

EDIVAN RODRIGUES DE SOUZA

**FITORREMEDIAÇÃO DE NEOSSOLO FLÚVICO SÓDICO SALINO DE
PERNAMBUCO COM *Atriplex nummularia*.**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, para obtenção do título de Doutor.

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2010

EDIVAN RODRIGUES DE SOUZA

**FITORREMEDIAÇÃO DE NEOSSOLO FLÚVICO SÓDICO SALINO DE
PERNAMBUCO COM *Atriplex nummularia*.**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, para obtenção do título de Doutor.

Orientadora

Prof^a. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Dra.

Co – Orientadores

Prof. Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, Ph D.

Prof. Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Dr.

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2010

Ficha catalográfica

S729f Souza, Edivan Rodrigues de
Fitorremediação de neossolo flúvico sódico salino de
Pernambuco com *Atriplex nummularia*. / Edivan
Rodrigues de Souza. -- 2010.
75 f.: il.

Orientadora: Maria Betânia Galvão dos Santos Freire.
Tese (Doutorado em Ciência do Solo – Agronomia) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Agronomia, Recife, 2010.
Referências.

1. Fitorremediação 2. Solos afetados por sais 3. Poda
4. Semi-árido 5. *Atriplex nummularia* Lind. 6. Estresse hídrico
I. Freire, Maria Betânia Galvão dos Santos, orientadora
II. Título

CDD 631.42

EDIVAN RODRIGUES DE SOUZA

**FITORREMEDIAÇÃO DE UM NEOSSOLO FLÚVICO SÓDICO SALINO DE
PERNAMBUCO COM *Atriplex nummularia* Lindl.**

Tese defendida e aprovada em 26 de Abril de 2010 pela banca examinadora:

Orientadora _____

Prof^a Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, Dra.
DEPA/UFRPE

Examinadores: _____

Adriana Maria de Aguiar Accioly (EMBRAPA/CNPMPF)

Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida (CODAI/UFRPE)

Abelardo Antônio de Assunção Montenegro (DTR/UFRPE)

Izabel Cristina de Luna Galindo (DEPA/UFRPE)

RECIFE
PERNAMBUCO - BRASIL
2010

Deus, a maior força da natureza, que rege todos os sistemas;

Aos meus pais: Maria Salete Rodrigues e Edgar de Souza (*In Memoriam*);

As minhas irmãs: Edivânia, Edilma e Edione;

As pessoas que me apoiaram.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, força motriz de todos os complexos sistemas da natureza;

A minha mãe, Maria Salete Rodrigues, sertaneja, com uma generosidade e ingenuidade que a coloca em lugar de destaque nesses agradecimentos; Ao meu pai, Edgar de Souza (*In memoriam*);

As minhas irmãs, Edivânia, Edilma e Edione; meus sobrinhos, Alzira e Edmilson Júnior;

Aos meus avós, Raimunda e Francisco Rodrigues, tios e tias, primos e primas;

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco e a Universidade Federal Rural do Semi Árido pela minha formação profissional;

À minha orientadora, Maria Betânia Galvão dos Santos Freire, pelo apoio incondicional durante a realização da pesquisa e no processo de doutoramento, fortalecendo-me em todos os instantes com sua presença agradável e otimista frente às dificuldades, mas ao mesmo tempo com todo rigor científico que se é necessário para a conclusão de um trabalho como esse. Meu muito obrigado!

Aos professores da Pós Graduação em Ciência do Solo, representados por Clístenes Williams Araújo do Nascimento, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro, Brivaldo Gomes de Almeida, Izabel Cristina de Luna Galindo, Ângelo Giussepe Chaves Alves, Mateus Rosas Ribeiro, José Ramon Barros Cantalice, Mateus Rosas Ribeiro Filho, Eurides Alves de Souza, Sheila Maria Bretas Bittar Schulze, Fernando José Freire, Maria de Fátima Cavalcanti Barros (Fatinha), Mario de Andrade Lira Júnior, Valdomiro Severino de Souza Júnior, Marcelo Metri Corrêa; Como também não poderia deixar de agradecer a José Fernando Wanderley Fernandes Lima (Zeca).

À Lady Mary Caraciolo Maia pelas significativas contribuições em relação ao manejo da *Atriplex nummularia*, além dos conselhos e estímulos durante nossas conversas; À Karina Patrícia Vieira da Cunha pela realização de avaliações histológicas nas folhas; A Adriana Maria de Aguiar Accioly (Embrapa/ Mandioca e Fruticultura Tropical) e a Clístenes Williams Araújo do Nascimento pela iniciativa preliminar de trabalhos dessa natureza em solos salinos e pelas contribuições dispensadas ao longo do trabalho; Ao professor Hugo Alberto Ruiz (UFV) pela disponibilização do laboratório de Física do Solo/UFV para as leituras da concentração osmótica.

A Maria do Socorro Santana, por abraçar e dar colo a estudantes carentes distantes de suas famílias; A Josué Camilo, pelo cafezinho e bom tratamento na secretaria;

Aos estimados alunos de graduação e estagiários, que muito me ajudaram e a quem eu devo muito de meu crescimento interpessoal, Ana Néri, Betânia Bacelar, Tallita, Heitor Duarte, Matheus, Ernande (Madruga), Eduardo, Diego Vandeval, Hidelblandi, Juliana, Rosângela (Rosinha), Cíntia e Orlando;

Aos meus grandes e sinceros amigos Herbeth Fernando da Silva Costa, José Dionísio e Elisângela Santiago de Mesquita;

Aos meus companheiros de república, Laerte Bezerra de Amorim, Agenor Bezerra de Almeida Júnior, Michelangelo Oliveira Silva, Hugo Bolsoni Zago, Dorgival Moraes de Lima Júnior e Cícero Gomes dos Santos. Foi muito gratificante a convivência com todos vocês.

Aos colegas de Pós Graduação, representados por Fátima, Tâmara, Daniela Rodrigues, Leila, Thaís Emannuelle, Felizarda, Carolina Malala, Welka Preston, Hailson, Márcio Fléquisson, Israel, Karina Patrícia, Caroline Biondi, Eriberto Freitas, Milton César, Maria da Conceição, Rômulo Vinícius, Luciana, Cleiton, Carla, Marise, Dani Paraíba, Rossana, Márcio Sobral, Airon, João Paulo, Adelazil, Monaliza, Renato e Andressa

Ao CNPq/CT-Hidro pela concessão da bolsa, sem a qual não teria conseguido realizar este sonho.

A todas as pessoas que me ajudaram e/ou que em algum momento torceram por mim nessa fase tão evolutiva na vida de um cidadão;

Ao ar, a água, ao sol e ao **SOLO**, por me permitirem viver!

BIOGRAFIA

EDIVAN RODRIGUES DE SOUZA, filho de Maria Salete Rodrigues e Edgar de Souza (*In memoriam*), nasceu em 22 de setembro de 1981, em Alexandria, Rio Grande do Norte.

Cursou o ensino fundamental e médio na Escola Estadual Governador Walfredo Gurgel na cidade de Antônio Martins – RN.

Em 2000 iniciou o curso de Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró – RN, graduando-se 2004.

Em março de 2005 iniciou o curso de Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo na Universidade Federal Rural de Pernambuco e recebeu o grau de Mestre em fevereiro de 2007.

Em março de 2007 matriculou-se no curso de Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo, nessa mesma instituição. Foi professor substituto dessa renomada instituição durante o ano de 2008.

SUMÁRIO

	Página
Introdução Geral	09
CAPÍTULO I: Crescimento, produção e extração de sais pela <i>Atriplex nummularia</i> sob estresse hídrico em solo salino sódico	11
Resumo.....	12
Abstract.....	13
1. Introdução.....	14
2. Material e Métodos.....	15
2.1. Montagem do experimento.....	16
2.2. Obtenção das mudas de <i>Atriplex</i> e composição dos tratamentos.....	17
2.3. Condução do experimento.....	17
2.4. Análises.....	18
2.4.1. Composição mineral das partes da planta.....	18
2.4.2. Morfo-anatomia.....	18
2.4.3. Potencial osmótico.....	30
2.4.4. Solo.....	19
2.5. Delineamento e Análise estatística.....	19
3. Resultados e Discussão.....	19
3.1. Crescimento da planta.....	19
3.2. Composição mineral e extração de sais.....	23
3.3. Tricomas vesiculares.....	26
3.4. Potencial osmótico.....	29
3.5. Solo.....	32
4. Conclusões.....	37
5. Referências Bibliográficas.....	38
CAPÍTULO II: Fitorremediação de solo salino sódico em condição de campo utilizando a <i>Atriplex nummularia</i>	43
Resumo.....	43
Abstract.....	44
1. Introdução.....	45
2. Material e Métodos.....	48
2.1. Localização do experimento e caracterização do solo.....	48
2.2. Condução do experimento e manejo da cultura.....	49

2.3. Análises.....	51
2. 3. 1. Solo.....	51
2.3.2. Planta.....	52
2. 4. Delineamento e Análise estatística.....	54
3. Resultados e Discussão.....	54
3.1. Crescimento da planta.....	54
3.2. Produção de Biomassa.....	57
3.3. Potencial de fitorremediação e fator de transferência.....	58
3. 4. Solo.....	60
4. Conclusões.....	68
5. Referências Bibliográficas.....	69
Considerações Finais	74

Introdução Geral

No contexto da Ciência do Solo moderna, a entidade “solo” deve ser tratada de forma racional nos diversos cenários em que atua. Dentre esses, a agricultura, por contribuir de forma efetiva na sobrevivência humana e por estar diretamente ligada às propriedades físicas, químicas e biológicas dessa entidade tem recebido maior atenção. Além disso, a produção vegetal é o principal elo entre o solo, e seus constituintes, com os demais atores de diversos ecossistemas.

Baseado nisso, cabe aos cientistas do solo e a comunidade em geral buscar alternativas que minimizem os impactos advindos de causas antropogênicas e que resultam, na maioria das vezes, na redução da qualidade do solo. Quando esses danos afetam diretamente a possibilidade de cultivo, atrelado a maximização do escoamento superficial e perda de solo, diminuição da infiltração e consequente recarga dos aquíferos, dentre outras causas, faz-se necessário atuar de forma efetiva.

Sendo assim, a salinidade do solo, embora seja um assunto recorrente, principalmente no semi árido do Nordeste Brasileiro, não perde seu foco atual, já que reduz a capacidade produtiva num país com tanta necessidade de alimento, principalmente nos locais onde ocorrem as maiores incidências desse problema. Para a sua recuperação e/ou remediação, nem sempre se dispõe de alternativas mais onerosas como o uso de corretivos químicos e maquinaria para implantação de sistemas de drenagem. Desse modo, nada mais conveniente que o uso de uma vegetação que suporte altos teores salinos, que consiga mantê-los em seus tecidos vegetais, produza grandes quantitativos de biomassa e que forneça alimento para determinadas espécies animais. Assim se deriva o termo fitorremediação e, mais especificamente, fitoextração.

Deve ficar claro que não é uma técnica recente, pois o seu uso para solos afetados por sais remonta a trabalhos clássicos nos anos de 1920 e 1930, onde Kelley e associados em uma série de experimentos de campo na Califórnia, comprovaram a eficiência da fitorremediação, inclusive quando comparada com correção utilizando corretivos químicos, em solos sódicos.

Dentre as diversas espécies que podem ser usadas para fitorremediação de solos com problemas de sais, a *Atriplex nummularia* se destaca devido atender as conveniências para a eficiência desse processo citadas acima, pela produção de

abundante biomassa em solos com altos teores de sais, de elevado teor protéico, além de tolerar déficit hídrico, comum em áreas de clima árido e semi árido.

As pesquisas que abordam este tema no Brasil, especificamente com solos salino sódicos na região Nordeste, principal palco dessas ocorrências, são incipientes, especialmente quando se considera a pesquisa *in situ*, em virtude de uma série de interferências que serão relatadas no decorrer deste trabalho.

Atrelada à carência de experimentos monitorados em campo, há uma série de questionamentos quanto ao manejo mais indicado no cultivo desta halófito, em termos de regime de poda, respostas a diferentes lâminas de irrigação e taxas de extração de sais.

Diante da contextualização e exposição da situação atual da fitorremediação em solos afetados por sais, este trabalho buscou esclarecer alguns dos questionamentos levantados, esperando ser um passo inicial para futuras investigações científicas.

CAPÍTULO I - CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E EXTRAÇÃO DE SAIS PELA *Atriplex nummularia* Lindl. SOB ESTRESSE HÍDRICO EM SOLO SALINO SÓDICO

RESUMO – Devido aos impactos ambientais e econômicos da salinidade e sodicidade em solos, formas de recuperação desses solos contribuem sobremaneira para a melhoria da produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas e uma das técnicas de recuperação destes solos é a fitorremediação, com a utilização de plantas eficientes na extração de sais dos solos. Este trabalho teve como objetivo avaliar o crescimento, a produção e extração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. cultivada em solo salino sódico sob condições de estresse hídrico, comparar propriedades do solo antes e após seu cultivo, além de avaliar o potencial osmótico da solução do solo e das folhas e analisar a morfoanatomia das células vesiculares acumuladoras de sais. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação durante 134 dias, cultivando-se *Atriplex nummularia* em vasos com 20 kg de solo salino sódico em quatro níveis de umidade (35, 55, 75 e 95% da capacidade de campo), com um tratamento controle (sem cultivo), montados em blocos casualizados, com oito repetições. A altura, o diâmetro e as produções de massa seca de folha, caule e raiz foram sensíveis à umidade do solo, sendo as umidades correspondentes a 75 e 95% da capacidade de campo as que possibilitaram os melhores resultados. As células vesiculares de *Atriplex nummularia* foram sensíveis a variações do teor de água no solo. As variáveis do complexo sortivo do solo (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , soma de bases) e o carbono orgânico total permaneceram estáveis entre o início e final do experimento em todos os tratamentos, enquanto o Na^+ e a percentagem de sódio trocável diminuíram após o cultivo da planta. Na solução do solo a dinâmica dos elementos foi evidenciada, observando aumentos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- e potencial osmótico ao final do ciclo. A medida de potencial osmótico pode ser indicada como um bom atributo para avaliar as respostas de tratamentos com estresse hídrico e água salina em planta e solo. As altas concentrações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e, especialmente Na^+ e Cl^- nas folhas de *Atriplex nummularia*, associadas à elevada produção de massa seca caracteriza esta espécie como planta fitoextratora de sais.

Palavras-chave: Fitoextração, solos afetados por sais, halófitas.

CHAPTER I - GROWTH, PRODUCTION AND EXTRACTION OF SALTS BY *Atriplex nummularia* UNDER WATER STRESS IN SALINE SODIC SOILS

Abstract – Due to environmental and economic impacts of salinity and sodicity in soils, forms of recovery of these soils contribute to improving the productivity and sustainability of farming systems and techniques for recovering these soils is phytoremediation, using efficient plants at extracting of salts from soils. This study aims to evaluate the growth, production and extraction of salts by *Atriplex nummularia* grown on saline-sodic soil under water stress conditions, to compare soil properties before and after their cultivation, and to evaluate the osmotic potential of soil solution and morphoanatomy of vesicular cells accumulation of salts. The experiment was carried out in a greenhouse for 134 days, by growing *Atriplex nummularia* in pots with 20 kg of saline sodic with four levels of soil moisture (35, 55, 75 and 95% of field capacity) with a control (soil without plant). The experiment was performed in a randomized block with eight replications. The height, diameter and yield of dry leaf, stem and root were sensitive to soil moisture, and humidity corresponding to 75 and 95% of field capacity which resulted in better results. The vesicular cells of *Atriplex nummularia* were sensitive to variations in water content in soil. The variables of the exchangeable cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , sum of bases) and total organic carbon remained stable between the beginning and end of the experiment in all treatments, while Na^+ and exchangeable sodium percentage decreased after cultivation of the plant. In the soil solution the dynamics of the elements was evidenced by observing increases in Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- and osmotic potential at the end of the cycle. The measurement of osmotic potential can be indicated as a good attribute for evaluating responses to treatments with hydric stress and saline water in plant and soil. The high concentrations of Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , and especially Na^+ and Cl^- in leaves of *Atriplex nummularia*, associated with high dry matter production characterizes this species as plant phytoextraction of salts.

