição granulométrica, densidade do solo (D_s), porosidade (P), condutividade hidráulica (K_{sat}) e resistência mecânica à penetração de raízes (RP). Para avaliar os atributos microbiológicos foram determinados o carbono orgânico total (COT), o carbono da biomassa microbiana (C-Mic), a respiração basal do solo (C-CO₂), calculados o quociente metabólico (qCO₂) e microbiano (qMic) e determinadas as atividades das enzimas β -Glucosidade, Fosfatases ácida e alcalina, Arilsulfatase e Urease. Os resultados foram submetidos à análise da variância e, quando significativos, suas médias foram testadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), e o coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para identificar relações entre a salinidade e os atributos biológicos do solo. O uso de espécies arbóreas da Caatinga, como Catingueira, Mulungu e Pau Ferro, foram mais eficientes na melhoria dos atributos físicos do solo, sobretudo K_{sat} e P, melhorando a permeabilidade do solo. Os atributos químicos variam muito sazonalmente com a dinâmica de chuvas e, portanto, são menos sensíveis para identificar melhorias na qualidade do solo. Os valores de CE, RAS e PST permaneceram com valores acima dos usados para classificar um solo como salino e/ou sódico, indicando que nenhuma espécie foi eficiente na atenuação da salinidade do solo, sendo necessário mais tempo de acompanhamento. A baixa adição de material vegetal pelas plantas não promoveu aumento do COT ao longo do tempo, o que limitou o crescimento da biomassa microbiana e maiores perdas de C na forma de CO₂ pela respiração dos micro-organismos do solo. O Na⁺ trocável e a CE podem afetar negativamente o teor de COT e a atividade das enzimas β -Glucosidase e Urease.

Palavras-chave: Desertificação. Mudança no uso do solo. Solo afetado por sais. Atividade enzimática do solo.

SOLONETZ (PLANOSSOLO NÁTRICO) IN THE SEMIARID REGION OF PERNAMBUCO IN RECOVERY PROCESS BY NATIVE CAATINGA SPECIES: SOIL ATTRIBUTES

Abstract

The Brazilian semiarid region is characterized by low rates of rainfall, poorly distributed throughout the year and a high rate of evapotranspiration, associated with changes in land use, causing degradation of large areas. These characteristics can favor the formation of salt affected soils, increasing the risk of desertification. With the revegetation of these areas, it would be possible to maintain the environmental balance in this ecosystem that is so susceptible to degradation. Thus, to evaluate changes in the quality of a saline soil in the semiarid region of Pernambuco and its recovery, an experiment was set up in randomized blocks, with eight treatments (six native species, *Atriplex nummularia* L., and the treatment without cultivation of plant) in four repetitions. Soil samples were collected, at different times, totaling 48 months of follow-up, at different depths (0-5, 5-25 and 25-50 cm) to assess changes in physical and chemical soil attributes, and 0-20 cm to assess changes in microbiological attributes. To evaluate the chemical attributes, pH, electrical conductivity (EC), soluble and exchangeable cations were analyzed, and the sodium adsorption ratio (SAR) and exchangeable sodium percentage (ESP) were calculated. To evaluate the physical attributes, particle size composition, soil density (Ds), porosity (P), hydraulic conductivity (Ksat) and mechanical resistance to root penetration (RP) were determined. To evaluate the microbiological attributes, total organic carbon (TOC), microbial biomass carbon (C-Mic), and basal soil respiration (C-CO₂) were determined, the metabolic (qCO₂) and microbial (qMic) quotients were calculated and determined the activities of the β -Glucosidase, Acid and Alkaline Phosphatases, Arylsulfatase and Urease enzymes. The results were submitted to analysis of variance and, when significant, their means were tested by the Tukey test ($p < 0.05$), and Pearson correlation coefficient was calculated to identify relationships between salinity and the biological attributes of the soil. The use of Caatinga tree species, such as Catingueira, Mulungu and Pau Ferro, were more efficient in improving physical attributes of the soil, especially Ksat and P, improving soil permeability. Chemical attributes vary greatly seasonally with rainfall dynamics and are therefore less sensitive to identify improvements in soil quality. EC, SAR, and ESP values remained above those used to classify a soil as saline and/or sodic, indicating that no species was efficient in attenuating soil salinity, requiring more time to be monitored. The low addition of plant material to the soil did not increase TOC over time, which limited the growth of microbial biomass and provided greater losses of C in CO₂ form by soil microorganisms respiration. Exchangeable Na⁺ and EC may negatively affect TOC content and the activity of β -Glucosidase and Urease enzymes.

Keywords: Desertification. Change in land use. Salt affected soils. Soil enzymatic activity.

3.1 Introdução

A região semiárida brasileira é caracterizada por baixa precipitação pluvial e alta evapotranspiração, além de um período prolongado de seca com duração de 8 a 9 meses no ano (OLIVEIRA; SANTOS E SILVA; LIMA, 2017; PAGOTO et al., 2015). Essas características favorecem a formação de solos afetados por sais, sobretudo se atreladas a práticas inadequadas de manejo do solo (BOUAZIZ et al., 2018; GORJI et al., 2020; MUNNS, 2002; TAGHADOSI; HASANLOU, 2017).

O aumento da concentração de sais no perfil do solo altera as propriedades físicas e químicas, promovendo perda de fertilidade, adensamento do solo, que reduz a infiltração do solo e o armazenamento de água. Isso leva ao escoamento superficial e à erosão, baixos teores de matéria orgânica, afetando a atividade microbiana e, conseqüentemente, alterando a natureza e a ciclagem dos nutrientes do solo (OLIVEIRA et al., 2021; RIBEIRO et al., 2016b).

A vegetação predominante é a Caatinga, domínio fitogeográfico específico do Brasil, classificada como floresta tropical sazonalmente seca (PENNINGTON; LAVIN; OLIVEIRA-FILHO, 2009), e possui enorme biodiversidade endêmica (FERNANDES et al., 2020; KOCH; ALMEIDA-CORTEZ; KLEINSCHMIT, 2017; LEAL et al., 2005). No entanto, menos de 1% deste bioma é protegido como reserva natural (KOCH; ALMEIDA-CORTEZ; KLEINSCHMIT, 2017; RIBEIRO et al., 2016a; SÁNCHEZ et al., 2018; TOMASELLA et al., 2018), de modo que a Caatinga é extremamente degradada por práticas agrícolas intensas, substituindo a vegetação nativa por área de cultivos agrícolas e produção pecuária (ANTONGIOVANNI et al., 2018).

Nesse contexto, o sobrepastoreio é a prática mais prejudicial, pois aumenta a compactação do solo, que provoca redução na porosidade e taxas de infiltração de água no solo, além de reduzir a vegetação nativa e, conseqüentemente, aumentar os riscos de erosão, gerando impactos negativos para as plantas e seres humanos (ALMEIDA et al., 2017; PEREIRA et al., 2021; SCHULZ et al., 2016).

O solo não é um recurso renovável, pelo menos dentro da escala de tempo humana. Portanto, práticas de manejo que protejam a diversidade e resiliência deste bioma devem ser buscadas. O reestabelecimento de comunidades vegetais em solos salinos pode alterar, de forma benéfica, as propriedades do solo, devido às interações bioquímicas e físicas entre as plantas e o solo, promovendo a melhoria das propriedades hidráulicas, aumentando a disponibilidade de nutrientes e incrementando biomassa e matéria orgânica (CAMESELLE; GOUVEIA, 2019; LI et al., 2019; PATEL; PARIDA, 2021; QADIR; OSTER, 2002).

Espécies nativas, devido ao seu alto grau de resiliência, têm potencial para uso em condições de estresse hídrico e salino (BESSA et al., 2017; LIMA et al., 2018; BARROS et al., 2019), pois apresentam diversas adaptações morfofisiológicas e bioquímicas que permitem seu estabelecimento nesta região (COSTA; SIMPLICIO; SOUZA, 2015; FIGUEIREDO-LIMA et al., 2018). Além disto, a vegetação nativa é um importante regulador do clima, da biodiversidade, dos ciclos biogeoquímicos e das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo.

Contudo, estudos sobre a tolerância à salinidade com espécies arbóreas no semiárido brasileiro, e principalmente com plantas nativas da Caatinga ainda são escassos, principalmente em condições de campo. Assim, estudar sua resposta às condições limitantes de déficit hídrico e alta salinidade assume grande importância ecológica e ambiental, uma vez que podem ser utilizadas em programas de reflorestamento e atividades de conservação. O uso de espécies nativas da Caatinga na revegetação de áreas degradadas pode melhorar a qualidade do solo por meio de suas propriedades, contribuindo para o aporte de carbono ao solo.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar a recuperação de um solo salino sódico no semiárido de Pernambuco, por meio da alteração ao longo do tempo de seus atributos físicos, químicos e biológicos, com o uso de seis espécies nativas da Caatinga: Aroeira-do-Sertão [*Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl.], Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis], Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Mulungu (*Erythrina velutina* Willd.), Pau-Ferro [*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz] e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda).

3.2 Material e Métodos

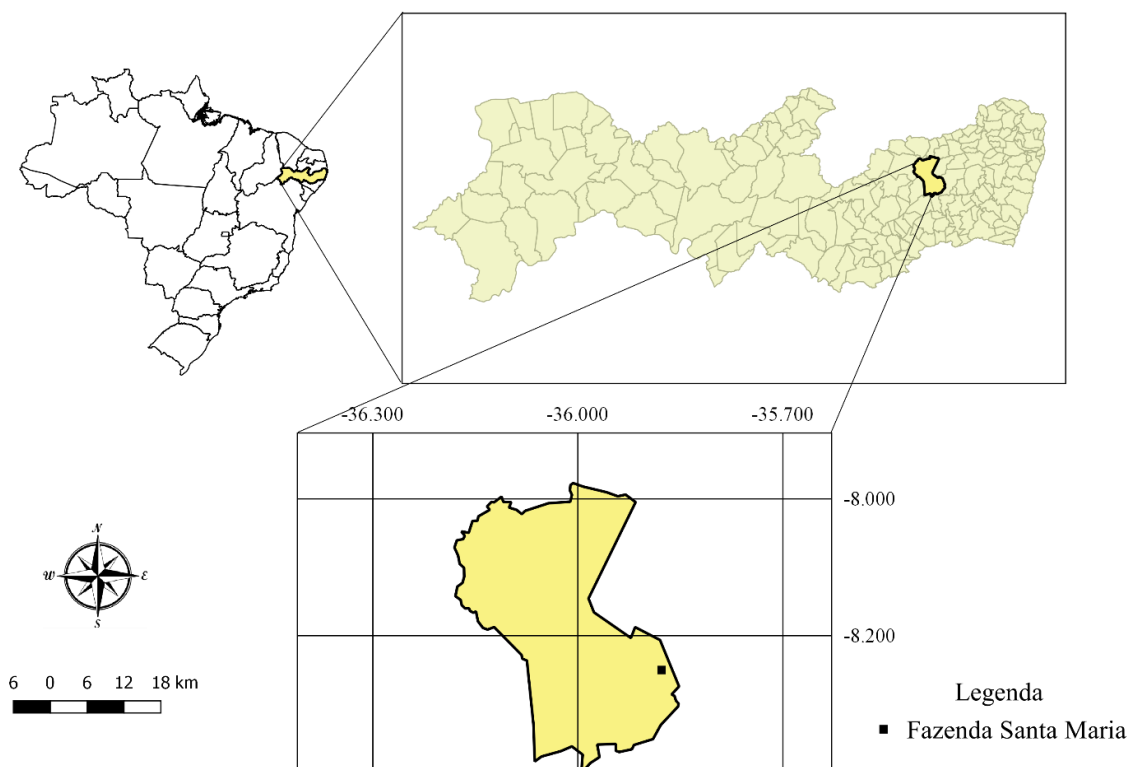
3.2.1 Área de estudo

A seleção da área foi realizada por meio de visitas e coleta de amostras de solo a diversas áreas afetadas por sais no Semiárido de Pernambuco. Foi então definida uma área de pasto degradado, sem uso agrícola por cerca de 20 anos e com acúmulo de sais a níveis intermediários (Tabela 1). A área localiza-se na Fazenda Santa Maria, município de Caruaru, nas coordenadas geográficas S 08°15'00.4" e WO 35°52'38.0" (Figura 1).

Tabela 1 - Caracterização química inicial da área de estudo

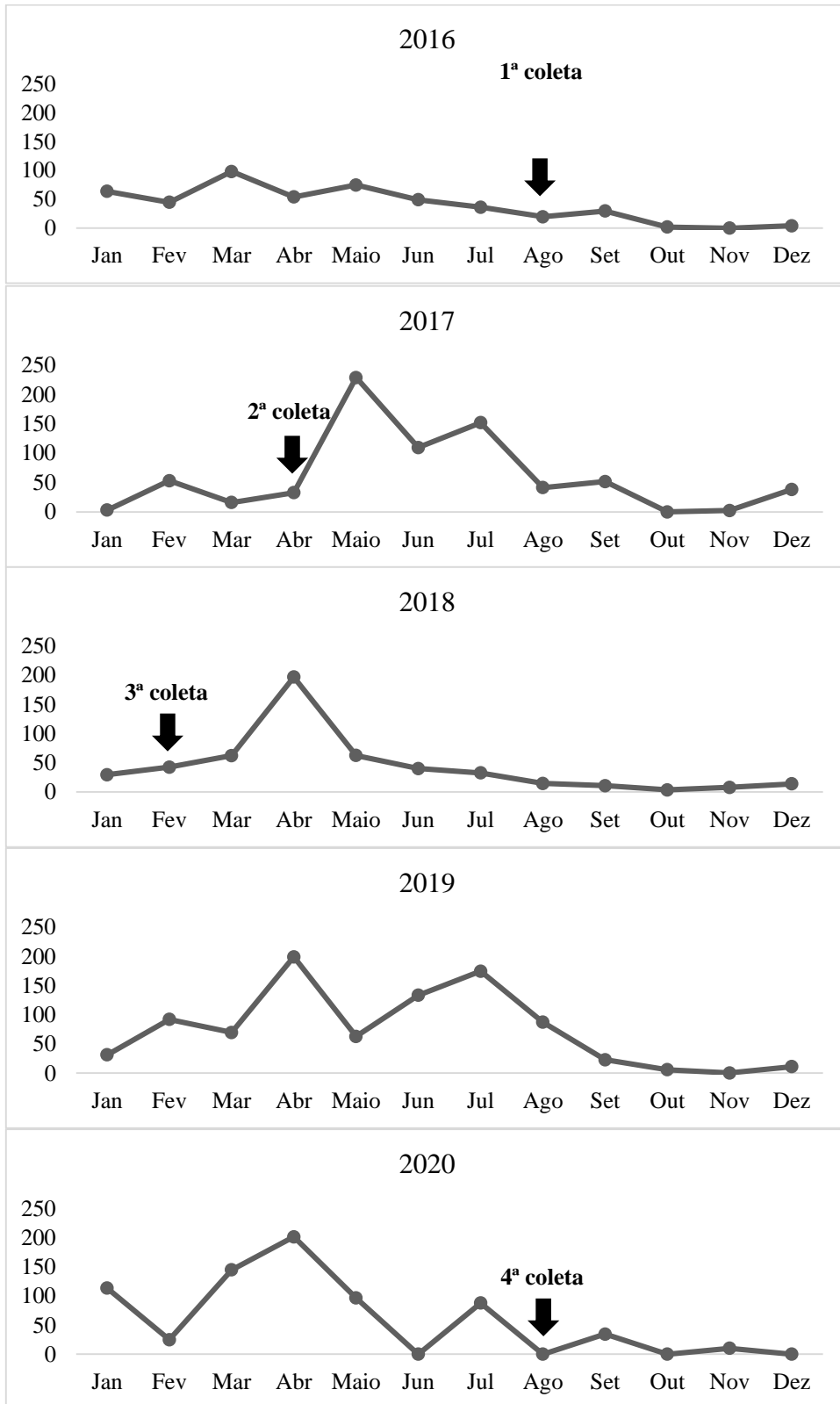
	pH	CE ¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	PST ²	RAS ³
Prof.		dS m ⁻¹	mmol _c L ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹				%	(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}
0-5	6,22	1,43	5,07	2,28	2,25	3,87	0,29	0,58	2,19	1,45	6,71	2,02
5-25	6,11	1,54	9,14	1,47	1,77	3,37	0,27	0,32	1,13	0,92	10,19	5,22
25-50	6,18	4,77	29,43	1,23	4,86	10,43	0,34	0,21	0,89	0,91	15,61	10,27

¹Condutividade elétrica do extrato de saturação; ²Porcentagem de sódio trocável; ³Relação de adsorção de sódio.

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo.

A precipitação pluvial variou bastante ao longo do tempo do experimento, com anos mais úmidos e outros mais secos e com má distribuição das chuvas durante o ano. Observou-se uma precipitação anual de 476,6 mm em 2016, 729,1 mm em 2017, 519,6 em 2018, 890,9 mm em 2019 e 713,2 mm em 2020 (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição da precipitação pluvial no município de Caruaru – PE ao longo do ano, no período de 2016 a 2020.



*Dados retirados da APAC. Posto Caruaru – IPA (24). Disponível em: <http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>

3.2.2 Classificação do solo

O perfil do solo foi classificado como PLANOSSOLO NÁTRICO Sílico méxico, apresentando a seguinte sequência de horizontes: Apz-Ez1-Ez2-Ez3-Ez4-Btnvz1-Btnvz2-Btnvz3-Btnvz4-BCnz1-BCnz2 (Tabela 2).

Os Planossolos são caracterizados por um horizonte A ou E, de textura mais leve, que contrasta abruptamente com o horizonte B imediatamente subjacente, adensado e de acentuada concentração de argila. Isto contribui para que solos desta ordem sejam imperfeitamente ou mal drenados, podendo haver estagnação temporária de água, o que confere cores predominantemente pouco vivas, tendendo a acinzentadas ou escurecidas, com ou sem presença de mosqueados (SiBCS, 2018).

Estas características puderam ser observadas no solo do estudo que apresentou coloração acinzentada (Figura 4; Tabela 2) típica da ordem, sendo um forte indício da estagnação de água no local. Isso foi confirmado pela presença de mosqueados em horizontes subsuperficiais, os mosqueados presentes no Ez1 são devidos a canais de raízes.

Figura 3 - Perfil do PLANOSSOLO NÁTRICO Sílico méxico estudado no semiárido de Pernambuco



A estrutura variou de granular simples a maciça e a textura variou de areia franca a francoarenosa nos horizontes superficiais e de argiloarenosa a franco-argiloarenosa nos horizontes subsuperficiais. Foi evidente a mudança textural abrupta com a argila variando de 15,42 g kg⁻¹ a 119,96 g kg⁻¹ nos horizontes A e E, e de 322,71g kg⁻¹ a 414,62 g kg⁻¹ nos horizontes Bt (Tabela 2 e 3), sendo observadas características vérticas com a presença de slickensides nos horizontes Bt.

O grau de flocculação, que indica o grau de estabilidade dos agregados, é outra característica importante de se observar. Verificou-se que, em superfície, existem agregados um pouco mais estáveis, flocculados, enquanto que em subsuperfície há uma maior dispersão natural das argilas (Tabela 3), o que pode ocasionar inúmeros problemas de ordem física, como obstrução de poros e adensamento do solo, o que conduz a problemas de permeabilidade.

Tabela 2 - Atributos morfológicos do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálido méxico do estudo no semiárido de Pernambuco

Horizontes		Cor		Mosqueados	Textura	Estrutura	Consistência			Transição
Símb.	Prof. (cm)	Seca	Úmida	Úmido			Seca	Úmida	Molhada	
Apz	0-5	10YR5/6	10YR4/2	-	Francoarenosa	Gran. simples e mt. peq. peq. bl. sub.	Macio	Mt. friável	Não plást., não peg.	Clara e plana
Ez1	5-15	10YR6/2	10YR4/2	7,5YR5/6 pou. peq. dif.	Areia Franca	Gran. simples e mt. peq. méd. bl. sub.	Macio	Mt. friável	Não plást., não peg.	Gradual e plana
Ez2	15-27	2,5Y7/2	10YR5/2	-	Francoarenosa	Gran. simples e mt. peq. bl. sub.	Macio	Mt. friável	Não plást., não peg.	Gradual e plana
Ez3	27-45	2,5Y6/2	10YR5/3	-	Francoarenosa	Gran. simples e mt. peq. peq. bl. sub.	Lig. duro	Friável	Não plást., não peg.	Gradual e plana
Ez4	45-59	10YR5/2	10YR5/3	-	Francoarenosa	Gran. simples e mt. peq. méd. bl. sub.	Mt. duro	Friável	Não plást., não peg.	Clara e plana
Btnvz1	59-71	10YR5/2	10YR3/4	7,5YR5/6 com.	Argiloarenosa	Gran. simples e mt. peq. bl. sub.	Mt. duro	Friável	Lig. plást., lig. peg.	Gradual e plana
Btnvz2	71-83	10YR4/4	10YR3/4	7,5YR5/6 com. méd. dist.	Argiloarenosa	Gran. simples e mt. peq. méd. bl. sub.	Ext. duro	Friável	Lig. plást., lig. peg.	Difusa e plana
Btnvz3	83-96	10YR5/3	10YR4/3	2,5Y5/6 abund. gr. dist.	Argiloarenosa	Maciça	Ext. duro	Mt. firme	Lig. plást., peg.	Difusa e plana
Btnvz4	96-110	2,5Y7/2	10YR5/4	20YR5/8 abund. gr. dist.	Franco-argiloarenosa	Maciça	Ext. duro	Mt. firme	Lig. plást., lig. peg.	Difusa e plana
BCnz1	110-124	-	10YR5/4	Variegado abund. gr. dist.	Franco-argiloarenosa	Mto peq. méd. bl. sub.	-	Friável	Lig. plást., lig. peg.	Difusa e plana
BCnz2	124-150+	-	10YR6/3	Variegado abund. gr. dist.	Franco-argiloarenosa	Mto peq. méd. bl. sub.	-	Mt. friável	Não plást., lig. peg.	-

*Símb. – Símbolo; Prof - Profundidade; pou. – pouco; peq. – pequeno; dif. – difusa; com. – comum; méd. – médio; dist. – distinto; abund. – abundante; gr. – grande; gran. – granular; mt. – muito; bl. sub. – bloco subangular; lig. – ligeiramente; ext. – extremamente; plást. – plástico; peg. – pegajoso.

Tabela 3 - Composição granulométrica da TFSA, argila dispersa em água (ADA) e grau de floculação (GF) do PLANOSSOLO NÁTRICO Sílico méxico do estudo no semiárido de Pernambuco

Horizonte	Profundidade cm	Areia Total (2-0,05 mm)	Silte (0,05-0,002 mm)	Argila (<0,002 mm)	ADA ¹	GF ² %
		g kg ⁻¹				
Apn	0-5	740,89	145,83	113,28	24,85	78,06
En1	5-15	810,66	140,40	48,94	15,42	68,48
En2	15-27	769,00	162,95	68,05	23,40	65,61
En3	27-45	723,58	175,91	100,51	100,51	0,00
E	45-59	712,16	147,26	140,57	119,96	14,66
Btnv1	59-71	500,50	84,88	414,62	290,75	29,87
Btnv2	71-83	551,60	97,23	351,17	305,81	12,92
Btnv3	83-96	502,63	147,23	350,14	289,96	17,19
Btnv4	96-110	521,45	155,84	322,71	237,60	26,37
BCn1	110-124	597,08	140,52	262,40	162,42	38,10
BCn2	124-150+	685,67	100,93	213,40	130,95	38,63

¹Argila dispersa em água; ²Grau de floculação.

Um solo para ser classificado como salino e/ou sódico deve apresentar $CE \geq 4 \text{ dS m}^{-1}$, $RAS \geq 13$ e $PST \geq 15\%$ (USSS, 1954), o que é observado em todos os horizontes deste solo (Tabela 4), sendo então classificado como salino-sódico. Importante salientar que a discrepância nos valores da caracterização inicial para estes do perfil do solo se devem a variação sazonal e temporal devido a época em que as amostras foram coletadas. Tendo a caracterização inicial sido feita no início do experimento e a abertura do perfil para classificação do solo próximo ao final do experimento.

Tabela 4 – Atributos químicos do PLANOSSOLO NÁTRICO Sálco méxico do estudo no semiárido de Pernambuco

Hor.	Prof. cm	CE dS m ⁻¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	RAS (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CTC	PST %
			mmol _c L ⁻¹					cmol _c kg ⁻¹					
Apn	0-5	12,37	225,51	18,19	9,27	33,08	49,01	0,76	0,56	1,07	1,07	5,53	13,74
En1	5-15	10,92	205,57	1,37	8,32	34,07	44,66	0,26	0,15	0,64	0,55	2,05	12,66
En2	15-27	12,38	222,19	1,27	11,68	42,13	42,83	0,36	0,20	0,65	0,85	2,63	13,85
En3	27-45	10,91	192,28	1,27	9,99	33,74	41,12	0,36	0,18	0,64	1,29	3,05	11,66
E	45-59	8,94	165,69	0,65	7,70	25,51	40,66	0,51	0,22	0,72	1,51	9,09	5,65
Bt _{nv} 1	59-71	7,98	152,63	0,55	4,98	14,48	48,93	2,53	0,45	2,12	5,09	5,74	43,99
Bt _{nv} 2	71-83	9,72	202,25	0,47	5,68	18,76	57,85	3,10	0,34	2,45	5,58	10,98	28,23
Bt _{nv} 3	83-96	16,33	344,67	0,64	10,56	31,60	75,07	2,79	0,26	2,51	5,09	10,77	25,92
Bt _{nv} 4	96-110	22,38	338,03	0,82	26,87	82,95	45,62	2,66	0,24	2,44	5,58	10,65	24,97
BC _n 1	110-124	30,15	663,71	1,08	34,69	108,62	78,41	3,01	0,22	2,43	5,09	9,39	32,05
BC _n 2	124-150+	16,66	377,91	0,79	15,53	42,79	69,98	2,66	0,19	2,52	3,55	9,39	28,31

Hor – horizontes; Prof. – profundidade; CE – condutividade elétrica; Na⁺ - sódio; K⁺ - potássio; Ca²⁺ - cálcio; Mg²⁺ - magnésio; RAS – relação de adsorção de sódio; CTC – capacidade de troca de cátions; PST – porcentagem de sódio trocável.

3.2.3 Condução do experimento

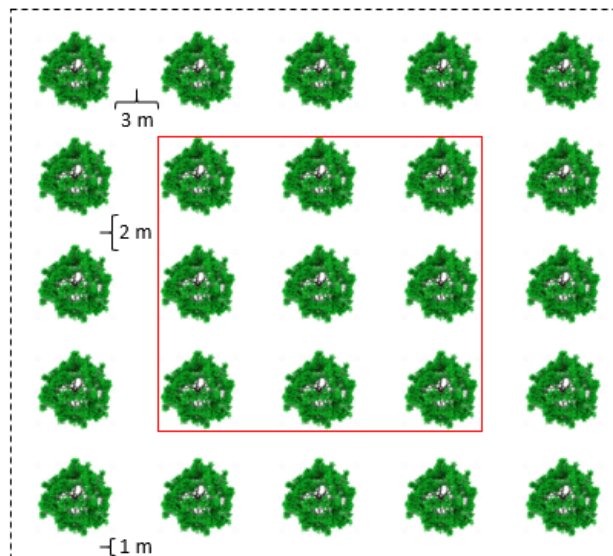
O experimento foi montado em Julho/Agosto de 2016, em blocos casualizados, com oito tratamentos (seis espécies nativas, a *Atriplex nummularia* Lindl., e o tratamento sem cultivo de planta), em quatro repetições, sendo uma por bloco, totalizando 32 parcelas experimentais. O plantio foi realizado no espaçamento de 2 x 3 m, em parcelas de 10 x 14 m (140 m²), com 25 plantas por parcela, área útil de 6 x 8 m (48 m²) com as nove plantas centrais (Figura 3).

As espécies nativas da Caatinga utilizadas foram escolhidas com base em trabalhos que vem sendo conduzidos e em resultados disponíveis na literatura, são elas: Aroeira-do-Sertão [*Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl.], Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis], Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Mulungu (*Erythrina velutina* Willd.), Pau-Ferro [*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz] e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), e as mudas foram cedidas pelo viveiro da Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco (CHESF). Além das seis espécies nativas, foram preparadas mudas de *Atriplex nummularia* Lindl, propagadas por estaquia, para serem utilizadas como planta teste e padrão de comparação. Existindo, também, parcelas sem plantas, como tratamento controle (testemunha).

As mudas foram transplantadas a campo quando estavam entre 30 e 40 cm de altura, recebendo irrigação semanal durante o primeiro mês para seu estabelecimento. Havendo reposição de novas mudas no lugar das que morreram. O Jatobá mostrou-se muito sensível as

condições locais havendo uma alta taxa de mortalidade, por isso foi um tratamento inteiramente perdido, pois, mesmo com o replantio, as mudas tornaram a morrer.

Figura 4 - Disposição das plantas na parcela e na área útil de amostragem.



Para fins de classificação do solo, um perfil foi aberto, sendo realizada a caracterização morfológica dos solos e coleta de amostras de acordo com o Manual de Descrição e Coleta de Solo no Campo (SANTOS et al., 2015).

Para avaliar alterações nas propriedades químicas do solo cultivado, foram coletadas amostras compostas deformadas em cada parcela útil, distando 30 cm das plantas, nas profundidades de 0-5, 5-25 e 25-50 cm, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio das plantas (MAT) (agosto de 2016, abril de 2017, fevereiro de 2018 e agosto de 2020). As amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira com malha de 2 mm para obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

Para avaliar alterações nas propriedades físicas também foram coletadas amostras com estrutura preservada por meio de cilindros volumétricos. As amostras foram coletadas em cada parcela útil, distando 30 cm das plantas, nas profundidades de 0-5, 5-25 e 25-50 cm, aos 0 e 48 MAT. Os cilindros foram coletados com o trado tipo Uhland, enrolados em plástico bolha e transportados cuidadosamente ao laboratório, onde foi feito o toaleta e, então, foram postos para saturar por capilaridade.

Para avaliar alterações nas propriedades biológicas, foram coletadas amostras compostas deformadas em cada parcela útil, distando 30 cm das plantas, na profundidade de 0-20 cm, aos 0, 8 e 48 MAT. Estas amostras após coletadas foram conservadas em caixas térmicas

com gelo até o transporte ao laboratório, onde foram passadas em peneira com malha de 2 mm, sem secagem ao ar, e armazenadas sob refrigeração para posterior análise.

3.2.4 Análises químicas do solo

Para a caracterização química, foram realizadas as análises: pH em água, na proporção solo:água de 1:2,5 (EMBRAPA, 2017); cátions trocáveis extraídos por acetato de amônio; capacidade de troca de cátions (CTC) pelo método do acetato de sódio/acetato de amônio, preparo da pasta da saturação e obtenção do extrato por vácuo para a medida da condutividade elétrica (CE) e determinação dos cátions e ânions solúveis (USSL, 1954). Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram dosados por espectrofotometria de absorção atômica, Na^+ e K^+ por fotometria de emissão de chama, Cl^- por titulometria e SO_4^{2-} por colorimetria. A relação de adsorção de sódio (RAS) e a porcentagem de sódio trocável (PST) foram calculadas com o resultado das análises de elementos solúveis e trocáveis, respectivamente, conforme USSL (1954).

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}}$$

Onde, RAS – Relação de adsorção de sódio em $(\text{mmol}_c \text{L}^{-1})^{0,5}$; Na^+ - Sódio solúvel em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Ca^{2+} - Cálcio solúvel em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; Mg^{2+} - Magnésio solúvel em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

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

Onde, PST – Porcentagem de sódio trocável em %; Na^+ - Sódio trocável em $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, CTC – Capacidade de troca de cátions em $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$

3.2.5 Análises físicas do solo

Foram determinadas a composição granulométrica do solo e argila dispersa em água pelo método da pipeta, e calculado o grau de flocculação do solo; a densidade do solo pelo método do anel volumétrico, porosidade pelo método da saturação dos poros, e a condutividade hidráulica em meio saturado pelo método do permeâmetro de coluna vertical e carga constante (EMBRAPA, 2017). As amostras ainda foram submetidas a tensões de 10, 60 e 100 cm de

coluna de água (cca), em mesa de tensão, para obtenção da umidade nos macroporos, mesoporos e na capacidade de campo.

Após o equilíbrio das tensões aplicadas, as amostras foram pesadas e realizado o ensaio de resistência à penetração, por um penetrômetro eletrônico de bancada, nas amostras estabilizadas a uma tensão de 100 cca. Foi adotada uma haste de ponta cônica com um ângulo de penetração de 30° com 4,00 mm de diâmetro. A velocidade de penetração foi de 10 mm s⁻¹ medindo a resistência da superfície até a profundidade de 4,5 cm e os valores iniciais e finais foram descartados por conta do efeito de bordadura, considerando apenas os dados dos 3 cm centrais da amostra. Com as leituras realizadas neste intervalo, foi calculada a média da resistência do solo à penetração.

3.2.6 Análises microbiológicas do solo

O carbono orgânico total (COT) foi determinado por via úmida. A biomassa microbiana foi determinada pelo método da irradiação-extração, que se baseia na promoção do rompimento celular pela utilização de energia eletromagnética, liberando os compostos intracelulares para posterior extração e quantificação do C. E a quantificação do C respirado pela microbiota do solo foi realizada pelo método de respirometria, evolução de C-CO₂ ou C mineralizável, que se fundamenta na captura de CO₂ emitido de uma amostra de solo, quando incubado em um ambiente fechado por determinado período de tempo (MENDONÇA; MATOS, 2005).

O quociente metabólico (qCO₂) foi determinado pela relação entre a respiração basal do solo e o carbono da biomassa microbiana. O quociente microbiano (qMic), obtido por relação entre o carbono da biomassa microbiana e carbono total do solo (ANDERSON; DOMSCH, 1978).

$$qCO_2 = \frac{C - CO_2}{C - Mic}$$

Onde, qCO₂ – Quociente metabólico do solo em µg g⁻¹ dia⁻¹; C-CO₂ – Respiração basal do solo em µg g⁻¹ dia⁻¹; C-Mic – Carbono da biomassa microbiana em µg g⁻¹.

$$qMic = \frac{C - Mic}{COT} \times 100$$

Onde, qMic – Quociente microbiano do solo em %; C-mic – Carbono da biomassa microbiana em µg g⁻¹; COT – Carbono orgânico total em µg g⁻¹.

Para avaliar a β -Glucosidade, o método baseou-se na determinação colorimétrica do p -nitrofenol liberado pela β -glucosidase quando o solo foi incubado com p -nitrofenol- β -D-glicosídeo. O p -nitrofenol liberado foi extraído por filtragem e determinado colorimetricamente a 410 nm (TABATABAI, 1994). As fosfatases ácida e alcalina foram quantificadas pela determinação colorimétrica do p -nitrofenol liberado pela Fosfatase quando o solo foi incubado com p -nitrofenil fosfato de sódio. O p -nitrofenol liberado foi extraído por filtragem e determinado colorimetricamente a 420 nm (TABATABAI; BREMNER, 1969). A quantificação da arilsulfatase baseia-se na determinação colorimétrica de p -nitrofenol liberado por meio da atividade da arilsulfatase quando o solo é incubado com uma solução tamponada (pH 5,8) de p -nitrofenil sulfato, a 410 nm (SPENCER, 1958). A urease baseia-se na determinação da quantidade de NH_4^+ liberado quando o solo é incubado com tampão THAM, ureia e tolueno a 37 °C por 2 horas (TABATABAI; BREMNER, 1972).

3.2.7 Análises estatísticas

Os dados foram previamente testados em relação à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, que foram submetidos à análise da variância para identificar diferenças entre as profundidades de coleta, entre os tratamentos e ao longo do tempo e, quando significativos, suas médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O coeficiente de correlação de Pearson foi determinado, com o software R, para os atributos microbiológicos do solo em relação aos atributos químicos, independentemente dos tratamentos, para avaliar a influência da salinidade sobre a atividade microbiana.

3.3 Resultados e Discussão

3.3.1 Atributos físicos

Apesar da classe textural francoarenosa superficialmente, o acúmulo de argila em subsuperfície conduz a problemas de permeabilidade da água ao longo do perfil do solo, característica marcante de Planossolos como citado anteriormente, e claramente observadas neste estudo.

Pode-se observar que a densidade do solo (Ds) é um pouco maior em profundidade em ambas as coletas (Tabela 5), indicando que o solo é mais adensado em subsuperfície. Isto é comum ocorrer em solos pouco desenvolvidos em ambiente sob clima semiárido no Nordeste

do Brasil, promovendo limitações à infiltração da água no solo e trocas gasosas com a atmosfera (MIRANDA et al., 2011).

Ainda se percebe que houve um ligeiro aumento na densidade entre a primeira e a segunda coleta, porém este aumento não foi significativo estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Indicando que durante o período do estudo nenhuma espécie vegetal utilizada ainda foi eficiente para promover alterações sobre a densidade do solo.

Isto pode ser justificado por dois fatores: 1) A baixa deposição de matéria orgânica, que auxilia numa melhor agregação e estruturação do solo, uma vez que estas plantas são caducifólias e passaram a maior parte do experimento sem apresentar folhas; e 2) As raízes das plantas ao crescerem são responsáveis pela criação de bioporos que auxiliam no aumento da porosidade do solo e conseqüentemente contribuem para uma diminuição da densidade do solo, porém as espécies deste estudo possuem um hábito de crescimento de lento a moderado, com suas raízes se desenvolvendo de forma igualmente lenta, atrelado ao fato de que o solo do estudo apresentou valores de resistência mecânica à penetração das raízes (RP) acima do limite considerado para um bom alongamento das raízes, afetando o crescimento e desenvolvimento das plantas.

De maneira geral, é considerado como limitante para o alongamento das raízes valores de RP acima de 2,0 MPa (LIPIEC et al., 2012), valores observados em subsuperfície nas áreas dos tratamentos Atriplex, Catingueira, Pau Ferro e Umbuzeiro aos 48 MAT (Tabela 5). Importante ressaltar que os valores apresentados nas tabelas são médias, de modo que foram observados valores máximos que chegaram a ultrapassar 6,0 MPa.

Também é importante salientar que esta determinação foi realizada com a amostra de solo com umidade na capacidade de campo. No entanto, na maior parte do ano, o semiárido passa por um regime de seca e, portanto, o solo dificilmente se encontrará numa condição de umidade referente à capacidade de campo. Sem umidade, é provável que o solo tenha uma resistência à penetração das raízes muito maior. Pois, quando há umidade no sistema, a coesão da camada adensada em campo é minimizada, diminuindo a dificuldade da penetração das raízes (SOUZA et al., 2021).

Apesar do notável retardo no crescimento das plantas, ainda assim as mesmas conseguiram se estabelecer na área, indicando uma maior resistência ao contrário do que ocorreu com o Jatobá, que não conseguiu se estabelecer na área, tendo sido observados sinais de que a raiz teve problemas para se alongar e crescer, além de sintomas de toxicidade por sais (Figura 5).

Tabela 5 - Densidade do solo (Ds), condutividade hidráulica em meio saturado (Ksat) e resistência mecânica à penetração das raízes na capacidade de campo (RP) de um PLANOSSOLO NÁTRICO degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Ds (g cm ⁻³)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	1,54 Aa	4,50	1,60 Aa	3,05	1,62 Aa	6,71	1,61 Aa	5,76	1,54 Aab	9,02	1,62 Aab	6,97	1,61 Aa	5,12
5-25	1,58 Aa	5,17	1,72 Aa	0,79	1,69 Aa	1,48	1,63 Aa	3,14	1,68 Aa	4,74	1,70 Aa	6,55	1,66 Aa	4,60
25-50	1,72 ABa	3,86	1,74 ABa	2,65	1,76 Aa	1,43	1,71 ABa	2,17	1,26 Cb	5,63	1,31 BCb	4,11	1,68 ABCa	4,54
48 MAT														
0-5	1,71 Aa	8,18	1,65 Aa	3,74	1,63 Aa	6,24	1,67 Aa	5,00	1,56 Aa	6,62	1,66 Aa	8,01	1,60 Aa	3,36
5-25	1,74 Aa	5,90	1,83 Aa	5,67	1,71 Aa	5,95	1,78 Aa	8,73	1,73 Aa	5,91	1,81 Aa	10,60	1,81 Aa	7,05
25-50	1,79 Aa	5,54	1,88 Aa	3,83	1,79 Aa	3,50	1,76 Aa	8,22	1,82 Aa	4,03	1,79 Aa	7,60	1,85 Aa	6,04
Ksat (mm h ⁻¹)														
0 MAT														
0-5	44,24 Aa	93,72	25,76 Aa	111,17	19,87 Aa	115,99	27,85 Aa	50,94	15,32 Aa	60,00	27,49 Aa	141,25	37,26 Aa	82,92
5-25	16,24 Aa	66,02	19,31 Aa	131,73	9,91 Aa	80,43	23,71 Aa	39,52	13,09 Aa	116,29	10,00 Aa	138,09	16,42 Aa	69,25
25-50	6,42 Aa	113,03	3,27 Aa	46,14	1,72 Aa	92,42	11,08 Aa	90,42	4,67 Aa	102,98	4,29 Aa	135,47	6,08 Aa	113,36
48 MAT														
0-5	22,4 Aa	76,86	24,46 Aa	84,17	68,91 Aa	49,91	93,09 Aa	147,44	76,16 Aa	154,85	89,48 Aa	120,51	39,53 Aa	78,41
5-25	41,37 Aa	149,74	19,34 Aa	124,85	22,37 Aa	110,98	26,26 Ab	94,35	21,6 Aab	85,71	23,50 Ab	151,70	10,16 Aa	130,68
25-50	12,60 Aa	107,68	3,25 Aa	95,45	9,25 Aa	84,14	25,01 Ab	158,46	3,76 Ab	138,67	16,91 Ab	136,22	9,50 Aa	175,13

(Continuação)

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
RP (MPa)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	1,09 Aa	50,15	1,13 Aa	62,77	1,16 Aa	31,76	1,13 Aa	75,73	0,71 Aa	70,18	1,03 Aa	44,19	0,84 Aa	38,29
5-25	0,25 Aa	48,67	0,60 Aa	80,37	0,62 Aa	84,18	1,30 Aa	132,55	1,40 Aa	161,37	0,75 Aa	29,58	0,72 Aa	64,80
25-50	0,59 Aa	27,51	0,37 Aa	62,05	0,42 Aa	81,74	0,66 Aa	36,07	0,78 Aa	85,28	0,73 Aa	47,48	0,32 Aa	98,70
48 MAT														
0-5	1,70 Aa	121,09	0,90 Aa	24,28	0,94 Aa	46,63	1,35 Aa	68,59	0,64 Aa	18,59	1,12 Aa	48,32	0,96 Aa	25,95
5-25	1,20 Aa	60,85	1,92 Aa	73,18	1,29 Aa	71,56	2,33 Aa	92,60	1,43 Aa	104,10	2,17 Aa	134,13	2,33 Aa	121,23
25-50	0,73 Aa	26,32	2,14 Aa	77,50	1,27 Aa	40,43	0,79 Aa	37,59	1,43 Aa	56,78	1,13 Aa	58,98	1,05 Aa	62,94

Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo de coleta não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$

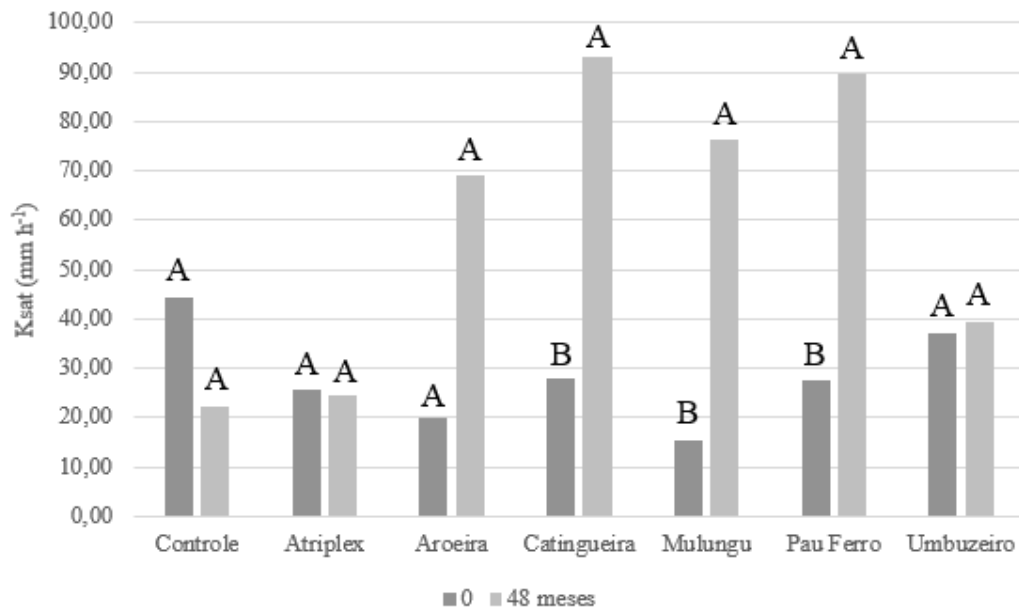
Figura 5 - Planta de jatobá com sintomas de toxicidade por excesso de sais, planta de jatobá morta e raiz de jatobá aparentando primeiros sinais de impedimento no crescimento cultivadas em em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco



A Ksat obteve uma diminuição significativa em profundidade apenas para a Catingueira, o Mulungu e o Pau Ferro aos 48 MAT (Tabela 5). Esta diferenciação em profundidade nestes tratamentos ocorre devido ao considerável aumento da Ksat em superfície (0-5 cm), que resultou também em um aumento significativo ao longo do tempo, indicando que estas espécies têm sido efetivas na melhoria da permeabilidade do solo (Figura 6). A Aroeira também apresentou um aumento considerável na Ksat na camada de 0-5 cm entre a primeira e segunda coleta, mas não foi significativo estatisticamente, provavelmente pela alta variabilidade que é muito comum nesta análise, como pode ser observado pelos altos coeficientes de variação (CV).

Este aumento da Ksat em superfície pode ser explicado de acordo com o que Pinheiro; Costa; Araújo (2013) observaram. Que a profundidade efetiva das raízes da Caatinga varia de 0,60 m a 0,78 m em solos profundos, e esta profundidade da raiz na estação seca tende a ser menor do que na estação chuvosa, o que pode indicar uma estratégia de aclimação, gerando maior porosidade em superfície para aumentar a infiltração na zona radicular.

Figura 6 - Diferença ao longo do tempo da condutividade hidráulica em meio saturado (K_{sat}) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

A porosidade total (P) diminuiu em profundidade de maneira geral para todos os tratamentos (Tabela 6), corroborando com a indicação de adensamento do solo em subsuperfície, conforme já apontado pela Ds e RP. O sódio em excesso atua como dispersante de coloides no solo, que são translocados no perfil, sendo o principal fator que colabora para a obstrução dos poros e formação de camadas adensadas. E, como será discutido posteriormente, os teores de sódio foram bem elevados neste solo.

Porém, foi possível observar que, ao longo do tempo, a Catingueira e o Pau Ferro contribuíram para um aumento significativo da P, nas profundidades de 0-5 cm e 25-50 cm, respectivamente (Figura 7 e 8).

Tabela 6 - Porosidade total (P), macroporosidade (Macro), mesoporosidade (Meso) e capacidade de campo (CC) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

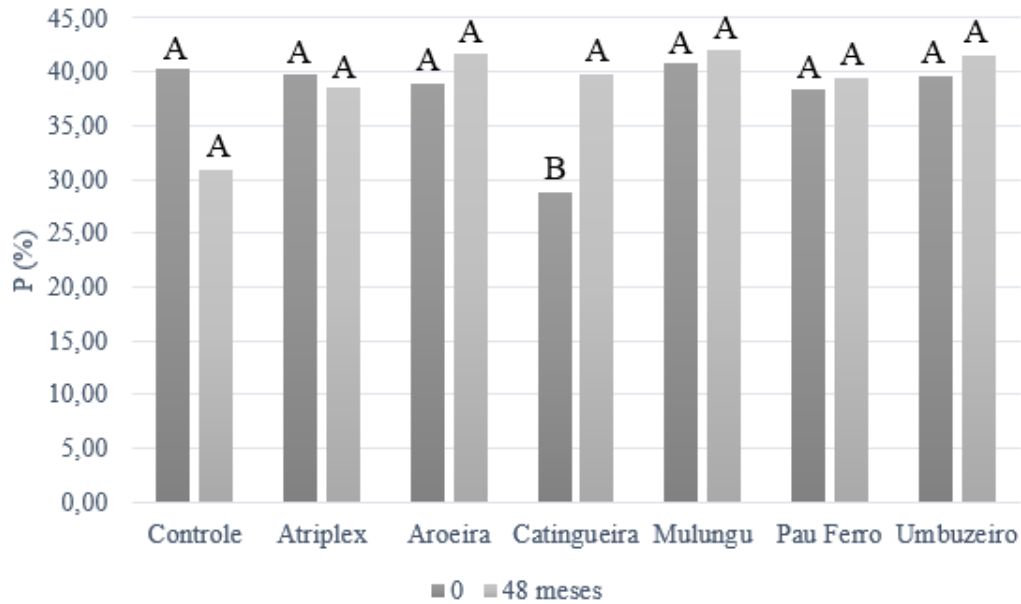
	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
P (%)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	40,30 Aa	7,81	39,73 Aa	8,40	38,98 Aa	11,03	28,80 Aa	5,15	40,83 Aa	11,58	38,36 Aa	4,43	39,67 Aa	10,71
5-25	37,04 Aa	11,72	33,70 Aa	8,99	35,86 Aa	7,41	35,60 Aa	8,79	32,67 Aab	18,60	33,14 Aa	15,29	34,57 Aa	5,80
25-50	31,52 Aa	8,67	30,88 Aa	5,97	31,62 Aa	5,23	32,68 Aa	21,13	24,50 Ab	11,09	20,27 Ab	17,74	32,81 Aa	11,16
48 MAT														
0-5	30,82 Aa	14,08	38,55 Aa	2,45	41,66 Aa	12,91	39,79 Aa	10,25	42,01 Aa	6,23	39,41 Aa	16,28	41,54 Aa	5,01
5-25	33,01 Aa	15,56	31,21 Aa	10,19	32,34 Aab	19,08	32,52 Aa	14,93	33,72 Aab	14,47	34,91 Aa	24,11	32,79 Aa	12,77
25-50	32,76 Aa	10,09	29,20 Aa	17,12	30,47 Ab	9,16	34,28 Aa	17,21	31,62 Ab	13,98	32,32 Aa	14,57	32,04 Aa	13,52
Macro (%)														
0 MAT														
0-5	3,29 Aa	26,96	3,56 Aa	22,65	3,46 Aa	12,90	2,27 Aa	24,39	2,65 Aa	33,55	2,96 Aa	32,66	3,74 Aa	30,06
5-25	3,83 Aa	29,03	3,32 Aa	19,44	3,51 Aa	13,80	2,74 Aa	41,47	4,30 Aa	38,35	3,10 Aa	14,04	3,81 Aa	5,80
25-50	3,48 Aa	15,66	3,62 Aa	16,44	3,83 Aa	12,86	3,35 Aa	41,90	2,59 Aa	19,31	1,57 Aa	90,74	3,65 Aa	27,10
48 MAT														
0-5	3,74 Aa	30,66	4,16 Aa	18,80	4,65 Aa	25,59	4,50 Aa	35,05	5,07 Aa	32,61	4,05 Aa	29,74	5,01 Aa	3,74
5-25	3,13 Aa	21,17	3,22 Aa	20,17	3,35 Aa	20,61	3,60 Aa	16,47	4,29 Aa	42,96	3,59 Aa	34,25	3,00 Ab	24,83
25-50	2,94 Aa	23,67	3,05 Aa	40,44	3,28 Aa	10,39	4,41 Aa	13,95	3,98 Aa	27,43	3,31 Aa	12,45	3,06 Ab	12,01

(Continuação)

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Meso (%)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	12,18 Aa	8,12	10,81 Aa	29,67	11,29 Aa	11,95	9,33 Aa	13,40	12,96 Aa	22,62	10,93 Aa	26,59	11,54 Aa	14,07
5-25	14,42 Aa	14,95	11,51 Aa	19,51	14,51 Aa	7,29	12,80 Aa	15,77	12,73 Aa	22,45	11,34 Aa	20,74	13,44 Aa	12,60
25-50	9,58 Aa	9,06	10,14 Aa	29,76	10,86 Aa	12,67	10,67 Aa	37,29	7,80 Aa	13,73	4,79 Ab	71,80	11,17 Aa	30,22
48 MAT														
0-5	10,89 Aa	35,97	12,31 Aa	22,90	15,43 Aa	24,63	13,15 Aa	35,59	14,20 Aa	13,87	15,20 Aa	52,94	15,45 Aa	24,69
5-25	10,90 Aa	35,86	9,93 Aa	28,68	12,09 Aa	35,74	13,00 Aa	39,97	11,40 Aa	30,11	11,54 Aa	47,32	9,85 Aa	44,01
25-50	9,44 Aa	37,71	7,21 Aa	47,24	10,04 Aa	25,75	13,14 Aa	39,72	9,45 Aa	28,37	10,89 Aa	48,93	9,87 Aa	47,00
CC (%)														
0 MAT														
0-5	15,64 Aa	8,86	13,68 Aa	30,25	13,82 Aa	12,38	11,93 Aa	5,31	16,58 Aa	18,04	14,59 Aa	23,18	15,52 Aa	14,51
5-25	17,82 Aa	13,12	14,67 Aa	13,88	18,18 Aa	7,88	15,58 Aa	13,91	15,94 Aa	19,49	14,33 Aa	19,25	16,53 Aa	10,48
25-50	12,70 Aa	13,29	12,86 Aa	25,10	13,86 Aa	12,18	13,14 Aa	43,94	9,88 Aa	12,25	6,93 Ab	50,99	13,72 Aa	24,85
48 MAT														
0-5	13,80 Aa	33,21	15,33 Aa	21,89	18,64 Aa	23,51	16,22 Aa	33,19	18,08 Aa	6,60	18,43 Aa	47,68	18,40 Aa	25,55
5-25	13,92 Aa	31,34	12,93 Aa	28,56	15,30Aa	33,58	16,09 Aa	36,12	14,31 Aa	26,09	14,85 Aa	46,30	12,89 Aa	43,17
25-50	12,57 Aa	34,57	9,29 Aa	42,04	12,82 Aa	24,41	16,11 Aa	36,65	11,97 Aa	25,60	13,79 Aa	43,04	12,23 Aa	45,19

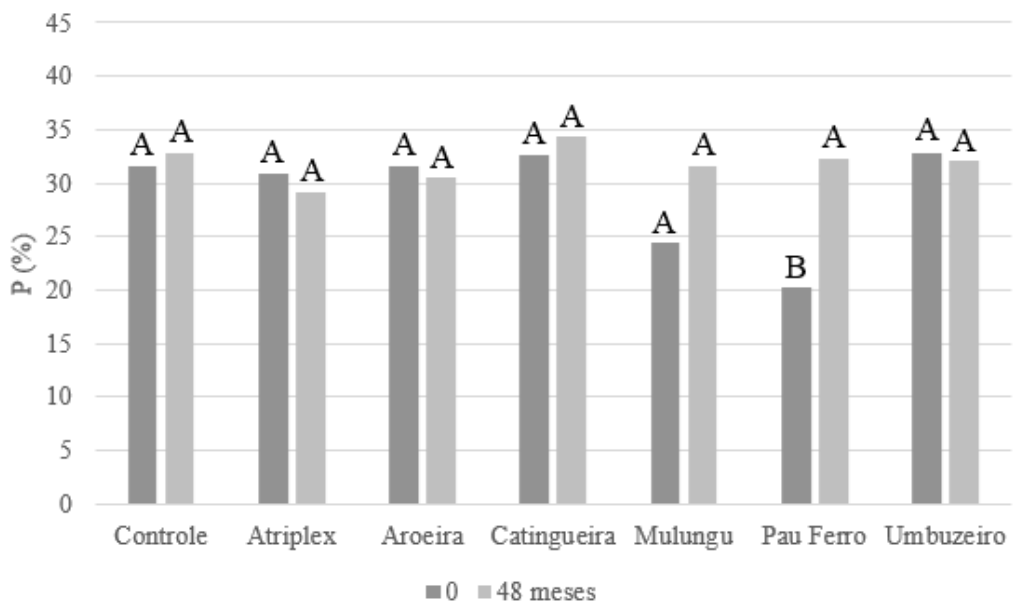
Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 7 - Diferença ao longo do tempo da porosidade total (P) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

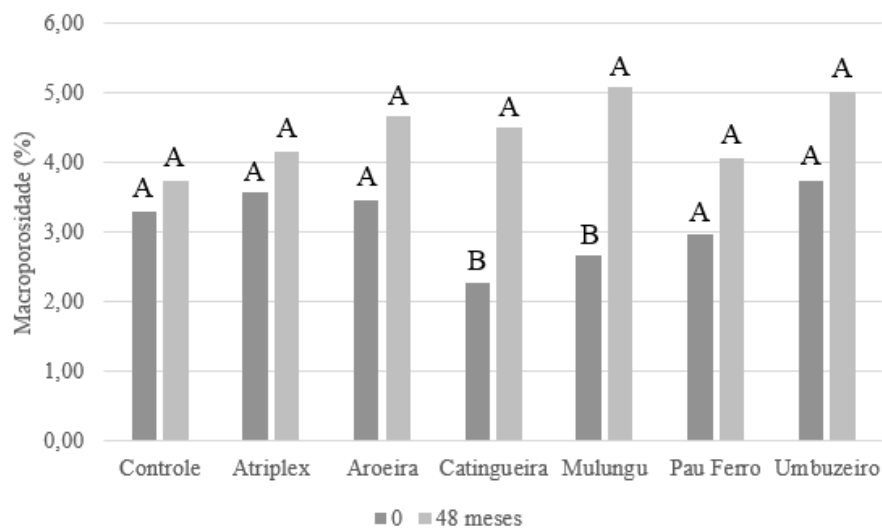
Figura 8 - Diferença ao longo do tempo da porosidade total (P) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

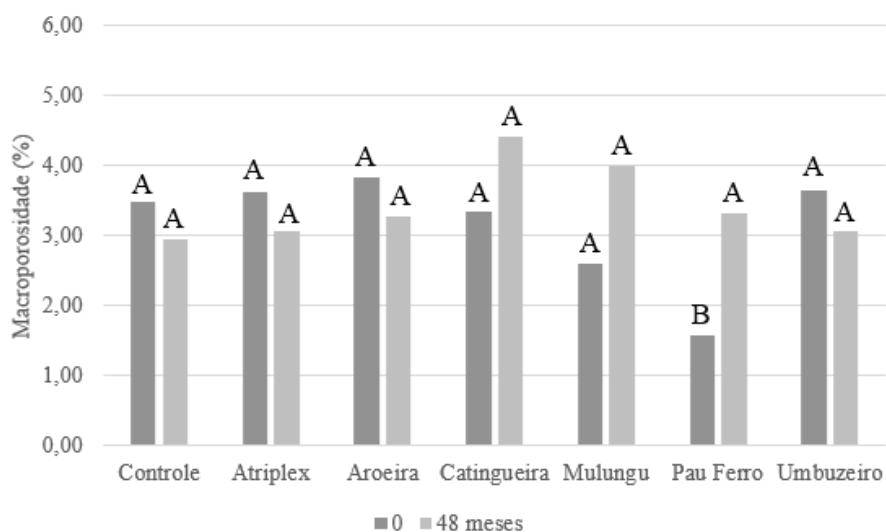
A macroporosidade aumentou no solo sob o cultivo de Catingueira e Mulungu na profundidade de 0-5cm (Figura 9), ainda havendo aumento significativo no solo cultivado com Pau Ferro na profundidade de 25-50 cm (Figura 10). A mesoporosidade e capacidade de campo (CC) aumentaram no solo sob o tratamento com Pau Ferro na profundidade de 25-50 cm (Figura 11 e 12).

Figura 9 - Diferença ao longo do tempo da macroporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 0-5 cm no semiárido de Pernambuco.



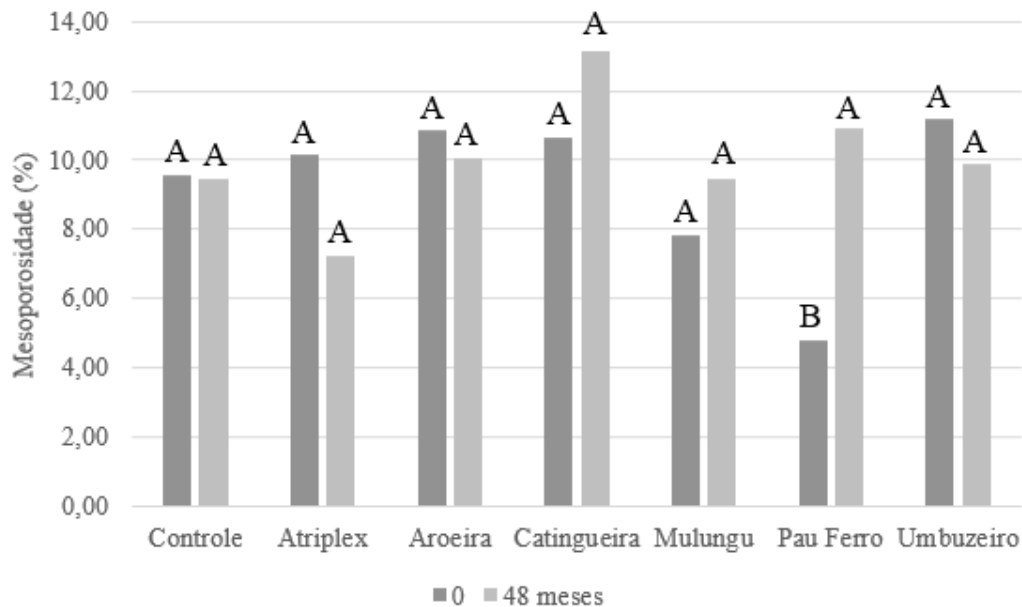
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 10 - Diferença ao longo do tempo da macroporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.