Key words: phytoextraction, salt affected soils, halophytes

1. Introdução

A salinidade e a sodicidade do solo estão entre as principais causas de degradação em ambiente semiárido, pois ocasionam danos às propriedades do solo, ao desenvolvimento vegetal e à sociedade, o que culmina em sério impacto social e ambiental. Sendo assim, formas de recuperação desses solos contribuem para a melhoria da produtividade e sustentabilidade dos sistemas de manejo do solo. Atualmente, os solos afetados por sais estão presentes em mais de 100 países, sendo que muitas regiões caracterizam-se pela salinização causada pela água de irrigação (Rengasamy, 2006). De acordo com a FAO (2000), a área total de solos afetados por sais no mundo, incluindo os solos salinos e sódicos é de 831 milhões de hectares, sendo 397 milhões de solos salinos e 434 milhões de solos sódicos. No Brasil, os problemas de salinidade concentram-se na região Nordeste.

Qadir et al. (2007) salientam que práticas de recuperação e de manejo eficientes devem ser adotadas, já que o uso desses solos para a agricultura é um recurso valioso que não pode ser negligenciado. Já Ravindran et al. (2007) fornecem alternativas para essa recuperação, como o uso de vegetação halófitas, aplicação de corretivos químicos e orgânicos e remediação mecânica, utilizando escavação e remoção do solo afetado por sais. O uso de vegetação halófitas fundamenta-se na fitoextração, que é uma técnica de fitorremediação que utiliza espécies de plantas que absorvem e acumulam o sódio na parte aérea, a qual pode ser removida e usada para outros fins. Qadir et al. (2007) afirmam que a fitoextração é uma estratégia eficiente de recuperação de solos salinos sódicos, com performance comparável à utilização de corretivos químicos.

Para que o processo de fitoextração em solo salino sódico seja eficiente é recomendável que a espécie cultivada seja hiperacumuladora de sais (especialmente NaCl) e que produza grande quantidade de biomassa para que a extração e retirada de sais seja satisfatória. A *Atriplex nummularia* encaixa-se neste perfil, haja vista a produção de biomassa e a afinidade na absorção de Na^+ e Cl^- . Pesquisas que abordam especificamente o uso de halófitas com o objetivo de fitorremediação ainda são incipientes na literatura, podendo-se citar alguns trabalhos desenvolvidos em casa-de-vegetação (Leal et al., 2008; Krishnapillai & Ranjan, 2005) e em campo (Ravindran et al., 2007).

De acordo com Flowers & Colmer (2008), as halófitas são caracterizadas como plantas que conseguem sobreviver e se reproduzir em ambientes onde a

concentração de sal excede 200 mmol L⁻¹ de NaCl (~20 dS m⁻¹), constituindo aproximadamente 1% da flora mundial. Dentre as halófitas, uma espécie de grande importância é a *Atriplex nummularia*, devido a adaptabilidade a estresses abióticos como salinidade e deficiência hídrica. As halófitas podem ser usadas em projetos de revegetação e fitorremediação, no controle de balanço de água e, em alguns casos, no sequestro de contaminantes de solos e aquíferos (Jordan et al., 2008).

A espécie halófitas *Atriplex nummularia* Lindl. tem sido estudada, principalmente, no âmbito de tolerância a salinidade do solo. No entanto, pela característica de adaptação em ambientes de clima árido e semi-árido se faz necessário avaliar, também, o desempenho dessa espécie quanto à tolerância a baixos teores de água no solo.

A resposta da planta à seca é caracterizada por mudanças fundamentais na relação da célula com a água, nos seus processos fisiológicos, na estrutura das membranas e de organelas celulares, além de mudanças morfológicas e fenológicas da planta, alterando a relação do seu dossel com o ambiente (Pimentel, 2005).

A umidade do solo é uma variável chave para o entendimento de uma série de processos hidrológicos e climáticos em diferentes escalas espaço-temporal (Brocca et al., 2009; Heathman et al., 2009). Do ponto de vista hidrológico, a umidade do solo controla o escoamento superficial, infiltração, armazenamento e drenagem, além de sua importância para a necessidade de irrigação e previsão da produtividade. Liu et al. (2008) enfatizam a tolerância das halófitas à salinidade e comentam que a literatura ainda é escassa em evidenciar o efeito conjunto da salinidade e do estresse hídrico no crescimento dessas plantas, já que esse efeito interativo e o entendimento de algumas respostas ecofisiológicas contribuem para o desenvolvimento de um manejo eficiente em ambientes salinos que ocorrem, especialmente, em regiões áridas e semi áridas.

Como resposta aos estresses hídrico e salino, algumas espécies vegetais recorrem ao ajustamento osmótico para tolerar a desidratação severa e manter ativos processos biológicos importantes. O ajustamento osmótico pode ser alcançado com o acúmulo de açúcares, ácidos orgânicos, aminoácidos e íons inorgânicos, como Na⁺, K⁺ e Cl⁻ (Munns & Tester, 2008, Flowers & Colmer, 2008) e uma das medidas para contabilizar a acumulação de solutos orgânicos e inorgânicos é o potencial osmótico, medido comumente com o uso do osmômetro.

Jordan et al. (2009) relatam que a caracterização dos padrões de crescimento e consumo de água em halófitas sob condição de irrigação, especialmente em

condições de salinidade, é uma pesquisa básica que deve ser explorada.

Portanto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar o crescimento, a produção de massa seca e extração de Ca, Mg, Na, K e Cl pela *Atriplex nummularia* cultivada em solo salino sódico sob condições de estresse hídrico (35, 55, 75 e 95% da capacidade campo) e comparar os teores desses elementos no solo. Propôs-se ainda a efetuar uma abordagem do potencial osmótico no solo e na planta e avaliar a influência do estresse hídrico nas células vesiculares da folha da *Atriplex nummularia*.

2. Material e Métodos

2. 1. Montagem do experimento

O experimento foi conduzido em casa de vegetação na Universidade Federal Rural de Pernambuco no período 01 de outubro de 2008 a 13 de fevereiro de 2009. Foi utilizada uma amostra de NEOSSOLO FLÚVICO Sódico salino, classificado conforme Corrêa & Ribeiro (2001), oriunda do município de Pesqueira (PE) e coletada na profundidade de 0-30 cm. O solo foi seco ao ar, destorroado, homogeneizado e passado em peneira de 4 mm para preenchimento dos vasos. Para caracterização física e química utilizaram-se subamostras passadas em malha de 2 mm (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1 - Caracterização física do solo (n= 36 amostras) utilizado no experimento

Ds	Dp	Areia			Silte	Argila	ADA	ID	IF	Tensão (atm)		
		Total	Grossa	Fina						0,1	0,33	15
kg dm ⁻³		g kg ⁻¹								g g ⁻¹		
1,40	2,6	590	229	361	330	80	60	0,75	0,25	0,21	0,15	0,05
	7									1	2	5

Ds: densidade do solo (Método do anel volumétrico); Dp: densidade das partículas (Método do balão volumétrico); ADA: argila dispersa em água; ID: índice de dispersão; IF: índice de floculação. ID: ADA/Argila; IF: (1 – ID)

Tabela 2 - Caracterização química do solo (n= 36 amostras) utilizado no experimento

Complexo sortivo		Extrato de saturação		Relações (solúveis)	
Variáveis	Valores	Variáveis	Valores	Variáveis	Valores
pH _(2,5:1)	8,66	CE _{es} (dS m ⁻¹)	42,56	Na/Ca	28,39
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	4,73	pH _{es}	7,45	Na/Mg	19,81
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,12	Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	16,07	Na/K	122,30
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	3,31	Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	22,98	Na/Cl	1,11
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,36	Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	456,19	Cl/Na	0,90
SB (cmol _c kg ⁻¹)	10,52	K ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	3,73	Cl/Ca	25,55
PST (%)	31,46	Cl ⁻ (mmol _c L ⁻¹)	410,64	Cl/Mg	17,87
COT (dag kg ⁻¹)	0,55	RAS (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	103,21	Cl/K	110,09
		PO (atm)	7,87		

SB: soma de bases; PST: percentagem de sódio trocável; COT: carbono orgânico total; RAS: relação de adsorção de sódio; PO: potencial osmótico.

Utilizaram-se vasos de polietileno com altura de 24 cm e capacidade de 20 kg de solo seco. No momento do preenchimento dos vasos foi retirada uma amostra de solo de cada vaso para caracterização e comparação dos atributos químicos com os resultados da segunda coleta do solo, ao final do experimento. As temperaturas e umidades relativas médias, mínimas e máximas foram monitoradas diariamente durante a execução do experimento (Figura 1). Os valores médios das temperaturas médias, máximas e mínimas foram de 32; 47 e 26 ° C; enquanto de umidade relativa foram de 50; 76 e 11%.

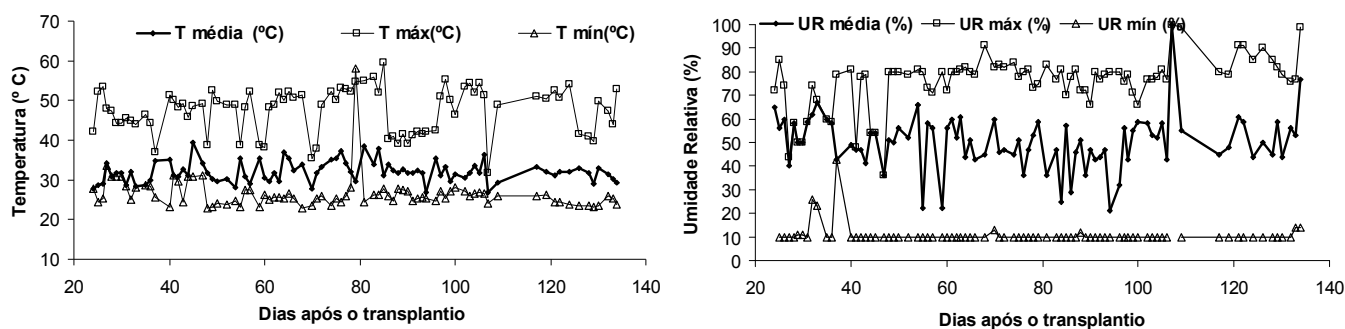


Figura 1 - Valores médios, máximos e mínimos de temperatura e umidade relativa do ar durante o período de execução do experimento, medidos diariamente. Obs: As medições foram efetuadas às 17 h no momento da irrigação.

2. 2. Obtenção das mudas de *Atriplex nummularia* e composição dos tratamentos

Foram usadas mudas de *Atriplex nummularia* com 120 dias de idade multiplicadas por estaquia a partir de uma única planta matriz para diminuir a variabilidade genética.

Tomando-se como referência a umidade do solo na capacidade de campo ($0,152 \text{ g g}^{-1}$) [Tabela 1], foram definidos quatro níveis: 35, 55, 75 e 95% da umidade, a base de massa, na capacidade de campo, mais um tratamento controle sem cultivo de *Atriplex* e mantido a 95% da capacidade campo. A irrigação foi procedida diariamente ao final da tarde, momento em que todos os vasos eram pesados e irrigados com água suficiente para manter os níveis de umidade estabelecidos. A água utilizada para irrigação foi preparada em laboratório com sais de NaCl, CaCl₂ e MgCl₂ a uma condutividade elétrica (CE) de $750 \mu\text{S cm}^{-1}$, tomando-se como referência o valor médio da CE encontrado nos cursos de água, especialmente poços, próximos ao local de coleta do solo.

2. 3. Condução do experimento

As mudas foram transplantadas para os vasos quando apresentavam 32 cm de altura, sendo monitoradas durante 134 dias. Para avaliar o crescimento das plantas foram efetuadas medições de altura de planta e diâmetro do caule aos 6, 36, 66, 96 e 132 dias após o transplântio (DAT). Ao final do experimento foi tomada uma amostra de solo de cada unidade experimental às profundidades de 0-8, 9-16 e 17-24 cm para a realização de análises químicas.

Aos 134 DAT a parte aérea das plantas foi coletada a 1 cm da superfície do solo e fracionada em folha e caule, pesando-se para obtenção da massa fresca de cada fração da planta. As raízes também foram coletadas, com o auxílio de água corrente sobre peneira. Todas as frações (folha, caule e raiz) foram colocadas em estufa de circulação forçada a 65° C até estabilização do peso para a obtenção da massa seca.

2.4. Análises

2. 4. 1. Composição mineral das partes da planta

A massa seca de folha, caule e raiz foi moída em moinho tipo Willey e realizada a digestão nitroperclórica (Silva, 2009). A determinação dos teores de sódio e potássio foi efetuada por fotometria de emissão de chama; e os teores de cálcio, magnésio, zinco e cobre por espectrofotometria de emissão ótica em plasma de argônio com acoplamento indutivo. O cloreto foi determinado por extração em água e titulação com nitrato de prata (Malavolta et al., 1989). Com os dados de produção de matéria seca e dos teores dos elementos na folha, caule e raiz foram calculados os conteúdos extraídos pela planta.

2. 4. 2. Morfo-anatomia

Amostras de folhas adultas foram coletadas no momento da coleta da planta e imediatamente fixadas em solução de FAA 50 por um período mínimo de 24-48 horas para determinação da densidade absoluta (número de tricomas por unidade de área), diâmetro externo das células pedunculares, diâmetro externo de células vesiculares e volume vesicular. Depois de lavadas em água destilada, essas amostras foram imersas em solução de hipoclorito de sódio a 10%, lavadas novamente em água destilada, dissociadas as epidermes, coradas com duas gotas de azul de metileno a 1% e montadas em glicerina 50%. As imagens das epidermes dissociadas foram obtidas utilizando câmera digital acoplada a um microscópio óptico e analisadas utilizando o programa de análise de imagem.

2. 4. 3. Potencial osmótico

Para a determinação da osmolalidade total do tecido foliar, foram coletadas folhas do terço médio da parte aérea da planta, que foram maceradas em almofariz com pistilo. A seiva obtida do tecido foi filtrada e centrifugada a 10.000 g por 10 min a 4°C (Silva et al, 2009). Uma alíquota de 50 µL do sobrenadante foi utilizada para a determinação da osmolalidade do tecido, com um micro-osmômetro (µ Osmette™ Model 5004 Automatic Osmometer). Os valores obtidos em milimoles por quilograma foram convertidos em potencial osmótico, por meio da equação de Van't Hoff (Kirkham, 2004; Hillel, 2007).

2. 4. 4. Solo

Nas subamostras de solo coletadas ao final do experimento foram realizadas as análises de: pH em água (EMBRAPA, 1997), carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988), Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e K^+ trocáveis extraídos por acetato de amônio 1 mol L^{-1} (Thomas, 1982), além da medição da condutividade elétrica, bases solúveis e cloreto no extrato de saturação do solo (Richards, 1954). As determinações de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- e potencial osmótico foram realizadas pelos mesmos métodos descritos anteriormente para a planta. Foram calculadas a soma de bases (SB), percentagem de sódio trocável (PST) e a relação de adsorção de sódio (RAS).

2. 5. Delineamento e Análise estatística

Os tratamentos foram dispostos em um delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro blocos e oito repetições, duas por bloco. Os dados foram analisados por meio de análise de variância e teste de Tukey ($P < 0,05$) utilizando o Programa SAEG 9.1 (UFV, 2007).

3. Resultados e Discussão

3. 1. Crescimento da planta

A altura de planta apresentou diferença significativa entre os tratamentos somente aos 132 DAT, onde o tratamento com 75% da CC não difere daquele com 95% da CC, mas supera aqueles com 35 e 55% da CC (Figura 2). Já com relação ao diâmetro do caule observa-se que desde os 33 DAT os tratamentos com 75 e 95% da CC foram significativamente superiores aos tratamentos com 35 e 55% da CC.

Na Figura 3 observa-se que, para a massa fresca e seca das folhas, os tratamentos com 75 e 95% da CC não diferiram entre si e superaram os demais (35 e 55% da CC). Já para a massa fresca e seca do caule, o tratamento com 75% da CC foi superior aos demais, promovendo maior produção. O resultado da massa fresca da raiz, similarmente ao de folha, foi superior nos tratamentos com 75 e 95% da CC, com valores superiores aos dos outros tratamentos.

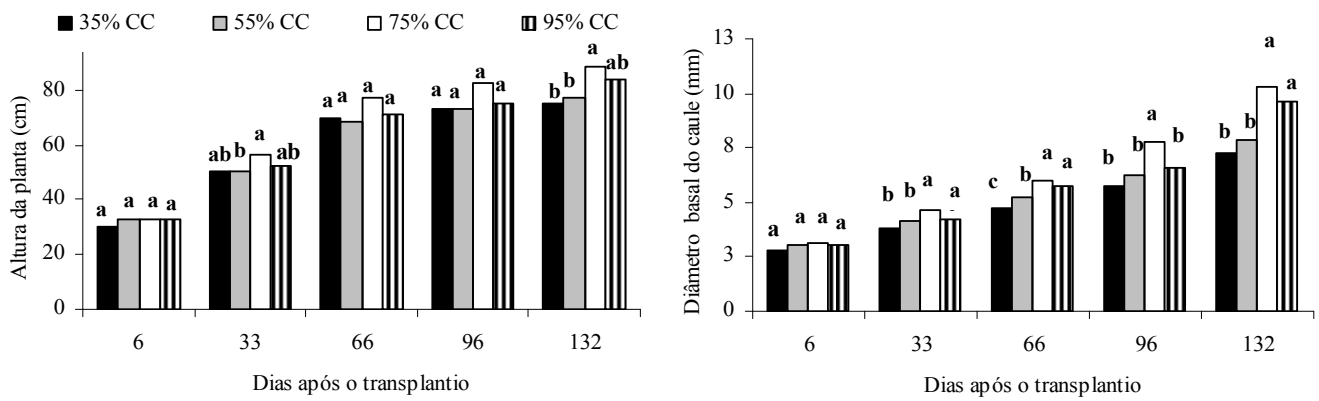


Figura 2 - Altura da planta (cm) e diâmetro do caule (mm) de *Atriplex nummularia* aos 6, 33, 66, 96 e 132 dias após o transplântio em função da umidade do solo.

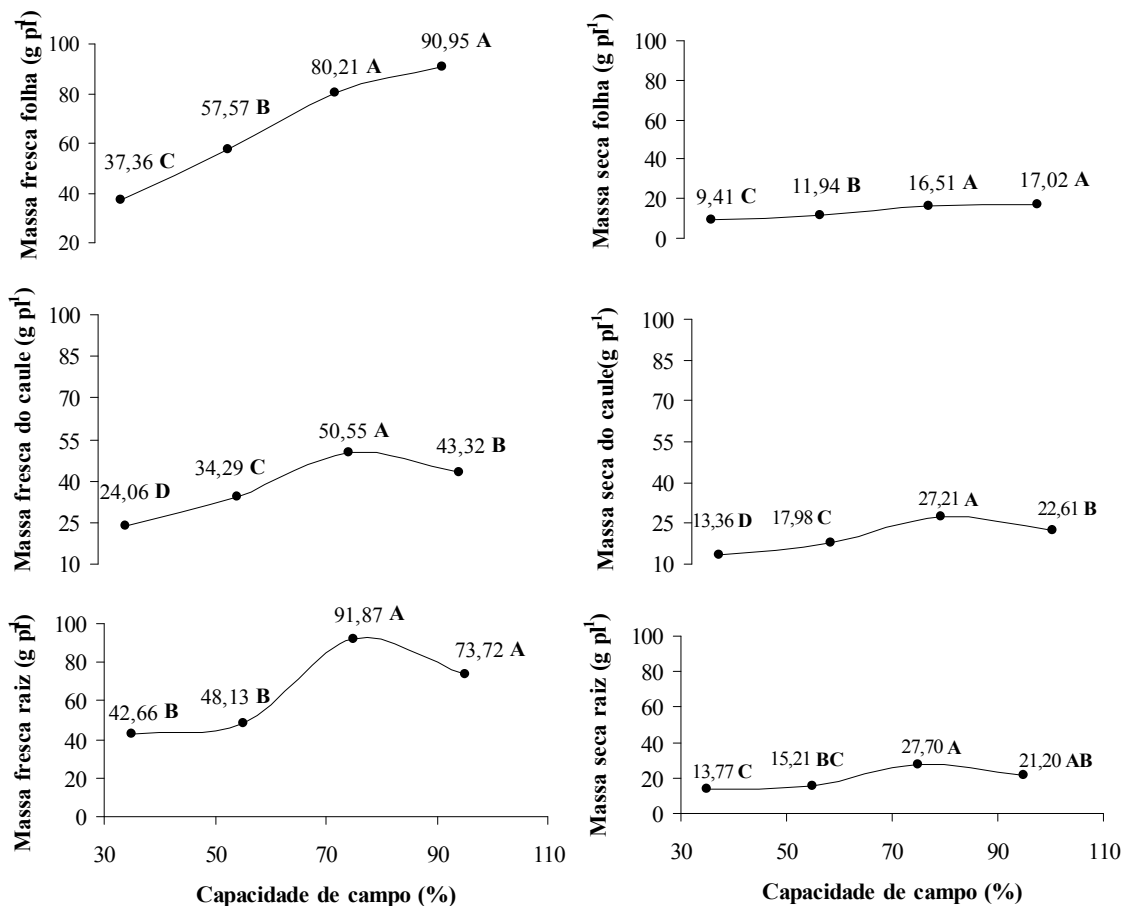


Figura 3 - Massas fresca e seca (g pl⁻¹) de folha, caule e raiz de *Atriplex nummularia* aos 134 dias após o transplântio em função do nível de umidade.

Embora a *Atriplex* seja comumente citada na literatura como planta tolerante à salinidade e estresse hídrico, este último tópico ainda é escasso em trabalhos de

pesquisa. No entanto, quando o objetivo é a retirada de sais do solo, a produção de biomassa deve ser otimizada e, desse modo, a adoção da prática de irrigação pode se mostrar como alternativa eficiente para esse aumento de biomassa. Tomando-se como referência a massa seca da folha no menor nível de umidade do solo (referente a 35% da CC) nos demais tratamentos (55, 75 e 95% da CC) essa variável sofreu incrementos de 21; 75 e 81%, respectivamente. A massa seca das folhas aumentou em função dos níveis de umidade, apresentando 17,02 g planta⁻¹ a 95% da CC e 9,41 g planta⁻¹ a 35% CC. A produção de massa seca a 95% da CC superou em 81% a produzida sob 35% da CC. Quando se observa a massa seca para o caule e a raiz verifica-se um decréscimo quando o solo está a 95% da CC.

Silveira et al. (2009), cultivando *Atriplex nummularia* irrigada com solução de 600 mmol L⁻¹ de NaCl (~ 60 dS m⁻¹) aos 49 dias após o transplântio encontraram valores de massa seca da folha e raiz de 7,50 e 4,50 g planta⁻¹, respectivamente, inferiores aos deste estudo, pelo maior período de observação (134 dias).

Liu et al. (2008), examinando o efeito interativo de quatro níveis de umidade do solo (40, 55, 70 e 85% da capacidade de campo) e cinco concentrações de cloreto de sódio (0, 50, 100, 150 e 200 mmol L⁻¹) sobre o crescimento da halófito *Suaeda salsa*, verificaram que o maior crescimento foi quando o solo estava com 55% da capacidade campo para a faixa de 50-100 mmol L⁻¹ NaCl e 85% da CC para a faixa acima de 100 mmol L⁻¹ de NaCl.

Avaliando o potencial de *Atriplex nummularia* na fitorremediação de solo salino sódico sob irrigação com águas salinas, Leal et al. (2008) encontraram, aos 130 dias após o transplântio, valores de 12,98 g planta⁻¹ para parte aérea (folha + caule) e 3,70 g planta⁻¹ para a raiz .

No presente estudo, a alocação da biomassa seca foi, preferencialmente, no caule e na raiz, ficando a folha com a menor percentagem (Figura 3); Pimentel (2005) comenta que espécies vegetais que se desenvolvem em ambientes sujeitos ao estresse hídrico possuem mecanismos de tolerância a seca, destacando-se, dentre outros, a diminuição da área foliar e alterações da razão raiz:parte aérea, para a manutenção do status hídrico.

Extrapolando-se os resultados obtidos para uma área de 1 hectare (considerando o diâmetro do vaso como espaçamento, 27 x 27 cm), as produções de biomassa (folha + caule) poderiam chegar a valores de 3.979; 5.229; 7.640 e 6.925 kg ha⁻¹ aos 134 dias para 35, 55, 75 e 95% da CC, respectivamente. Masters

et al. (2007) enfatizam que essa biomassa pode ser utilizada como forragem, servindo como o produto potencial das halófitas.

Porto et al. (2006) avaliaram o cultivo de *Atriplex nummularia* em condições de campo por um período de 1 ano, irrigada por sulcos com água proveniente do rejeito da dessalinização de água após a criação de tilápia rosa (*Oriochromis* sp.), com condutividade elétrica média de 8,29 dS m⁻¹. Foram aplicados quatro tratamentos: 75 (T1), 150 (T2), 225 (T3) e 300 (T4) L do efluente por planta, aplicados semanalmente de uma única vez. Durante o ano foram efetuadas 43 irrigações com volumes respectivos de 3.225, 6.450, 9.675 e 12.900 L por planta. Para uma melhor compreensão em termos de lâminas, adaptando os dados originais, os tratamentos corresponderam a 3, 6, 9 e 12 mm planta⁻¹ dia⁻¹, enquanto a evaporação média medida por tanque Classe A foi 9 mm, ou seja, os tratamentos 3 e 4 repunham a água perdida por evaporação, enquanto os tratamentos 1 e 2 estariam em níveis abaixo do recomendado e, provavelmente, próximo ao ponto de murcha permanente do solo.

Pelos resultados da pesquisa de Porto et al. (2006), a massa seca total da planta e a massa seca da folha responderam ao aumento de umidade até o tratamento 3, apresentando um pequeno decréscimo quando a lâmina foi de 300 L de efluente, ou seja, quando se aplicou 60 mm semana⁻¹ (12 mm dia⁻¹), valor 33% acima da evaporação. Os tratamentos 1 e 2 produziram 67,31 e 84,57% da produção obtida no tratamento 3. Dessa forma, pesquisas que avaliassem o desempenho da *Atriplex* no semi árido nordestino em condições de sequeiro seriam interessantes, para que fosse possível fazer uma relação econômica da viabilidade de extração de sais em função do consumo de água, além do balanço de sais nesse ambiente. Ao analisar a produção das plantas sob o tratamento 1 (3 mm dia⁻¹), valor próximo ao fornecido pelas precipitações anuais ocorridas no semi árido (700 mm/365 = 1,92 mm dia⁻¹), pode-se inferir que, mesmo em condições de sequeiro, a *Atriplex* forneceria uma boa quantidade de massa seca, na ordem de 9.758,80 kg ha⁻¹ ano⁻¹, que poderia ser utilizado como forragem para a alimentação animal, mesmo nos períodos de seca.

A produção de 7.640 kg ha⁻¹ aos 134 dias⁻¹ com 75% da CC, se extrapolada para um ano de cultivo, ultrapassaria a produtividade encontrada por Porto et al. (2006).

3. 2. Composição mineral e extração de sais

Com os dados médios de concentração dos elementos ($n=32$ amostras) em folha, caule e raiz (Tabela 3) fica evidente o potencial da *Atriplex nummularia* como planta fitoextratora de sais do solo, principalmente de NaCl.

Destacam-se as concentrações de sódio e cloro na folha, atingindo 124,73 e 149,45 g kg^{-1} de massa seca, respectivamente; enquanto as concentrações de cálcio, magnésio e potássio atingiram 5,24; 6,13 e 19,33 g kg^{-1} , respectivamente. O conhecimento desses valores fornece subsídios para um programa de manejo em áreas salinas, cujos objetivos sejam a extração de sais e/ou utilização desta planta como forrageira. Norman et al. (2008) encontraram valores de 7,0; 6,7; 52,5; 24,1 e 73,3 g kg^{-1} de Ca, Mg, Na, K e Cl na massa seca de folhas e caule (< 3 mm de diâmetro) na Austrália. É importante frisar que nessa caracterização as plantas foram cultivadas em solo de textura arenosa com CE_{es} de 3,2 dS m^{-1} . Já Leal et al. (2008), cultivando a *Atriplex* em solo com CE_{es} de 25,94 dS m^{-1} obtiveram uma concentração de 109,7 g kg^{-1} de sódio na folha aos 130 DAT. Segundo esses autores, os teores foliares encontrados indicam que esta halófito pode apresentar característica de planta hiperacumuladora de sais.

Tabela 3 – Teores médios de cálcio, magnésio, sódio, potássio, cloro, cobre e zinco em folha, caule e raiz de *Atriplex nummularia* cultivada em solo salino sódico aos 134 dias após o transplântio

Elemento	Folha	Caule	Raiz
Ca (g kg^{-1})	5,24	1,55	3,40
Mg (g kg^{-1})	6,13	1,13	2,50
Na (g kg^{-1})	124,73	13,01	15,29
K (g kg^{-1})	19,33	10,50	7,09
Cl (g kg^{-1})	149,45	26,52	19,96
Cu (mg kg^{-1})	1,03	0,35	7,84
Zn (mg kg^{-1})	40,81	3,74	15,42

Com relação ao conteúdo de sódio nas partes fracionadas da planta, as folhas mantêm o mesmo padrão observado nas concentrações, chegando a acumular 2,28 g planta^{-1} , enquanto para caule e raiz os valores máximos foram, respectivamente, de 0,32 e 0,34 g planta^{-1} (Figura 4). Houve efeito significativo dos níveis de umidade

aplicados apenas para o sódio nas folhas, onde os tratamentos correspondentes a 75 e 95% da CC foram estatisticamente superiores àqueles com 35 e 55% da CC.

Os conteúdos de potássio foram similares nas três frações da planta e não houve diferenças significativas entre os tratamentos, exceto para o caule. O acúmulo de cloreto ocorreu similarmente ao de sódio nas três frações analisadas, com os maiores teores na folha, alcançando $2,92 \text{ g planta}^{-1}$ no tratamento com 95% da CC. As maiores extrações de cálcio e magnésio pelas partes da planta (folha, caule e raiz) foram alcançadas no tratamento com 75% da capacidade de campo, entretanto, não diferiram dos resultados com 95% da CC.

Para comparar a capacidade da planta em extrair sódio e potássio, foram calculadas as relações Na:K nas partes da planta, diferindo esta em função dos tratamentos apenas nas folhas, parte da planta em que esta relação atingiu valores bem superiores aos do caule e raiz. Este resultado também é positivo, considerando-se que a planta extrai proporcionalmente mais sódio que potássio do solo, reduzindo o desequilíbrio iônico em solos sódicos, prejudicial ao crescimento da maioria das culturas.

Verifica-se que a planta alocou sua biomassa na seguinte ordem: folha < caule ~ raiz (Figura 5). Já com relação ao acúmulo de sódio o resultado foi o inverso, concentrando-se nas folhas para todos os tratamentos.