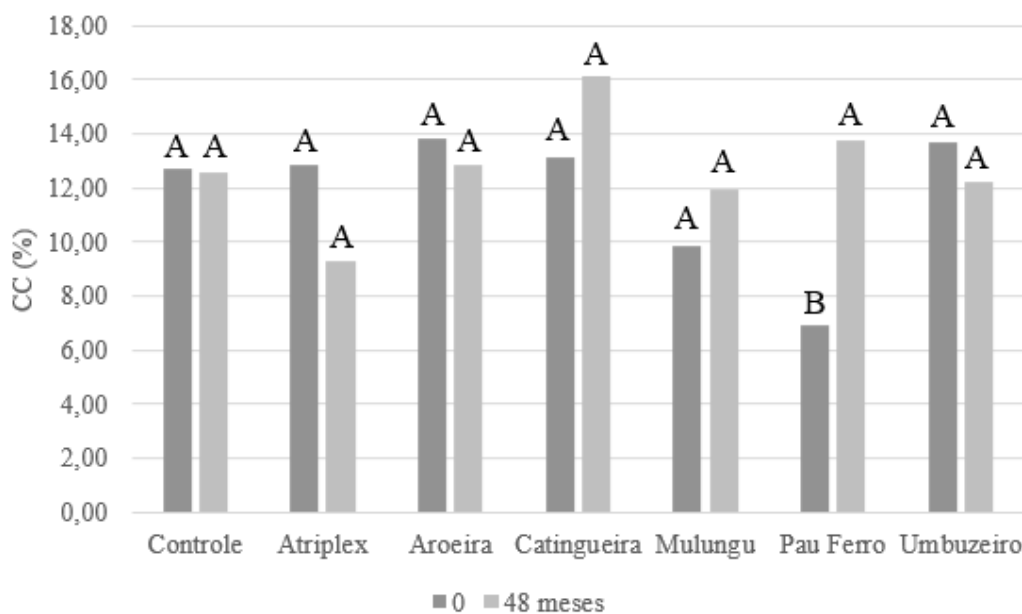
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 11 - Diferença ao longo do tempo da mesoporosidade de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 12 - Diferença ao longo do tempo na umidade da capacidade de campo (CC) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na profundidade de 25-50 cm no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

3.3.2 Atributos químicos

O pH em água variou de 4,96 a 6,59, e não apresentou diferença significativa ao longo do tempo e nem entre tratamentos. Os tratamentos com Aroeira, Mulungu e Umbuzeiro apresentaram diferença significativa em profundidade apenas ao 48 MAT, de modo que se observa uma maior acidificação nas camadas de 0-5 e 5-25 cm, o que se justifica devido a influência dos exudados das plantas que tendem a acidificar o solo (Tabela 7). Da mesma forma observa-se que o pH da pasta saturada, que foi ligeiramente maior que o pH em água, não apresentou diferença estatística nem ao longo do tempo, nem em profundidade e nem entre tratamentos variando de 5,82 a 7,52 (Tabela 8).

Houve grande variabilidade da condutividade elétrica (CE) no tempo, com valores médios que variaram de 0,89 a 7,58 dS m^{-1} no início do experimento, 0,76 a 11,16 dS m^{-1} aos 8 MAT, 2,11 a 46,85 dS m^{-1} aos 18 MAT e 2,48 a 9,65 dS m^{-1} aos 48 MAT (Tabela 9). O que é uma característica muito comum em solos afetados por sais, uma vez que em regiões semiáridas a dinâmica de íons varia sazonalmente atrelada a dinâmica de chuvas do ambiente, havendo acúmulo de sais durante a estação seca, que ascendem por capilaridade e se acumulam na superfície, e sua lixiviação durante a estação chuvosa, se não houver impedimento físico para a infiltração e drenagem da água ao longo do perfil.

Esta grande variabilidade se reflete em altos coeficientes de variação, que chegou a um máximo de 187,40%, o que contribui para a não diferenciação estatística dos tratamentos mesmo com valores tão contrastantes. Sendo assim, não houve diferença entre tratamentos, nem em profundidade. Ao longo do tempo observa-se que houve aumento significativo da CE em superfície (0-5 cm) aos 18 MAT, com diminuição aos 48 MAT, apenas no solo cultivado com Atriplex e Pau Ferro (Figura 13).

Quando se leva em consideração o acumulado de chuvas em cada tempo de coleta, percebe-se que a variação da CE acompanha a variação da precipitação pluvial (Figura 3), de modo que quando houve diminuição da precipitação nos meses anteriores à coleta do solo, o acúmulo de sais foi maior, havendo translocação dos mesmos na última coleta para camadas mais profundas do perfil (Agosto/2020) com o aumento das chuvas no período anterior, uma vez que os anos de 2019 e 2020 foram mais chuvosos com acumulados de 890,9 e 713,2 mm, respectivamente.

É importante ressaltar que o solo apresenta problemas de infiltração, o que não contribui para uma boa lavagem dos sais ao longo do perfil durante os períodos de chuva, o que pode explicar os valores ainda elevados ao final do experimento, mesmo com anos mais chuvosos.

Tabela 7 – Valores médios de pH em água (pH_(H₂O)) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
pH (H ₂ O)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	6,13 Aa	8,96	6,22 Aa	6,65	6,15 Aa	3,45	6,30 Aa	6,10	6,29 Aa	6,85	6,66 Aa	10,42	5,94 Aa	6,71
5-25	6,01 Aa	8,89	5,89 Aa	7,56	6,09 Aa	4,37	6,22 Aa	4,70	6,26 Aa	6,50	6,22 Aa	8,70	6,11 Aa	3,35
25-50	6,19 Aa	9,08	6,27 Aa	15,15	5,92 Aa	4,04	6,25 Aa	3,79	6,18 Aa	11,39	6,07 Aa	8,90	6,40 Aa	6,63
8 MAT														
0-5	6,35 Aa	6,60	6,10 Aa	9,41	6,05 Aa	3,40	6,34 Aa	8,90	6,13 Aa	3,19	5,98 Aa	2,31	5,93 Aa	7,05
5-25	5,81 Aa	7,84	5,85 Aa	9,14	5,19 Aa	2,93	5,76 Aa	4,35	5,71 Aa	9,41	5,78 Aa	8,56	5,77 Aa	9,62
25-50	6,34 Aa	7,80	5,90 Aa	9,52	5,52 Aa	3,52	5,87 Aa	4,88	6,17 Aa	9,51	6,20 Aa	16,32	6,27 Aa	14,77
18 MAT														
0-5	6,16 Aa	8,90	5,51 Aa	10,48	5,59 Aa	6,87	5,60 Aa	8,74	6,02 Aa	19,10	5,99 Aa	5,70	5,63 Aa	7,86
5-25	5,90 Aa	2,83	5,76 Aa	8,50	5,77 Aa	6,74	5,81 Aa	6,03	5,78 Aa	11,56	5,69 Aa	5,45	5,79 Aa	9,15
25-50	6,59 Aa	5,61	6,18 Aa	4,19	5,81 Aa	8,59	6,40 Aa	3,71	6,00 Aa	13,40	5,75 Aa	4,32	6,26 Aa	12,99
48 MAT														
0-5	5,70 Aa	9,96	5,61 Aa	8,73	4,97 Ab	4,48	5,42 Aa	7,00	5,44 Ab	6,59	5,78 Aa	14,78	5,53 Ab	4,82
5-25	5,85 Aa	10,65	5,86 Aa	6,65	5,23 Ab	3,46	5,84 Aa	8,34	5,73 Ab	3,64	5,65 Aa	4,70	5,71 Aab	13,69
25-50	6,28 Aa	6,26	6,39 Aa	7,58	6,13 Aa	8,92	6,25 Aa	8,34	6,69 Aa	6,42	6,18 Aa	13,61	6,40 Aa	11,50

Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Tabela 8 - Valores médios de pH da pasta saturada (pH_(P.S.)) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
pH (P.S.)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	6,40 Aa	10,03	6,54 Aa	7,01	6,09 Aa	8,11	6,80 Aa	12,88	6,61 Aa	10,67	6,48 Aa	13,20	6,04 Aa	11,95
5-25	6,00 Aa	12,37	6,47 Aa	13,33	6,24 Aa	9,75	6,60 Aa	8,14	6,53 Aa	14,80	6,17 Aa	10,23	6,28 Aa	3,70
25-50	6,18 Aa	10,81	5,84 Ab	8,25	5,82 Aa	11,42	6,38 Aa	10,27	5,97 Aa	12,92	6,19 Aa	11,15	6,26 Aa	6,43
8 MAT														
0-5	6,77 Aa	5,32	7,20 Aa	3,01	6,71 Aa	10,80	7,52 Aa	10,40	6,99 Aa	3,27	7,17 Aa	5,58	7,09 Aa	2,14
5-25	6,44 Aa	6,52	6,75 Aa	9,85	6,67 Aa	10,00	7,23 Aa	2,43	6,74 Aa	8,12	6,60 Aa	7,90	6,78 Aa	5,43
25-50	7,25 Aa	2,12	7,02 Aa	6,00	7,21 Aa	1,91	7,31 Aa	3,20	7,14 Aa	6,97	7,31 Aa	3,01	7,40 Aa	1,48
18 MAT														
0-5	6,93 Aa	8,93	6,66 Aa	10,02	6,88 Aa	7,44	6,61 Aa	8,37	6,68 Aa	13,22	6,58 Aa	9,75	6,74 Aa	3,44
5-25	7,27 Aa	9,03	7,12 Aa	6,40	7,24 Aa	4,62	6,57 Aa	9,77	7,33 Aa	4,84	7,01 Aa	7,61	6,81 Aa	8,49
25-50	7,29 Aa	7,09	6,83 Aa	5,35	6,72 Aa	11,31	6,83 Aa	6,21	6,88 Aa	11,18	6,90 Aa	6,86	6,47 Aa	14,51
48 MAT														
0-5	6,53 Aa	12,98	6,84 Aa	11,51	6,38 Aa	10,51	6,53 Aa	4,28	6,62 Aab	8,73	6,09 Aa	11,28	6,06 Aa	5,58
5-25	6,65 Aa	11,06	6,32 Aa	4,40	6,20 Aa	7,10	6,39 Aa	4,49	6,01 Ab	13,13	6,16 Aa	8,30	6,04 Aa	9,40
25-50	6,81 Aa	3,76	6,62 Aa	10,12	6,60 Aa	4,62	6,72 Aa	3,43	6,91 Aa	6,48	6,74 Aa	6,15	6,64 Aa	10,75

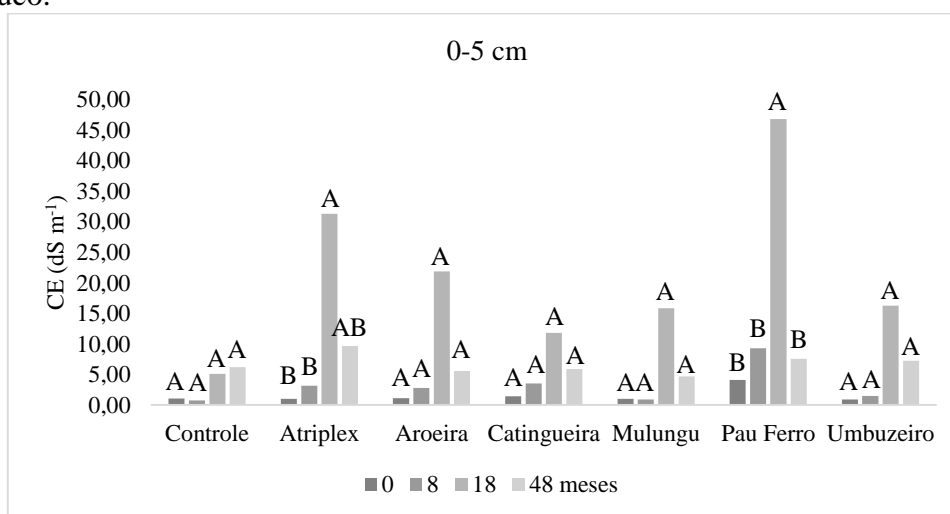
Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Tabela 9 - Valores médios de condutividade elétrica (CE) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
CE (dS m ⁻¹)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	1,07 Aa	48,15	1,02 Aa	28,27	1,10 Aa	84,61	1,40 Aa	75,77	1,00 Aa	42,70	4,09 Aa	142,52	0,89 Aa	47,05
5-25	0,89 Aa	92,54	1,41 Aa	20,02	1,58 Aa	107,15	2,09 Aa	153,02	0,95 Aa	54,44	3,28 Aa	145,73	1,01 Aa	90,30
25-50	2,49 Aa	64,42	7,58 Aa	34,12	6,09 Aa	60,50	3,61 Aa	75,01	6,09 Aa	28,27	6,26 Aa	83,35	4,33 Aa	84,95
8 MAT														
0-5	0,76 Aa	77,70	3,14 Aa	75,57	2,82 Aa	134,77	3,51 Aa	146,11	0,89 Aa	47,88	9,28 Aa	182,13	1,47 Aa	86,31
5-25	1,57 Aa	36,05	7,37 Aa	80,14	6,59 Aa	72,29	6,60 Aa	109,45	5,08 Aa	93,99	5,28 Aa	93,52	5,47 Aa	80,32
25-50	6,43 Aa	72,24	10,27 Aa	52,04	11,16 Aa	27,74	9,44 Aa	73,91	9,27 Aa	39,76	9,34 Aa	54,74	9,47 Aa	56,41
18 MAT														
0-5	5,11 Aa	120,58	31,33 Aa	168,51	21,86 Aa	187,40	11,82 Aa	94,21	15,87 Aa	155,52	46,85 Aa	169,36	16,29 Aa	154,71
5-25	2,11 Aa	92,50	8,10 Aa	67,55	3,30 Aa	149,61	5,04 Aa	63,82	3,99 Aa	52,03	10,01 Aab	135,61	5,03 Aa	67,13
25-50	2,33 Aa	106,50	8,18 Aa	26,65	5,93 Aa	29,82	5,78 Aa	70,57	6,51 Aa	50,98	7,83 Ab	77,39	4,73 Aa	61,35
48 MAT														
0-5	6,18 Aa	61,01	9,65 Aa	32,56	5,58 Aa	35,16	5,90 Aa	69,39	4,66 Aa	49,03	7,58 Aa	114,27	7,25 Aa	44,93
5-25	4,14 Aa	110,39	5,38 Aa	46,58	3,69 Aa	44,67	4,41 Aa	113,50	2,63 Aa	85,18	3,21 Aa	90,43	5,75 Aa	33,54
25-50	5,29 Aa	136,45	6,02 Aa	112,58	3,13 Aa	66,44	4,32 Aa	102,29	2,48 Aa	57,23	5,40 Aa	98,89	5,86 Aa	62,09

Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 13 - Condutividade elétrica de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex ao longo do tempo, na camada de 0-5 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Os cátions solúveis e a RAS, de forma semelhante à CE, apresentaram grande variabilidade ao longo do tempo também acompanhando a dinâmica de chuvas. A concentração de Na^+ na solução do solo variou de 1,09 a 838,30 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ na camada de 0-5 cm, 3,87 a 161,68 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ na camada de 5-25 cm e de 13,27 a 146,25 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ na camada de 25-50 cm. O K^+ variou de 1,46 a 34,22 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 0,96 a 5,03 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ e 0,39 a 2,75 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm, respectivamente (Tabela 10). De modo que o Na^+ predomina na solução em detrimento dos demais cátions, potencializando o risco de toxicidade na maioria das plantas.

A concentração de Ca^{2+} variou de 1,49 a 62,08 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 1,28 a 12,12 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ e de 2,06 a 18,72 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, e a concentração de Mg^{2+} variou de 1,79 a 186,67 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, 1,98 a 28,87 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$ e de 4,33 a 29,56 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$, nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm, respectivamente (Tabela 10). Observa-se que há um maior predomínio de Mg^{2+} na solução do solo em relação ao Ca^{2+} , o que também pode ser problemático uma vez que o Mg^{2+} possui uma menor energia de adsorção e isso acaba provocando indiretamente uma maior adsorção de Na^+ . Além disto, nutricionalmente as plantas necessitam de mais Ca do que Mg, e este desequilíbrio dos íons na solução pode acarretar num mau desenvolvimento das plantas, fazendo com que não absorvam estes nutrientes em concentrações adequadas, desencadenando toxicidade e desequilíbrio nutricional.

Diante disto, observou-se de fato que o solo do estudo apresentou uma alta relação de adsorção de sódio (RAS), que variou de 0,66 a 62,20 ($\text{mmol}_c \text{kg}^{-1}$)^{0,5} na camada de 0-5 cm, 2,03

a 37,51 (mmol_c kg⁻¹)^{0,5} na camada de 5-25 cm e de 6,31 a 33,53 (mmol_c kg⁻¹)^{0,5} na camada de 25-50 cm (Tabela 11).

Em profundidade observou-se uma diferença significativa para o Na⁺ no tratamento com o Pau Ferro aos 18 MAT, o qual foi maior na camada de 0-5 cm. Para o K⁺ todos os tratamentos foram significativamente maiores na camada de 0-5 cm aos 48 MAT. Para o Ca²⁺ aos 48 MAT os teores foram maiores em superfície para os tratamentos com Aroeira, Catingueira e Umbuzeiro, e o Mg²⁺ e a RAS não apresentaram nenhuma diferença em profundidade em todas as coletas (Tabela 10 e 11).

Entre tratamentos houve diferença significativa apenas aos 18 MAT na camada de 0-5 cm para o Na⁺ e a RAS. Que foram menores para os tratamentos Controle, Aroeira e Catingueira, de modo que uma vez que o tratamento sem presença de plantas (controle) está entre os que apresentaram valores mais baixos, esta redução não deve ser atribuída a uma absorção pelas plantas.

Ao longo do tempo houve um aumento aos 18 MAT com posterior redução aos 48 MAT. Este aumento e redução foram significativos na camada superficial para o Na⁺ nos tratamentos com Atriplex e Pau Ferro (Figura 14), para o K⁺ no tratamento com Pau Ferro (Figura 15), para o Ca²⁺ nos tratamentos com Atriplex e Aroeira (Figura 16), para o Mg²⁺ nos tratamentos com Atriplex e Aroeira (Figura 17), e para a RAS no tratamento com Pau Ferro (Figura 18).

Diversos autores apontam este mesmo comportamento de acúmulo de sais, especialmente de Na⁺ e Cl⁻ durante as épocas secas, altos valores de RAS, e sua diluição nas épocas chuvosas. Também salientam que a análise e o entendimento dessa dinâmica tornam-se importantes, visto que os mesmos se relacionam e determinam critérios e limites de caracterização dos solos afetados por sais e/ou sódio, influenciando na eficiência do manejo agrícola (ÁLVAREZ-ROGEL et al., 2007; SANTOS et al., 2013; BUSCAROLI; ZANNONI, 2017).

Tabela 10 - Valores médios dos cátions solúveis de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Na⁺ (mmol_c L⁻¹)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	2,94 Aa	149,51	3,01 Aa	65,76	2,29 Aa	90,22	5,00 Aa	151,05	1,09 Aa	75,65	22,79 Aa	186,89	1,81 Aa	50,68
5-25	4,21 Aa	115,85	13,32 Aa	79,27	5,48 Aa	82,77	11,78 Aa	179,77	4,41 Aa	94,09	22,00 Aa	163,12	6,23 Aa	77,53
25-50	13,27 Aa	68,90	39,08 Aa	53,21	35,92 Aa	65,87	20,07 Aa	89,71	33,60 Aa	46,07	41,35 Aa	101,85	28,43 Aa	83,70
8 MAT														
0-5	1,62 Aa	124,50	9,50 Aa	108,45	11,78 Aa	166,54	15,79 Aa	191,50	1,43 Aa	80,78	99,78 Aa	196,65	2,62 Aa	69,76
5-25	3,87 Aa	56,49	49,51 Aa	93,37	39,82 Aa	111,21	44,49 Aa	131,30	30,35 Aa	131,28	35,92 Aa	154,31	33,00 Aa	136,58
25-50	48,45 Aa	88,35	86,74 Aa	46,35	74,70 Aa	48,79	68,97 Aa	95,62	64,07 Aa	64,49	78,81 Aa	61,62	75,72 Aa	61,97
18 MAT														
0-5	46,85 Ba	155,12	389,02 ABa	178,87	148,89 ABa	188,43	68,25 Ba	65,61	131,22 ABa	157,35	838,30 Aa	180,15	124,33 ABa	160,99
5-25	27,52 Aa	136,43	161,68 Aa	86,15	53,17 Aa	166,08	37,44 Aa	73,73	48,99 Aa	80,83	155,24 Ab	172,94	90,65 Aa	79,31
25-50	32,43 Aa	103,57	111,75 Aa	23,65	91,51 Aa	51,16	95,98 Aa	66,79	93,27 Aa	54,21	146,25 Ab	103,44	68,93 Aa	67,48
48 MAT														
0-5	52,27 Aa	138,72	59,72 Aa	59,84	30,58 Aa	63,10	49,80 Aa	107,72	38,32 Aa	84,41	33,66 Aa	103,36	31,61 Aa	77,78
5-25	18,01 Aa	85,70	64,44 Aa	44,66	16,60 Aa	88,18	50,59 Aa	135,48	23,98 Aa	117,63	32,13 Aa	121,42	29,58 Aa	53,63
25-50	44,38 Aa	111,95	62,17 Aa	54,76	43,56 Aa	74,02	59,10 Aa	118,10	38,43 Aa	52,39	58,08 Aa	103,98	56,37 Aa	68,53
K⁺ (mmol_c L⁻¹)														
0 MAT														
0-5	1,97 Aa	41,48	1,74 Aa	57,89	1,87 Aa	79,51	2,69 Aa	38,23	2,03 Aa	51,63	3,96 Aa	45,26	2,40 Aa	62,60
5-25	1,19 Aa	85,60	1,96 Aa	150,04	0,96 Aa	93,32	0,96 Aa	24,72	1,15 Aa	34,93	2,70 Ab	79,27	2,01 Aa	90,00
25-50	0,39 Aa	64,37	0,97 Aa	43,27	0,88 Aa	59,59	0,81 Aa	37,70	0,74 Aa	22,99	1,40 Ab	53,19	3,90 Aa	151,58

(Continuação)

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Prof. (cm)	8 MAT													
0-5	1,79 Aa	25,25	3,01 Aa	92,47	2,81 Aa	48,23	5,86 Aa	148,92	1,46 Aa	59,09	1,78 Aa	103,39	2,78 Aa	45,06
5-25	1,49 Aa	69,28	1,74 Aa	26,94	1,22 Aa	23,41	2,47 Aab	36,73	1,81 Aa	44,73	2,59 Aa	76,99	1,42 Aa	57,04
25-50	0,52 Aa	61,17	0,88 Aa	32,41	1,19 Aa	53,59	1,35 Ab	43,79	1,12 Aa	33,55	1,06 Aa	45,20	1,01 Aa	69,33
	18 MAT													
0-5	13,68 Aa	48,46	15,87 Aa	72,31	8,26 Aa	88,54	17,00 Aa	77,56	12,15 Aa	114,67	34,22 Aa	156,96	15,87 Aa	94,57
5-25	3,36 Aa	62,86	1,78 Aa	51,90	1,34 Aa	60,52	4,11 Aa	78,55	5,03 Aa	21,88	4,59 Aa	72,23	1,59 Aa	84,88
25-50	1,09 Aa	87,41	0,83 Aa	42,43	0,76 Aa	59,46	1,30 Aa	80,44	0,94 Aa	18,40	2,56 Aa	147,38	0,73 Aa	45,81
	48 MAT													
0-5	7,48 Aa	61,47	11,41 Aa	65,14	8,88 Aa	20,70	10,54 Aa	54,12	6,31 Aa	48,06	7,17 Aa	59,63	8,27 Aa	50,13
5-25	3,10 Aab	57,34	2,17 Aab	148,48	3,17 Ab	51,79	2,75 Aab	107,27	1,07 Ab	24,82	2,55 Ab	28,27	2,91 Ab	101,16
25-50	2,75 Ab	154,85	0,59 Ab	64,30	0,67 Ab	71,59	1,18 Ab	68,35	0,54 Ab	47,97	0,77 Ab	84,46	1,23 Ab	109,84
	Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)													
	0 MAT													
0-5	2,33 Aa	34,54	1,79 Ab	38,89	2,10 Aa	77,21	2,34 Aa	56,36	2,58 Aab	76,14	3,63 Aa	75,48	1,49 Aa	33,25
5-25	1,70 Aa	77,06	2,23 Ab	59,00	2,25 Aa	118,68	2,03 Aa	120,22	1,45 Ab	51,19	1,97 Aa	92,60	1,28 Aa	87,18
25-50	3,03 Aa	86,93	7,24 Aa	67,18	5,56 Aa	59,16	3,14 Aa	56,29	6,49 Aa	34,85	4,77 Aa	63,77	4,34 Aa	93,92
	8 MAT													
0-5	2,59 Aa	51,51	7,93 Aa	53,07	4,97 Aa	81,17	5,06 Ab	70,31	2,39 Aa	34,59	9,28 Aa	129,48	3,55 Aa	96,82
5-25	3,58 Aa	51,81	12,12 Aa	76,45	10,67 Aa	41,54	9,62 Aab	111,79	7,63 Aa	42,44	5,55 Aa	47,89	6,06 Aa	70,16
25-50	6,76 Aa	95,83	13,32 Aa	81,35	14,17 Aa	42,10	18,72 Aa	107,19	9,66 Aa	41,29	7,78 Aa	72,43	8,57 Aa	61,61
	18 MAT													
0-5	11,43 Aa	119,54	62,08 Aa	166,03	32,91 Aa	178,51	32,12 Aa	102,46	20,07 Aa	121,60	30,36 Aa	115,26	27,85 Aa	130,82
5-25	3,16 Aa	47,27	9,02 Ab	45,81	3,05 Aa	83,25	6,99 Aa	70,51	6,74 Aa	42,49	8,62 Aa	111,24	5,80 Aa	61,83
25-50	2,06 Aa	57,23	9,09 Ab	35,27	7,26 Aa	49,41	9,14 Aa	112,13	9,62 Aa	53,61	8,00 Aa	42,06	6,44 Aa	32,91

(Continuação)

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Prof. (cm)	48 MAT													
0-5	12,05 Aa	55,50	13,45 Aa	44,15	14,31 Aa	30,31	11,53 Aa	32,64	9,52 Aa	32,94	10,31 Aa	25,64	13,78 Aa	29,75
5-25	5,93 Aa	66,87	7,61 Aa	51,86	8,01 Ab	53,99	6,97 Aab	73,04	6,69 Aa	32,01	5,23 Aa	55,87	9,53 Aab	43,91
25-50	6,28 Aa	64,59	7,57 Aa	37,21	5,68 Ab	38,13	5,17 Ab	53,86	5,34 Aa	35,37	7,97 Aa	42,71	5,64 Ab	52,05
	Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)													
	0 MAT													
0-5	2,66 Aa	37,01	2,81 Aa	48,54	3,02 Aa	78,96	2,72 Aa	69,77	4,31 Aa	121,38	11,54 Aa	121,97	1,95 Aa	42,90
5-25	2,19 Aa	115,96	3,97 Aa	80,81	3,81 Aa	116,35	4,47 Aa	148,39	2,05 Aa	46,01	6,56 Aa	162,51	1,98 Aa	86,32
25-50	5,70 Aa	103,76	15,13 Aa	75,60	15,80 Aa	85,03	6,63 Aa	62,69	9,91 Aa	91,03	12,48 Aa	117,60	10,13 Aa	92,52
	8 MAT													
0-5	1,79 Aa	38,72	10,30 Aa	81,40	10,84 Aa	148,70	11,91 Aa	139,76	2,79 Aa	52,63	41,18 Aa	185,90	6,84 Aa	132,55
5-25	4,08 Aa	29,73	24,69 Aa	80,12	18,04 Aa	73,49	19,30 Aa	122,01	14,09 Aa	87,55	21,56 Aa	96,72	18,27 Aa	91,65
25-50	15,04 Aa	101,40	25,71 Aa	78,71	29,17 Aa	41,06	29,56 Aa	76,45	23,78 Aa	41,20	22,38 Aa	64,89	23,84 Aa	67,18
	18 MAT													
0-5	20,79 Aa	104,93	186,67 Aa	182,57	152,07 Aa	191,92	55,30 Aa	92,19	54,95 Aa	130,80	112,40 Aa	147,60	50,01 Aa	151,90
5-25	5,66 Aa	113,49	23,14 Aa	65,61	8,91 Aa	138,29	13,79 Aa	63,93	9,67 Aa	68,64	28,87 Aa	136,55	13,15 Aa	61,85
25-50	6,81 Aa	82,33	20,84 Aa	42,24	15,49 Aa	30,28	15,34 Aa	70,46	16,96 Aa	59,67	22,51 Aa	66,43	11,29 Aa	70,51
	48 MAT													
0-5	14,49 Aa	79,60	26,04 Aa	29,76	20,88 Aa	37,64	21,45 Aa	66,66	13,78 Aa	36,95	20,53 Aa	91,37	20,49 Aa	37,72
5-25	9,09 Aa	91,53	11,85 Aa	41,64	13,59 Aa	44,50	12,44 Aa	118,07	7,72 Aa	93,67	6,85 Aa	63,55	17,74 Aa	39,28
25-50	11,63 Aa	136,12	14,67 Aa	88,39	8,17 Aa	69,05	8,65 Aa	82,28	4,33 Aa	70,40	13,41 Aa	121,22	12,57 Aa	65,87

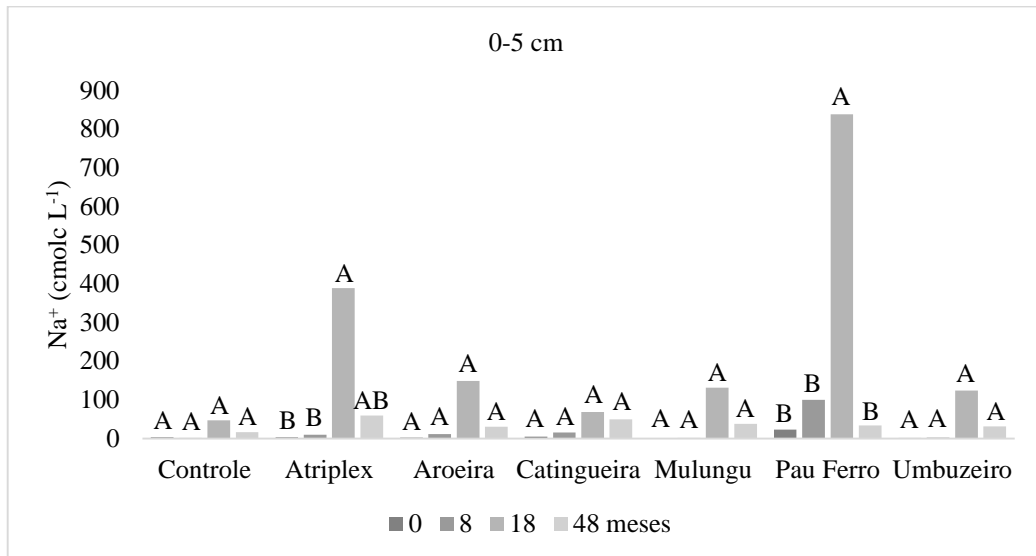
Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Tabela 11 - Valores médios da relação de adsorção de sódio (RAS) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

Prof. (cm)	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
RAS														
0 MAT														
0-5	1,65 Aa	138,49	2,00 Aa	55,97	1,31 Aa	56,88	2,56 Aa	134,08	0,66 Ab	47,87	5,44 Aa	170,77	1,33 Aa	38,58
5-25	2,65 Aa	67,69	9,19 Aa	97,88	3,28 Aa	57,88	4,47 Aa	139,51	3,73 Aab	106,16	8,30 Aa	101,55	6,60 Aa	108,83
25-50	6,31 Aa	39,69	12,17 Aa	25,19	10,58 Aa	45,88	8,49 Aa	70,84	11,69 Aa	20,04	12,73 Aa	58,18	10,93 Aa	34,53
8 MAT														
0-5	0,96 Aa	102,24	2,80 Ab	74,85	3,01 Aa	125,14	3,45 Aa	180,97	0,85 Aa	68,27	10,99 Aa	183,20	1,25 Aa	14,12
5-25	2,03 Aa	62,31	10,18 Aab	67,41	8,93 Aa	94,57	9,11 Aa	107,53	7,53 Aa	108,77	7,78 Aa	128,44	7,84 Aa	104,54
25-50	13,35 Aa	59,86	20,02 Aa	14,90	15,74 Aa	38,68	12,78 Aa	89,49	14,77 Aa	58,47	20,59 Aa	49,80	17,61 Aa	48,59
18 MAT														
0-5	9,06 Ba	110,78	25,03 ABa	115,18	10,48 Ba	125,57	10,25 Ba	49,65	15,69 ABa	118,55	62,20 Aa	160,13	14,67 ABa	109,15
5-25	10,86 Aa	95,11	37,51 Aa	73,43	15,76 Aa	123,60	11,23 Aa	51,27	15,30 Aa	71,19	25,00 Aa	134,65	19,44 Aa	98,67
25-50	13,87 Aa	65,73	29,48 Aa	13,88	27,20 Aa	41,93	26,00 Aa	48,73	25,13 Aa	34,26	33,53 Aa	72,71	21,86 Aa	43,03
48 MAT														
0-5	13,14 Aa	127,79	13,30 Aa	58,11	7,10 Aa	51,57	11,04 Aa	90,24	10,62 Aa	79,11	7,59 Aa	76,07	7,60 Aa	73,28
5-25	6,18 Aa	53,00	20,86 Aa	34,45	5,13 Aa	69,30	12,66 Aa	112,73	7,56 Aa	104,56	12,46 Aa	114,58	8,14 Aa	47,32
25-50	13,78 Aa	54,24	18,48 AA	22,11	15,55 Aa	73,36	19,18 Aa	94,73	17,89 Aa	53,16	15,64 Aa	72,26	18,08 Aa	45,80

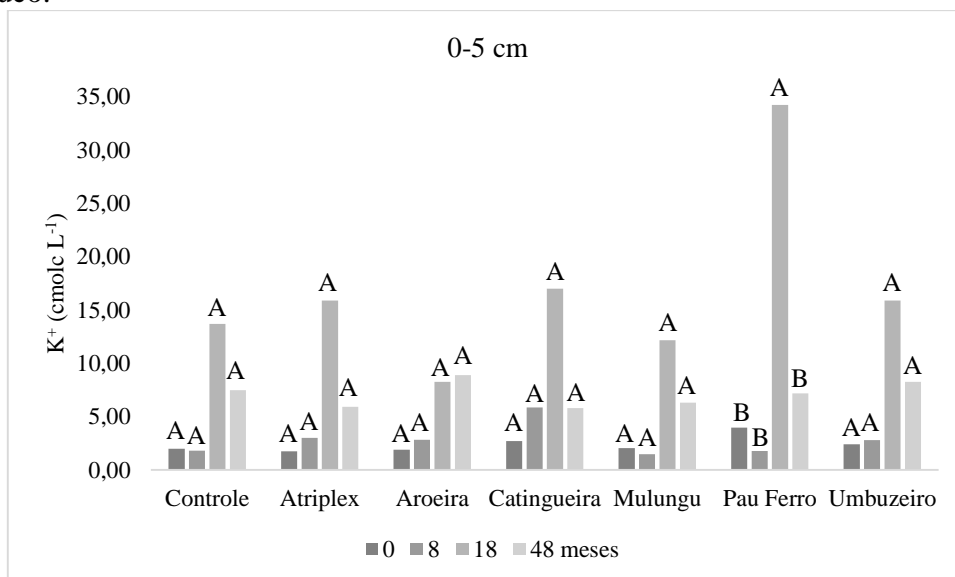
Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 14 - Sódio (Na^+) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



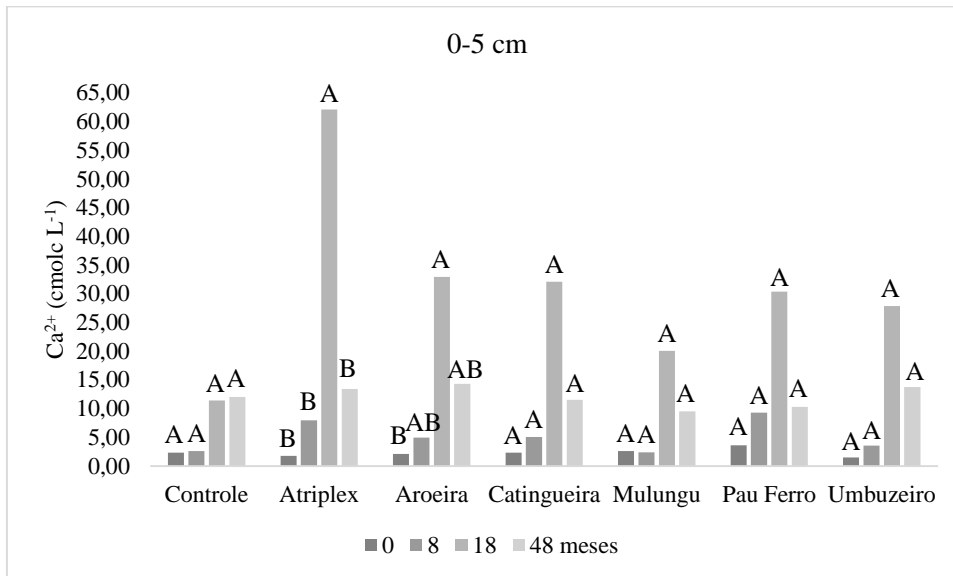
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Figura 15 - Potássio (K^+) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



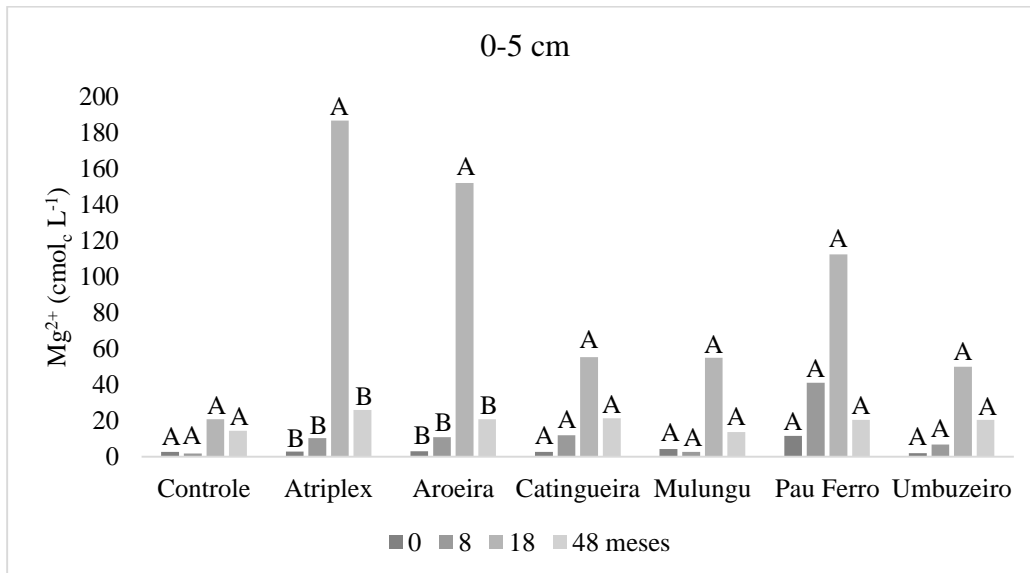
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Figura 16 - Cálcio (Ca^{2+}) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



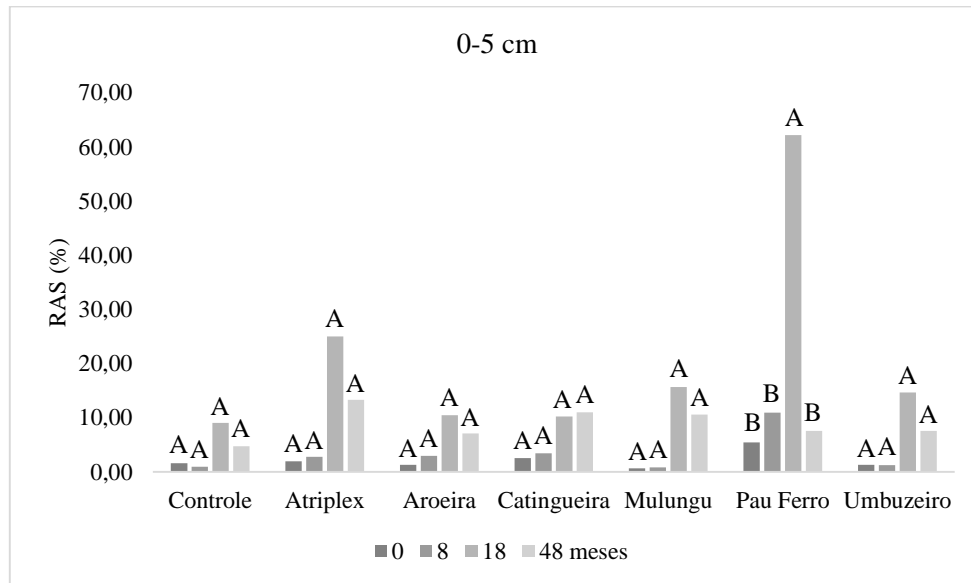
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Figura 17 - Magnésio (Mg^{2+}) solúvel de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Figura 18 – Relação de adsorção de sódio (RAS) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex em diferentes profundidades e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

O Na^+ trocável variou de 0,10 a 0,36 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm, de 0,07 a 0,37 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 5-25 cm, e de 0,16 a 0,47 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 25-50 cm, sendo maior em subsuperfície de maneira geral, mas não havendo diferença significativa entre profundidades, entre tratamentos e nem ao longo do tempo (Tabela 12).

Enquanto o K^+ trocável variou de 0,34 a 0,93 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 0-5 cm, de 0,19 a 0,48 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 5-25 cm, e de 0,16 a 0,50 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ na camada de 25-50 cm, sendo maior em superfície, sendo esta diferença entre profundidades significativa para a Catingueira e Pau Ferro aos 0 MAT, Atriplex e Catingueira aos 18 MAT, para todos os tratamentos exceto Aroeira aos 18 MAT e para todos os tratamentos aos 48 MAT (Tabela 12).

Entre os tratamentos houve diferenciação apenas aos 18 MAT, com o solo sob cultivo de Aroeira apresentando as menores concentrações de K^+ e o solo sob cultivo de Mulungu e sem cultivo de plantas (controle) apresentando as maiores concentrações (Tabela 12). Ao longo do tempo observou-se uma redução significativa nos teores de K^+ para os tratamentos com Atriplex e Catingueira (Figura 19)

Ao contrário do observado para os cátions solúveis, no complexo de troca há uma maior concentração de K^+ em relação ao Na^+ em superfície, refletindo em valores de PST abaixo dos 15%, o que pode ser benéfico uma vez que o Na^+ em excesso no complexo de troca é um dos principais fatores que contribuem para a dispersão dos colóides do solo e contribuem com a degradação da estrutura do mesmo.

Tabela 12 - Valores médios dos cátions trocáveis de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Na^+ (cmol _c kg ⁻¹)														
0 MAT														
Prof. (cm)														
0-5	0,28 Aa	85,94	0,32 Aa	73,34	0,34 Aa	42,74	0,36 Aa	105,92	0,19 Aa	66,74	0,30 Aa	130,69	0,25 Aa	78,04
5-25	0,25 Aa	60,07	0,34 Aa	61,41	0,24 Aa	42,85	0,36 Aa	83,45	0,21 Aa	53,62	0,29 Aa	114,22	0,19 Aa	78,88
25-50	0,29 Aa	49,06	0,35 Aa	21,51	0,31 Aa	20,17	0,33 Aa	56,34	0,38 Aa	24,78	0,36 Aa	62,93	0,40 Aa	42,58
8 MAT														
0-5	0,22 Aa	46,70	0,27 Aa	45,18	0,29 Aa	83,52	0,22 Aa	104,94	0,18 Aa	32,39	0,32 Aa	92,78	0,18 Aa	47,88
5-25	0,13 Aa	24,15	0,32 Aa	40,64	0,18 Aa	20,67	0,17 Aa	72,18	0,15 Aa	61,34	0,29 Aa	118,11	0,37 Aa	78,33
25-50	0,37 Aa	95,74	0,35 Aa	29,79	0,24 Aa	15,62	0,26 Aa	68,97	0,30 Aa	65,25	0,42 Aa	60,27	0,47 Aa	62,91
18 MAT														
0-5	0,19 Aa	28,23	0,26 Aa	83,98	0,26 Aa	109,57	0,19 Aa	50,10	0,26 Aa	72,53	0,32 Aa	79,48	0,23 Aa	76,04
5-25	0,10 Aa	20,28	0,20 Aa	54,12	0,11 Aa	56,43	0,13 Aa	49,44	0,17 Aa	55,46	0,17 Aa	66,25	0,19 Aa	72,99
25-50	0,16 Aa	55,40	0,21 Aa	29,12	0,18 Aa	49,88	0,35 Aa	86,84	0,20 Aa	58,10	0,21 Aa	52,96	0,24 Aa	22,02
48 MAT														
0-5	0,25 Aa	101,72	0,34 Aa	82,74	0,10 Aa	68,90	0,18 Aa	125,91	0,11 Aa	86,49	0,33 Aa	144,21	0,24 Aa	83,30
5-25	0,22 Aa	123,58	0,24 Aa	64,67	0,07 Aa	81,41	0,15 Aa	76,84	0,09 Aa	79,23	0,21 Aa	143,58	0,22 Aa	74,47
25-50	0,26 Aa	110,97	0,40 Aa	60,57	0,21 Aa	34,83	0,27 Aa	122,12	0,28 Aa	62,09	0,32 Aa	42,18	0,38 Aa	60,88
K^+ (cmol _c kg ⁻¹)														
0 MAT														
0-5	0,52 Aa	32,11	0,57 Aa	33,58	0,47 Aa	54,79	0,64 Aa	15,29	0,60 Aa	31,17	0,70 Aa	37,56	0,55 Aa	52,86
5-25	0,28 Aa	34,57	0,26 Aa	22,59	0,24 Aa	27,79	0,37 Aab	11,77	0,35 Aa	47,82	0,48 Aab	66,63	0,28 Aa	21,78
25-50	0,16 Aa	81,53	0,21 Aa	38,61	0,18 Aa	33,38	0,22 Ab	25,16	0,21 Aa	7,71	0,28 Ab	34,54	0,24 Aa	41,28

(Continuação)

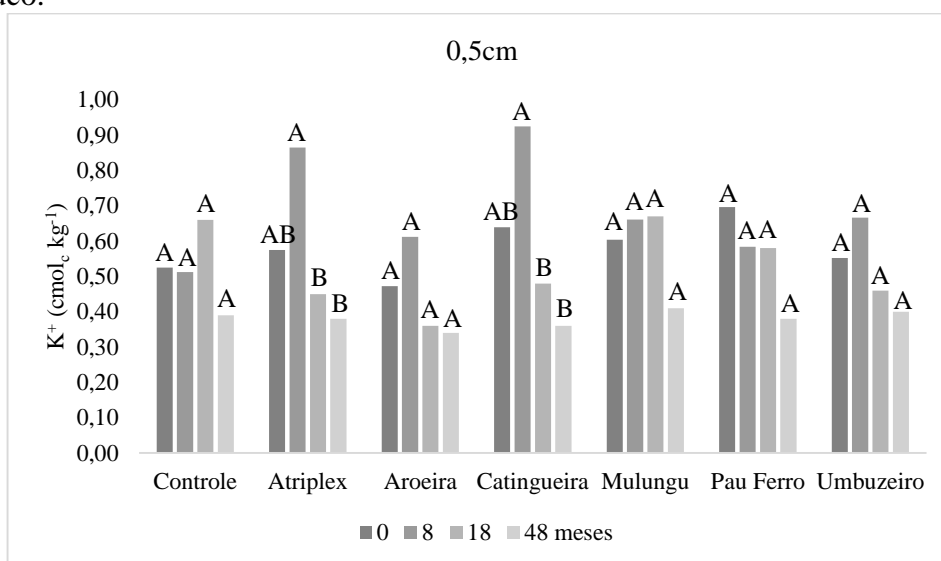
	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Prof. (cm)	8 MAT													
0-5	0,51 Aa	45,60	0,86 Aa	28,29	0,61 Aa	36,32	0,93 Aa	49,85	0,66 Aa	26,11	0,58 Aa	26,33	0,67 Aa	30,18
5-25	0,33 Aa	48,30	0,38 Ab	69,75	0,36 Aa	39,58	0,44 Ab	30,57	0,39 Aa	15,88	0,30 Aa	62,11	0,31 Aa	12,15
25-50	0,25 Aa	42,41	0,25 Ab	28,58	0,23 Aa	17,93	0,35 Ab	44,43	0,25 Aa	57,55	0,32 Aa	26,53	0,50 Aa	79,48
	18 MAT													
0-5	0,66 Aa	44,82	0,45 ABa	48,37	0,36 Ba	11,42	0,48 ABa	21,47	0,67 Aa	37,21	0,58 ABa	33,64	0,46 ABa	24,01
5-25	0,28 Ab	25,88	0,22 Ab	17,48	0,19 Aa	7,58	0,24 Ab	28,20	0,24 Ab	10,00	0,29 Ab	47,48	0,20 Ab	27,59
25-50	0,19 Ab	33,97	0,18 Ab	25,84	0,17 Aa	9,75	0,18 Ab	23,00	0,20 Ab	21,26	0,20 Ab	13,94	0,21 Ab	37,91
	48 MAT													
0-5	0,39 Aa	28,28	0,38 Aa	19,50	0,34 Aa	23,29	0,36 Aa	15,37	0,41 Aa	24,61	0,38 Aa	31,27	0,40 Aa	16,95
5-25	0,29 Aab	31,62	0,20 Ab	21,90	0,19 Ab	13,44	0,22 Ab	30,78	0,21 Ab	27,43	0,20 Ab	11,21	0,21 Ab	20,76
25-50	0,19 Ab	9,82	0,17 Ab	30,36	0,17 Ab	24,08	0,23 Ab	43,02	0,19 Ab	22,68	0,17 Ab	28,80	0,20 Ab	8,94
	Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)													
	0 MAT													
0-5	2,42 Aa	15,77	1,97 Aa	17,66	1,81 Aa	62,10	2,48 Aa	40,19	2,59 Aa	39,98	2,04 Aa	18,89	1,92 Aa	44,62
5-25	1,22 Aab	25,89	1,05 Aa	23,08	0,89 Aa	37,53	1,64 Aab	32,62	1,14 Ab	44,78	0,94 Aa	28,62	1,00 Aa	30,59
25-50	0,95 Ab	46,11	0,98 Aa	44,60	0,70 Aa	17,45	1,02 Ab	29,83	0,94 Ab	21,39	0,72 Aa	8,02	0,91 Aa	40,01
	8 MAT													
0-5	2,20 Aa	21,99	3,32 Aa	28,36	2,15 Aa	21,43	2,68 Aa	32,79	1,85 Aa	10,39	2,19 Aa	32,21	2,22 Aa	26,00
5-25	1,27 Aa	16,93	2,02 Aab	59,79	1,12 Aa	13,99	1,24 Aab	17,41	0,99 Aa	22,10	1,05 Aa	24,41	1,30 Aa	21,37
25-50	1,14 Aa	15,57	1,05 Ab	22,08	1,04 Aa	6,17	1,15 Ab	29,92	0,97 Aa	30,81	0,97 Aa	16,86	1,18 Aa	25,46
	18 MAT													
0-5	2,79 Aa	9,44	3,27 Aa	51,68	2,75 Aa	55,19	2,67 Aa	32,57	3,61 Aa	40,47	3,97 Aa	46,77	2,97 Aa	17,47
5-25	1,85 Aa	22,08	1,62 Aa	24,76	0,92 Aa	16,78	1,29 Aa	39,81	1,48 Aa	44,96	1,62 Aa	27,03	1,69 Aa	45,78
25-50	1,43 Aa	13,80	1,00 Aa	16,05	1,10 Aa	26,92	1,08 Aa	47,58	1,53 Aa	32,72	1,28 Aa	66,33	1,21 Aa	34,84

(Continuação)

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
Prof. (cm)	48 MAT													
0-5	1,93 Aa	35,64	1,59 Aa	30,71	1,38Aab	34,53	1,81 Aa	39,85	2,09 Aa	25,38	1,32 Aa	56,56	1,41 Aa	13,54
5-25	1,07 Ab	27,15	0,83 Aa	32,87	0,75 Ab	39,66	0,99 Ab	19,60	0,70 Ab	22,67	1,00 Aa	43,21	0,79 Aa	9,95
25-50	0,80 ABb	26,71	1,08 ABa	45,16	1,60 Aa	39,96	0,78 ABb	28,98	0,62 Bb	15,87	1,27 ABa	62,02	0,77 ABa	31,20
	Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)													
	0 MAT													
0-5	1,27 Aa	18,74	1,58 Aa	46,20	1,31 Aa	77,26	1,54 Aa	67,96	1,50 Aa	41,28	1,70 Aa	53,45	1,27 Aa	52,24
5-25	0,76 Aa	17,60	1,06 Aa	25,28	0,78 Aa	32,70	1,11 Aa	64,31	0,99 Aa	38,00	0,91 Aa	65,68	0,81 Aa	30,89
25-50	0,75 Aa	33,96	0,94 Aa	22,01	0,88 Aa	14,59	0,91 Aa	40,37	0,97 Aa	12,04	0,87 Aa	49,41	1,09 Aa	41,72
	8 MAT													
0-5	1,20 Aa	19,74	2,33 Aa	31,22	1,51 Aa	50,87	2,11 Aa	58,34	1,31 Aa	17,62	1,59 Aa	36,45	1,39 Aa	33,84
5-25	0,95 Aa	18,53	2,11 Aa	35,45	1,27 Aa	34,40	1,05 Aa	39,01	1,01 Aa	36,16	1,13 Aa	35,34	1,32 Aa	61,07
25-50	1,25 Aa	38,45	1,44 Aa	6,28	1,18 Aa	10,45	1,25 Aa	20,31	1,37 Aa	44,53	1,56 Aa	36,48	1,58 Aa	43,04
	18 MAT													
0-5	1,53 Aa	34,66	1,53 Aa	33,05	1,32 Aa	60,05	1,214 Aa	38,24	1,52 Aa	39,99	1,69 Aa	34,65	1,286 Aa	37,88
5-25	0,62 Ab	28,44	0,93 Ab	23,24	0,63 Ab	45,39	0,705 Aa	41,49	0,64 Ab	33,32	0,84 Ab	34,68	0,923 Aa	20,35
25-50	0,82 Ab	42,4	0,88 Ab	21	0,78 Ab	32,41	0,827 Aa	31,66	0,82 Ab	38,66	0,75 Ab	48,09	0,926 Aa	34,42
	48 MAT													
0-5	1,23 Aa	41,85	1,57 Aa	67,15	1,64 Aa	64,04	1,68 Aa	71,61	1,02 Aa	37,99	1,90 Aa	94,45	2,01 Aa	79,05
5-25	1,65 Aa	49,52	1,40 Aa	28,72	1,26 Aa	48,84	1,40 Aa	43,31	1,23 Aa	10,79	1,14 Aa	43,90	1,39 Aa	52,86
25-50	1,37 Aa	35,61	1,89 Aa	15,46	1,98 Aa	14,95	1,50 Aa	27,22	1,44 Aa	43,32	1,80 Aa	51,00	2,56 Aa	53,30

Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 19 - Potássio (K^+) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 0-5 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



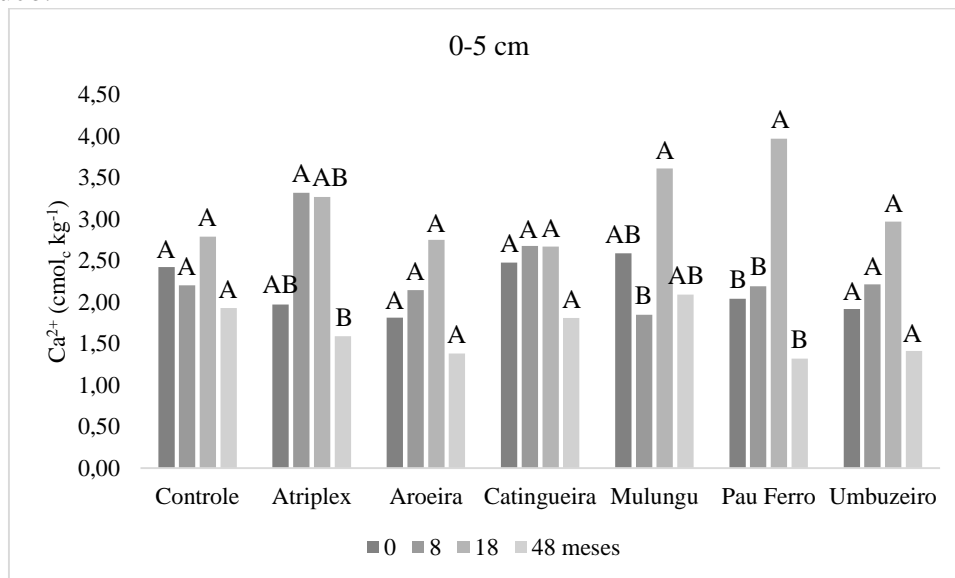
*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

As concentrações de Ca^{2+} variaram de 1,32 a 3,97 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 0-5 cm, 0,70 a 2,02 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 5-25 cm e de 0,62 a 1,60 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 25-50 cm. Havendo uma diferença significativa entre profundidades para os tratamentos Controle, Catingueira e Mulungu aos 0 MAT, para Atriplex e Catingueira aos 8 MAT e para Controle, Catingueira e Mulungu aos 48 MAT sendo a concentração de Ca^{2+} maior em superfície, e para Aroeira aos 48 MAT em subsuperfície na camada de 25-50 cm (Tabela 12).

Entre tratamentos apenas houve diferenciação na camada de 25-50 cm aos 48 MAT, com o maior teor de Ca^{2+} sendo observado no solo cultivado com Aroeira e o menor no solo cultivado com Mulungu (Tabela 12). Ao longo do tempo houve redução no teor de Ca^{2+} no solo cultivado com Atriplex, uma redução com posterior aumento no solo cultivado com Mulungu, e um aumento com posterior redução no solo cultivado com Pau Ferro (Figura 20).

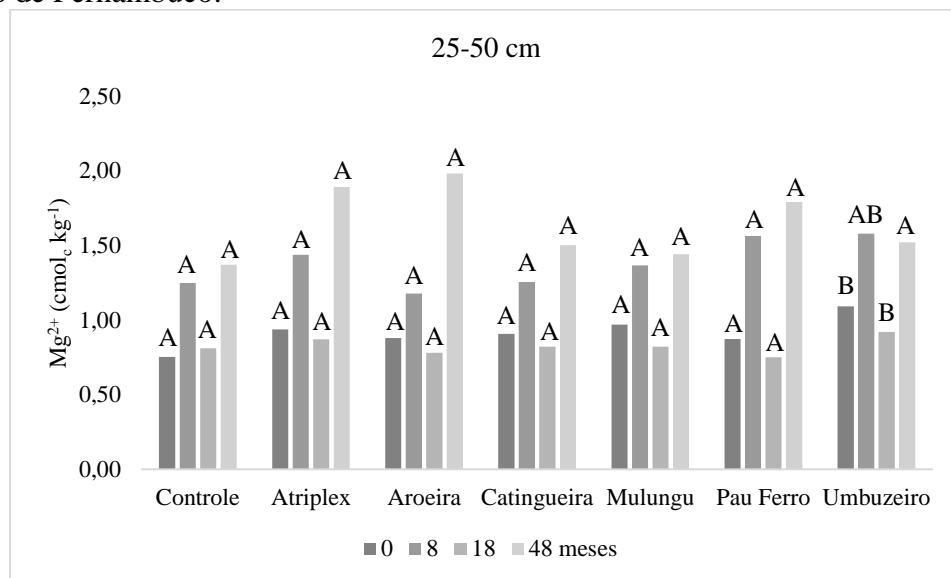
As concentrações de Mg^{2+} variaram de 1,02 a 2,33 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 0-5 cm, 0,62 a 2,11 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 5-25 cm e de 0,75 a 2,56 $cmol_c kg^{-1}$ na camada de 25-50 cm. Estas concentrações foram significativamente maiores em superfície aos 18 MAT para os tratamentos Controle, Atriplex, Aroeira, Mulung e Pau Ferro. Não havendo diferenças entre as profundidades nas demais coletas, nem diferenças entre tratamentos (Tabela 12). Ao longo do tempo foi observado um aumento na concentração de Mg^{2+} aos 48 MAT na camada de 25-50 cm (Figura 21).

Figura 20 - Cálcio (Ca^{2+}) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 0-5 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

Figura 21- Magnésio (Mg^{2+}) trocável de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 25-50 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

A PST variou de 2,16 a 7,99% na camada de 0-5 cm, 2,73 a 14,80 na camada de 5-25 cm e de 8,05 a 26,11 na camada de 25-50 cm, sendo de maneira geral maior na camada de 25-50 cm, com esta diferença sendo significativa para o Mulungu aos 0 MAT, Controle aos 8 MAT, Catingueira aos 18 MAT. Entre tratamentos não houve diferença (Tabela 13). Ao longo do tempo foi observada diferença apenas no tratamento controle (Figura 22).

A PST indica quanto da capacidade de troca catiônica do solo (CTC) está preenchida por Na^+ , sendo um solo considerado sódico quando a PST atinge valor igual ou acima de 15%, que é o caso do solo do estudo que aos 48 MAT ainda obteve valores mínimos e máximos que variaram de 0,93 a 22,65% na camada de 0-5 cm, de 0,86 a 37,14% na camada de 5-25 cm e de 1,82 a 62,71% na camada de 25-50 cm.

Apesar de não ter sido observada uma atenuação significativa da salindade do solo com o tempo de cultivo das plantas, é muito importante salientar que mesmo com acúmulo excessivo de Na^+ , e alta CE, RAS e PST, acima do que é tolerável para a maioria das culturas, as espécies aqui estudadas permanecem vivas e conseguiram se estabelecer na área, com exceção do Jatobá.

Destaca-se ainda que com a amostragem até 50 cm, não foi possível avaliar os horizontes mais problemáticos deste solo, que apresentam maiores teores de argila e concentrações de sais bem mais elevadas como apresentadas na descrição do perfil (Tabela 3 e 4), e ainda assim as plantas permanecem vivas, uma vez que por seu porte arbóreo as raízes alcançam maiores profundidades e com certeza já passaram dos 50 cm. Isto indica que elas têm grande potencial para uso e revegetação de áreas com solos afetados por sais.