Utilizando-se estes resultados, estima-se uma extração de sódio pela biomassa total das plantas de Atriplex da ordem de 300,6; 311,0; 454,3 e 589,3 kg ha^{-1} para 35, 55, 75 e 95% da CC, respectivamente. Desses resultados, as folhas seriam responsáveis por 216,68; 239,40; 339,00 e 398,42 kg ha^{-1} nos 134 dias de cultivo das plantas. Leal et al. (2008), trabalhando com fitorremediação com Atriplex no mesmo tipo de solo, sob cultivo em casa de vegetação, encontraram valores semelhantes de concentração e extração de sódio nas folhas aos 130 DAT.

Quando se considera a remoção de cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloro pela folha no tratamento com 95% da CC chegam-se a valores de 22,38; 22,04; 440,36; 75,14 e 622,09 kg ha^{-1} aos 134 dias de cultivo, respectivamente, comprovando a capacidade da planta na retirada de sais de solos.

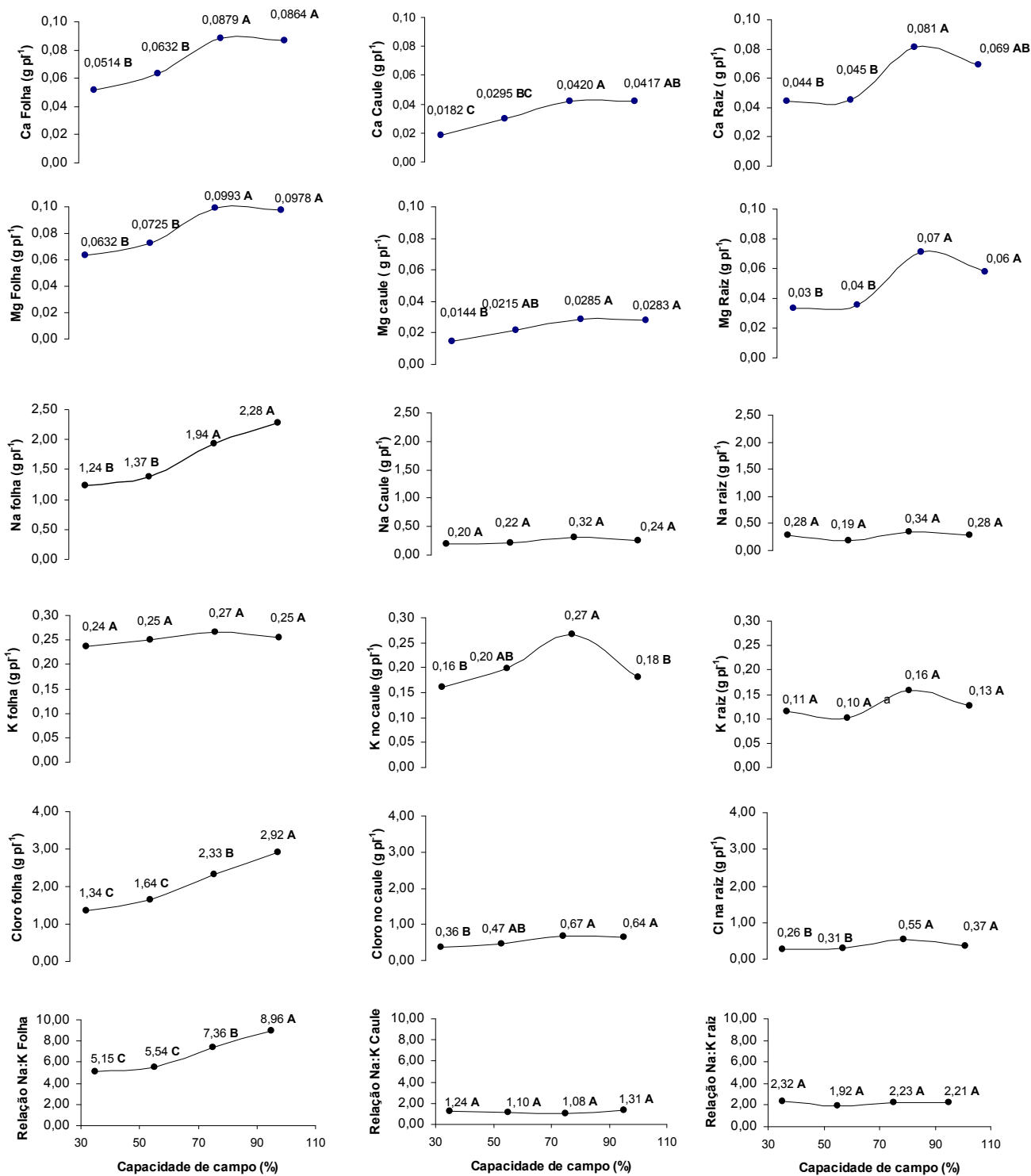


Figura 4. Conteúdos de Ca, Mg, Na, K, Cl e relação Na:K em folha, caule e raiz de *Atriplex nummularia* em função dos diferentes níveis de umidade do solo aos 134 DAT.

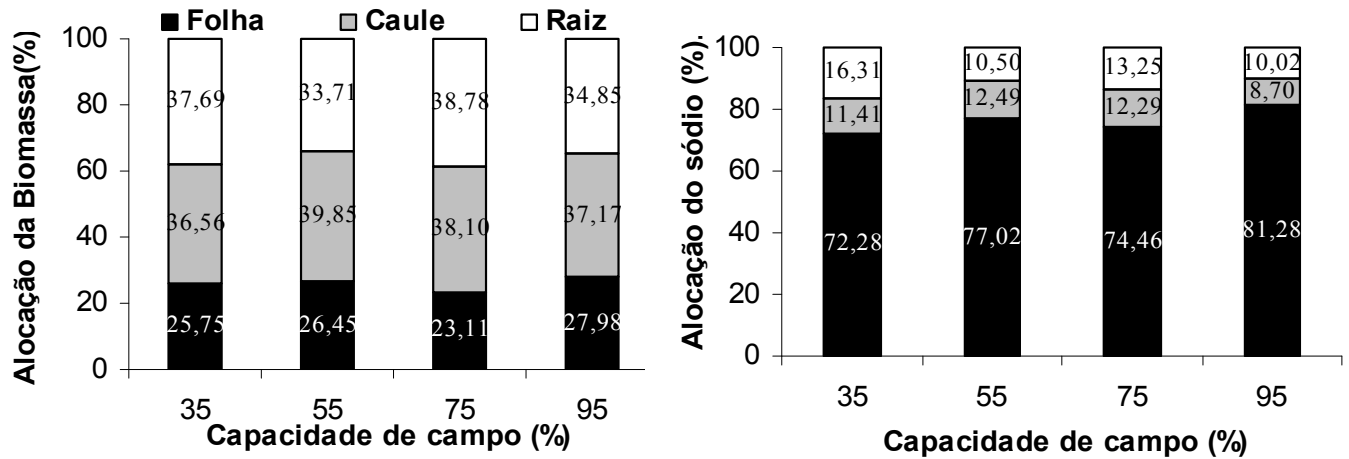


Figura 5 - Alocação da biomassa e sódio na folha, caule e raiz de plantas de *Atriplex nummularia* em função dos níveis da capacidade de campo.

3. 3. Tricomas vesiculares

A superfície foliar das plantas de *Atriplex nummularia* mostra-se coberta por tricomas vesiculares, tanto na face adaxial como abaxial. O tricoma vesicular nessa espécie é constituído de duas células facilmente distinguíveis (Figura 6): (1) célula peduncular, alongada, cilíndrica com paredes celulares espessas e comprimento e diâmetro variável, situada diretamente sobre uma célula basal epidérmica (em detalhe na Figura 6g); (2) célula vesicular, de forma globular, embora, devido à pressão exercida pelas células vesiculares vizinhas, possam apresentar alterações em sua forma, de diâmetro e volume variável, situada sobre a célula peduncular.

Dentre os caracteres anatômicos medidos e avaliados, apenas o diâmetro médio das vesículas e o volume médio das vesículas por unidade de área apresentaram diferenças significativas com relação aos tratamentos estudados (Tabela 4).

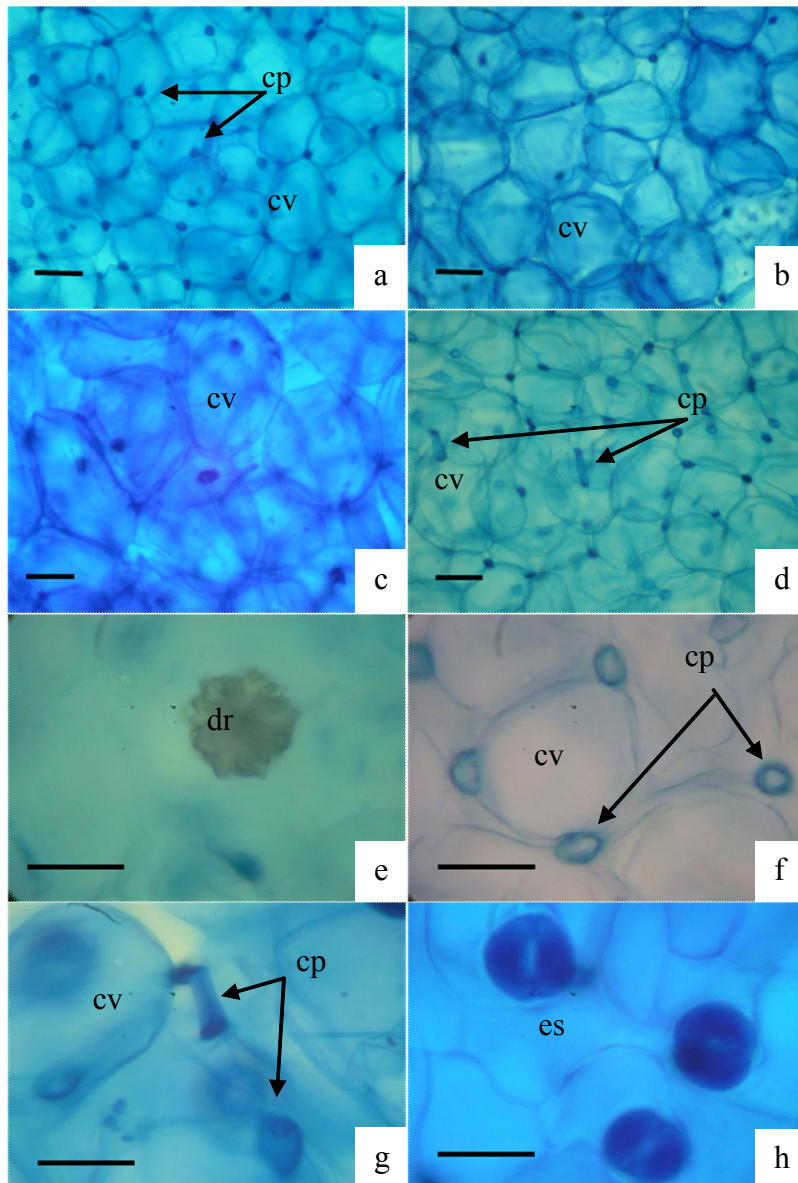


Figura 6. Vista frontal da epiderme de folhas adultas de *Atriplex nummularia* Lindl. cultivadas em solo salino sódico sob diferentes regimes hídricos: a – 35 ; b – 55; c – 75; d – 95% da capacidade de campo. Em detalhe, drusa (e) formada por deposição de cloreto de sódio no interior das células. Tricoma vesicular constituído de célula peduncular encimada por uma célula vesicular (f-g) e estômatos (h). cp: célula peduncular; cv: célula vesicular; dr: drusa; es: estômato. Barra: 50 μ m (a-d); 25 μ m (e-h).

Tabela 4 - Caracteres anatômicos da epiderme de folhas adultas de plantas de *Atriplex nummularia* Lindl. cultivadas em solo salino sódico sob diferentes níveis de estresse hídrico

	DMP ¹	DMV	VMV	DEM V
	μm		10 ⁶ μm ³ mm ⁻²	nº mm ⁻²
35% da capacidade de campo				
Adaxial	20,54 a	165,12 a	1.102,83 a	30.085,70 a
Abaxial	21,62 a	132,82 b	563,74 b	26.621,21 a
Média	21,08 A	148,97 B	833,28 B	28.353,46 A
55% da capacidade de campo				
Adaxial	20,24 a	174,30 a	1.547,13 a	27.108,48 a
Abaxial	21,23 a	190,09 a	1.986,95 a	25.242,69 a
Média	20,73 A	182,19 A	1.767,04 A	26.175,58 A
75% da capacidade de campo				
Adaxial	20,50 a	195,46 a	2.389,32 a	30.879,04 a
Abaxial	21,21 a	173,87 a	1.720,55 a	27.709,64 a
Média	20,85 A	184,67 A	2.054,94 A	29.294,34 A
95% da capacidade de campo				
Adaxial	20,60 a	171,74 a	1.057,79 a	24.998,42 b
Abaxial	20,84 a	168,22 a	1.436,57 a	29.038,10 a
Média	20,72 A	169,98 AB	1.247,18 AB	27.018,26 A
CV (%)	4,55	7,69	27,51	12,65

¹ DMP: Diâmetro médio do pedúnculo; DMV: Diâmetro médio da vesícula; VMV: volume médio da vesícula; DEMV: Densidade média dos tricomas vesiculares. Médias seguidas de mesma letra minúscula dentro de cada nível de umidade e maiúscula entre os níveis não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (P<0,05)

Os menores diâmetros e volumes médios de vesículas foram encontrados na epiderme de plantas cultivadas a 35% da capacidade de campo. Não foram observadas diferenças significativas entre os diâmetros e volumes médios das vesículas de plantas cultivadas a 55, 75 e 95% da capacidade de campo. Embora evidenciada como uma planta tolerante à seca, foi possível observar que o nível de 35% da CC interferiu no volume médio da vesícula, o que pode diminuir uma possível acumulação de sais nas vesículas e, conseqüentemente, reduzir a extração.

Os tricomas vesiculares apresentaram distribuição, tamanho e volume semelhantes entre as faces epidérmicas. Diferenças significativas entre as faces abaxial e adaxial foram observadas, porém, para o diâmetro médio de vesículas e volume médio de vesículas no tratamento com 35% da capacidade de campo, que apresentaram valores mais elevados na face adaxial, em contraste a densidade de

vesícula que foi maior na face abaxial, no tratamento com 95% da capacidade de campo.

É comum em espécies do gênero *Atriplex* a presença de tricomas vesiculares recobrendo toda a epiderme (Mozafar & Goodin, 1970; Boughalleb et al., 2009). Porém, a sua constituição pode variar conforme a espécie em questão. *Atriplex nummularia*, semelhante à *Atriplex triangularis* descrita por Karimi & Ungar (1989), apresenta o tricoma vesicular formado por uma célula vesicular que se une à epiderme por meio de um pedúnculo unicelular. A espécie *Atriplex halimus*, por sua vez, possui pedúnculo multicelular constituído por até três células em tricomas adultos. É no tricoma vesicular que as espécies de *Atriplex* acumulam elevadas concentrações de sais. A célula peduncular, diferentemente da vesicular, não apresentou resposta ao estresse hídrico aos quais as plantas foram submetidas nesse trabalho. Uma vez que o pedúnculo representa a ligação entre a célula epidérmica e a vesicular (Apezzarto-da-Glória & Carmello-Guerreiro, 2006), alterações na estrutura da célula peduncular poderiam afetar a capacidade de transporte de sais das células epidérmicas até as vesículas e o armazenamento desses. Porém, nenhuma relação foi encontrada entre o diâmetro médio dos pedúnculos e o diâmetro médio das vesículas.

Apesar de não haver diferenças significativas na densidade de distribuição dos tricomas por unidade de área da epiderme, foi observada redução no diâmetro e volume de células vesiculares por unidade de área, decorrente da redução do teor de água com o aumento do estresse hídrico a que foram submetidas. Isso pode indicar que as plantas de *Atriplex* cultivadas em solo salino sódico conseguiram manter maior turgor celular no tratamento com maior teor de água no solo.

Pimentel-Galindo (2001) investigou a estrutura de tricomas vesiculares e dos elementos de condução do xilema em folhas jovens e adultas de *Atriplex nummularia* Lindl. produzidas sob diferentes níveis de salinidade em experimentos sob condições de campo e casa de vegetação. Foi verificado que a extensibilidade da parede das vesículas promoveu aumento nas dimensões da célula vesicular, em resposta à elevação da salinidade, compensando a redução na área foliar e na densidade dos tricomas, tanto em folhas jovens quanto em folhas adultas, resultando numa significativa capacidade acumuladora de sais no interior dessas células.

De maneira geral, as espécies halófitas enfrentam um duplo problema: devem tolerar a alta concentração de sais dos seus habitats, e devem absorver água do

solo a partir de uma solução que tem um baixo potencial osmótico. Para manter a absorção de água e o turgor celular, nestas condições, as halófitas necessitam do ajustamento osmótico, ou seja, redução do potencial osmótico da planta quando comparado à solução do solo (Khan et al., 2000; Munns & Tester, 2008; Bem-Gal et al., 2009; Türkan & Demiral, 2009). É nesse sentido que é de grande importância a determinação dessa variável tanto no solo como na planta.

3. 4. Potencial osmótico

Os principais critérios de avaliação de tolerância das culturas à salinidade, assim como o manejo da agricultura bioessalina têm sido desenvolvidos, principalmente, em termos de concentração dos elementos químicos e/ou condutividade elétrica. Ben-Gal et al. (2009) sugerem o uso do potencial osmótico como forma de avaliar tais efeitos. Os mesmos destacam que experimentos envolvendo culturas como feijão, milho, tomate, cebola e alface, indicaram que os sais com diferentes cátions (Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-}) não causam diferenças no crescimento das plantas quando avaliados de forma isolada comparados com o potencial osmótico.

Muitos trabalhos desenvolvidos em fisiologia vegetal abordam somente o efeito de sais específicos como o NaCl, sendo necessário avaliar também a interação desses com os demais elementos químicos, principalmente por conhecer a complexidade de espécies químicas presentes na solução do solo. Assim, as correlações obtidas entre CE, potencial osmótico, teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e Cl^- do extrato da pasta de saturação do solo (Tabela 5) comprovam os pressupostos de Bem-Gal et al. (2009). Observa-se que os coeficientes de correlação da CE_{es} variaram de 0,75 com o Ca^{2+} a 0,92 com o K^+ , sendo de 0,85 com o potencial osmótico. Já os coeficientes de correlação do potencial osmótico com as demais variáveis permaneceram mais estáveis (Ca: 0,73; Mg: 0,80; Na: 0,84; K: 0,85 e Cl^- : 0,84). A explicação para esse resultado advém do fato de que na condutividade elétrica a participação de determinados íons (ex: Na^+ e K^+) prevalecem quando comparados com os demais (ex: Ca^{2+} e Mg^{2+}); diferentemente do que ocorre com o potencial osmótico.

Ben-Gal et al. (2009) compararam diferentes formas de avaliar o efeito da toxidez de sais em plantas de melão, milho e feijão, como a ação dos íons individuais, a concentração eletrolítica (CE) e o potencial osmótico. Quando a salinidade foi expressa em termos de potencial osmótico, os modelos encontrados

sofreram melhores ajustes, sendo a identificação dos cátions envolvidos irrelevantes.

Tabela 5 - Coeficientes de correlação linear simples entre condutividade elétrica (CE_{es}), potencial osmótico (PO_{es}), bases solúveis e cloreto do extrato da pasta de saturação do solo salino sódico ao final do experimento

	CE_{es}	PO_{es}	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-
CE_{es}	-	0,85**	0,75**	0,83**	0,90**	0,92**	0,85**
PO_{es}		-	0,73**	0,80**	0,84**	0,85**	0,84**
Ca^{2+}			-	0,93**	0,73**	0,76**	0,74**
Mg^{2+}				-	0,81**	0,82**	0,82**
Na^+					-	0,88**	0,85**
K^+						-	0,88**
Cl^-							-

** Altamente significativo ($P < 0,01$). n= 97 amostras

Outra questão que pode ser levantada é a dificuldade de encontrar trabalhos que abordem as relações hídricas no sistema solo-água-plantas em ambientes salinos, que apresentam concentrações de sais elevadas, alterando um dos principais potenciais de água no solo, o osmótico. Normalmente, em ambientes não salinos, este potencial é desprezado, por não influenciar nas constantes hídricas. Sua medida é de grande relevância em ambientes salinizados, uma vez que apresenta relação direta com a absorção de água pela planta. Através dos resultados da Tabela 6 é possível entender o motivo pelo qual a Atriplex absorve água em locais onde as demais culturas não consegue. Com uma CE_{es} de 39,34 dS m^{-1} o potencial osmótico no extrato de saturação do solo é de -16,80 atm (-1,68 MPa), enquanto o potencial osmótico da folha é de -49,29 atm (-4,929 MPa)

Tabela 6 - Estatística descritiva da CE_{es} , potencial osmótico do extrato de saturação do solo (PO_{es}) e potencial osmótico da seiva da folha (PO_{sf}).

Parâmetros	CE_{es} (dS m ⁻¹)	PO_{es} (atm)	PO_{sf} (atm)
Média	39,34	-16,80	-49,29
Mínimo	15,50	-34,00	-70,03
Máximo	63,76	-3,90	-36,29
Desvio padrão	20,24	6,50	6,0
Coeficiente de variação (%)	51,45	38,77	12,15
Número de amostras	97	97	27

Na *Atriplex nummularia* cultivada em solução de 150 mmol L⁻¹ de NaCl (~ 15 dS m⁻¹) o potencial osmótico nas folhas foi aproximadamente de 5 a 6 vezes menor do que nas raízes e solução externa. Foram encontrados valores de -4,03; -0,64 e -0,83 Mpa para as folhas, raízes e solução do solo, respectivamente (Silveira et al., 2009).

Para que o potencial osmótico na planta, principalmente na folha, seja menor, a planta sequestra o Na⁺ e Cl⁻ no vacúolo, diminuindo a concentração no citoplasma e contribuindo com o ajustamento osmótico para manter a absorção de água em solos salinos. Além da compartimentalização do Na⁺ e Cl⁻ no vacúolo, as plantas sintetizam e acumulam compostos orgânicos no citoplasma. Como estes solutos protegem os componentes celulares de injúria por desidratação, são comumente referenciados como osmoprotetores. Tais solutos incluem prolina, açúcares (sacarose, frutose, glicose), açúcares complexos (trealose), polióis (manitol, glicerol e inositol metilado) e compostos quaternários de amônio, como glicina betaína, alaninabetaína, prolinabetaína, hidroxiprolinabetaína (Ashraf & Harris, 2004; Parida & Das, 2005; Chinnusamy et al., 2005; Vinocur & Altman, 2005; Ashraf & Foolad, 2007; Flowers & Colmer, 2008; Munns & Tester, 2008; Lee et al., 2008; Shulaev et al., 2008; Türkan & Demiral, 2009).

Os valores bem negativos de potencial osmótico alcançados na seiva da folha (Tabela 6) permitem às plantas de *Atriplex nummularia* absorver água mesmo de solos com elevada salinidade e, portanto, com potencial osmótico do extrato de saturação negativos, mas que não se aproximam aos encontrados na seiva das folhas desta planta. Isso permite seu desenvolvimento tanto em ambientes sob estresse hídrico e salino, como em solos afetados por sais sob clima semiárido, confirmando sua potencialidade como planta fitoextratora de sais.

3. 5. Solo

Quando se compara, através do teste de Tukey ($P < 0,05$), o pH, as bases trocáveis, a soma de bases, a PST e o COT antes e após o cultivo (Tabela 7), observa-se que não houve diferença significativa para SB, COT e Ca^{2+} entre a caracterização inicial e final para todos os tratamentos avaliados, exceto para o Mg^{2+} na testemunha, K^+ na testemunha e no tratamento com 55% da CC e pH nos tratamentos com 55 e 75% da CC. Entretanto, observou-se comportamento diferenciado para o Na^+ e PST em todos os tratamentos, cujos resultados indicam valores significativamente menores ao final do experimento, exceto para o tratamento controle.

Ao se comparar os tratamentos dentro de cada amostragem, observa-se que para a primeira coleta (caracterização inicial) não houve diferença significativa. Já na segunda coleta (ao final do experimento), as variáveis Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e PST apresentaram os maiores valores no tratamento controle, aquele que não foi cultivado e que era mantido a 95% da CC, podendo-se atribuir as diferenças, neste caso específico, a alguma ação da planta nos demais tratamentos (com planta).

Embora com reduzido tempo de cultivo, foi possível evidenciar a diminuição do sódio trocável no solo em todos os tratamentos com cultivo de planta, o que indica a eficiência da *Atriplex nummularia* na extração de sais e recuperação do solo. Leal et al. (2008) avaliaram o potencial da *Atriplex nummularia* na fitorremediação de solo salino-sódico sob irrigação com águas salinas ($175 \mu\text{S cm}^{-1}$, $500 \mu\text{S cm}^{-1}$ e $1.500 \mu\text{S cm}^{-1}$) e verificaram o potencial do gesso como potencializador da fitoextração de sódio (ausência e aplicação de 50% da dose recomendada pela necessidade de gesso), em experimento de casa de vegetação. As avaliações se deram até 130 dias após o transplantio. Os autores afirmam que a *Atriplex nummularia* comportou-se como planta hiperacumuladora de sódio, possuindo potencial de uso na fitoextração deste elemento no solo. No entanto só puderam detectar reduções significativas de sódio no solo a partir de 100 dias após o transplantio. Observa-se a necessidade de estudos a longo prazo, seja em casa de vegetação ou no campo.

Tabela 7 – Valores médios de pH, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ trocáveis, soma de bases (SB), percentagem de sódio trocável (PST) e carbono orgânico total (COT) no solo antes (AC) e depois do cultivo (DC) de *Atriplex nummularia* em função dos níveis de umidades adotadas.

Tratamento	AC	DC	AC	DC
	pH		Ca ²⁺	
			—————cmol _c kg ⁻¹ —————	
35% da CC	8,68 a A	8,58 a A	4,57 a A	4,75 a A
55% da CC	8,70 a A	8,53 b A	4,89 a A	4,78 a A
75% da CC	8,66 a A	8,49 b A	5,08 a A	4,99 a A
95% da CC	8,59 a A	8,51 a A	4,41 a A	4,66 a A
Testemunha	8,70 a A	8,57 a A	4,82 a A	4,92 a A
	Mg ²⁺		Na ⁺	
	—————cmol _c kg ⁻¹ —————		—————cmol _c kg ⁻¹ —————	
35% da CC	2,09 a A	2,14 a B	3,35 a A	2,50 b AB
55% da CC	2,22 a A	2,25 a AB	3,37 a A	2,74 b AB
75% da CC	2,18 a A	2,25 a AB	3,22 a A	2,39 b B
95% da CC	2,23 b A	2,37 a A	3,30 a A	2,88 b AB
Testemunha	2,30 a A	2,40 a A	3,39 a A	3,20 a A
	K ⁺		SB	
	—————cmol _c kg ⁻¹ —————		—————cmol _c kg ⁻¹ —————	
35% da CC	0,34 a A	0,25 a BC	10,35 a A	9,74 a A
55% da CC	0,41 a A	0,37 b BC	10,82 a A	10,14 a A
75% da CC	0,37 a A	0,34 a C	10,84 a A	9,97a A
95% da CC	0,34 a A	0,40 a B	10,28 a A	10,30 a A
Testemunha	0,33 b A	0,49 a A	10,83 a A	11,02 a A
	PST		COT	
	—————%—————		—————g kg ⁻¹ —————	
35% da CC	32,29 a A	25,67 b AB	5,11 a A	5,14 a A
55% da CC	30,68 a A	27,02 b AB	5,05 a A	5,06 a A
75% da CC	29,69 a A	23,93 b B	4,99 a A	5,03 a A
95% da CC	32,06 a A	28,02 b A	5,11 a A	5,04 a A
Testemunha	30,99 a A	29,07 a A	5,62 a A	4,70 a A

Testemunha: Sem cultivo de *Atriplex nummularia* e mantido a 95% da capacidade de campo. Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas (compara época de coleta) e maiúscula nas colunas (compara tratamentos dentro de casa coleta) não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Um ponto que merece ser destacado e estudado em futuros trabalhos é uma caracterização detalhada da solução do solo e das entradas e/ou saídas de sais do sistema, que no caso do presente trabalho não houve saída, pois o vaso não apresentava drenagem. Outra observação importante que pôde ser extraída dessa

pesquisa é que, provavelmente, não houve adsorção de sódio no solo, mesmo tendo se irrigado com água de $CE=0,75 \text{ dS m}^{-1}$ durante todo o ciclo, sendo esta preparada com predominância de sódio e cloro.

Não houve alteração no valor de carbono orgânico total do solo com o cultivo da planta, nem entre as duas amostragens, possivelmente, pelo tempo reduzido entre as duas coletas de amostras não ter sido suficiente para que esta variável sofresse alteração.

Os valores de CE_{es} não diferiram significativamente entre as épocas de coleta nem entre os tratamentos aplicados (Tabela 8), já os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e o potencial osmótico apresentaram valores superiores na segunda coleta, ou seja, após o cultivo, sendo os maiores valores encontrados, em geral, nos tratamentos com 95% da CC e na testemunha.

Apesar dos elevados teores de Na^+ no extrato de saturação do solo, a RAS foi diminuída nos tratamentos de 75 e 95% da CC, por serem caracterizados pelo acréscimo de maiores volumes de água, contendo, além de Na^+ , o Ca^{2+} e o Mg^{2+} , que também tiveram seus teores aumentados ao final do cultivo das plantas (Tabela 8). Por outro lado, o K^+ , que não participou da constituição da água aplicada, teve seus teores reduzidos ao final do experimento em todos os tratamentos com cultivo da Atriplex.

Os resultados de Na^+ , K^+ e Cl^- encontrados na segunda coleta poderiam ser superiores, caso se considerasse a presença desses elementos por profundidade. A coleta de solo ao final do ciclo ocorreu em três profundidades dentro do vaso (0-8; 8-16 e 16-24 cm). Os valores apresentados no trabalho são a média das três profundidades, em virtude da necessidade de comparação com a primeira amostragem que não apresentou divisão por camada do solo. Constatou-se que os valores de Na^+ , K^+ e Cl^- aumentaram em profundidade, devido, provavelmente, à constante aplicação de água no sistema. Uma proposta de trabalho futuro seria um estudo mais detalhado sobre procedimentos amostrais de solo para experimento de casa de vegetação, principalmente quando se adota vasos com grande capacidade de armazenamento de solo.