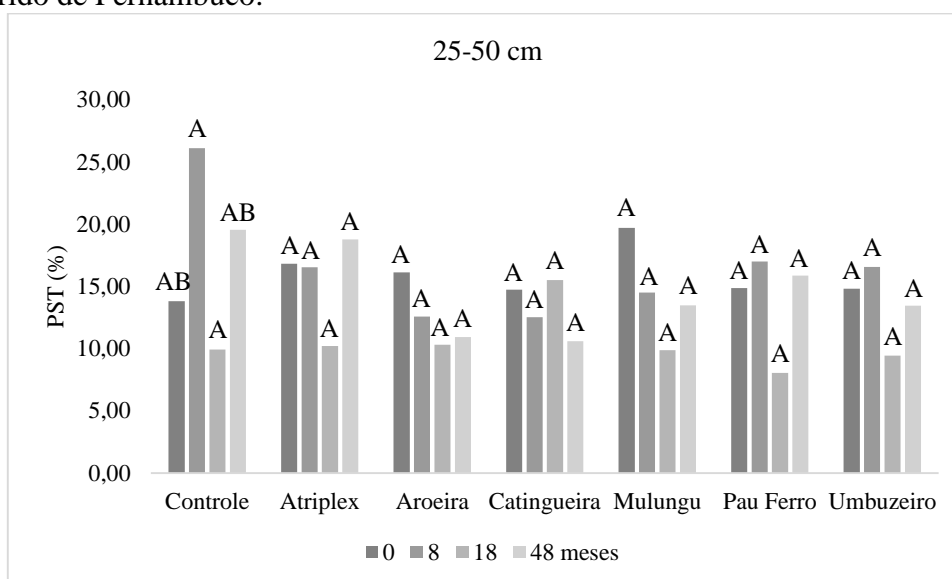
A revegetação dessas áreas pode melhorar a conservação e o equilíbrio ambiental, aumentando a cobertura vegetal em uma área antes exposta a degradação e desertificação e, até mesmo, incrementando o aporte de carbono ao solo. Podendo ainda vir a ser uma fonte de renda para os agricultores pelos usos múltiplos que estas espécies podem oferecer, seja para uso medicinal, uso da madeira como combustível, alimentação humana e animal, etc.

Tabela 13 - Valores médios da porcentagem de sódio trocável (PST) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8, 18 e 48 meses após o transplântio (MAT), nas camadas de 0-5, 5-25 e 25-50 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

Prof. (cm)	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
PST (%)														
0 MAT														
0-5	6,74 Aa	81,68	7,41 Aa	60,15	7,99 Aa	34,92	7,06 Aa	74,43	6,02 Ab	80,34	7,32 Aa	114,23	5,60 Aa	74,16
5-25	13,04 Aa	72,32	12,11 Aa	64,61	10,24 Aa	35,04	11,93 Aa	50,27	6,78 Ab	42,88	10,36 Aa	83,82	8,06 Aa	83,08
25-50	13,80 Aa	16,68	16,83 Aa	13,97	16,13 Aa	8,36	14,73 Aa	32,20	19,72 Aa	17,92	14,87 Aa	48,77	14,82 Aa	31,99
8 MAT														
0-5	5,36 Ab	39,17	6,41 Aa	28,33	6,46 Aa	37,78	4,31 Aa	69,54	5,38 Aa	25,59	7,93 Aa	73,81	4,73 Aa	47,45
5-25	6,50 Ab	37,69	12,05 Aa	47,39	7,87 Aa	7,57	5,73 Aa	44,44	5,26 Aa	62,06	8,51 Aa	95,16	14,80 Aa	81,86
25-50	26,11 Aa	136,69	16,53 Aa	22,93	12,59 Aa	19,26	12,52 Aa	66,25	14,51 Aa	50,47	16,99 Aa	45,38	16,55 Aa	44,29
18 MAT														
0-5	4,67 Aa	31,26	5,80 Aa	62,45	5,48 Aa	55,91	4,56 Ab	58,85	7,48 Aa	72,94	7,97 Aa	74,28	5,79 Aa	60,85
5-25	5,10 Aa	42,07	7,26 Aa	56,54	4,63 Aa	44,67	5,38 Ab	82,66	6,88 Aa	84,31	7,59 Aa	81,08	7,82 Aa	76,66
25-50	9,93 Aa	93,49	10,21 Aa	23,78	10,31 Aa	78,01	15,52 Aa	60,45	9,88 Aa	39,25	8,05 Aa	22,20	9,44 Aa	34,37
48 MAT														
0-5	6,17 Aa	96,63	7,72 Aa	60,19	2,16 Aa	30,18	3,42 Aa	91,16	3,21 Aa	89,42	7,68 Aa	130,46	5,92 Aa	72,54
5-25	12,52 Aa	132,81	9,11 Aa	68,53	2,73 Aa	61,50	5,14 Aa	71,47	3,85 Aa	104,83	6,52 Aa	111,54	9,37 Aa	78,99
25-50	19,55 Aa	147,78	18,78 Aa	51,68	10,92 Aa	33,48	10,60 Aa	83,59	13,48 Aa	51,82	15,87 Aa	68,43	13,44 Aa	52,02

Prof. – profundidade; \bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha e letras minúsculas iguais na coluna dentro de cada tempo não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Figura 22 - Porcentagem de sódio trocável (PST) de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex na camada de 25-50 cm de profundidade e ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



*Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada tratamento não diferem entre si pelo teste de Tukey a $p < 0,05$ ao longo do tempo.

3.3.3 Atributos microbiológicos

A matéria orgânica do solo depende fortemente da biomassa vegetal, de modo que uma diminuição da cobertura vegetal torna os solos mais suscetíveis à erosão e leva à redução do carbono orgânico total (COT) no solo. Neste estudo os tratamentos não diferiram entre si em nenhum dos três tempos de coleta. Os valores médios de COT variaram de 0,66 a 0,89 dag kg⁻¹ em 0 MAT, de 1,03 a 1,28 dag kg⁻¹ aos 8 MAT e de 0,72 a 1,00 dag kg⁻¹ aos 48 MAT, com um aumento significativo ao longo do tempo apenas para o tratamento Controle e para o Umbuzeiro (Tabela 14).

Apesar da ausência de espécies arbóreas nativas no tratamento controle, o solo não estava descoberto, havendo presença de uma vegetação espontânea da área, incluindo uma remanescência da pastagem cultivada anteriormente, que era cortada parcialmente periodicamente com auxílio de roçadeira, o que pode justificar o aumento do COT no tratamento.

Estes valores foram superiores ao encontrados por Oliveira et al. (2021), que observaram um teor de 0,54 dag kg⁻¹ em área de Caatinga nativa e de 0,34 dag kg⁻¹ em área degradada por sobrepastoreio. E semelhantes aos encontrados por Barreto-Garcia et al. (2021) que, estudando o efeito de manejos florestais na Caatinga, observaram variações de 1,16 dag kg⁻¹ em um manejo de corte seletivo a 1,22 dag kg⁻¹ em área de Caatinga não manejada.

Tabela 14 - Valores médios de carbono orgânico total (COT), carbono da biomassa microbiana (C-Mic), respiração basal do solo (C-CO₂), quociente metabólico (qCO₂) e quociente microbiano (qMic) de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8 e 48 meses após o transplântio (MAT), na camada de 0-20 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

MAT	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
COT (dag kg ⁻¹)														
0	0,70 Ab	35,30	0,80 Aa	14,74	0,67 Aa	44,38	0,89 Aa	43,04	0,81 Aa	18,74	0,71 Aa	47,33	0,66 Ab	23,45
8	1,28 Aa	13,44	1,14 Aa	14,31	1,03 Aa	11,48	1,14 Aa	22,44	1,05 Aa	16,36	1,12 Aa	28,68	1,15 Aa	13,62
48	1,00 Aab	30,93	0,94 Aa	14,47	0,98 Aa	33,44	0,82 Aa	32,38	0,93 Aa	34,91	0,72 Aa	42,41	0,99 Aab	27,49
C-Mic (µg g ⁻¹)														
0	71,36 Aa	22,29	59,29 Aa	45,48	43,82 Aa	51,90	41,14 Aa	66,50	67,67 Aab	34,79	66,61 Aa	66,89	57,90 Aa	65,25
8	42,88 Aa	97,07	70,39 Aa	58,74	52,50 Aa	56,46	37,20 Aa	67,42	20,31 Ab	86,71	42,89 Aa	85,28	80,19 Aa	75,16
48	48,96 Aa	42,53	39,83 Aa	56,71	33,16 Aa	38,50	28,66 Aa	37,39	80,84 Aa	29,94	61,92 Aa	48,08	50,88 Aa	39,85
C-CO ₂ (µg g ⁻¹ dia ⁻¹)														
0	33,23 Aa	36,35	54,20 Aa	63,52	41,17 Aa	24,16	34,28 Aa	56,72	43,96 Aa	55,25	45,20 Aa	60,10	35,24 Aa	37,06
8	27,40 Aa	40,71	43,41 Aa	67,51	31,43 Aa	24,86	37,29 Aa	55,37	23,94 Aa	108,68	36,18 Aa	51,70	40,00 Aa	25,93
48	24,55 Aa	27,74	31,79 Aa	15,05	33,1 Aa	39,92	30,98 Aa	10,70	30,08 Aa	28,26	22,61 Aa	36,28	29,41 Aa	39,11
qCO ₂ (µg g ⁻¹ dia ⁻¹)														
0	0,47 Aa	90,41	1,01 Aa	51,48	1,38 Aa	93,87	1,05 Aa	54,23	0,91 Aa	112,00	2,19 Aa	153,98	0,71 Aa	33,44
8	1,21 Aa	106,43	0,90 Aa	97,15	0,92 Aa	88,33	1,47 Aa	93,45	1,56 Aa	126,57	2,23 Aa	107,47	1,34 Aa	143,17
48	0,64 Aa	81,81	0,94 Aa	35,96	1,01 Aa	20,24	1,16 Aa	24,75	0,4 Aa	41,82	0,39 Aa	23,6	0,67 Aa	58,99
qMic														
0	10,81 Aa	30,13	7,53 Aa	50,10	6,68 Aa	36,34	5,65 Aa	77,83	8,81 Aa	44,92	12,25 Aa	89,76	9,70 Aa	77,37
8	3,53 Aa	107,56	6,40 Aa	62,98	5,10 Aa	54,95	3,12 Aa	56,37	1,98 Aa	87,57	4,73 Aa	94,70	7,68 Aa	89,05
48	5,54 Aa	56,35	4,52 Aa	70,12	3,84 Aa	63,23	3,64 Aa	29,57	9,31 Aa	40,67	9,91 Aa	72,46	5,29 Aa	43,27

\bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si quanto aos tratamentos e letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si ao longo do tempo pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

O carbono da biomassa microbiana (C-Mic), embora represente uma pequena proporção do COT, é uma parte muito importante pois representa a fração mais ativa da matéria orgânica do solo. O C-Mic não apresentou diferença significativa ao longo do tempo, exceto para o solo cultivado com Mulungu onde houve um aumento do C-Mic que passou de $67,67 \mu\text{g g}^{-1}$ na primeira coleta para $80,84 \mu\text{g g}^{-1}$ na última (Tabela 14). Os resultados variaram de $41,14$ a $71,36 \mu\text{g g}^{-1}$ em 0 MAT, para $28,66$ a $33,16 \mu\text{g g}^{-1}$ aos 48 MAT, valores semelhantes aos encontrados por Barreto-Garcia et al. (2021) que observaram teores de C-Mic variando de $29,58 \mu\text{g g}^{-1}$ em um sistema de manejo de corte seletivo da Caatinga a $69,49 \mu\text{g g}^{-1}$ em área de Caatinga não manejada.

De acordo com Pacchioni et al. (2014), a diversidade microbiana nos solos é determinada pelas características do solo, como umidade, temperatura, estrutura e disponibilidade de nutrientes para o desenvolvimento microbiano. De modo que extremos de incidência de radiação solar e maiores variações na temperatura e umidade do solo, limitam o desenvolvimento de micro-organismos (RODRIGUES et al., 2011). Além de que variáveis relacionadas à salinidade, como a CE e o teor de Na^+ , também podem reduzir a atividade microbiana (OLIVEIRA et al., 2021). Características essas presentes na área de estudo, com altas temperaturas, variações na umidade do solo com grandes períodos de seca e poucos meses de chuva, e solo degradado por excesso de sais.

Arelado a isto, a vegetação característica da Caatinga é composta, principalmente, por plantas decíduas e semidecíduas, que, em períodos de seca perdem suas folhas para uma melhor eficiência do uso da água. Fato observado na área de estudo, onde as plantas passaram a maior parte do ano sem folhas. Ou seja, há baixa adição de serrapilheira ao solo, o que limita severamente o crescimento da biomassa microbiana. Isso ocorre porque a serrapilheira e os exsudatos de raiz no solo, atuam como fonte de alimento para os micro-organismos do solo e desempenham um papel fundamental na interação micro-organismo/vegetação (EISENHAUER et al., 2017), desse modo, se não há adição de serrapilheira a reacumulação de COT e de C-Mic se torna mais lenta.

Este fato foi comprovado por Araújo Filho et al. (2018) que, investigando mudanças no conteúdo de C e atividade microbiana em solos de áreas de floresta de Caatinga em repouso por 0, 5, 6, 9, 12, 25, 50 anos e sem perturbações, descobriram que o tempo médio para o C no solo retornar aos seus valores iniciais nesses locais é estimado em aproximadamente 65 anos, sendo necessários, no mínimo, 33 anos para o mesmo alcançar ao menos 50% de recuperação.

A respiração basal do solo (C-CO₂) variou de $33,23$ a $54,20 \mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ em 0 MAT, $23,94$ a $43,41 \mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ aos 8 MAT, para $22,61$ a $33,10 \mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ aos 48 MAT, não havendo

uma diferença estatística nem entre tratamentos, nem ao longo do tempo (Tabela 14). Resultados mais elevados do que os encontrados por Araújo Filho et al. (2018), que observaram valores variando de 12,96 a 18,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ para o intervalo de profundidade de 0-5 cm e de 6,0 a 12,96 $\mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ para o intervalo de profundidade de 5-10 cm em área de Caatinga no semiárido de Pernambuco. Mas semelhantes aos encontrados por Santos et al. (2021), que observaram teores de 20,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ e de 40,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ em solo parcialmente degradado e preservado, respectivamente, também no semiárido pernambucano.

O quociente metabólico ($q\text{CO}_2$) variou de 0,47 a 1,38 $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ em 0 MAT, 0,90 a 2,23 $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ aos 8 MAT, para 0,40 a 1,16 $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1} \text{dia}^{-1}$ aos 48 MAT, porém sem diferença estatística entre tratamentos e também ao longo do tempo (Tabela 14). Valores um pouco mais elevados do que os observados por Barreto-Garcia et al. (2021), que variaram de 0,36 a 0,75 $\mu\text{g } \mu\text{g}^{-1} \text{dia}^{-1}$. Valores mais expressivos de $q\text{CO}_2$ indicam uma alteração na atividade metabólica dos micro-organismos do solo, induzindo maiores perdas de C do solo em forma de CO_2 .

Esta característica é típica de ecossistemas sujeitos a algum tipo de estresse que causa maior gasto de energia pela biomassa microbiana. De acordo com Kaschuk; Alberton; Hungria (2010), altos valores de $q\text{CO}_2$ associados a uma diminuição no C-Mic demonstram uma vulnerabilidade da resistência e resiliência dos micro-organismos aos distúrbios causados pelo manejo do solo.

O quociente microbiano ($q\text{Mic}$) também não apresentou diferença estatística entre tratamentos e ao longo do tempo, variando de 5,65 a 12,25 em 0 MAT, 1,98 a 7,68 aos 8 MAT, para 3,64 a 9,91 aos 48 MAT (Tabela 14).

O quociente microbiano ($q\text{Mic}$) representa a relação entre o carbono da biomassa microbiana e o carbono orgânico total, e é utilizado como indicação da qualidade da matéria orgânica do solo. De modo que em condições de estresse a atividade microbiana é reduzida refletindo num decréscimo do quociente microbiano, indicando menor reserva de compostos orgânicos nessas áreas. Em contrapartida, se há adição de uma matéria orgânica de boa qualidade ou o estresse é interrompido, acaba por ocorrer um incremento na biomassa microbiana, assim como no $q\text{Mic}$, indicando que a matéria orgânica do solo é ativa e está sujeita a ser decomposta pela microbiota.

A atividade da β -Glucosidase variou de 556,08 a 1116,56 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 0 MAT para 271,23 a 492,61 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 48 MAT, diminuindo significativamente ao longo do tempo, no solo sob os tratamentos Controle e Aroeira. Não havendo diferenciação entre tratamentos dentro de cada tempo. A atividade da Urease variou de 1,29 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ a 2,47 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 0 MAT para 1,57 a 2,32 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 48 MAT, diminuindo significativamente ao longo do tempo nos

tratamentos controle e Aroeira, mas não diferiu entre tratamentos dentro de cada tempo (Tabela 15).

A atividade da Fosfatase ácida variou de 2992,80 a 4893,00 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 0 MAT para 2757,2 a 4642,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 48 MAT e não teve diferenciação significativa ao longo do tempo para cada tratamento e nem entre tratamentos dentro de cada tempo. A Fosfatase alcalina variou de 472,50 a 1046,32 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 0 MAT para 233,3 a 629,85 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 48 MAT, havendo uma diminuição significativa ao longo do tempo para o tratamento com Mulungu, e um aumento aos 8 MAT seguido de diminuição aos 48 MAT para o solo cultivado com Atriplex. Entre tratamentos houve diferenciação apenas aos 8 MAT com a Atriplex tendo sido superior aos demais tratamentos. A Arilsulfatase variou de 717,66 a 843,55 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em 0 MAT para 652,54 a 794,10 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ aos 48 MAT, e diminuiu significativamente no solo sem cultivo de plantas (controle) e no solo cultivado com Aroeira (Tabela 15). Figura 27).

Os valores de atividade enzimática encontrados neste estudo são muito superiores aos encontrados em outros trabalhos conduzidos com solos do semiárido, exceto para a atividade da Urease.

Silva et al. (2019), avaliando cinco tipos de uso da terra em Serra Talhada-PE, encontraram valores de β -Glucosidase abaixo de 300 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 0-5 e abaixo de 150 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 5-10 cm. E valores de Fosfatase ácida abaixo de 8 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 0-5 cm e abaixo de 4 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 5-10 cm, havendo de modo geral, uma redução ao longo do tempo. A Urease, de modo geral, variou de, aproximadamente, 2,0 a mais de 45,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 0-5, chegando a um máximo de, aproximadamente, 30,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 5-10 cm.

Medeiros et al. (2017), investigando efeitos da regeneração natural do solo no semiárido do estado da Paraíba, observaram que a Fosfatase ácida variou de 18,65 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio inicial de regeneração (15 anos) a 56,80 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio final de regeneração (+ de 50 anos) na camada de 0-5 cm, e 14,19 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio inicial a 40,63 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio final na camada de 5-10 cm. Enquanto a atividade da Arilsulfatase variou de 3,53 a 7,90 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 0-5 cm e de aproximadamente 2,1 a 4,5 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 5-10 cm. A Urease variou de 5,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio inicial a aproximadamente 12,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ no estágio final na camada de 0-5 cm, e de 4,0 a 6,0 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ na camada de 5-10 cm.

Tabela 15 - Valores médios das enzimas do solo de um Planossolo Nátrico degradado, cultivado com espécies nativas da Caatinga e Atriplex, aos 0, 8 e 48 meses após o transplântio (MAT), na camada de 0-20 cm de profundidade no semiárido de Pernambuco

	Controle		Atriplex		Aroeira		Catingueira		Mulungu		Pau Ferro		Umbuzeiro	
	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV	\bar{x}	CV
MAT	B-Glucosidade ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)													
0	979,67 Aa	26,73	860,82 Aa	89,99	1116,56 Aa	62,38	556,08 Aa	42,05	712,01 Aa	57,60	911,19 Aa	54,45	715,67 Aa	81,24
8	367,25 Ab	24,74	859,58 Aa	54,22	507,67 Ab	57,97	435,66 Aa	30,99	334,79 Aa	38,61	337,96 Aa	43,03	410,21 Aa	12,78
48	271,23 Ab	57,38	532,9 Aa	5,66	436,91 Ab	43,46	452,41 Aa	14,09	379,82 Aa	35,25	426,88 Aa	32,09	492,61 Aa	21,09
	Fosfatase Ácida ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)													
0	4754,67 Aa	7,96	4733,00 Aa	31,77	4893,00 Aa	64,83	2992,80 Aa	79,40	4573,00 Aa	41,88	3990,40 Aa	65,47	3265,40 Aa	43,99
8	4104,50 Aa	15,74	6716,00 Aa	24,23	4651,00 Aa	32,96	5056,00 Aa	34,94	5456,00 Aa	42,37	4034,90 Aa	64,60	5036,00 Aa	29,48
48	2889,00 Aa	30,44	4094,00 Aa	23,23	4642,00 Aa	46,31	4054,00 Aa	4,61	3599,00 Aa	13,76	2757,20 Aa	46,21	3989,00 Aa	17,99
	Fosfatase Alcalina ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)													
0	680,78 Aa	27,52	647,84 Ab	38,10	806,96 Aa	68,82	472,50 Aa	20,97	1046,32 Aa	73,93	799,87 Aa	20,37	557,02 Aa	22,29
8	367,27 Ba	20,97	1497,88 Aa	93,70	323,15 Ba	35,52	724,98 ABa	70,00	428,00 Bab	40,07	374,32 Ba	37,17	509,26 Ba	52,06
48	233,3 Aa	14,63	351,87 Ab	23,67	345,3 Aa	31,40	376,55 Aa	12,01	323,30 Ab	9,07	629,85 Aa	100,57	436,7 Aa	36,74
	Arilsulfatase ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)													
0	843,55 Aa	10,63	835,14 Aa	13,72	824,10 Aa	15,17	717,66 Aa	15,38	806,75 Aa	15,65	805,96 Aa	15,46	785,47 Aa	14,47
8	646,46 Ab	14,95	744,13 Aa	12,87	719,78 Ab	6,16	752,32 Aa	6,01	756,02 Aa	4,79	722,58 Aa	6,43	685,76 Aa	5,09
48	732,06 Aab	5,17	794,1 Aa	7,85	652,54 Aab	18,23	759,94 Aa	5,99	743,75 Aa	10,21	773,72 Aa	11,21	750,95 Aa	3,77
	Urease ($\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$)													
0	2,41 Aa	45,76	1,38 Aa	52,96	2,47 Aa	54,10	1,42 Aa	57,37	1,68 Aa	57,12	1,29 Aa	60,99	1,60 Aa	74,38
8	0,87 Ab	38,30	1,27 Aa	70,67	1,14 Ab	21,76	0,92 Aa	73,57	1,14 Aa	84,27	0,83 Aa	62,86	1,18 Aa	78,74
48	1,57 Aab	11,11	1,84 Aa	34,78	1,84 Aab	38,88	1,7 Aa	21,14	2,32 Aa	36,13	1,66 Aa	22,74	1,57 Aa	23,13

\bar{x} - média aritmética; CV – coeficiente de variação (%). *Médias seguidas por letras maiúsculas iguais na linha não diferem entre si quanto aos tratamentos e letras minúsculas iguais na coluna não diferem entre si ao longo do tempo pelo teste de Tukey a $p < 0,05$.

Oliveira et al. (2021), estudando o efeito do sobrepastoreio na degradação de solos do semiárido do Ceará, observaram na área degradada por sobrepastoreio valores médios de 23,66 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para β -glucosidase e 2,18 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para Arilsulfatase. E na área de Caatinga nativa médias de 32,17 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para β -glicosidase e 3,66 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ para Arilsulfatase.

Valores semelhantes e superiores ao deste estudo foram observados apenas em solos ácidos de Floresta e no Cerrado. Vasconcellos (2012) observou teores de fosfatase ácida em solo da mata atlântica que variaram de 3266 a 7953 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$. Silva et al. (2013) observaram teores de 8218,38 $\mu\text{g g}^{-1} \text{h}^{-1}$ em um latossolo vermelho distrófico no Cerrado brasileiro.

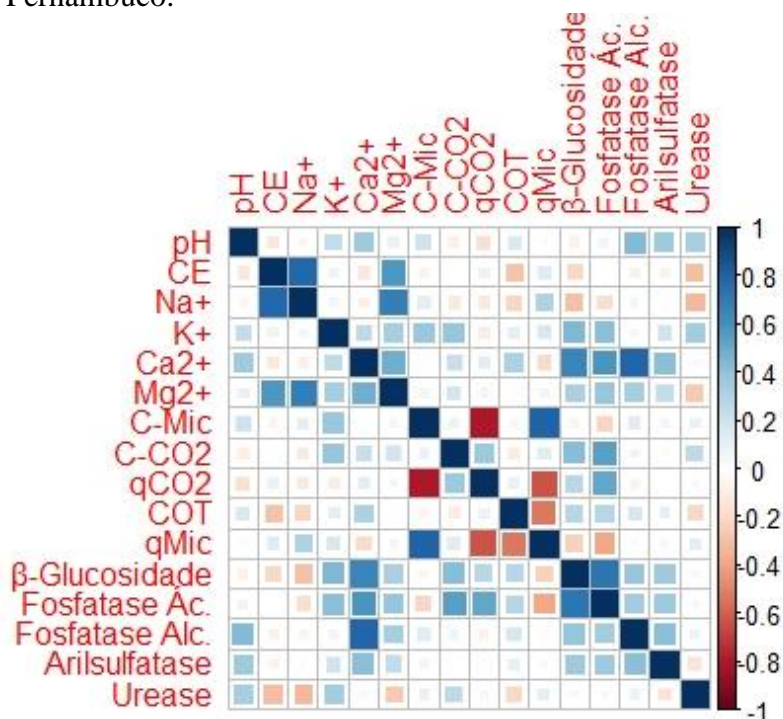
As atividades enzimáticas podem desempenhar um papel significativo na influência da dinâmica do solo e funções microbianas (MEDEIROS et al., 2017), e é condicionada por inúmeros fatores como composição da vegetação, práticas de manejo, pH e fertilidade do solo, umidade e temperatura do solo, estabilidade e compactação de agregados, entre outros (BENITEZ et al., 2005; RAIESI; BEHESHTI, 2014).

Apesar do solo do estudo ser salino e sódico, seu pH é ácido variando de 4,97 a 6,66 em superfície, faixa de pH que está dentro do ótimo para a maioria dessas enzimas, exceto a fosfatase alcalina, o que pode explicar os valores tão elevados observados neste estudo. Além disso é possível que devido ao baixo teor de COT as proteases estejam presentes em pequenas concentrações no solo, enzimas cuja atividade está interligada com a disponibilidade de carbono e nitrogênio e são responsáveis pela quebra e degradação de muitas proteínas/enzimas.

Aliada a esta possível baixa concentração de protease, a adsorção de enzimas extracelulares à partículas de argila e a própria matéria orgânica do solo, é um importante mecanismo de estabilização e proteção destas enzimas (BURNS et al., 2013). Essas enzimas se ligam covalentemente à matéria orgânica ou são adsorvidas fisicamente nos colóides do solo, de forma que o solo é um sistema natural onde as enzimas ficam imobilizadas pela interação com argila e húmus (NAIDJA; HUANG; BOLLAG, 2000). A argila não é apenas benéfica na estabilização de enzimas, mas também fornece mais locais de reação no substrato (CHEN et al., 2017; CUI et al., 2018).

Por meio da análise de correlação percebe-se que as enzimas do solo foram fortemente correlacionadas de forma positiva com os teores de Ca^{2+} trocável do solo, e que elas se relacionam positivamente entre si. Os teores de Na^{+} trocável e de CE tiveram influência negativa sobre o teor de COT e sobre a atividade da Urease e β -Glucosidase, ainda que seja uma correlação menos significativa (Figura 23).

Figura 23 – Matriz de correlação de Pearson entre a salinidade e os atributos microbiológicos de um PLANOSSOLO NÁTRICO cultivado com espécies nativas e Atriplex ao longo do tempo no semiárido de Pernambuco.



Azadi; Raiesi (2021) verificaram este mesmo comportamento onde o aumento da salinidade afetou negativamente o C-Mic e a atividade das enzimas Fosfatase alcalina, Urease e Arilsulfatase em solo do Irã.

Solos afetados por sais são particularmente caracterizados por baixos teores de matéria orgânica, devido aos baixos insumos e altas perdas de C, que é a principal fonte de alimento e energia para os micro-organismos do solo (AMINI et al., 2016; SINGH, 2016; SAIFULLAH et al., 2018). A influência prejudicial da salinidade como um grande estresse para a comunidade microbiana do solo tem sido atribuída, principalmente, aos estresses osmótico e iônico de sais solúveis no solo, bem como à deterioração das propriedades físicas e químicas do solo (RATH; ROUSK, 2015; SINGH, 2016; YANG et al., 2018).

3.4 Conclusões

A espécie *Hymenaea courbaril* L. (Jatobá) não consegue se desenvolver nessa área sob salinidade e problemas físicos, não sendo boa opção para a revegetação do solo.

As espécies *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P.Lewis (Catingueira), *Erythrina velutina* Willd. (Mulungu) e *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz (Pau-Ferro) são eficientes na melhoria de atributos físicos do solo, sendo alternativas possíveis de uso em solos degradados pela salinidade. Catingueira e Mulungu atuam mais em superfície e Pau-Ferro em subsuperfície

No tempo de até 48 meses, nenhuma espécie avaliada foi capaz de melhorar as propriedades químicas do solo relacionadas com a salinidade e sodicidade. Isso sugere a necessidade de maiores períodos em estudos de revegetação de solos afetados por sais.

Espécies nativas podem ser usadas para a revegetação de áreas degradadas por sais, aumentando a cobertura vegetal, porém o processo de reacumulação de C é lento, dessa forma nenhuma espécie foi eficiente em aumentar o conteúdo de C do solo.

Os estresses abióticos ocasionam maior gasto de energia pela biomassa microbiana e, portanto, maiores perdas de C do solo.