Tabela 8 – Valores médios de CE_{es} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ solúveis, Cl^- , relação de adsorção de sódio (RAS) e potencial osmótico (PO) do extrato de saturação do solo antes (AC) e depois (DC) do cultivo de *Atriplex nummularia* em função dos níveis de umidades adotadas

Tratamento	AC	DC	AC	DC
	CE_{es}		Ca^{2+}	
	—dS m ⁻¹ —		—mmol _c L ⁻¹ —	
35% da CC	40,07 a A	37,72 a AB	16,39 b A	22,78 a A
55% da CC	42,26 a A	39,06 a AB	17,15 b A	25,50 a A
75% da CC	39,53 a A	35,70 a B	14,66 b A	24,85 a A
95% da CC	46,04 a A	43,49 a A	15,27 b A	27,11 a A
Testemunha	47,24 a A	45,65 a A	17,95 a A	29,98 a A
	Mg^{2+}		Na^+	
	—mmol _c L ⁻¹ —		—mmol _c L ⁻¹ —	
35% da CC	22,19 b A	28,88 a C	422,33 a A	452,67 a A
55% da CC	22,85 b A	33,39 a ABC	478,08 a A	506,60 a A
75% da CC	20,22 b A	32,05 a BC	422,33 a A	428,97 a A
95% da CC	25,20 b A	40,92 a A	475,99 b A	560,41 a A
Testemunha	25,88 a A	40,46 a AB	505,26 a A	596,57 a A
	K^+		Cl^-	
	—mmol _c L ⁻¹ —		—mmol _c L ⁻¹ —	
35% da CC	3,50 a A	2,79 b A	377,81 b A	437,40 a BC
55% da CC	3,94 a A	2,88 b A	431,07 a A	458,13 a ABC
75% da CC	3,59 a A	2,50 b A	380,31 a A	398,13 a C
95% da CC	4,01 a A	3,37 b A	425,63 b A	521,04 a AB
Testemunha	4,35 a A	4,83 a A	471,25 a	585,00 a A
	RAS		PO	
	—(mmol _c L ⁻¹) ^{0,5} —		—Atm—	
35% da CC	95,18 a A	89,90 a AB	- 7,42 b AB	-14,56 a AB
55% da CC	110,93 a A	93,35 a AB	- 8,20 b AB	-15,74 a AB
75% da CC	102,25 a A	80,12 b B	- 5,72 b B	-13,07 a B
95% da CC	107,44 a A	95,94 b A	-10,88 b A	-18,40 a A
Testemunha	108,89 a A	100,88 a A	-10,39 b AB	- 17,22 a AB

Testemunha: Sem cultivo de *Atriplex nummularia* e mantido a 95% da capacidade de campo. Médias seguidas de mesma letra minúscula nas linhas (compara época de coleta) e maiúscula nas colunas (compara tratamentos dentro de casa coleta) não diferem estatisticamente ao nível de 5% de probabilidade pelo Teste de Tukey.

Outro ponto que deve ser evidenciado foi a redução da velocidade de crescimento da planta ao final do experimento devido, principalmente, a limitação do sistema radicular, embora o vaso com capacidade de 20 kg tenha sido escolhido para evitar tais problemas.

Seria necessário um maior período de observação, com mais amostragens de solo para o entendimento das alterações ocorridas nos sais da solução do solo e sua influência sobre o desenvolvimento das plantas. Contudo, pela limitação ao desenvolvimento radicular observado, optou-se pela conclusão do trabalho, não sendo possível um acompanhamento dessas alterações em maior período.

4. Conclusões

a) A altura, o diâmetro e as produções de massa seca de folha, caule e raiz das plantas de *Atriplex nummularia* são variáveis sensíveis à umidade do solo, sendo as umidades correspondentes a 75 e 95% da CC as que possibilitaram os melhores resultados;

b) Os tricomas vesiculares de *Atriplex nummularia* são sensíveis a variações do teor de água no solo, sendo os menores diâmetros e volumes médios de vesículas encontrados na epiderme de plantas cultivadas a 35% da capacidade de campo;

c) Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ , a SB e o carbono orgânico total do solo ficaram estáveis entre o início e o final do experimento em todos os tratamentos;

d) A dinâmica dos elementos na solução do solo foi mais evidenciada, com aumentos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- e potencial osmótico ao final do ciclo;

e) A medida de potencial osmótico pode ser indicada como uma boa variável para avaliar as respostas de tratamentos com estresse hídrico e água salina em planta e solo.

f) Mesmo sem uma redução significativa dos valores de CE_{es} ao final do ciclo, a produção de biomassa e a extração de sais encontradas na *Atriplex* confirmam o seu uso para programas de manejo em áreas salinizadas.

5. Referências Bibliográficas

ASHRAF, M. & HARRIS, P. J. C. Potential biochemical indicators of salinity tolerance in plants. *Plant Science*, 166: 3–16, 2004.

ASHRAF, M. & FOOLAD, M. R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. *Environmental and Experimental Botany*, 59: 206–216, 2007.

APPEZZARTO-DA-GLÓRIA, B. & CARMELLO-GUERREIRO, S. M. *Anatomia vegetal*. 2. ed. Viçosa: UFV, 2006. 438 p.

BEN-GAL, A.; BOROCHOV-NEORI, H.; YERMIYAHU, U. & SHANI, U. Is osmotic potential a more appropriate property than electrical conductivity for evaluating whole-plant response to salinity? *Environmental and Experimental Botany*, 65: 232–237, 2009.

BOUGHALLEB, F.; DENDEN, M. & BEN TIBA, B. Anatomical changes induced by increasing NaCl salinity in three fodder shrubs, *Nitraria retusa*, *Atriplex halimus* and *Medicago arborea*, *Acta Physiologiae Plantarum*, 31: 947-960. 2009.

BROCCA, L.; MELONE, F. ; MORAMARCO, T. & MORBIDELLI, R. Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. *Geoderma*, 148: 364–374, 2009.

CHINNUSAMY, V.; JAGENDORF, A. & ZHU, J. K. Understanding and improving salt tolerance in plants. *Crop Science*, 45: 437–448, 2005.

CORRÊA, M. M. & RIBEIRO, M. R. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário. Recife, UFRPE/UFPE/CNPq/BNB, 2001. (Relatório de Projeto).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FAO. Global Network on Integrated Soil Management for Sustainable Use of Salt-affected Soils. Rome: 2000. Acesso em 17 de abril de 2007 <<http://www.fao.org/ag/agl/agll/spush>>

FLOWERS, T. J. & COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179: 945-963, 2008.

HEATHMAN, G. C., LAROSE, M., COSH, M. H. & BINDLISH, R. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA. *Catena*, 78: 159–169, 2009.

HILLEL, D. *Soil in the Environment: Crucible of Terrestrial Life*. Academic Press, 2007. 320p.

JORDAN, F.; WAUGH, J.; GLENN, E.; SAM, L.; TOMPSON, T. & TOMPSON, T. L. Natural bioremediation of a nitrate contaminated soil-and-aquifer system in a desert environment. *Journal of Arid Environment.*, 72, 748–753. 2008.

JORDAN, F. L.; YOKLIC, M.; MORINO, K.; BROWN, P.; SEAMAN, R. & GLENN, E. P. Consumptive water use and stomatal conductance of *Atriplex lentiformis* irrigated with industrial brine in a desert irrigation district. *Agricultural and forest meteorology*, 149: 889-912, 2009.

KARIMI S. H. & UNGAR, I. A. Development of epidermal salt hairs in *Atriplex triangularis* Willd. in response to salinity, light intensity, and aeration. *Botanical Gazette* 150:68–71. doi:[10.1086/337749](https://doi.org/10.1086/337749) ,1989.

KHAN, M.A.; UNGAR, I.A. & SHOWALTER, A.M. Effects of salinity on growth, water relations and ion accumulation of the subtropical perennial halophyte, *Atriplex griffithii* var. *stocksii*. *Annals of Botany*, 85: 225-232, 2000.

KIRKHAM, M. B. *Principles of soil and plant water relations*. Academic Press; 1 edition, 2004. 520p.

KRISHNAPILLAI, M. & RANJAN, R. S. Evaluating the phytoremediation potential of *Atriplex patula* on salt contaminated soil. Written for presentation at the CSAE/SCGR 2005 Meeting Winnipeg, Manitoba. June 26 - 29, 2005.

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. A. & FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32: 1065-1072, 2008.

LEE, G.; CARROW, R. N.; DUNCAN, R. R.; EITEMAN, M. A. & RIEGER, M. W. Synthesis of organic osmolytes and salt tolerance mechanisms in *Paspalum vaginatum*. Environmental and Experimental Botany, 63: 19–27, 2008.

LIU, X.; HAUNG, W.; MORI, S. & TADANO, T. Interactive effect of moisture levels and salinity levels of soil on the growth and ion relations of halophytes. Communications in soil science and plant analysis, 39: 741-752, 2008.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 219p.

MASTERS, D.; BENES, S. & NORMAN, H. Biosaline agriculture for forage and livestock production. Agriculture, Ecosystems & Environment. 119:234–248, 2007.

MUNNS, R. & TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59: 651–81, 2008.

MOZAFAR, A. & GOODIN, J. R. Vesiculated hairs: a mechanism for salt tolerance in *Atriplex halimus* L. Plant Physiology 45:62–65. doi:10.1104/pp.45.1.62, 1970.

NORMAN, H. C.; MASTERS, D. G.; WILMOT, M. G. & RINTOUL, A. J. Effect of supplementation with grain, hay or straw on the performance of Weaner Merino sheep grazing old man (*Atriplex nummularia*) or river (*Atriplex Amnicola*) saltbush. Grass and forage science, 63: 179-192, 2008.

PARIDA, A. K. & DAS, A. B. Salt tolerance and salinity on plants: a review. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 60: 324-349, 2005.

PIMENTEL, C. Respostas fisiológicas à falta d'água: limitação difusiva ou metabólica. In: *Estresses ambientais: danos e benefícios em plantas*. Eds. Nogueira, R.J.M.C.; Araújo, E.L.; Willadino, L. G.; Cavalcante, U. M. T. Recife, UFRPE, Imprensa universitária, p.14, 2005. 500p.

PIMENTEL-GALINDO, R. M. Variações estruturais e funcionais dos tricomas vesiculares e dos elementos xilemáticos em folhas de *Atriplex nummularia* Lindl., em resposta a salinidade. Tese de Doutorado. 90 f. Botânica, UFRPE. 2001.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C.; DUTRA, M. T.; PAULINO, R. V.; BRITO, L. T. L. & MATOS, A. N. B. Rendimento da *Atriplex nummularia* irrigada com efluentes da criação de tilápia em rejeito da dessalinização de água. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n.1, p.97-103, 2006.

QADIR, M.; OSTER, J.D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A.D. & SAHRAWAT, K.L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, 96:197-247, 2007.

RAVINDRAM, K. C.; VENKATESAN, K.; BALAKRISHNAN, V. CHELLAPPAN, K. P. & BALASUBRAMANIAN, T. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 39:2661-2664, 2007.

RENGASAMY, P. World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, 57:1017-1023, 2006.

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

SHULAEV, V.; CORTES, D.; MILLER, G. & MITTLER, R. Metabolomics for plant stress response. *Physiologia Plantarum*, 132: 199–208, 2008.

SILVA, F. C., ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação tecnológica, 2009. 627p.

SILVA, E. V.; SILVEIRA, J. A. G. RODRIGUES, C. R. F.; LIMA, C. S. & VIÉGAS, R. A. Contribuição de solutos orgânicos e inorgânicos no ajustamento osmótico de pinhão-mansão submetido à salinidade. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 44(5): 437-445, 2009.

SILVEIRA, J. B. A.; ARAÚJO, S. A. M.; LIMA, J. P. M. S. & VIÉGAS, R. A. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. Environmental and Experimental Botany, v.66, p. 1–8, 2009.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Communications in Soil Science Plant Analysis, 19:1467-1476, 1988.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: Page, A. L. (ed). Methods of soil analysis. Part-2 chemical methods. Madison: American Society of Agronomy, 1982, p.159-165.

TÜRKAN, I. & DEMIRAL, T. Recent developments in understanding salinity tolerance. Environmental and Experimental Botany, 67: 2–9, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. SAEG 9.1: Sistema de Análises Estatística. Viçosa, MG: Fundação Arthur Bernardes, 2007. (CD-ROM).

VINOCUR, B. & ALTMAN, A. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. Current Opinion in Biotechnology, 16: 123-132, 2005.

CAPÍTULO II - FITORREMEDIAÇÃO DE SOLO SALINO SÓDICO EM CONDIÇÃO DE CAMPO UTILIZANDO A *Atriplex nummularia* Lindl.

Resumo – Essa pesquisa almeja elucidar questionamentos sobre o manejo da *Atriplex nummularia*, em condição de campo, no Nordeste Brasileiro, mais especificamente quanto ao seu crescimento, sistema de cortes periódicos, extração de sais e condições do solo antes e após o cultivo. O trabalho foi conduzido em um Neossolo Flúvico Sódico salino no município de Pesqueira, PE. Para isso, a *Atriplex nummularia*, plantada em espaçamento 2,5 x 2,5 m, foi monitorada durante dezesseis meses. Foram aplicados três tratamentos: solo cultivado com plantas de *Atriplex* que foram podadas aos seis e doze meses após o transplântio (MAT); solo cultivado com plantas que só foram coletadas ao final do ciclo (16 MAT) e solo não cultivado que serviu como testemunha. Realizaram-se quatro amostragens de solo: no momento do transplântio, aos seis, doze e dezesseis MAT. As amostragens se deram aos 30, 60, 90 e 120 cm de distância do caule, nas profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. A parte aérea foi fracionada em folhas, caule fino (< 3 mm de diâmetro) e caule grosso (> 3 mm de diâmetro), sendo determinados os teores de cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloreto por parte da planta. O solo foi avaliado quanto aos teores de sódio trocável, percentagem de sódio trocável, condutividade elétrica do extrato de saturação e sódio solúvel. Determinou-se a produtividade total ao final do ciclo, o potencial de fitoextração (PF) e o fator de transferência (FT) para o cálcio, magnésio, sódio, potássio e cloreto. A média de altura das plantas não podadas foi de 179,50 cm e o diâmetro da copa alcançou 258,00 cm aos 16 MAT, indicando a necessidade de poda dos ramos laterais caso se pretenda manter as plantas por um período maior de cultivo. A produtividade de massa seca não diferiu estatisticamente entre as plantas não podadas e podadas, o que pode ser considerado como fator positivo, já que os ramos da rebrota ficam menos lignificados facilitando o aproveitamento pelos animais. Verificou-se uma extração total de sais (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ e Cl^-) pela planta de 651,92 kg ha⁻¹. O FT seguiu a ordem para as plantas podadas: K > Na > Mg > Cl > Ca. Devido a variações sazonais de precipitação, ascensão capilar, nível do lençol freático e altos teores salinos no solo não foram detectadas reduções significativas do teor de sódio no solo ao final do experimento (16 MAT).

Palavras chave: solos afetados por sais, poda, halófitas.

CHAPTER II- PHYTOREMEDIATION OF A SALINE-SODIC SOIL IN FIELD CONDITION WITH *Atriplex nummularia*

Abstract - This research aims to clarify questions about culture management of *Atriplex nummularia*, under field conditions in Northeastern Brazil, but specifically as to its growth, periodic system of cuts, extracting salt and soil conditions before and after cultivation. The research was carried out in Pesqueira city, Pernambuco State in a Fluvic Neossol Sodic saline. *Atriplex nummularia* plants, transplanted spaced 2.5 x 2.5 m, were monitored for sixteen months. Three treatments were formed: soil cultivated with *Atriplex* plants were pruned to six and twelve months after transplanting (MAT); cultivated soil were only collected at the end of the cycle (16 MAT) and uncultivated land which served as control treatment. There were four soil samplings: at the time of transplantation, six, twelve and sixteen MAT. The samples are given at 30, 60, 90 and 120 cm from the stem, at 0-20, 20-40, 40-60 and 60-80 cm. Shoots were fractionated into leaves, stems thin (<3 mm in diameter) and thick stem (> 3 mm in diameter), and determined plant contents of calcium, magnesium, sodium, potassium and chloride. The soil was evaluated for exchangeable sodium, exchangeable sodium percentage, saturation extract electrical conductivity and soluble sodium. At end of the cycle was determined total productivity, phytoextraction potential (PP) and transfer factor (TF) for calcium, magnesium, sodium, potassium and chloride. The average plant height was not pruned 179.50 cm and crown diameter to 16 MAT reached 258.00 cm. The yield of dry mass did not differ statistically between non-pruned and pruned plants, which can be regarded as a positive factor, since the branches of regrowth are less lignified facilitating the use by animals. There was a total extraction of salts (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ and Cl^-) by the plant of 785,91 kg ha⁻¹. The TF followed the order to the pruned plants, K> Na> Mg> Cl> Ca due to seasonal variations in precipitation, rising damp, water table and high salt levels in soil were not detected significant reductions in sodium to end of the experiment (16 MAT).