Teores de Na⁺ trocável e CE podem afetar negativamente o conteúdo de COT e atividade das enzimas β -Glucosidase e Urease.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA, C. L.; ARAÚJO, J. C.; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M.; ANDRADE, E. M. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in Caatinga. **Floresta e Ambiente**, v. 24, Article 20160175, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017516>

ÁLVAREZ-ROGEL, J.; CARRASCO, L.; MARÍN, C. M.; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, J. J. Soils of a dune coastal salt marsh system in relation to groundwater level, micro-topography and vegetation under a semiarid Mediterranean climate in SE Spain. **Catena**, v. 69, n. 2, p. 111-121, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.04.024>

AMINI, S.; GHADIRI, H.; CHEN, C.; MARSCHNER, P. Salt-affected soils, reclamation, carbon dynamics, and biochar: a review. **Journal of Soils and Sediments**, v. 16, p. 939-953, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1293-1>

ANDERSON, J. P. E.; DOMSCH, K. H. **A physiological method for the quantitative measurement of microbial biomass in soils**. Soil Biology and Biochemistry, United Kingdom, v. 10, n. 3, p. 215-221, 1978. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(78\)90099-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(78)90099-8)

ANTONGIOVANNI, M.; VENTICINQUE, E. M.; FONSECA, C. R. Fragmentation patterns of the Caatinga drylands. **Landscape Ecology**, v. 33, p. 1353-1367, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10980-018-0672-6>

ARAÚJO FILHO, R. N.; FREIRE, M. B. G. S.; WILCOX, B. P.; WEST, J. B.; FREIRE, F. J.; MARQUES, F. A. Recovery of carbon stocks in deforested caatinga dry forest soils requires at least 60 years. **Forest Ecology and Management**, v. 407, p. 210-220, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.002>

AZADI, N.; RAIESI, F. Sugarcane bagasse biochar modulates metal and salinity stresses on microbial functions and enzyme activities in saline co-contaminated soils. **Applied Soil Ecology**, v. 167, article 104043, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104043>

BARRETO-GARCIA, P. A. B.; BATISTA, S. G. M.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; PAULA, A.; BATISTA, W. C. A. Short-term effects of forest management on soil microbial biomass and activity in caatinga dry forest, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 481, article 118790, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118790>

BARROS, J. P. A.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; SILVA, L. S. Partitioning and modeling of biomass in caatinga legume seedlings in different water conditions. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.034818>

BENITEZ, E.; SAINZ, H.; NOGALES, R. Hydrolytic enzyme activities of extracted humic substances during the vermicomposting of a lignocellulosic olive waste. **Bioresource Technology**, v. 96, p. 785-790, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.08.010>

BESSA, M. C.; LACERDA, C. F.; AMORIM, A. V.; BEZERRA, A. M. E.; LIMA, A. D. Mechanisms of salt tolerance in seedlings of six woody native species of the Brazilian semi arid. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n. 1, p. 157-165, 2017. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170018>

BOUAZIZ, M.; CHTOUROU, M. Y.; TRIKI, I.; MEZNER, S.; BOUAZIZ, S. Prediction of soil salinity using multivariate statistical techniques and remote sensing tools. **Advances in Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 313-326, 2018. <https://doi.org/10.4236/ars.2018.74021>

BURNS, R. G.; DEFOREST, J. L.; MARXSEN, J.; SINSABAUGH, R. L.; STROMBERGER, M. E.; WALLENSTEIN, M. D.; WEINTRAUB, M. N.; ZOPPINI, A. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 58, p. 216-234, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.11.009>

BUSCAROLI, A.; ZANNONI, D. Soluble ions dynamics in Mediterranean coastal pinewood forest soils interested by saline groundwater. **Catena**, v. 157, p. 112-129, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.05.014>

CAMESELLE, C.; GOUVEIA, S. Phytoremediation of mixed contaminated soil enhanced with electric current. **Journal of Hazardous Materials**, v. 361, p. 95-102, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.08.062>

CHEN, H.; LUO, P.; WEN, L.; YANG, L.; WANG, K.; LI, D. Determinants of soil extracellular enzyme activity in a karst region, southwest China. **European Journal of Soil Biology**, v. 80, p. 69-76, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.05.001>

COSTA, L. M.; SIMPLICIO, F. G.; SOUZA, T. P. *Libidibia ferrea* (Mart. Ex tul) L. P. Queiroz var. Ferrea: pharmacological, phytochemical and botanical aspects. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 7, n. 4, p. 48-53, 2015. <https://innovareacademics.in/journals/index.php/ijpps/article/view/4740>

CUI, Y.; FANG, L.; GUO, X.; WANG, X.; ZHANG, Y.; LI, P.; ZHANG, X. Ecoenzymatic stoichiometry and microbial nutrient limitation in rhizosphere soil in the arid area of the northern Loess Plateau, China. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 116, p. 11-21, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.09.025>

EISENHAUER, N.; LANOUE, A.; STRECKER, T.; SCHEU, S.; STEINAUER, K.; THAKUR, M. P.; MOMMER, L. Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. **Scientific Reports**, v. 7, article 44641, 2017. <https://doi.org/10.1038/srep44641>

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. 3 ed. Brasília - DF: Embrapa Solos, 2017. 574 p.

FERNANDES, M. F.; CARDOSO, D.; QUEIROZ, L. P. An updated plant checklist of the Brazilian Caatinga seasonally dry forests and woodlands reveals high species richness and endemism. **Journal of Arid Environments**, v. 174, Article 104079, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104079>

FIGUEIREDO-LIMA, K. V.; FALCÃO, H. M.; MELO-DE-PINNA, G. F.; ALBACETE, A.; DODD, I. C.; LIMA, A. L. A.; SANTOS, M. G. Leaf phytohormone levels and stomatal control in an evergreen woody species under semiarid environment in a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Plant Growth Regulation**, v. 85, p. 437-445, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10725-018-0405-5>

GORJI, T.; YILDIRIM, A.; HAMZEHPUR, N.; TANIK, A.; SERTEL, E. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106173, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106173>

KASCHUK, G.; ALBERTON, O.; HUNGRIA, M. Three decades of soil microbial biomass studies in Brazilian ecosystems: Lessons learned about soil quality and indications for improving sustainability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 1-13, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.08.020>

KOCH, R.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KLEINSCHMIT, B. Revealing areas of high nature conservation importance in a seasonally dry tropical forest in Brazil: combination of modelled plant diversity hot spots and threat patterns. **Journal of Nature Conservation**, v. 35, p. 24-39, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2016.11.004>

LEAL, I. R.; SILVA, J. M. C.; TABARELLI, M.; LACHER JR., T. E. Changing the course of biodiversity conservation in the Caatinga of Northeastern Brazil. **Conservation Biology**, v. 19, n. 3, p. 701-706, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2005.00703.x>

- LI, B. C.; WANG, J. C.; YAO, L. R.; MENG, Y. X.; MA, X. L.; SI, E. J.; REN, P. R.; YANG, K.; SHANG, X. W.; WANG, H. J. *Halophyte Halogeton glomeratus*, a promising candidate for phytoremediation of heavy metal-contaminated saline soils. **Plant and Soil**, v. 442, p. 323-331, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04152-4>
- LIMA, A. D.; BEZERRA, F. M. S.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, A. M. E. Response of four woody species to salinity and water deficit in initial growth phase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p. 753-757, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p753-757>
- LIPIEC, J.; HORN, R.; PIETRUSIEWICZ, J.; SICZEK, A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species. **Soil and Tillage Research**, v. 121, p. 74-81, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.01.013>
- MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; SANTOS, L. A. R.; LIMA, J. R. S.; ALMEIDA-CÔRTEZ, J. S.; HAMMECKER, C.; LARDY, L.; COURNAC, L. Soil organic carbon, microbial biomass and enzyme activities responses to natural regeneration in a tropical dry region in Northeast Brazil. **Catena**, v. 151, p. 137-146, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.12.012>
- MENDONÇA, E. S.; MATOS, E. S. **Matéria orgânica do solo: Métodos de análises**. Viçosa: UFV, 2005. p. 61-66
- MIRANDA, M. A.; OLIVEIRA, E. E. M.; SANTOS, K. C. F.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G. 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, p. 484-490, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500008>
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 1, p. 239-250, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
- NAIDJA, A.; HUANG, P. M.; BOLLAG, J.-M. Enzyme-Clay Interactions and Their Impact on Transformations of Natural and Anthropogenic Organic Compounds in Soil. **Journal of Environmental Quality**, v. 29, n. 3, p. 677-691, 2000. <https://doi.org/10.2134/jeq2000.00472425002900030002x>
- OLIVEIRA, A. F. N.; SOUSA, L. I. S.; COSTA, V. A. S.; ANDRADE, J. V. T.; LIMA, L. A. L.; SALES, P. A. F.; SILVA, D. F.; PEREIRA, A. P. A.; MELO, V. M. M. Long-term effects of grazing on the biological, chemical, and physical soil properties of the Caatinga biome. **Microbiological Research**, v. 253, article 126893, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.micres.2021.126893>
- OLIVEIRA, P. T.; SANTOS E SILVA, C. M.; LIMA, K. C. Climatology and trend analysis of extreme precipitation in subregions of Northeast Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 130, p. 77-90, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1865-z>

PACCHIONI, R. G.; CARVALHO, F. M.; THOMPSON, C. E.; FAUSTINO, A. L. F.; NICOLINI, F.; PEREIRA, T. S.; SILVA, R. C. B.; CANTÃO, M. E.; GERBER, A.; VASCONCELOS, A. T. R.; AGNEZ-LIMA, L. F. Taxonomic and functional profiles of soil samples from Atlantic forest and Caatinga biomes in northeastern Brazil. **Microbiologyopen**, v. 3, p. 299–315, 2014. <https://doi.org/10.1002/mbo3.169>

PAGOTO, M. A.; ROIG, F. A.; RIBEIRO, A. S.; LISI, C. S. Influence of regional rainfall and Atlantic sea surface temperature on tree-ring growth of *Poincianella pyramidalis*, semiarid forest from Brazil. **Dendrochronologia**, v. 35, p. 14-23, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.05.007>

PATEL, M.; PARIDA, A. K. Salinity alleviates the arsenic toxicity in the facultative halophyte *Salvadora persica* L. by the modulations of physiological, biochemical, and ROS scavenging attributes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 401, artigo 123368, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123368>

PENNINGTON, R. T.; LAVIN, M.; OLIVEIRA-FILHO, A. Woody plant diversity, evolution, and ecology in the tropics: Perspectives from seasonally dry tropical forests. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 40, n. 1, p. 437-457, 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120327>

PEREIRA, A. P. A.; LIMA, L. A. L.; BEZERRA, W. M.; PEREIRA, M. L.; NORMANDO, L. R. O.; MENDES, L. W.; OLIVEIRA, J. G. B.; ARAÚJO, A. S. F.; MELO, V. M. M. Grazing exclusion regulates bacterial community in highly degraded semiarid soils from the Brazilian Caatinga biome. **Land Degradation and Development**, v. 32, p. 2210-2225, 2021. <http://doi.org/10.1002/ldr.3893>

PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C. A. G.; ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, v. 89, p. 1-4, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.10.003>

QADIR, M.; OSTER, J. Vegetative bioremediation of calcareous sodic soils: history, mechanisms, and evaluation. **Irrigation Science**, v. 21, p. 91-101, 2002. <https://doi.org/10.1007/s00271-001-0055-6>

RAIESI, F.; BEHESHTI, A. Soil specific enzyme activity shows more clearly soil responses to paddy rice cultivation than absolute enzyme activity in primary forests of northwest Iran. **Applied Soil Ecology**, v. 75, p. 63-70, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.10.012>

RATH, K. M.; ROUSK, J. Salt effects on the soil microbial decomposer community and their role in organic carbon cycling: a review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 81, p. 108-123, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.11.001>

RIBEIRO, K.; SOUSA-NETO, E. R.; CARVALHO JUNIOR, J. A.; SOUSA LIMA, J. R.; MENEZES, R. S. C.; DUARTE-NETO, P. J.; GUERRA, G. S.; OMETTO, J. P. H. B. Land cover changes and greenhouse gas emissions in two different soil covers in the Brazilian Caatinga. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 1048-1057, 2016a. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.07.095>

RIBEIRO, M. R.; RIBEIRO FILHO, M. R.; JACOMINE, P. K. T. Origem e classificação dos solos afetados por sais. GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F.; FILHO, E. G. (Eds.). **Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos aplicados**, INCT/SAL, Fortaleza, 2016b. p. 9-15

RODRIGUES, H. J. B.; SÁ, L. D. A.; RUIVO, M. L. P.; COSTA, A. C. L.; SILVA, R. B.; MOURA, Q. L.; MELLO, I. F. Quantitative microbial population variability associated with the microclimate conditions observed in tropical rainforest soil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 629-638, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862011000400012>

SAIFULLAH, D. S.; NAEEM, A.; RENGEL, Z.; NAIDU, R. Biochar application for the remediation of salt-affected soils: challenges and opportunities. **Science of the Total Environment**, v. 625, p. 320-335, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.257>

SÁNCHEZ, A. S.; ALMEIDA, M. B.; TORRES, E. A.; KALID, R. D. A.; COHIM, E.; GASPARATOS, A. Alternative biodiesel feedstock systems in the Semi-arid region of Brazil: implications for ecosystem services. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2744-2758, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.080>

SANTOS, M. A.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G.; LINS, C. M. T.; SILVA, E. M. Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 397-404, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400007>

SANTOS, R. D.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solos no campo**. 7. ed. rev e ampl. Viçosa. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2015. 102 p.

SANTOS, T. O.; FRACETTO, F. J. C.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; ARAÚJO FILHO, J. C.; LIRA JÚNIOR, M. A.; MENDES JÚNIOR, J. P.; SIQUEIRA NETO, M.; SILVA, Y. R. O.; BARROS, F. M. R.; FRACETTO, G. G. M. Carbon and nitrogen stocks and microbial indicators in tropical semiarid degraded Luvisols. **Catena**, article 105885, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105885>

SCHULZ, K.; VOIGT, K.; BEUSCH, C.; ALMEIDA-CORTEZ, J. S.; KOWARIK, I.; WALZ, A.; CIERJACKS, A. Grazing deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 367, p. 62-70, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>

SIBCS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Embrapa, Brasília – DF, 5. ed. revista e ampliada. 2018. 356 p.

SILVA, E. O.; MEDEIROS, E. V.; DUDA, G. P.; LIRA JUNIOR, M. A.; BROSSARD, M.; OLIVEIRA, J. B.; SANTOS, U. J.; HAMMECKER, C. Seasonal effect of land use type on soil absolute and specific enzyme activities in a Brazilian semi-arid region. **Catena**, v. 172, p. 397-407, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.09.007>

SILVA, P. G.; VIANA, A. A. O. N.; MARRIEL, I. E.; SANTOS, V. L.; SILVA, D. F. Quantificação da microbiota e atividade da fosfatase ácida e alcalina do solo em diferentes sistemas de manejo com o uso de dejetos suínos como fertilizante. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2013. Disponível em:

<https://www.sbcs.org.br/cbcs2013/anais/arquivos/1451.pdf>

SINGH, K. Microbial and enzyme activities of saline and sodic soils. **Land Degradation and Development**, v. 27, p. 706-718, 2016. <https://doi.org/10.1002/ldr.2385>

SOUZA, R.; HARTZEL, S.; FERRAZ, A. P. F.; ALMEIDA, A. Q.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S. Dynamics of soil penetration resistance in water controlled environments. **Soil and Tillage Research**, v. 205, article 104768, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104768>

SPENCER, B. Studies on sulphatases: 20. Studies on sulphatases. 20. Enzymic cleavage of aryl hydrogen sulphates in the presence of H₂¹⁸O. **Biochemistry Journal**, v. 69, p.155–159, 1958. <https://doi.org/10.1042/bj0690155>

TABATABAI, M. A. Soil Enzymes. In: WEAVER, W.; ANGLE, S.; BOTTOMLEY, P.; BEZDICEK, D.; SMITH, S.; TABATABAI, A.; WOLLUM, A. **Methods of Soil Analysis: Part 2 - Microbiological and Biochemical Properties**, SSSA Book Series, Soil Science Society of America, p. 775-833, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.2.c37>

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Assay of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 4, n. 4, p. 479-487, 1972. [https://doi.org/10.1016/0038-0717\(72\)90064-8](https://doi.org/10.1016/0038-0717(72)90064-8)

TABATABAI, M. A.; BREMNER, J. M. Use of r-nitrofenol phosphate for assay of soil phosphatase activity. **Soil Biology and Biochemistry**, 1, 301-307, 1969.

[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(69\)90012-1](https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1)

TAGHADOSI, M. M.; HASANLOU, M. Trend analysis of soil salinity in different land cover types using Landsat time series data (case study Bakhtegan Salt Lake). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-4/W4, p. 251-257, 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-251-2017>

TOMASELLA, J.; VIEIRA, R. M. S. P.; BARBOSA, A. A.; RODRIGUEZ, D. A.; SANTANA, M. O.; SESTINI, M. F. Desertification trends in the Northeast of Brazil over the period 2000–2016. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 73, p. 197-206, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.012>

UNITED STATES SALINITY LABORATORY. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington DC: US Department of Agriculture, 1954. 160 p. (USDA Agricultural Handbook, 60).

VASCONCELLOS, R. L. F. **Bioindicadores de qualidade do solo em um gradiente de restauração ambiental**. 2012. 113 f. Tese (Doutorado em Ciências – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2012.

YANG, J.; ZHAN, C.; LI, Y.; ZHOU, D.; YU, Y.; YU, J. Effect of salinity on soil respiration in relation to dissolved organic carbon and microbial characteristics of a wetland in the Liaohe River estuary, Northeast China. **Science of the Total Environment**, v. 642, p. 946-953, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.121>

4 BIOQUÍMICA DE PLANTAS NATIVAS DA CAATINGA E *Atriplex nummularia* LINDL. CULTIVADAS EM SOLO DEGRADADO POR SAIS NO SEMIÁRIDO DE PERNAMBUCO

Resumo

Os recursos florestais que envolvem as áreas de Caatinga têm sofrido extensa exploração passando por danos, decorrentes não só de causas antrópicas, mas também de fatores bióticos e abióticos, como salinidade do solo e déficit hídrico, comuns em regiões semiáridas. A Caatinga inclui espécies com alto potencial para diferentes usos, que se adaptam prontamente às diferentes condições do solo e também às dificuldades naturais do clima semiárido. Sua vegetação pode representar alternativa importante no aproveitamento de áreas salinas onde a exploração de muitas culturas agrícolas não é viável economicamente. Espécies nativas têm adaptações morfofisiológicas e bioquímicas que lhes confere alto grau de resiliência, contudo, estudos sobre sua tolerância à salinidade ainda são escassos, principalmente em condições de campo. Assim, com o objetivo de avaliar características bioquímicas associadas com a tolerância a estresses ambientais de plantas nativas da Caatinga, um experimento foi montado em blocos casualizados, com seis espécies: Aroeira-do-Sertão [*Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl.], Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G.P. Lewis], Jatobá [*Hymenaea courbaril* L.], Mulungu [*Erythrina velutina* Willd.], Pau-Ferro [*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz] e Umbuzeiro [*Spondias tuberosa* Arruda]; e *Atriplex nummularia* L., planta halófito exótica que serviu como um padrão de comparação, em quatro repetições. Aos 48 meses após o transplante, totalizando 4 anos com as plantas em condição de campo, foram coletadas folhas do terço médio de 3 plantas da área útil de cada parcela, para a realização das análises bioquímicas, totalizando 12 repetições para cada espécie. Foram determinados os pigmentos fotossintéticos (chl a, chl b e carotenoides), teor de proteínas solúveis, carboidratos solúveis, aminoácidos solúveis totais e prolina livre, produção de peróxido de hidrogênio (H₂O₂), peroxidação lipídica quantificada por meio da produção de malondialdeído (MDA) e a atividade de enzimas do complexo antioxidativo, como Superóxido dismutase (SOD), Catalase (CAT) e Ascorbato peroxidase (APX). Observou-se que as espécies nativas podem se adaptar à salinidade, apresentando um sistema de defesa enzimático e não enzimático eficientes, com desempenho superior à *Atriplex nummularia*. O Umbuzeiro apresentou o sistema de defesa antioxidante enzimático mais eficiente, enquanto Aroeira e Pau Ferro tiveram um sistema de defesa antioxidante não enzimático mais eficiente.

Palavras-chave: Estresse salino. Mecanismos de tolerância. Espécies lenhosas. Floresta tropical sazonalmente seca.

BIOCHEMISTRY OF CAATINGA NATIVE PLANTS AND *Atriplex nummularia* LINDL. CULTIVATED IN A SALT AFFECTED SOIL IN PERNAMBUCO SEMI-ARID**Abstract**

The forest resources surrounding the Caatinga areas have been extensively exploited and still suffer other types of damage, not only from anthropogenic causes, but also from biotic and abiotic factors. For example, soil salinity and water deficit, common in the Brazilian semiarid region, which have irregular rainfall and high interannual variability that results in occasional prolonged droughts. Caatinga Biome includes species with high potential for different uses, which readily adapt to different soil conditions and also to the natural adversities of the semi-arid climate. They can be an important alternative in the use of saline areas where the exploitation of many agricultural crops is not economically viable. Native species have several morphophysiological and biochemical adaptations that give them a high degree of resilience, however, studies on their tolerance to salinity are still scarce, especially under field conditions. Thus, in order to evaluate biochemical characteristics associated with the tolerance to environmental stresses of native plants, an experiment was set up in randomized blocks, with six native species, namely Aroeira-do-Sertão [*Astronium urundeuva* (M. Allemão) Engl.], Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G. P. Lewis], Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Mulungu (*Erythrina velutina* Willd.), Pau-Ferro [*Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz] e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda); and *Atriplex nummularia* L., an exotic halophyte plant that served as a comparison standard, in four replicates. At 48 months after transplanting, totaling 4 years with the plants in field condition, leaves were collected from the middle third of three plants in the useful area of each plot, to perform biochemical analyses, totaling 12 replications for each species. Photosynthetic pigments (chl a, chl b and carotenoids), soluble protein content, soluble carbohydrates, total soluble amino acids and free proline, production of hydrogen peroxide (H₂O₂), quantified lipid peroxidation through the production of malondialdehyde (MDA) and the activity of enzymes of the antioxidant complex, such as Superoxide dismutase (SOD), Catalase (CAT) and Ascorbate peroxidase (APX), were determined. The results showed that native species can adapt to salinity, presenting an efficient enzymatic and non-enzymatic defense system, and they performed better than *Atriplex nummularia*. Umbuzeiro presented the most efficient enzymatic antioxidant defense system, while Aroeira and Pau Ferro presented a more efficient non-enzymatic antioxidant defense system.

Keywords: Salt stress. Tolerance mechanisms. Woody species. Seasonally dry tropical forest.

4.1 Introdução

Florestas tropicais sazonalmente secas, como a Caatinga, exibem um conjunto incomum de condições ecológicas, com precipitação extremamente irregular, com alta variabilidade interanual, atreladas a altos índices de evapotranspiração. O que resulta em ocasionais secas prolongadas com uma breve estação chuvosa. Estas características facilitam a formação de solos afetados por sais, que são uma das principais causas de degradação e desertificação do solo em regiões de clima árido e semiárido, como o Nordeste brasileiro (BOUAZIZ et al., 2018; GORJI et al., 2020; MUNNS, 2002; TAGHADOSI; HASANLOU, 2017).

Estresses ambientais, como seca, salinidade e altas temperaturas levam a uma série de mudanças morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e moleculares em todos os órgãos das plantas, devido à interrupção da homeostase celular por limitação da fixação de CO₂, que afeta negativamente o crescimento e a produtividade (CHENG et al., 2018; CRAMER et al., 2011; FROSI et al., 2016; SHARMA et al., 2012).

Como resultado da menor fixação de CO₂, a quantidade de NADPH⁺ e H⁺ disponível para o ciclo de Calvin é reduzida e, conseqüentemente, a concentração de NADP⁺ e o potencial do receptor de elétrons para a cadeia de transporte de elétrons diminuem. Isso leva ao aumento de radicais livres e espécies reativas de oxigênio (EROs), como peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e superóxido (O₂⁻) (SELMAR; KLEINWÄCHTER, 2013).

Quando o nível de EROS excede os mecanismos de defesa, diz-se que uma célula está em um estado de estresse oxidativo, causando peroxidação de lipídios, oxidação de proteínas, danos aos ácidos nucleicos, inibição de enzimas, podendo levar à morte das células (SHARMA et al., 2012).

Para lidar com o estresse, as plantas desenvolveram uma variedade de características adaptativas. A desintoxicação de espécies reativas de oxigênio geradas por fotorredução de oxigênio é realizada por um sistema integrado de antioxidantes enzimáticos e não enzimáticos que estão concentrados no cloroplasto (ASADA, 1994). O ânion superóxido, produto inicial da fotorredução de O₂, é dismutado pela superóxido dismutase (EC 1.15.1.1, SOD) em H₂O₂ e O₂ (NOCTOR; FOYER, 1998). O H₂O₂ é, então, convertido em H₂O pela catalase (EC 1.11.1.6, CAT) nos peroxissomos (WILLEKENS et al., 1997), e pelo ciclo ascorbato-glutationa. Nesta via, a ascorbato peroxidase (EC 1.11.1.11, APX) usa ascorbato (AsA) para reduzir o H₂O₂ a H₂O (CHEN, CHENG, 2003).

Os solutos orgânicos compatíveis são compostos de baixo peso molecular e altamente solúveis, que incluem aminoácidos livres e seus derivados, prolina, betaínas, poliaminas,

proteínas e carboidratos solúveis e polióis. Juntamente com os solutos inorgânicos, diminuem o potencial osmótico da célula de forma a produzir alto potencial de turgescência para a manutenção do crescimento, e podem proteger as enzimas intracelulares contra os efeitos iônicos inibidores, promover a desintoxicação de EROs, proteger a integridade da membrana e estabilizar enzimas e proteínas (ASHRAF; FOOLAD, 2007; RADIC' et al., 2013; SHARMA et al., 2012).

Espécies nativas da Caatinga, apresentam diversas adaptações morfofisiológicas e bioquímicas que lhes confere alto grau de resiliência e permitem seu estabelecimento em regiões áridas e semiáridas, com potencial para uso em condições de estresse hídrico e salino (BARROS et al., 2019; BESSA et al., 2017; COSTA; SIMPLICIO; SOUZA, 2015; FIGUEIREDO-LIMA et al., 2018; LIMA et al., 2018). Além de que muitas das espécies neste ecossistema têm potencial para usos múltiplos.

Astronium urundeuva (M. Allemão) Engl., conhecida como Aroeira, é uma das plantas mais utilizadas na medicina popular por suas propriedades anti-inflamatórias, cicatrizantes e antiúlcera (BANDEIRA et al., 2013). *Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G. P. Lewis, conhecida como Catingueira, é utilizada para os mais diversos fins, onde podemos destacar a sua utilização como combustível, matéria-prima na construção, aplicação forrageira e uso medicinal (CHAVES et al., 2016).

Erythrina velutina Willd., conhecida como Mulungu, é utilizada como madeira, aplicações ornamentais e fontes de compostos bioativos com aplicações farmacológicas, possuindo propriedades sedativas, anticonvulsivantes, neuroprotetoras e ansiolíticas, atuando principalmente em alvos do sistema nervoso central (RAMBO et al., 2019). *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz, conhecida como Pau-Ferro, possui múltiplos usos para sua madeira como atributos paisagísticos, medicinais e forrageiros, além de ser utilizada na recuperação de áreas degradadas (CARVALHO et al., 2017).

Spondias tuberosa Arruda, conhecida como Umbuzeiro, é uma árvore xerofítica pertencente à família Anacardiaceae que produz frutos comestíveis para humanos e animais. As raízes tuberosas (xilopódio) auxiliam na adaptação ao clima devido a sua capacidade de armazenar água, sais minerais e solutos orgânicos essenciais para sua sobrevivência durante as estações secas (DUARTE et al., 2004).

Contudo, estudos sobre sua tolerância à salinidade ainda são escassos, principalmente em condições de campo. Assim, estudar sua resposta às condições limitantes de déficit hídrico e alta salinidade assume grande importância ecológica e ambiental, uma vez que podem ser utilizadas em programas de reflorestamento e atividades de conservação.

Para fins de comparação com as espécies nativas, utilizou-se *Atriplex nummularia* Lindl., espécie halófito com alta capacidade de sobrevivência em ambientes salinos e secos. Estudos anteriores já têm demonstrado o potencial de uso da *Atriplex* em solos afetados por sais do Brasil, inclusive, atuando na fitorremediação dos solos e melhoria da qualidade dos solos (MELO et al., 2016; SANTOS et al., 2013; SILVA et al. 2016; SOUZA et al., 2011).

4.2 Material e Métodos

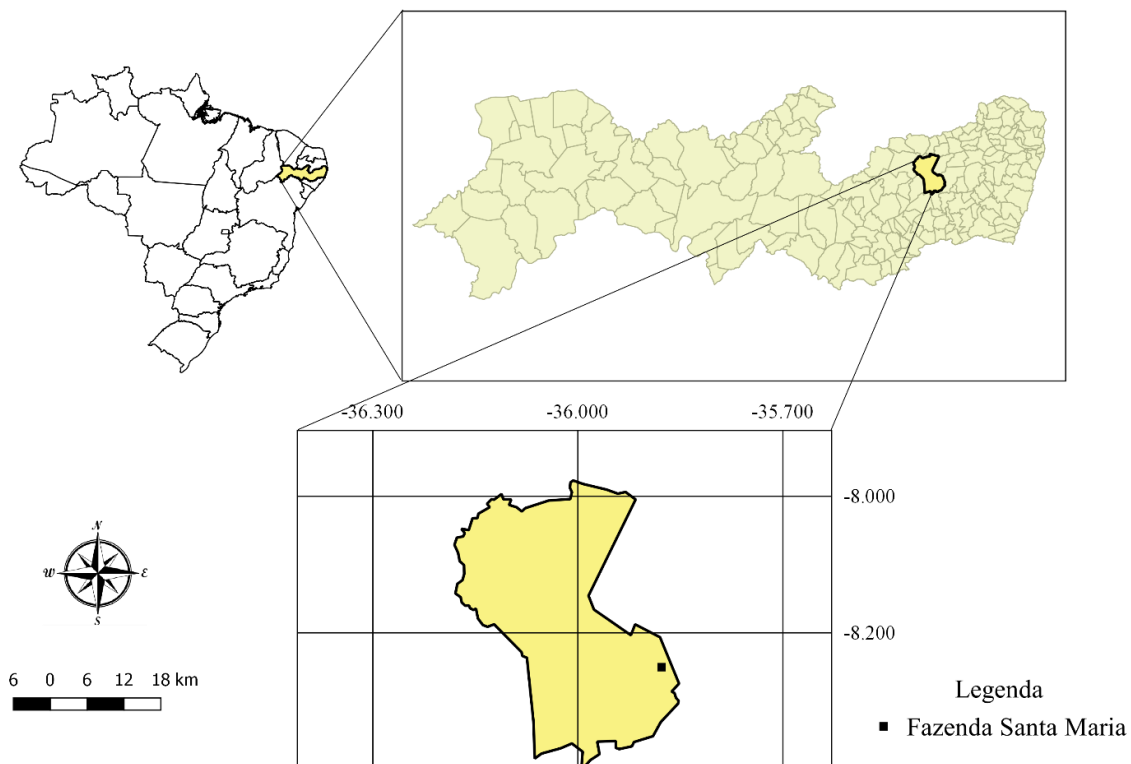
4.2.1 Área de estudo

A seleção da área foi realizada por meio de visitas e coleta de amostras de solo a diversas áreas afetadas por sais no Semiárido de Pernambuco. Foi então definida uma área de pasto degradado, sem uso agrícola por cerca de 20 anos e com acúmulo de sais a níveis intermediários (Tabela 1). A área localiza-se na Fazenda Santa Maria, município de Caruaru, nas coordenadas geográficas S 08°15'00.4" e WO 35°52'38.0" (Figura 1).