Key words: salt-affected soils, prune, halophyte.

1. Introdução

Os efeitos da salinidade e sodicidade nas propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos podem impactar adversamente o equilíbrio ecológico e econômico de ecossistemas, acarretando redução na produtividade agrícola e elevados custos de produção, aumento da erosão pela dispersão das partículas do solo, aumento do escoamento superficial e das enchentes, redução da recarga do aquífero, desbalanço ecológico devido a alterações na vegetação, efeitos negativos nos índices de saúde pública, redução da vida útil das construções, estradas, represas, adutoras e implementos agrícolas (Chhabra, 1996).

O ambiente de elevada salinidade pode causar uma perda de água das células e uma diminuição do turgor. Ao mesmo tempo, o acúmulo de íons específicos como o sódio e o cloreto na planta podem interferir diretamente nos processos bioquímicos. O estresse osmótico é geralmente imediato e particularmente prejudicial para a germinação das sementes, emergência e vigor das plântulas e absorção de água. Enquanto a ação dos íons específicos é cumulativa (Masters et al., 2007; Flowers & Colmer, 2008; Munns & Tester, 2008).

O uso desses solos afetados por sais para a agricultura não pode ser negligenciado. Deste modo, é imperativa a necessidade de encontrar técnicas ambiental e economicamente adequadas para a remediação desses solos (Qadir et al., 2007; Bennet et al., 2009)

Diante disso, a fitorremediação é uma estratégia de biorremediação que consiste de procedimentos que envolvem emprego de plantas e sua microbiota associada e de amenizantes do solo, além de práticas agrônômicas que, se aplicadas em conjunto, removem, imobilizam ou tornam os contaminantes inofensivos ao ecossistema (Accioly & Siqueira, 2000). Esta prática é utilizada com frequência quando o contaminante do solo trata-se de um metal pesado, porém pode ser empregada em solo sódico ou salino sódico, onde o contaminante é o sal e, ou, o sódio (Qadir et al., 2007). Neste caso, a técnica empregada, fitoextração, utiliza espécies de plantas que absorvem e acumulam sais na parte aérea, a qual pode ser removida da área. Qadir et al. (2007) afirmam que a fitoextração é uma estratégia eficiente de recuperação de solos salino sódicos, com performance comparável à utilização de corretivos químicos.

A fitorremediação apresenta-se como um método de remediação de solos contaminados de custo razoável, ambientalmente mais seguro e de maior aceitação pelo público do que os métodos mais agressivos ao ambiente (Nascimento et al., 2009). Esses mesmos autores comentam ainda que, é uma tecnologia emergente, com diversas limitações e com poucos exemplos de técnicas comercialmente disponíveis, mas grande chance de sucesso, devido a sua viabilidade econômica e benefícios ambientais.

Um dos gargalos à implementação da fitoextração em escala comercial é o prazo relativamente longo requerido para a diminuição nos teores de contaminantes no solo a níveis regulatórios. Esse problema torna-se menos preocupante frente às inúmeras vantagens ocasionadas pelo uso de vegetação em área inóspita para o crescimento de culturas alimentares, pastagens convencionais, etc. (Nascimento et al., 2009).

Alguns benefícios da fitorremediação em solos afetados por sais são citados por Qadir (2007): elimina o custo com corretivos químicos; possibilita o uso de subprodutos fornecidos pela espécie cultivada; melhora a estabilidade dos agregados do solo e criação de macroporos, o que otimiza as propriedades hidráulicas do solo e proliferação das raízes; promove maior disponibilidade de nutrientes, que não são levados do solo após a fitorremediação; possibilita a recuperação do solo em profundidades maiores; e após a fitorremediação, e no próprio processo, o solo pode aumentar o sequestro de carbono, tendo implicações ambientais positivas. Além disso, é uma solução viável para pequenos agricultores que, normalmente, dispõem de poucos recursos financeiros. Diversas espécies de plantas podem ser adotadas, no entanto, quando o objetivo é a retirada do cloro e sódio do solo, as halófitas apresentam-se como a alternativa mais indicada.

As halófitas crescem sob condições salinas e, historicamente, têm sido usadas como forragem para ruminantes ou como componentes de rações mistas para substituir volumoso, podendo ajudar na conversão, pelo animal, em carne, lã e outros subprodutos (Masters et al., 2007; Norman et al., 2008; Araújo, 2009; Mattos, 2009).

Para que a técnica se torne viável, é desejável que se possa aproveitar a biomassa retirada após a extração. No caso da remoção de sais, existe um destino final que ajuda no processo, que é o aproveitamento na alimentação animal. A taxa de remoção de um contaminante é dependente da biomassa coletada no final do ciclo, do número de cortes por ano e da concentração do contaminante na porção colhida (Accioly & Siqueira, 2000).

A erva-sal (*Atriplex nummularia* Lindl.) pode ser considerada como alimento volumoso de digestibilidade aparente variando de 39% a 70% (Souto et al., 2005). Sua oferta tem sido feita na forma de pastejo direto em área de geração espontânea da espécie, ou como feno ou silagem quando cultivada, mas a forma de feno é a mais utilizada (Araújo, 2009; Ben Salem et al., 2010).

As espécies de *Atriplex* são plantas perenes que podem produzir por mais de quarenta anos (Le Houérou, 1965 citado por Ben Salem et al, 2010). No entanto, com o passar dos anos, a tendência é que os ramos fiquem mais lignificados e as taxas de crescimento diminuam, reduzindo também o potencial para o aproveitamento como forrageira. As espécies de *Atriplex* possuem um alto poder de rebrota, o que permite serem podadas e, conseqüentemente, exportarem os sais contidos nos tecidos que foram extraídos (Watson & O'Leary, 1993). Dependendo da intensidade de cultivo, as espécies de *Atriplex* podem ser podadas em intervalos de 4-6 anos (Le Houérou, 1992), no entanto esse período pode ser modificado de acordo com o tipo e a finalidade do manejo. Além da extração de sais ser acelerada com a poda, os novos ramos e folhagem que brotam apresentam melhor qualidade para os animais, em virtude da menor lignificação, sendo de mais fácil mastigação.

Watson & O'Leary (1993) avaliaram a produção de biomassa de oito espécies de *Atriplex* (*undulata*, *deserticola*, *polycarpa*, *canescens*, *nummularia*, *vestita*, *lentiformes* e *barclayana*) durante 27 meses irrigadas com água com condutividade elétrica de 18 dS m⁻¹. Durante o período de cultivo foram efetuados quatro cortes (podas) aos 4,5; 13,0; 16,7 e 27 meses após o transplântio das mudas. As alturas de corte das podas variaram de 10 a 20 cm. As produtividades totais foram de 8,9 a 19,80 Mg ha⁻¹ de massa seca para *A. polycarpa* e *A. undulata*, respectivamente. Dessas produtividades, 66% (5,90 Mg ha⁻¹) e 50% (9,90 Mg ha⁻¹) foram da biomassa produzida nos 2°, 3° e 4° cortes, respectivamente para *A. polycarpa* e *A. undulata*, indicando o estímulo na rebrota causado pela poda.

Outro ponto que se apresenta carente na literatura é com relação ao espaçamento recomendado para o cultivo de *Atriplex*, seja para uso como forrageira e/ou remediação de solos afetados por sais. As produtividades encontradas na literatura variam consideravelmente com a diferenciação do espaçamento. Por exemplo, Glenn et al. (1998), cultivando a *Atriplex* no espaçamento de 0,6 x 0,6 m, obtiveram produtividade anual de: 49.100 kg ha⁻¹ de massa seca; enquanto Porto et al. (2006), cultivando a mesma espécie com espaçamento de 4 x 4 m, alcançaram produção anual de massa seca de 13.819,80 kg ha⁻¹. Outros exemplos importantes

que merecem citação são os experimentos de Glenn et al. (2009) e Watson & O'Leary (1993). Os primeiros adotaram um espaçamento de 1,8 x 1,8 m e obtiveram uma produtividade de 18.000 kg ha⁻¹, enquanto os outros, com espaçamento de 0,76 x 2,5 m, encontraram 15.600 kg ha⁻¹ em 27 meses.

Ainda existem algumas lacunas a serem preenchidas para o aperfeiçoamento no que condiz à forma de avaliação da fitoextração, principalmente para solos afetados por sais. Esta vem sendo realizada através de análises químicas do solo antes e após a implantação da espécie fitorremediadora, bem como através da análise química do material vegetal seco extraído na colheita. No entanto, são necessárias variáveis mais palpáveis, que podem ser, inclusive, importadas de técnicas mais consolidadas, como é o caso de remediação de metais pesados.

Diante da carência de informações sobre o manejo da cultura da Atriplex no Nordeste Brasileiro, mais especificamente quanto ao seu crescimento, espaçamento, sistema de cortes periódicos, extração de sais e condições dos solos antes e após o cultivo, essa pesquisa almeja elucidar tais questionamentos, fornecendo subsídios para trabalhos futuros com essa halófito.

2. Material e Métodos

2. 1. Localização do experimento e caracterização do solo

A área do experimento está localizada na sub-bacia do Rio Ipanema no Estado de Pernambuco, especificamente no município de Pesqueira (Figura 1).

O solo foi caracterizado como NEOSSOLO FLÚVICO Sódico salino de acordo com Corrêa & Ribeiro (2001). Um dos principais motivos para escolha da área foi o estágio avançado do processo de salinização evidenciado pela presença de plantas nativas cuja ocorrência se dá exclusivamente nesses ambientes. De acordo com a classificação de Köppen, o clima na região é do tipo BSsh (extremamente quente, semiárido), com precipitação total anual média de 730 mm, e evapotranspiração potencial anual média de 1.683 mm.

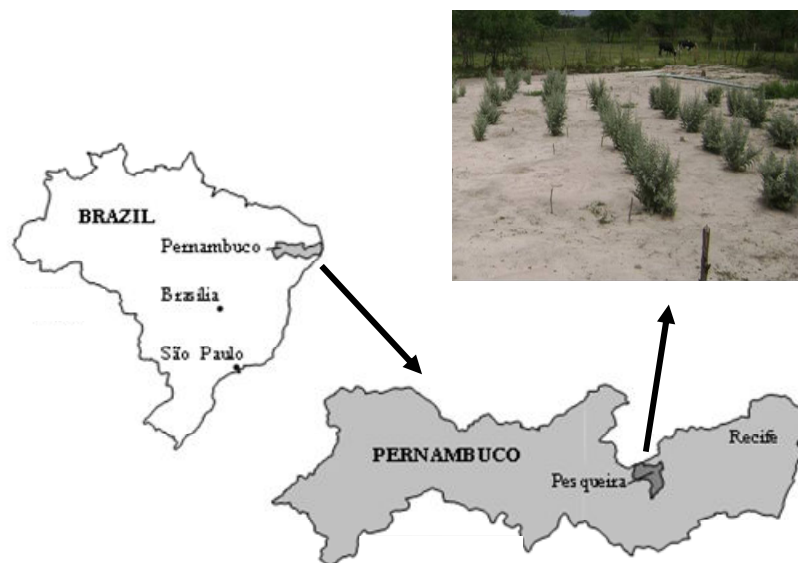


Figura 1 - Localização geográfica da área experimental. Adaptada de Montenegro et al. (2009)

Os dados pluviométricos (Tabela 1) foram adquiridos de uma estação meteorológica da Campbell Scientific instalada nas proximidades do experimento, além da medição da profundidade do lençol freático através de um piezômetro.

2. 2. Condução do experimento e manejo da cultura

O experimento foi conduzido no período de setembro de 2008 a janeiro de 2010, totalizando dezesseis meses de acompanhamento. Foram utilizadas mudas de *Atriplex nummularia* com idade de 90 dias, produzidas a partir de estacas de uma única planta matriz, para manter a uniformidade genética. O espaçamento adotado foi de 2,5 x 2,5 m, com o transplântio sendo realizado manualmente, com uma planta por cova, nas dimensões de 0,3 x 0,3 x 0,3 m, sem a aplicação de fertilizantes.

Tabela 1 – Valores de precipitação pluvial (mm) e profundidade do lençol freático (m) dos meses de janeiro de 2008 a janeiro de 2010 do local de execução do experimento

Mês	2008	2009	2010	2008	2009	2010
	—Precipitação (mm)—			—Nível Freático (m)—		
Janeiro	0,00	67,20	153,60	-	2,30	1,63
Fevereiro	0,00	5,10	-	2,48	2,00	-
Março	1,00	0,20	-	-	2,50	-
Abril	9,00	18,30	-	1,00	2,20	-
Maiο	198,50	3,60	-	0,43	1,53	-
Junho	62,50	11,60	-	0,70	0,37	-
Julho	86,70	113,30	-	0,73	0,73	-
Agosto	74,70	0,00	-	1,03	0,48	-
Setembro	4,80	2,70	-	1,40	1,03	-
Outubro	0,50	18,50	-	1,85	1,83	-
Novembro	0,00	15,20	-	2,48	-	-
Dezembro	35,80	49,30	-	2,30	1,84	-

Foram estabelecidos três tratamentos: solo cultivado com plantas de Atriplex que foram coletadas apenas ao final do ciclo; solo cultivado com plantas que foram podadas duas vezes durante o cultivo e solo não cultivado, servindo como a testemunha. Cada parcela foi composta por nove plantas, em que a planta do centro foi utilizada para acompanhamento ao longo do experimento (Figura 2). As coletas de solo foram realizadas ao lado de cada planta central nas distâncias de 30, 60, 90 e 120 cm do caule em quatro profundidades (0-20; 20-40; 40-60 e 60-80 cm), totalizando 16 amostras por parcela (Figura 2). Para o tratamento controle, como não havia plantas cultivadas, o centro da parcela serviu como referência para as distâncias do caule. Foram realizadas quatro amostragens: no momento do transplante (0 dias após o transplante - 0 DAT), seis meses após o transplante (MAT), doze MAT e 16 MAT, no momento da coleta do experimento. Deste modo foram coletadas 192 amostras de solo a cada amostragem.

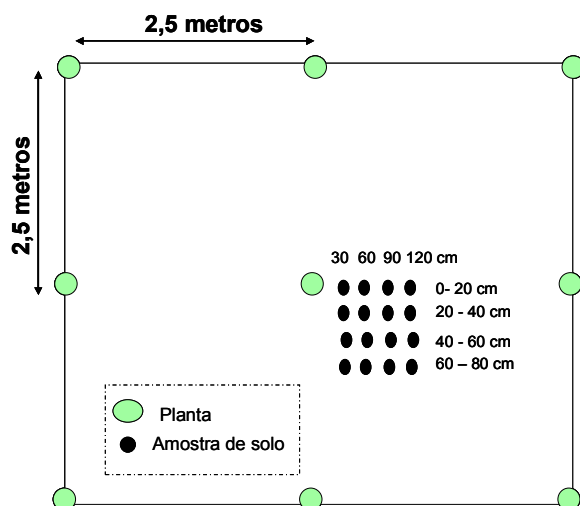


Figura 2 – Visualização da parcela experimental, distâncias e profundidades de amostragem do solo em relação à planta de *Atriplex nummularia*.

2.3. Análises

2.3.1. Solo

Após coletadas com trado holandês e identificadas, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas, passadas em malha de 2 mm. Com relação à caracterização física do solo (Tabela 2) foram determinadas: a densidade do solo (método do anel volumétrico), densidade das partículas (método do balão volumétrico), granulometria (método da pipeta) argila dispersa em água (ADA), descritos em EMBRAPA (1997); e calculados os índices de dispersão (ID) e floculação (IF). Para a determinação da densidade do solo foram abertas trincheiras com profundidade de 80 cm, uma em cada bloco e retiradas três amostras indeformadas a cada profundidade.