Tabela 1 - Caracterização química inicial da área de estudo

	pH	CE ¹	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	PST ²	RAS ³
Prof.		dS m ⁻¹	mmol _c L ⁻¹				cmol _c kg ⁻¹				%	(mmol _c L ⁻¹) ^{0.5}
0-5	6,22	1,43	5,07	2,28	2,25	3,87	0,29	0,58	2,19	1,45	6,71	2,02
5-25	6,11	1,54	9,14	1,47	1,77	3,37	0,27	0,32	1,13	0,92	10,19	5,22
25-50	6,18	4,77	29,43	1,23	4,86	10,43	0,34	0,21	0,89	0,91	15,61	10,27

¹Condutividade elétrica do extrato de saturação; ²Porcentagem de sódio trocável; ³Relação de adsorção de sódio.

Figura 1 - Localização geográfica da área de estudo.

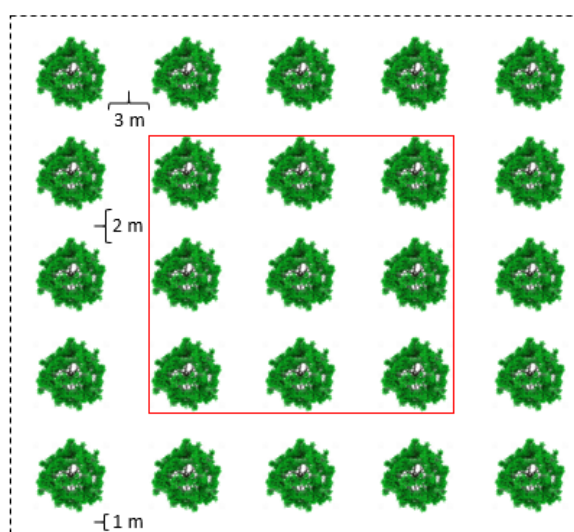
4.2.2 Condução do experimento

O experimento foi instalado em Julho/Agosto de 2016, em blocos casualizados, com oito tratamentos (seis espécies nativas, a halófito *Atriplex nummularia* Lindl., e o tratamento sem cultivo de planta), em quatro repetições, sendo uma por bloco. O plantio foi realizado no espaçamento de 2 x 3 m, em parcelas de 10 x 14 m (140 m²), com 25 plantas por parcela, área útil de 6 x 8 m (48 m²) com as nove plantas centrais (Figura 2).

As espécies nativas da Caatinga utilizadas foram escolhidas com base em trabalhos que vem sendo conduzidos e em resultados disponíveis na literatura, são elas: Aroeira-do-Sertão [*Astronium urundeuva* (M.Allemão) Engl.], Catingueira [*Cenostigma pyramidale* (Tul.) Gagnon & G. P. Lewis], Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.), Mulungu (*Erythrina velutina* Willd.), Pau-Ferro *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L. P. Queiroz] e Umbuzeiro (*Spondias tuberosa* Arruda), e as mudas foram cedidas pela Companhia Hidro-Elétrica do São Francisco (CHESF). Além das seis espécies nativas, foram preparadas mudas de *Atriplex nummularia* Lindl, propagadas por estaquia, para serem utilizadas como planta teste e padrão de comparação. Existindo, também, parcelas sem plantas, como tratamento controle (testemunha).

As mudas foram transplantadas a campo quando estavam entre 30 e 40 cm de altura, recebendo irrigação semanal durante o primeiro mês para seu estabelecimento. Havendo reposição de novas mudas no lugar das que morreram. O Jatobá mostrou-se muito sensível às condições locais havendo uma alta taxa de mortalidade, por isso foi um tratamento inteiramente perdido pois, mesmo com o replantio, as mudas tornaram a morrer.

Figura 2 - Disposição das plantas na parcela e na área útil de amostragem.



Plantas da Caatinga tem por característica natural serem decíduas ou semidecíduas e esta característica dificultou a coleta de material vegetal. Dessa forma foi realizada apenas uma coleta aos 48 meses após o transplântio das plantas na área experimental (agosto de 2020), totalizando 4 anos com as plantas em condições de campo, onde foram coletadas folhas do terço médio de 3 plantas da área útil de cada parcela, para a realização das análises bioquímicas, totalizando 12 repetições para cada espécie (4 repetições x 3 triplicatas). Exceto para o Umbuzeiro, que totalizou 6 repetições, pois em dois blocos nenhuma das plantas da área útil apresentava folhas.

4.2.1 Pigmentos fotossintéticos

Os teores de clorofilas a, b e carotenoides foram determinados utilizando-se 0,1 g de matéria fresca de folhas das plantas, que foi macerada em nitrogênio líquido, adicionando-se 10 mL de etanol a 95%. As amostras foram armazenadas sob refrigeração na ausência de luz por 48 h. Os teores de clorofila a, b e carotenoides foram, então, quantificados em espectrofotômetro, nos comprimentos de onda 664 nm, 649 nm e 470 nm, respectivamente

(ARNON, 1949). Os valores foram calculados pelas fórmulas descritas abaixo e os resultados expressos em miligrama de clorofila por grama de matéria fresca (mg g^{-1} MF), segundo metodologia de Lichtenthaler; Buschmann (2001).

$$\text{Clorofila a} = 13,36 \times A_{664} - 5,19 \times A_{649}$$

$$\text{Clorofila b} = 27,43 \times A_{649} - 8,12 \times A_{664}$$

$$\text{Carotenoides} = 1000 \times A_{470} - 2,13 (\text{Clorofila a}) - 97,64 \frac{(\text{Clorofila b})}{209}$$

4.2.2 Solutos orgânicos

Para a determinação dos solutos orgânicos, foi utilizado 1 g de matéria fresca de folha, que foi macerada em N_2 líquido e adicionados 4 mL de solução tampão de fosfato monobásico 100 mmol L^{-1} (pH 7,0), contendo EDTA a $0,1 \text{ mmol L}^{-1}$. Os extratos foram filtrados em tecido de voil, colocados em eppendorfs e centrifugados a 15.000 rpm por 10 minutos a uma temperatura de $4 \text{ }^\circ\text{C}$, coletando-se o sobrenadante, o qual foi transferido para outro tubo eppendorf. Estes extratos foram armazenados a uma temperatura de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ para posterior determinação de proteínas solúveis, carboidratos solúveis, aminoácidos solúveis totais e prolina livre.

A determinação de proteínas solúveis foi feita pelo método da ligação ao corante coomassie brilliant blue, de acordo com a metodologia de Bradford (1976), utilizando-se albumina sérica bovina como padrão e realizando as leituras em espectrofotômetro a 595 nm. Os carboidratos solúveis foram determinados pelo método do fenol-ácido sulfúrico (DUBOIS et al., 1956), utilizando-se glicose anidra como padrão e realizando-se as leituras em espectrofotômetro a 490 nm. Os aminoácidos solúveis totais foram analisados pelo método da ninhidrina (YEMM; COCKING, 1955), utilizando-se glicina como padrão, com as leituras realizadas na faixa de 570 nm. E a prolina livre foi avaliada pelo método da ninhidrina ácida (BATES; WALDREN; TEARE, 1973), utilizando como padrão a L-prolina, sendo a leitura de absorbância das amostras realizada no comprimento de onda 520 nm.

4.2.3 Peroxidação lipídica e quantificação de peróxido de hidrogênio

O malondialdeído (MDA) é o principal produto da peroxidação lipídica da membrana quando as plantas estão sob estresse salino, e seu conteúdo representa o grau de dano da

membrana celular. Portanto, o teor de MDA pode indicar estresse salino e/ou tolerância a sais. A peroxidação de lipídeos foi determinada através da produção de metabólitos reativos a ácido 2-tiobarbitúrico (TBA), principalmente o MDA, segundo metodologia de Heath; Packer (1968).

Foram pesadas 0,2 g de matéria fresca da folha, que foi macerada em N₂ líquido e adicionados 1,5 mL de TCA 5% (ácido tricloroacético), o extrato foi armazenado em eppendorf e centrifugado a 12000 g por 20 min a 4 °C. As amostras foram armazenadas a -20 °C e, posteriormente, as leituras foram feitas no espectrofotômetro a 532 e 660 nm. O peróxido de hidrogênio foi medido após a reação com KI. A reação foi desenvolvida por 1 h no escuro e a absorvância medida a 390 nm. A concentração de peróxido de hidrogênio foi calculada usando uma curva padrão preparada com concentrações conhecidas de H₂O₂, segundo metodologia de Alexieva et al. (2001).

4.2.3 Enzimas antioxidantes

A extração para análise enzimática foi realizada utilizando 0,1g de matéria fresca da folha, que foi macerado em N₂ líquido e adicionados 2 mL do tampão de fosfato de potássio 100 mmol L⁻¹ pH 7,0 + EDTA 0,1 mmol L⁻¹ + ASA 1 mmol L⁻¹, o extrato foi centrifugado a 14000 g por 30 min a 4 °C.

A superóxido dismutase (SOD) foi testada por sua capacidade de inibir a redução fotoquímica do cloreto de azul nitrotetrazólio (NBT) (GIANNOPOLITIS; RIES, 1977). A reação foi iniciada ligando uma “luz branca” (30W) e permitindo que a reação ocorresse por 5 min, em seguida, foi realizada a leitura em espectrofotômetro a 560 nm.

A ascorbato peroxidase (APX) e catalase (CAT) foram determinadas com base na oxidação do ascorbato e do H₂O₂, respectivamente (NAKANO; ASADA, 1981). Para a APX as leituras foram realizadas em espectrofotômetro a 290 nm, durante 1 min, com intervalos de 15 em 15 s. Para a determinação da atividade da enzima, foi utilizado o coeficiente de extinção molar do ascorbato de 0,0028 µmol cm⁻¹ e o resultado expresso em µmol min⁻¹ mg⁻¹ ascorbato, considerando que 1 U de APX é a quantidade de enzima capaz de oxidar 1 mol de ascorbato em 1 min.

Para a CAT, as amostras tiveram a absorvância monitorada em espectrofotômetro a 240 nm durante 1 min, em intervalos 15 em 15 s (HAVIR; MCHALE, 1987). A atividade bruta da catalase foi calculada baseando-se no coeficiente de extinção molar do H₂O₂ (0,036 µmol cm⁻¹) e expressa em µmol min⁻¹ mg⁻¹ H₂O₂ (ANDERSON et al, 1995), considerando-se que 1 U de CAT é a quantidade de enzima capaz de oxidar 1 mol de H₂O₂ em 1 min.

4.2.3 Análise estatística

Os dados foram previamente testados em relação à normalidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, que foram submetidos à análise da variância e, quando significativos, tiveram suas médias confrontadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.3 Resultados e Discussão

4.3.1 Mortalidade das plantas

As plantas de Aroeira e Atriplex foram as que melhor se estabeleceram em campo, apresentando uma mortalidade de apenas 1%. Seguidas por Pau Ferro, com uma mortalidade de 15%, Umbuzeiro com 22% e Catingueira com 23%. Mulungu e Jatobá foram as plantas que apresentaram uma maior mortalidade, com 64 e 95%, respectivamente (Tabela 2).

A mortalidade destas espécies é justificada pela maior sensibilidade ao stresse salino e hídrico. Cardoso et al. (2017) avaliando plantas de Jatobá sob stresse hídrico e alagamento, verificaram que o seu metabolismo foi afetado prejudicando seu crescimento, sobretudo sob estresse hídrico.

Guimarães et al. (2013) avaliando o efeito da salinidade na água de irrigação na emergência e crescimento inicial de plântulas de Mulungu, verificaram que com o aumento da salinidade da água seu crescimento foi prejudicado. Figueiredo et al. (2019) estudando plantas de Mulungu sob stresse salino também verificaram sensibilidade, ocorrendo principalmente efeitos deletérios nas trocas gasosas. Lopes et al. (2007), observaram que acima de uma CE de 4 dS m^{-1} , plantas de Catingueira tiveram seu crescimento e desenvolvimento comprometido. Assim como Sousa et al. (2020) observaram que quando irrigadas com água de CE igual a 4 dS m^{-1} , a Catingueira também teve seu crescimento e acúmulo de massa seca prejudicados.

Apesar do transplântio das mudas de todas as espécies terem sido realizados simultaneamente e com os mesmos cuidados, Jatobá já apresentou problemas nos primeiros dias em campo. Foram realizadas substituições das mudas que morreram durante os 3 primeiros meses, no entanto, a morte se repetia. Enquanto isso, apenas um indivíduo de Atriplex e um de Aroeira não suportaram, com 99% de plantas permanecendo vivas em campo. Isso pode ser um indicativo da existência de mecanismos de sobrevivência dessas espécies às condições extremas da área e precisa ser melhor investigado.

Tabela 2 – Taxa de mortalidade de espécies nativas e *Atriplex nummularia* cultivadas em um solo degradado por sais em Caruaru, semiárido de Pernambuco

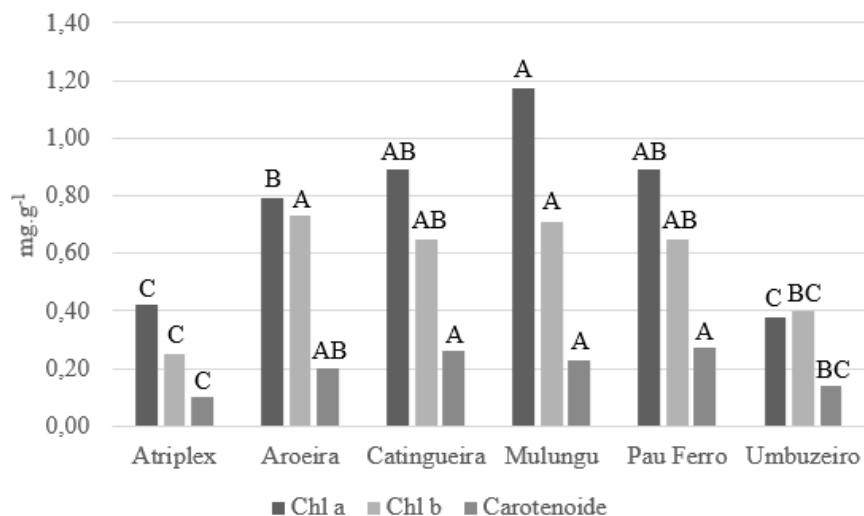
Planta	Total	Vivas	Mortas	Mortalidade (%)
Atriplex	100	99	1	1
Aroeira	100	99	1	1
Catingueira	100	77	23	23
Jatobá	100	5	95	95
Mulungu	100	36	64	64
Pau Ferro	100	85	15	15
Umbuzeiro	100	78	22	22

4.3.2 Pigmentos fotossintéticos

Observou-se diferença significativa nos teores dos pigmentos fotossintéticos entre as espécies de plantas estudadas. O Mulungu produziu mais clorofila a (Chl a), enquanto a Atriplex e o Umbuzeiro tiveram menores teores. Para a clorofila b (Chl b), Aroeira e Mulungu apresentaram maiores teores, enquanto a Atriplex o menor. Para os carotenóides (Car), Catingueira, Mulungu e Pau Ferro apresentaram maiores teores, e a Atriplex e o Umbuzeiro os menores (Figura 3).

Os pigmentos fotossintéticos são sensíveis aos estresses hídrico e salino, possivelmente devido a uma inibição da síntese de clorofila, juntamente com a ativação de sua degradação pela enzima clorofilase, e o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (FAHAD et al., 2017; SANTOS, 2004).

Figura 3 – Teores de clorofila a (Chl a), b (Chl b) e carotenoides em plantas nativas da Caatinga e *Atriplex* cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais dentro de cada variável não diferem entre as espécies pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Nedjimi (2014), estudando três espécies de *Atriplex*, observou que o teor de Chl a e b em *A. nummularia* reduziu com o aumento da concentração de sais no solo, com a Chl a variando de $1,7 \text{ mg g}^{-1}$ sem estresse salino a $0,7 \text{ mg g}^{-1}$, quando submetidas a um stress de 300 mM de NaCl, e para Chl b variando de $1,0 \text{ mg g}^{-1}$ sem estresse a $0,8 \text{ mg g}^{-1}$ com um estresse de 300 mM de NaCl. Teores pouco mais elevados dos que os observados neste estudo. Para a Aroeira, Barros et al. (2020), observaram aumento nos teores de Chl a, b e Car sob estresse hídrico, com teores de 0,7, 0,6 e $0,4 \text{ mg g}^{-1}$, respectivamente, valores semelhantes aos deste estudo.

Um menor conteúdo de pigmentos fotossintéticos, pode indicar prejuízo ao aparato fotossintético, provocado pelo dano oxidativo de lipídios e proteínas (SUO et al., 2017). O que não foi o caso da *Atriplex* e do Umbuzeiro que, apesar dos menores teores de pigmentos em relação as outras espécies, não apresentaram alta produção de malondialdeído (MDA) (Figura 8). Este é o principal produto da peroxidação lipídica da membrana quando as plantas estão sob estresse salino, e seu conteúdo representa o grau de dano da membrana celular.

Catingueira, Mulungu e Pau Ferro tiveram uma maior concentração de carotenoides, que é importante pois estes pigmentos têm um duplo propósito durante a fotossíntese. Além da coleta de luz, eles protegem o aparato fotossintético da foto-oxidação, atuando para dissipar o excesso de energia na forma de calor (CHEN; CHENG, 2003; KEUNEN et al., 2013). A dissipação do excesso de energia ocorre através do ciclo da xantofila, e ainda podem atuar como

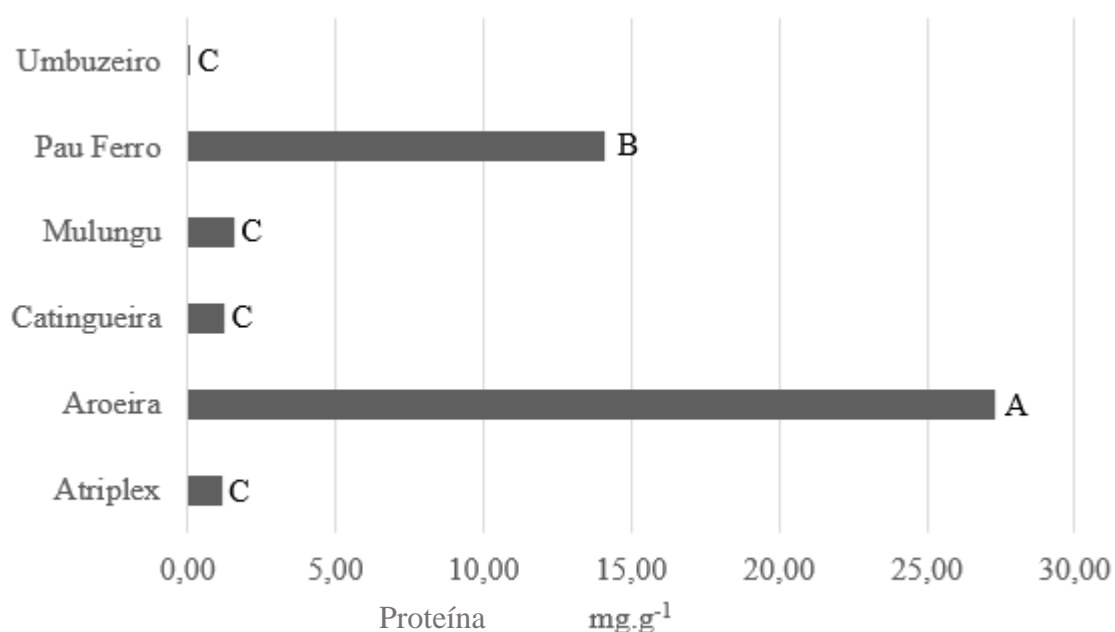
poderosos estabilizadores de membrana de cloroplasto, reduzindo a fluidez da membrana e a suscetibilidade à peroxidação lipídica (DEMMIG-ADAMS; ADAMS, 2002).

4.3.3 Solutos orgânicos

A Aroeira apresentou maiores teores de proteína, seguida pelo Pau Ferro, enquanto Atriplex, Catingueira, Mulungu e Umbuzeiro tiveram menores teores (Figura 4). Barros et al. (2020) encontraram teores semelhantes de proteína em plantas de Aroeira sob estresse hídrico, variando de 25 a 30 mg g⁻¹. Em plantas de Catingueira sob estresse salino, Lima et al. (2021) observaram teores variando de 4 a 10 mg g⁻¹ de proteína, valores maiores do que o deste estudo.

Sob deficiência hídrica, menores teores de proteína com manutenção do teor de prolina, é um comportamento que pode levar à osmoproteção pela estabilização de membranas, proteínas e enzimas (ASHRAF; FOOLAD, 2007).

Figura 4 – Teores de proteína em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco

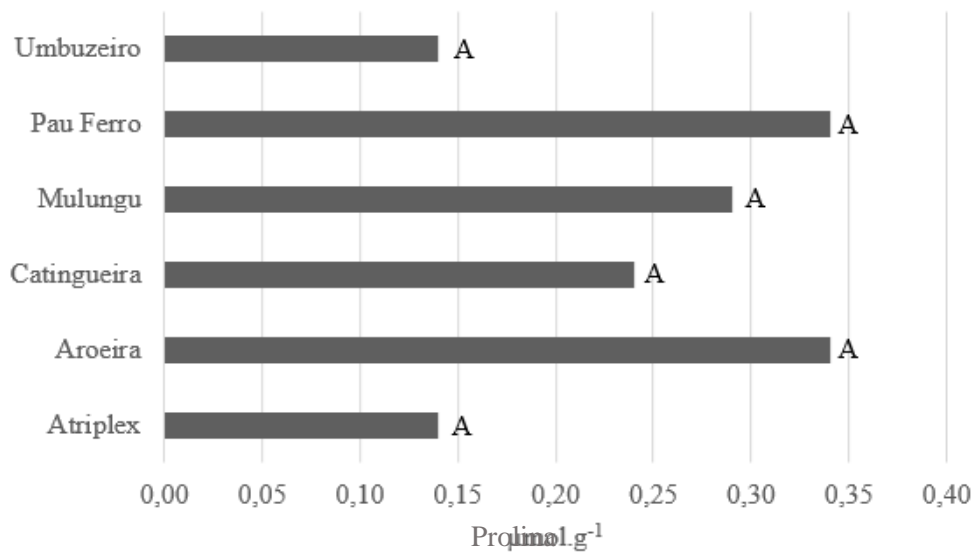


Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Todas as plantas deste estudo foram capazes de produzir prolina, ainda que em baixas concentrações, não havendo diferença significativa entre os tratamentos (Figura 5). Algumas espécies utilizam a proteína para produzir prolina, diminuindo o seu teor protéico, porém, observa-se que no caso do Pau Ferro e da Aroeira estas espécies conseguiram manter os teores

de proteína elevados além de produzir prolina, estratégia que promove uma maior proteção e tolerância contra estresses abióticos. A concentração de prolina tende a ser geralmente mais alta em plantas tolerantes ao estresse do que em plantas sensíveis ao estresse, atuando como um regulador osmótico, que protege contra a desnaturação de proteínas, estabiliza a síntese de proteínas e sequestra os radicais livres (ASHRAF; FOOLAD, 2007).

Figura 5 – Teores de prolina em plantas nativas da Caatinga e *Atriplex* cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.

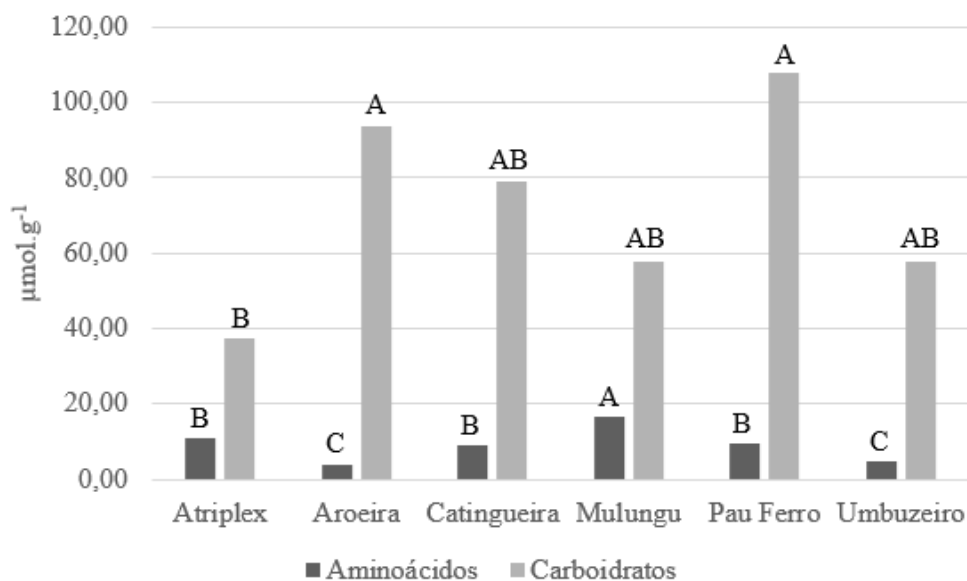


Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Quanto aos aminoácidos e carboidratos solúveis, foi observada uma maior concentração de aminoácidos nas plantas de Mulungu e menor concentração em plantas de Aroeira e Umbuzeiro, e maior concentração de carboidratos em plantas de Aroeira e Pau Ferro, e menos nas de *Atriplex* (Figura 6). O aumento de carboidratos por espécies nativas pode desempenhar um papel na eliminação de espécies reativas de oxigênio e no ajustamento osmótico de plantas submetidas a estresse hídrico e salino (KEUNEN et al., 2013)

Por definição, os carboidratos solúveis são sintetizados em resposta ao estresse osmótico, agindo como osmoprotetores que estabilizam as membranas celulares e mantêm o turgor. Os açúcares podem substituir a água sob estresse hídrico. Como tal, eles mantêm as superfícies da membrana hidratadas e evitam a fusão da membrana, mantendo o espaço entre as moléculas de fosfolipídios (PESHEV; VAN DEN ENDE, 2013).

Figura 6 – Teores de aminoácidos e carboidratos em plantas nativas da Caatinga e *Atriplex* cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os açúcares também são capazes de proteger os cloroplastos e estabilizar a fotossíntese em condições de estresse (KEUNEN et al., 2013). Açúcares solúveis e prolina acumulados durante o estresse podem levar à regulação de diferentes aspectos do metabolismo, incluindo a mitigação dos efeitos promovidos pelas ROS (SAMI et al., 2016).

E estes devem ter sido os fatores que contribuíram para a manutenção destas plantas em campo, pois como veremos a seguir embora as plantas tenham tido uma alta produção de H_2O_2 , que é uma espécie reativa de oxigênio e contribui para a degradação de membranas e células, as plantas conseguiram sobreviver e se estabelecer em campo.

4.3.4 Acúmulo de peróxido de hidrogênio e peroxidação lipídica

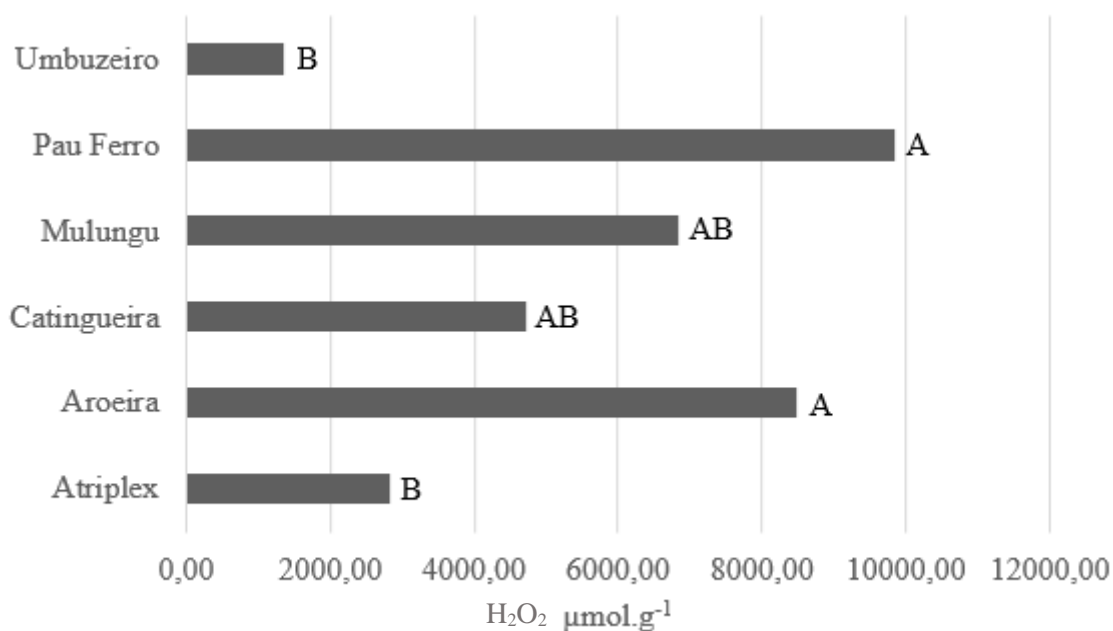
Os dados indicaram que as plantas de Aroeira e Pau Ferro produziram muito mais H_2O_2 em relação as demais espécies, sendo a *Atriplex* e o Umbuzeiro as espécies que menos produziram esta mesma EROs (Figura 7). Porém, apesar de uma considerável produção de H_2O_2 pelas espécies, apenas a Aroeira teve uma alta produção de MDA, sugerindo degradação das membranas devido à peroxidação lipídica (Figura 8).

O aumento do conteúdo de H_2O_2 nas folhas pode danificar a membrana ao produzir substâncias envolvidas na peroxidação lipídica, resultando na produção de MDA (POLLE; CHEN, 2015; SAMI et al., 2016).

É importante salientar que, em condições fisiológicas ideais, as EROs são naturalmente produzidas como subprodutos do metabolismo aeróbio em cloroplastos, mitocôndrias e peroxissomos (KEUNEN et al., 2013). E, para além de seus efeitos prejudiciais na planta, podem também atuar como moléculas sinalizadoras de estresse, que vão ativar seus mecanismos de defesa (FOYER; NOCTOR, 2005; MILLER et al., 2010), e o desenvolvimento vegetativo das plantas (MHAMDI; BREUSEGEM, 2018). Por isso, altas concentrações de H_2O_2 não devem ser vistas apenas como eventos prejudiciais que devem ser evitados ou atenuados, mas podem ser vistas como pré-requisitos para que as plantas respondam de forma adequada e induzam melhores mecanismos de aclimação (MILLER et al., 2010).

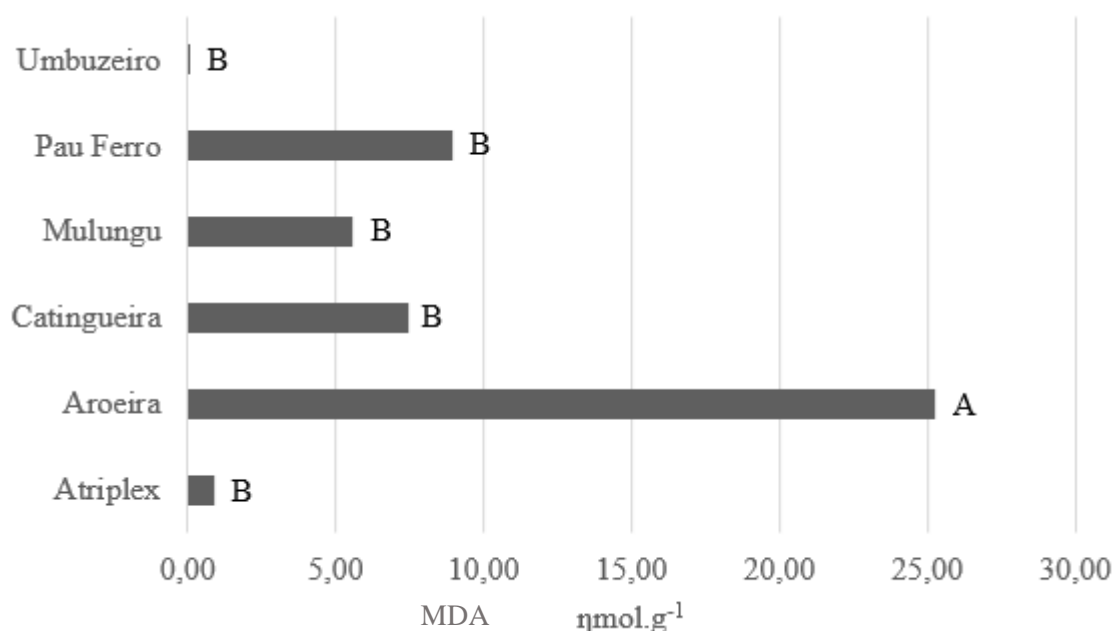
Por isso, níveis prejudiciais de EROs são determinados por um equilíbrio rigidamente controlado entre sua produção e sua eliminação, que é alcançado por meio de sistemas antioxidantes altamente complexos (MITTLER et al., 2011; NOCTOR et al., 2012). E este equilíbrio entre produção e eliminação de EROs vai determinar e controlar o crescimento e a sobrevivência da planta (MITTLER, 2017; WASZCZAK; CARMODY; KANGASJÄRVI, 2018). E isto pode bem ser observado neste trabalho, onde as plantas produziram altas concentrações de H_2O_2 , mas se aclimataram e se estabeleceram em campo. Assim como a Aroeira que produziu uma maior concentração de MDA e foi uma das espécies que melhor se aclimatou e sobreviveu em campo.

Figura 7 – Concentração de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 8 – Teor de malondialdeído (MDA) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Lima et al. (2021), avaliando se a hora do dia influencia a tolerância de plantas de Catingueira sob estresse salino, observaram que quando o estresse se inicia no período noturno, em momentos de alta concentração de H_2O_2 as plantas mostraram alto teor de carboidratos solúveis e prolina, e uma menor produção de MDA, indicando que o sistema antioxidante não enzimático desta espécie foi ativado. Enquanto que nas plantas que o estresse foi iniciado durante o dia, mesmo com o acúmulo de prolina e carboidratos, houve um aumento na produção do MDA, sugerindo danos às membranas induzidos pela salinização.

Observamos isto com a Aroeira e Pau Ferro que apresentaram altos teores de H_2O_2 e altos valores de carboidratos, de modo que este acúmulo de açúcar conseguiu frear a peroxidação lipídica para o Pau Ferro. E a aroeira apesar de ter obtido a maior peroxidação lipídica, sua permanência no campo não foi prejudicada.

Oliveira et al. (2014) estudando a tolerância aos estresse entre plantas de Angico (espécie nativa) e Algaroba (espécie exótica) no semiárido de Pernambuco, observaram que o Angico apresentou maior concentração de peróxido de hidrogênio na estação seca, sem aumento da atividade enzimática o que promoveu um aumento desproporcional na concentração de MDA, indicando que as espécies nativas precisam de maior investimento na atividade das enzimas que regulam o metabolismo do oxigênio (OLIVEIRA et al., 2014).

Compartamento que foi observado para a Aroeira, que apesar da alta produção de H_2O_2 , a atividade enzimática não foi aumentada como forma de combater a peroxidação.

4.3.5 Enzimas antioxidativas

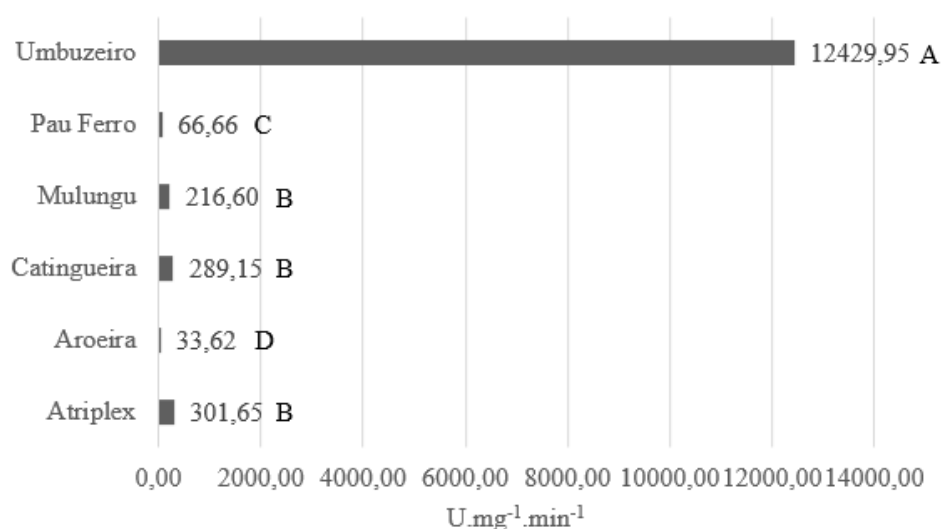
Entre as enzimas antioxidantes, a SOD é a primeira linha de defesa contra ROS em plantas (ABBAS et al., 2018). O produto da atividade da SOD é o H_2O_2 , que é eliminado por conversão em H_2O nas reações subsequentes, sendo regulado por várias enzimas como CAT, APX e GPX (DU et al., 2019).

O nível das enzimas antioxidantes APX, GPX e CAT pode determinar a suscetibilidade das plantas à peroxidação lipídica. A deficiência de suas atividades pode resultar no aumento da peroxidação lipídica mediada por radicais livres (KAHLI et al., 2021).

Este mecanismo de defesa comandado pela SOD mais CAT e APX foi seguramente observado para o Umbuzeiro que teve altíssima produção destas enzimas, o que refletiu numa produção muito baixa de MDA, indicando que esta espécie possui um sistema antioxidante enzimático muito eficiente e muito superior as demais espécies deste estudo (Figura 9 e 10).

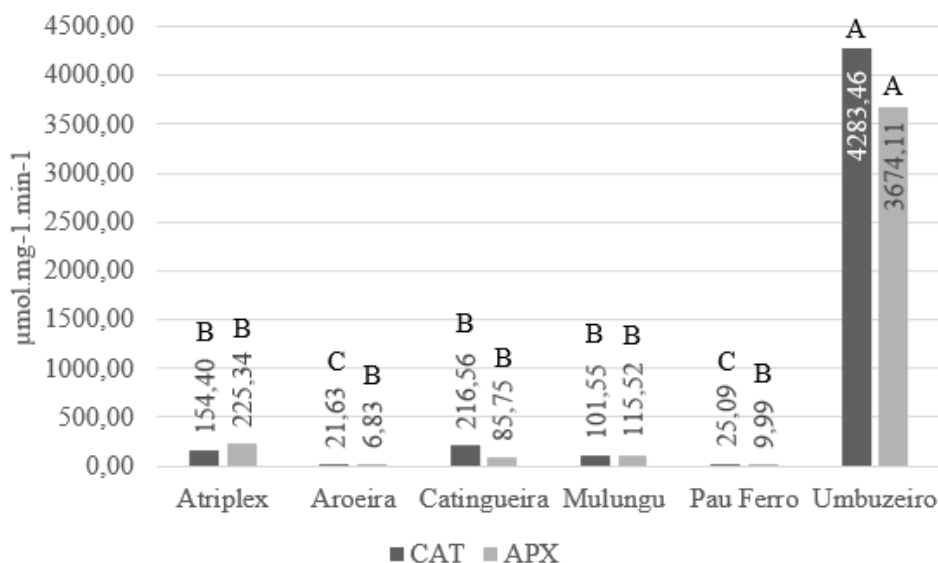
Entre as outras espécies, a Aroeira e o Pau Ferro tiveram as menores atividades enzimáticas, que foi refletido numa maior produção de H_2O_2 e, em consequência, em maior produção de MDA, principalmente para a Aroeira, indicando dano oxidativo das membranas (Figura 9 e 10).

Figura 9 – Atividade da enzima superóxido dismutase (SOD) em plantas nativas da Caatinga e Atriplex cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Figura 10 – Atividade das enzimas catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) em plantas nativas da Caatinga e *Atriplex* cultivadas em solo salino-sódico no semiárido de Pernambuco.



Médias seguidas de letras maiúsculas iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

É importante ressaltar que, apesar da Aroeira e Pau Ferro terem apresentando um maior dano de membranas por peroxidação lipídica, o acúmulo de solutos orgânicos osmoprotetores foi eficiente, o que contribuiu para o estabelecimento destas espécies em campo.

4.4 Conclusões

As espécies nativas da Caatinga avaliadas neste estudo têm um sistema de defesa enzimático e não enzimático eficientes e podem se adaptar à salinidade.

As espécies nativas estudadas apresentam desempenho superior à *Atriplex nummularia*.

O Umbuzeiro tem sistema de defesa antioxidante enzimático mais eficiente.

Aroeira e Pau Ferro apresentam sistema de defesa antioxidante não enzimático mais eficiente.

Referências Bibliográficas

- ABBAS, G.; MURTAZA, B.; BIBI, I.; SHAHID, M.; NIAZI, N. K.; KHAN, M. I.; AMJAD, M.; HUSSAIN, M.; NATASHA. Arsenic uptake, toxicity, detoxification, and speciation in plants: physiological, biochemical, and molecular aspects. **International Journal of Environment Research and Public Health**, v. 15, article 59, 2018. <https://doi.org/10.3390/ijerph15010059>
- ALEXIEVA, V.; SERGIEV, I.; MAPELLI, S.; KARANOV, E. The effect of drought and ultraviolet radiation on growth and stress markers in pea and wheat. **Plant, Cell and Environment**, v. 24, n. 12, p. 1337-1344, 2001. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2001.00778.x>
- ANDERSON, M. D.; PRASAD, T. K.; STEWART, C. R. Changes in isozyme profiles of catalase, peroxidase, and glutathione reductase during acclimation to chilling in mesocotyls of maize seedlings. **Plant Physiology**, v. 109, p. 1247-1257, 1995. <https://doi.org/10.1104/pp.109.4.1247>
- ARNON, D.I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphenoloxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v.24, n.1, p.1-15, 1949. <https://doi.org/10.1104/pp.24.1.1>
- ASADA, K. Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissues. In: FOYER, C. H.; MULLINEAUX, P. M. (eds). **Cause of photooxidative stress and amelioration of defense systems in plants**. CRC Press, New York, 1994. p. 77–104
- ASHRAF, M.; FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and Proline in Improving Plant Abiotic Stress Resistance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 59, p. 206 - 216, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.12.006>
- BANDEIRA, M. A. M.; VIANA, G. S. B.; AGUIAR-GALVÃO, W. R.; BRAZ-FILHO, R.; MATOS, F. J. A (In memoriam). **Myracrodruon urundeuva Fr. All. (aroeira-do-sertão)**. In: VIANA, G. S. B.; LEAL, L. K. A. M.; VASCONCELOS, S. M. M. (Eds.), **Medicinal Plants of Caatinga: Biological Activities and Therapeutic Potential**, Fortaleza: Universidade Federal do Ceará/Expressão Gráfica Editora Ltda., p. 317-350. 2013.
- BARROS, J. P. A.; SOUZA, L. S. B.; SILVA, T. G. F.; MOURA, M. S. B.; SILVA, L. S. Partitioning and modeling of biomass in caatinga legume seedlings in different water conditions. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-10, 2019. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.034818>
- BARROS, V.; MELO, A.; SANTOS, M.; NOGUEIRA, L.; FROSI, G.; SANTOS, M. G. Different resource-use strategies of invasive and native woody species from a seasonally dry tropical forest under drought stress and recovery. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 147, p. 181-190, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2019.12.018>
- BATES, L.S; WALDREN, R. P.; TEARE, I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. **Plant and Soil**, v. 39, p. 205-207, 1973. <https://doi.org/10.1007/BF00018060>

BESSA, M. C.; LACERDA, C. F.; AMORIM, A. V.; BEZERRA, A. M. E.; LIMA, A. D. Mechanisms of salt tolerance in seedlings of six woody native species of the Brazilian semi arid. **Revista Ciência Agronômica**, v. 48, n, 1, p. 157-165, 2017.

<https://doi.org/10.5935/1806-6690.20170018>

BOUAZIZ, M.; CHTOUROU, M. Y.; TRIKI, I.; MEZNER, S.; BOUAZIZ, S. Prediction of soil salinity using multivariate statistical techniques and remote sensing tools. **Advances in Remote Sensing**, v. 7, n. 4, p. 313-326, 2018. <https://doi.org/10.4236/ars.2018.74021>

BRADFORD, M. M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, v. 7, n. 72, p. 248-254, 1976. <https://doi.org/10.1006/abio.1976.9999>.

CARDOSO, K. P. S.; PALHETA, J. G.; SOUSA, J. C. M.; NASCIMENTO, V. R.; NOGUEIRA, G. A. S.; MACHADO, L. C.; MARTINS, J. T. S.; COSTA, T. C.; ANDRADE JÚNIOR, W. V.; OLIVEIRA NETO, C. F.; SANTOS FILHO, B. G. Physiological and biochemical metabolism in Jatoba plants (*Hymenaea courbaril* L.) affected by water stress and flooding. **Australian Journal of Crop Science**, v. 11, n. 7, p. 844-852, 2017.

<http://doi.org/10.21475/ajcs.17.11.07.pne498>

CARVALHO, S. M. C.; TORRES, S. B.; BENEDITO, C. P.; NOGUEIRA, N. W.; SOUZA, A. A. T.; SOUZA NETA, M. L. Viability of *Libidibia ferrea* (Mart. ex Tul.) L.P. Queiroz var. *ferrea* seeds by tetrazolium test. **Journal of Seed Science**, v.39, n.1, p.007-012, 2017.

<https://doi.org/10.1590/2317-1545v39n1163784>

CHAVES, T. P.; FERNANDES, F. H.; SANTANA, C. P.; SANTOS, J. S.; MEDEIROS, F. D.; FELISMINO, D. C.; SANTOS, V. L.; CATAO, R. M.; COUTINHO, H. D.; MEDEIROS, A. C. Evaluation of the interaction between the *Poincianella pyramidalis* (Tul.) LP Queiroz extract and antimicrobials using biological and analytical models. **PloS One**, v. 11, article 0155532, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0155532>

CHEN, L-S.; CHENG, L. Both xanthophyll cycle-dependent thermal dissipation and the antioxidant system are up-regulated in grape (*Vitis labrusca* L. cv. Concord) leaves in response to N limitation. **Journal of Experimental Botany**, v. 54, n. 390, p. 2165–2175, 2003. <https://doi.org/10.1093/jxb/erg220>

CHENG, L.; HAN, M.; YANG, L.; YANG, L.; SUN, Z.; ZHANG, T. Changes in the physiological characteristics and baicalin biosynthesis metabolism of *Scutellaria baicalensis* Georgi under drought stress. **Industrial Crops and Products**, v. 122, p. 473-482, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.06.030>

COSTA, L. M.; SIMPLICIO, F. G.; SOUZA, T. P. *Libidibia ferrea* (Mart. Ex tul) L. P. Queiroz var. *Ferrea*: pharmacological, phytochemical and botanical aspects. **International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences**, v. 7, n. 4, p. 48-53, 2015.

<https://innovareacademics.in/journals/index.php/ijpps/article/view/4740>

CRAMER, G. R.; URANO, K.; DELROT, S.; PEZZOTTI, M.; SHINOZAKI, K. Effects of abiotic stress on plants: a systems biology perspective. **BMC Plant Biology**, v. 11, article 163, 2011. <https://doi.org/10.1186/1471-2229-11-163>

- DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W. Antioxidants in photosynthesis and human nutrition. **Science**, v. 298, p. 2149-2153, 2002. <https://doi.org/10.1126/science.1078002>
- DUARTE, M. E. M. D.; MATA, M. E. R. M. C.; NASCIMENTO, J. P. T.; SILVEIRA JR., V. 2004. **The concentration kinetics of cooked umbu**. In: Drying 2004 – Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004), Sao Paulo, Brazil, p. 1971–1976.
- DU, Q.; ZHAO, X. H.; XIA, L.; JIANG, C. J.; WANG, X. G.; HAN, Y.; YU, H. Q. Effects of potassium deficiency on photosynthesis, chloroplast ultrastructure, ROS, and antioxidant activities in maize (*Zea mays* L.). **Journal of Integrative Agriculture**, v. 18, p. 395-406, 2019. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)61953-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61953-7)
- DUBOIS, M.; GILLES, K. A.; HAMILTON, J. K.; REBERS, P. A.; SMITH, F. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. **Analytical Chemistry**, v. 28, p. 350-356, 1956. <https://doi.org/10.1021/ac60111a017>
- FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; WU, C.; WANG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, p. 1-16, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01147>
- FIGUEIREDO-LIMA, K. V.; FALCÃO, H. M.; MELO-DE-PINNA, G. F.; ALBACETE, A.; DODD, I. C.; LIMA, A. L. A.; SANTOS, M. G. Leaf phytohormone levels and stomatal control in an evergreen woody species under semiarid environment in a Brazilian seasonally dry tropical forest. **Plant Growth Regulation**, v. 85, p. 437-445, 2018. <https://doi.org/10.1007/s10725-018-0405-5>
- FIGUEIREDO, F. R. A.; LOPES, M. F. Q.; SILVA, R. T.; NÓBREGA, J. S.; SILVA, T. I.; BRUNO, R. L. A. Respostas fisiológicas de mulungu submetida a estresse salino e aplicação de ácido salicílico. **Irriga**, s. 1, v. 24, n. 3, p. 662–675, 2019. <https://doi.org/10.15809/irriga.2019v24n3p662-675>
- FOYER, C. H.; NOCTOR, G. Redox homeostasis and antioxidant signaling: a metabolic interface between stress perception and physiological responses. **The Plant Cell**, v. 17, p. 1866-1875, 2005. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.033589>
- FROSI, G.; BARROS, V. A.; OLIVEIRA, M. T.; SANTOS, M.; RAMOS, D. G.; MAIA, L. C.; GUIDA, M. S. Symbiosis with AMF and leaf Pi supply increases water deficit tolerance of woody species from seasonal dry tropical forest. **Journal of Plant Physiology**, v. 207, p. 84–93, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2016.11.002>
- GIANNOPOLITIS, O.; RIES, S. K. Superoxide dismutase: I. Occurrence in higher plants. **Plant Physiology**, v. 59, p. 309-314, 1977. <https://doi.org/10.1104/pp.59.2.309>
- GORJI, T.; YILDIRIM, A.; HAMZEHPOUR, N.; TANIK, A.; SERTEL, E. Soil salinity analysis of Urmia Lake Basin using Landsat-8 OLI and Sentinel-2A based spectral indices and electrical conductivity measurements. **Ecological Indicators**, v. 112, p. 106173, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106173>

GUIMARÃES, I. P.; OLIVEIRA, F. N.; VIEIRA, F. E. R.; TORRES, S. B. Efeito da salinidade da água de irrigação na emergência e crescimento inicial de plântulas de mulungu. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n.1, p. 137-142, 2013.

<https://doi.org/10.5039/agraria.v8i1a2360>

HAVIR, E. A.; MCHALE, N. A. Biochemical and Developmental Characterization of Multiple Forms of Catalase in Tobacco Leaves. **Plant Physiology**, v. 84, p. 450-455, 1987.

<http://dx.doi.org/10.1104/pp.84.2.450>

HEATH, R. L.; PACKER, L. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and Stoichiometry of fatty acid peroxidation. **Archives of Biochemistry and Biophysics**, v. 125, n. 1, p. 189 – 198. 1968. [https://doi.org/10.1016/0003-9861\(68\)90654-1](https://doi.org/10.1016/0003-9861(68)90654-1)

KAHLI, H.; SBARTAI, H.; COHEN-BOUHACINA, T.; BOURGUIGNON, J. Characterization of cadmium accumulation and phytoextraction in three species of the genus *Atriplex* (*canescens*, *halimus* and *nummularia*) in the presence or absence of salt. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 902-911, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.06.027>

KEUNEN, E.; PESHEV, D.; VANGRONSVELD, J.; ENDE, W. V. D.; CUYPERS, A. Plant sugars are crucial players in the oxidative challenge during abiotic stress: extending the traditional concept. **Plant, Cell and Environment**, v. 36, p. 1242–1255. 2013.

<https://doi.org/10.1111/pce.12061>

LICHTENTHALER, H. K.; BUSCHMANN, C. Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. **Current Protocols in Food Analytical Chemistry**, unit F4.3.1, suppl. 1, p. F4.3.1 – F4.3.8, 2001.

<https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>

LIMA, A. D.; BEZERRA, F. M. S.; NEVES, A. L. R.; SOUSA, C. H. C.; LACERDA, C. F.; BEZERRA, A. M. E. Response of four woody species to salinity and water deficit in initial growth phase. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, n. 11, p. 753-757, 2018. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v22n11p753-757>

LIMA, L. L.; FROSI, G.; LOPES, R.; SANTOS, M. G. Remobilization of leaf Na⁺ content and use of nonstructural carbohydrates vary depending on the time when salt stress begins in woody species. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 158, p. 385-395, 2021.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.026>

LOPES, A. P.; LÚCIO, A. A.; SILVA, F. F. S.; SILVA, P. P.; DANTAS, B. F. Crescimento inicial de plantas de catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul.) submetidas ao estresse salino. Jornada de iniciação científica da Embrapa semi-árido, 2., 2007. Petrolina. Anais... Petrolina: Embrapa Semi-Árido, 2007. Disponível em:

<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/160391/1/OPB1604.pdf>

MELO, H. F.; SOUZA, E. R.; ALMEIDA, B. G.; FREIRE, M. B. G. S.; MAIS, F. E. Growth, biomass production and ions accumulation in *Atriplex nummularia* Lindl grown under abiotic stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 144-151, 2016.

<https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n2p144-151>

- MHAMDI, A.; VAN BREUSEGEM, F. Reactive oxygen species in plant development. **Primer**, v. 145, p. 1-12, 2018. <https://doi.org/10.1242/dev.164376>
- MILLER, G.; SUZUKI, N.; CIFTCI-YILMAZ, S.; MITTLER R. Reactive oxygen species homeostasis and signalling during drought and salinity stresses. **Plant, Cell and Environment**, v. 33, p. 453– 467, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2009.02041.x>
- MITTLER, R. ROS are good. **Trends in Plant Science**, v. 22, p. 11-19, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>
- MITTLER, R.; VANDERAUWERA, S.; SUZUKI, N.; MILLER, G.; TOGNETTI, V. B.; VANDEPOELE, K.; GOLLERY, M.; SHULAEV, V.; VAN BREUSEGEM. ROS signaling: the new wave? **Trends in Plant Science**, v. 16, p. 300-309, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2011.03.007>
- MUNNS, R. Comparative physiology of salt and water stress. **Plant, Cell and Environment**, v. 25, n. 1, p. 239-250, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x>
- NAKANO, Y.; ASADA, K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidases in spinach chloroplast. **Plant Cell Physiology**, v. 22, n. 5, p. 867-880, 1981. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.pcp.a076232>
- NEDJIMI, B. Effects of salinity on growth, membrane permeability and root hydraulic conductivity in three saltbush species. **Biochemical Systematics and Ecology**, v.52, p.4-13, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bse.2013.10.007>
- NOCTOR, G.; MHAMDI, A.; CHAOUCH, S.; HAN, Y.; NEUKERMANS, J.; MARQUEZ-GARCIA, B.; QUEVAL, G.; FOYER, C. H. Glutathione in plants: an integrated overview. **Plant, Cell and Environment**, v. 35, p. 454-484, 2012. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02400.x>
- NOCTOR, G.; FOYER, C. H. Ascorbate and glutathione: keep active oxygen under control. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, v. 49, p. 249-279, 1998. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.49.1.249>
- OLIVEIRA, M. T.; MATZEK, V.; MEDEIROS, C. D.; RIVAS, R.; FALCÃO, H. M.; SANTOS, M. G. Stress Tolerance and Ecophysiological Ability of an Invader and a Native Species in a Seasonally Dry Tropical Forest. **PLoS ONE** v. 9, n. 8, article 105514, 2014. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105514>
- PESHEV, D.; VAN DEN ENDE, W. Sugars as antioxidants in plants. In: TUTEJA, N.; GILL, S. S. **Crop Improvement under Adverse Conditions** (eds). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, Germany, 2013. p. 285– 308 https://doi.org/10.1007/978-1-4614-4633-0_13
- POLLE, A.; CHEN, S. On the salty side of life: molecular, physiological and anatomical adaptation and acclimation of trees to extreme habitats. **Plant Cell and Environment**, v. 38, p. 1794-1816, 2015. <https://doi.org/10.1111/pce.12440>

RADIĆ, S.; ŠTEFANIĆ, P. P.; LEPEDUŠ, H.; ROJE, V.; PEVALEK-KOZLINA, B. Salt tolerance of *Centaurea ragusina* L. is associated with efficient osmotic adjustment and increased antioxidative capacity. **Environmental and Experimental Botany**, v. 87, n. 1, p. 39-48, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2012.11.002>

RAMBO, D. F.; BIEGELMEYER, R.; TOSON, N. S. B.; DRESCH, R. R.; MORENO, P. R. H.; HENRIQUES, A. T. The genus *Erythrina* L: a review on its alkaloids, preclinical, and clinical studies. **Phytotherapy Research**, v. 33, n. 5, p. 1258-1276, 2019. <http://dx.doi.org/10.1002/ptr.6321>

SAMI, F.; YUSUF, M.; FAIZAN, M.; FARAZ, A.; HAYAT, S. Role of sugars under abiotic stress. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 109, p. 54-61, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.09.005>

SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, E.; RUBIO-WILHELMI, M.; CERVILLA, L. M.; BLASCO, B.; RIOS, J. J.; ROSALES, M. A.; ROMERO, L.; RUIZ, J. M. Genotypic differences in some physiological parameters symptomatic for oxidative stress under moderate drought in tomato plants. **Plant Science**, v. 178, p. 30– 40, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2009.10.001>

SANTOS, C. V. Regulation of chlorophyll biosynthesis and degradation by salt stress in sunflower leaves. **Scientia Horticulturae**, v. 103, p. 93-99, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.04.009>

SANTOS, M. A.; FREIRE, M. B. G. S.; ALMEIDA, B. G.; LINS, C. M. T.; SILVA, E. M. Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 4, p. 397-404, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000400007>

SANTOS, M. G.; OLIVEIRA, M. T.; FIGUEIREDO, K. V.; FALCÃO, H. M.; ARRUDA, E. C. P.; ALMEIDA-CORTEZ, J.; SAMPAIO, E. V. S. B.; OMETTO, J. P. H. B.; MENEZES, R. S. C.; OLIVEIRA, A. F. M.; POMPELLI, M. F.; ANTONINO, A. C. D. Caatinga, the Brazilian dry tropical forest: can it tolerate climate changes? **Theoretical Experimental Plant Physiology**, v. 26, p. 83–99, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40626-014-0008-0>

SELMAR, D.; KLEINWÄCHTER, M. Influencing the product quality by deliberately applying drought stress during the cultivation of medicinal plants. **Industrial Crops and Products**, v. 42, p. 558-566, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.020>

SHARMA, P.; JHA, A. B.; DUBEY, R. S.; PESSARAKLI, M. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions. **Journal of Botany**, v. 2012, Article ID 217037, 26p, 2012. <https://doi.org/10.1155/2012/217037>

SILVA, Y. J. A. B.; SILVA, Y. J. A. B.; FREIRE, M. B. G. S.; LOPES, E. A. P. L.; SANTOS, M. A. *Atriplex nummularia* Lindl. as alternative for improving salt-affected soils conditions in semiarid environments: a field experimente. **Chilean Journal of Agricultural Research**, Chillán, v. 76, n. 3, p. 343-348, 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392016000300012>

SOUSA, G. G.; GOMES, K. R.; SOUZA, M. V. P.; MENDONÇA, A. M.; LEITE, K. N.; BLUM, S. C. Crescimento inicial de catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) irrigada com águas salinas em diferentes substratos. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4190-4199, 2020. <https://doi.org/10.7127/RBAI.V14N401195>

SOUZA, E. R.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; MONTENEGRO, A. A. A.; FREIRE, F. J.; MELO, H. F. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 477-483, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000500007>

SUO, J.; ZHAO, Q.; DAVID, L.; CHEN, S.; DAI, S. Salinity response in chloroplasts: Insights from gene characterization. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 18, article 1011, 2017. <https://doi.org/10.3390/ijms18051011>

TAGHADOSI, M. M.; HASANLOU, M. Trend analysis of soil salinity in different land cover types using Landsat time series data (case study Bakhtegan Salt Lake). **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLII-4/W4, p. 251-257, 2017. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-4-W4-251-2017>

WASZCZAK, C.; CARMODY, M.; KANGASJÄRVI, J. Reactive oxygen species in plant signaling. **Annual Review of Plant Biology**, v. 69, p. 209-236, 2018. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042817-040322>

WILLEKENS, H.; CHAMNONGPOL, S.; DAVEY, M.; SCHRAUDNER, M.; LANGEBARTELS, C.; VAN MONTAGU, M.; INZÉ, D.; VAN CAMP, W. Catalase is a sink for H₂O₂ and is indispensable for stress defence in C₃ plants. **The Embo Journal**, v. 16, p. 4806–4816, 1997. <https://doi.org/10.1093/emboj/16.16.4806>

YEMM, E.W.; COCKING, E.F. The determination of amino acids with ninhydrin. **Analyst**, v. 80, p. 209-213, 1955. <https://doi.org/10.1039/AN9558000209>

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A avaliação de respostas de tolerância de espécies nativas é de extrema importância, visto que o sucesso da revegetação de áreas degradadas, entre outros fatores, depende da capacidade das plantas resistirem e se estabelecerem em condições ambientais adversas.

A revegetação de áreas degradadas com espécies nativas, além de ser benéfico para o resgate da biodiversidade local, pode contribuir com uma fonte de renda para os agricultores locais, devido aos seus múltiplos usos. Essas espécies podem se estabelecer em áreas onde a exploração de muitas espécies agrícolas não é viável economicamente, além de diminuir a pressão sobre a Caatinga remanescente, evitando a exploração e o desmatamento de novas áreas.

É necessário que haja um estímulo à revegetação de áreas sem cobertura vegetal, especialmente no semiárido, que tem altos valores de déficit hídrico. No entanto, só o conhecimento da potencialidade das espécies em termos de capacidade de sobrevivência e tolerância a saiz poderá trazer sucesso a iniciativas dessa natureza. Espera-se que haja maiores incentivos à recuperação de áreas degradadas com o uso de espécies nativas.

APÊNDICE A – Fotos do experimento



Mudas utilizadas na montagem do experimento



Marcação das parcelas, abertura das covas e plantio das mudas.



Experimento implantado. Julho de 2016.



Área experimental em Março de 2017.



Área experimental em Março de 2018. Foto superior – *Atriplex nummularia*. Fotos inferiores – Aroeira, Catingueira e Mulungu, respectivamente.



Área experimental em Março de 2020. Pau Ferro e Catingueira



Área experimental em Março de 2020. Mulungu e Aroeira



Área experimental em Março de 2020. Umbuzeiro e Atriplex