Tabela 2 - Caracterização física das amostras da primeira coleta de solo

Prof.	Ds	Dp	Areia			Silte	Argila	ADA	ID	IF
			Total	Fina	Grossa					
	kg dm ⁻³		g kg ⁻¹							
0-20	1,54 ± 0,13	2,73	380±50	230±30	150±50	500±40	120±20	100±20	0,83	0,17
20-40	1,65±0,07	2,74	370±70	230±40	140±40	500±80	140±30	130±20	0,93	0,07
40-60	1,68±0,05	2,73	380±80	230±40	150±60	470±70	150±30	140±30	0,93	0,07
60-80	1,69±0,08	2,73	330±100	200±60	130±50	490±60	180±40	170±50	0,94	0,06

Resultados são expressos como média ± desvio padrão (n=48); ADA: Argila dispersa em água; ID: Índice de dispersão; IF: Índice de floculação.

Para a caracterização química das amostras do solo (Tabela 3) foram realizadas as análises de: pH em água, carbono orgânico total (Yeomans & Bremner, 1988), Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ e K⁺ trocáveis extraídos por acetato de amônio 1

mol L⁻¹ (Thomas, 1982), além da medida da condutividade elétrica, bases solúveis e cloreto no extrato de saturação do solo (Richards, 1954). A determinação dos teores de sódio e potássio foi realizada por fotometria de emissão de chama; e os teores de cálcio e magnésio por espectrofotometria de emissão ótica em plasma de argônio com acoplamento indutivo. O cloreto foi determinado através da titulação com nitrato de prata (EMBRAPA, 1997).

Determinou-se, também a osmolalidade do extrato de saturação do solo com micro-osmômetro (μ OsmetteTM Model 5004 Automatic Osmometer). Foram calculadas a soma de bases (SB), percentagem de sódio trocável (PST) e a relação de adsorção de sódio (RAS).

Tabela 3 - Caracterização química das amostras de solo da primeira coleta.

Complexo sortivo	Profundidade (cm)			
	0-20	20-40	40-60	60-80
pH _(2.5:1)	8,03 ± 1,04	8,75 ± 0,33	8,98 ± 0,35	8,90 ± 0,38
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	5,83 ± 1,75	5,12 ± 1,66	4,49 ± 1,04	4,46 ± 1,10
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	2,06 ± 0,34	1,97 ± 0,39	1,92 ± 0,41	2,00 ± 0,44
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	3,43 ± 1,56	3,45 ± 1,00	3,89 ± 1,03	4,39 ± 1,18
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,64 ± 0,23	0,50 ± 0,20	0,41 ± 0,16	0,39 ± 0,15
SB (cmol _c kg ⁻¹)	11,96 ± 2,14	10,60 ± 2,67	10,50 ± 1,55	11,09 ± 1,74
PST (%)	30,51 ± 14,49	34,15 ± 16,50	38,54 ± 12,60	42,42 ± 16,42
COT (dag kg ⁻¹)	0,73 ± 0,29	0,45 ± 0,22	0,29 ± 0,11	0,26 ± 0,10
Sais solúveis				
CE _{es} (dS m ⁻¹)	23,65 ± 14,55	20,93 ± 10,86	23,46 ± 8,86	23,82 ± 9,19
pH _{es}	7,66 ± 0,39	7,84 ± 0,61	7,66 ± 0,46	7,70 ± 0,39
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	6,43 ± 4,99	5,64 ± 4,96	7,01 ± 5,30	7,25 ± 5,23
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	7,95 ± 6,38	6,49 ± 5,65	7,43 ± 5,11	7,84 ± 5,13
Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	277,29 ± 202,39	223,78 ± 136,50	252,76 ± 115,03	262,11 ± 113,39
K ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	3,15 ± 2,18	1,94 ± 1,40	1,63 ± 1,07	1,32 ± 0,82
Cl ⁻	223,78 ± 157,26	189,31 ± 114,99	213,83 ± 100,41	218,67 ± 94,82
RAS (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	107,81 ± 57,79	93,38 ± 35,00	102,44 ± 23,13	99,66 ± 23,88
PO (Mpa)	0,84 ± 0,64	0,71 ± 0,47	0,82 ± 0,56	0,83 ± 0,39

Resultados são expressos como média ± desvio padrão (n=48)

2.3.2. Planta

No momento do transplante e a partir do segundo mês após o transplante (MAT) foram efetuadas medidas mensais de altura e diâmetro (sentido norte-sul e leste-oeste) da copa das plantas. Foram realizadas duas podas ao longo do

experimento, aos seis MAT, onde se retirou todo o material vegetal acima dos 80 cm de altura; e aos doze MAT, retirando a biomassa acima dos 60 cm de altura.

A coleta de todas as plantas (podadas e não podadas) foi realizada aos dezesseis meses após o transplântio, cortando-se ao nível da superfície do solo. Tanto na coleta final como nas podas, o material retirado foi fracionado em folhas, caule fino (diâmetro < 3 mm) [Norman et al., 2008] e caule grosso (diâmetro > 3 mm). O material vegetal coletado foi pesado, levado para secar em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C, até peso constante. A massa seca de folha, caules fino e grosso foi moída em moinho tipo Willey e realizada a digestão nitroperclórica (Silva, 2009). A determinação dos teores de sódio e potássio foi realizada por fotometria de emissão de chama; e os teores de cálcio e magnésio por espectrofotometria de emissão ótica em plasma de argônio com acoplamento indutivo. O cloreto foi determinado por extração em água e titulação com nitrato de prata (Malavolta et al., 1989).

Foi determinado o potencial de fitoextração (PF), representado pelo total de um determinado elemento extraído de um único ciclo de fitoextração (Kos et al., 2003). Foi calculado da seguinte maneira:

$$PF = \text{Teor}(Ca, Mg, Na, K, Cl)_{\text{planta}(folha, caule\ fino, caule\ grosso)} \times \text{Biomassa}_{\text{planta}(folha, caule\ fino, caule\ grosso)}$$

A capacidade das plantas em extrair Ca, Mg, Na, K e Cl do solo foi avaliada pelo fator de transferência (FT) [Leal et al., 2008], definido conforme a equação:

$$FT = \frac{\text{Teor}(Ca, Mg, Na, K, Cl)_{\text{Folha}}}{\text{Teor}(Ca, Mg, Na, K, Cl)_{\text{Solo}}}$$

Para o cálculo do teor no solo foi somado o teor trocável com o solúvel, devido ao elevado teor deste último no solo. Para o cálculo dos teores solúveis por kg de solo, utilizaram-se os valores de saturação a base de massa e das concentrações dos elementos determinadas no extrato de saturação do solo.

2. 4. Delineamento e Análise estatística

Os tratamentos foram dispostos em um delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. Os dados foram analisados por meio de parâmetros descritivos (média, desvio padrão, coeficiente de variação), análise de variância e teste de Tukey ($P < 0,05$) utilizando o Programa SAEG 9.1 (UFV, 2007).

3. Resultados e Discussão

3.1. Crescimento da planta

Os dados mensais de altura de planta durante a condução do experimento fornecem subsídios importantes em relação à marcha de crescimento da Atriplex em ambientes semelhantes ao da pesquisa (Figura 1).

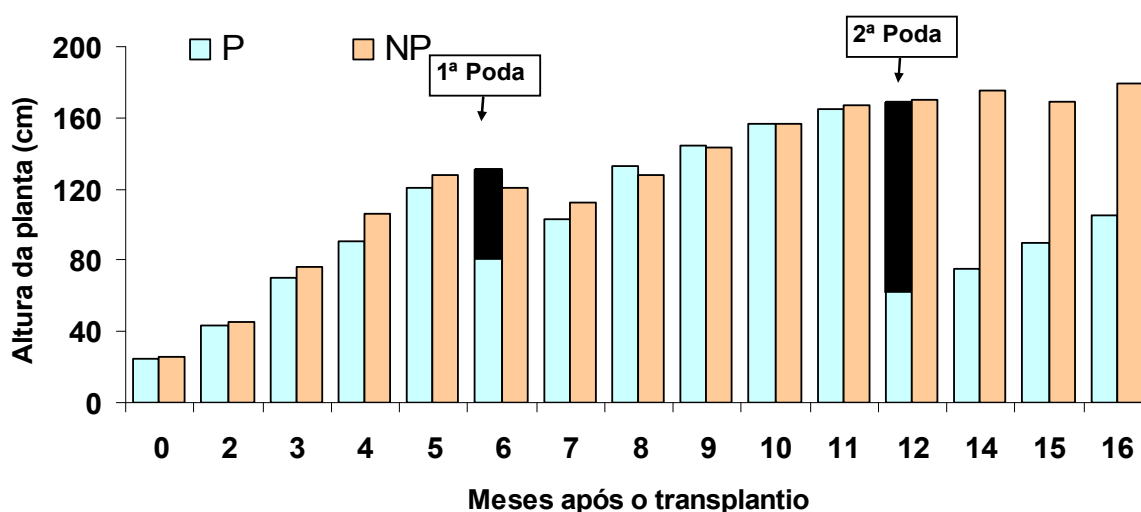


Figura 3 – Altura de planta (cm) ao longo dos dezesseis meses de condução do experimento nas plantas podadas (P) e não podadas (NP). As colunas hachuradas em preto aos seis e doze meses após o transplante indicam a altura da poda.

Houve um crescimento contínuo até os seis meses após o transplante (MAT), similar entre as plantas submetidas ou não à poda, após este período o crescimento foi menos pronunciado, especialmente para as plantas não podadas. Aos seis MAT as plantas que foram podadas estavam com altura média de 130,75 cm (Figura 3). Como no processo de poda foi retirado todo o material acima de 80 cm, coletou-se 50,75 cm. No mês subsequente (sete MAT), a altura média das plantas podadas era

de 103,00 cm, muito próxima daquelas que não foram podadas, com média de 112,50 cm, diferença esta que já não existia dois meses após a primeira poda.

Aos 12 MAT, as plantas submetidas à poda apresentavam uma altura média de 169,50 cm e, naquele momento, foi extraída toda a biomassa acima de 60 cm, ou seja, 109,50 cm. Como nessa segunda poda a altura reduziu, de 80 para 60 cm, e devido as plantas estarem com maior altura, a recuperação da altura das plantas podadas foi mais lenta, pelo menos até os dezesseis meses de avaliação (Figura 3). Mesmo assim, é possível verificar que, quatro meses após a segunda poda, as plantas apresentavam altura média de 105,25 cm, com um aumento de 45,25 cm em relação à altura de corte que havia sido 60 cm. Diante dessa recuperação em termos de altura, é possível inferir que, se o experimento tivesse sido avaliado por um maior período de tempo, as plantas podadas alcançariam, em termos de altura, as planta não podadas.

Fundamentado nesses resultados, pode-se evidenciar a capacidade de rebrota da *Atriplex nummularia*, principalmente quanto à altura vertical dos ramos. Aliado a isso, é importante frisar que o material da rebrota apresentou-se menos lignificado, mais tenro, o que favorece o seu uso como forragem de melhor palatabilidade para os animais, especificamente os caprinos. Com um ano de idade, plantas de *Atriplex nummularia* podem alcançar mais de 2,0 m de altura (Glenn et al., 1998; Porto et al., 2001; Porto et al., 2006), enquanto com cinco anos de idade essa altura varia de 2 a 3 m (Glenn et al., 2009).

Devido à carência de dados na literatura que indicassem a altura de corte em regime de poda, optou-se por trabalhar com as alturas de 80 e 60 cm para a primeira e segunda podas, respectivamente. No entanto, pelos resultados apresentados e pelo poder de rebrota da *Atriplex*, recomenda-se reduzir essas alturas a fim de otimizar a produção de massa fresca e seca, principalmente quando o objetivo é o fornecimento de material para forragem e, conseqüentemente, a extração de sais do solo pelos tecidos da planta.

Outro dado de grande valia que deve ser destacado é o diâmetro da copa da planta, tanto no sentido norte-sul como leste-oeste, fornecendo subsídio para escolhas futuras de experimentos semelhantes a este e/ou que utilizem a mesma espécie adotada nesta pesquisa. Um dos principais questionamentos que se tem é com respeito ao espaçamento ideal para o cultivo de *Atriplex*, já que as pesquisas realizadas até o momento são bastante diferenciadas quanto ao tipo de objetivo do cultivo. O diâmetro da planta (Figura 4) apresentou crescimento semelhante à altura

da planta, uma vez que a partir dos sete MAT houve uma estabilidade no crescimento para as plantas submetidas ou não à poda. O diâmetro da planta na direção leste-oeste seguiu comportamento semelhante ao norte-sul.

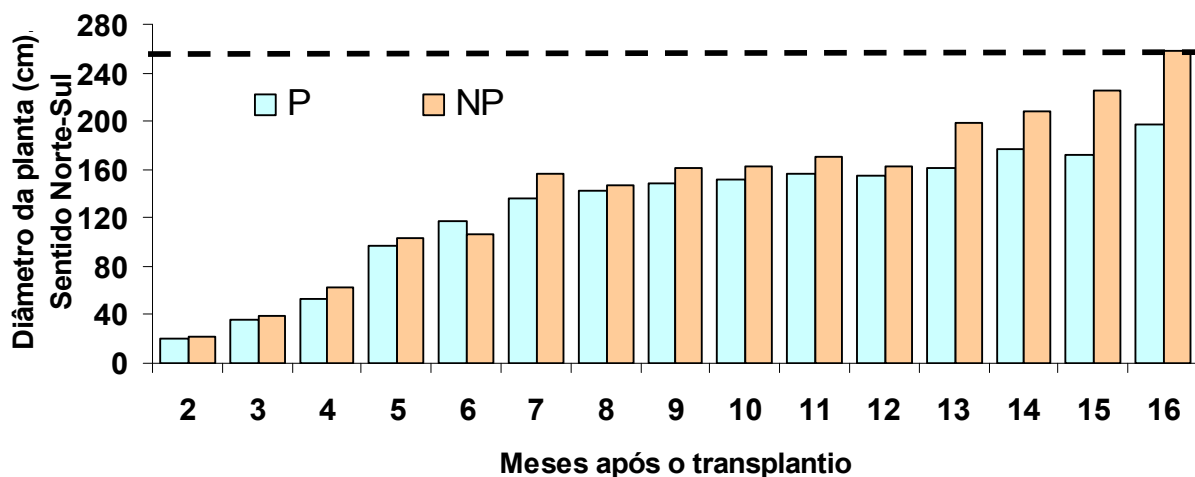


Figura 4 – Diâmetro da copa da planta (cm), no sentido norte-sul ao longo dos dezesseis meses de condução do experimento nas plantas podadas (P) e não podadas (NP).

Quando o objetivo é a maximização da produção de biomassa, o ideal é o aumento da densidade populacional das plantas de *Atriplex* com a redução do espaçamento. Nesse sentido, faz-se necessário conhecer a evolução do diâmetro da copa das plantas para que não ocorra a sobreposição das mesmas quando o espaçamento não for adequado. Sendo assim, verifica-se que, com um ano de transplante, os diâmetros médios das plantas podadas e não podadas foram de 155,00 e 162,00 cm, respectivamente (Figura 4), indicando que até esta data o espaçamento de 2,5 x 2,5 m (1.600 plantas ha⁻¹) poderia ser reduzido para 2,0 x 2,0 m (2.500 plantas ha⁻¹), aumentando a densidade de plantio em 900 plantas ha⁻¹ que, em termos de produção de biomassa, contribuiria de forma efetiva para extração de sais do solo. Este aumento poderia ser maior ainda, caso se optasse pela poda dos ramos laterais, possibilitando diminuir o espaçamento para 1,5 x 1,5 m (4.440 plantas ha⁻¹).

Para que houvesse a sobreposição das copas das plantas seria necessário transcorrer 16 meses de cultivo, quando a média das plantas não podadas alcançou 258,00 cm de diâmetro de copa. De qualquer forma, de modo particular para essa

pesquisa, não houve sobreposição das plantas centrais avaliadas, embora nas plantas de bordadura este fato tenha ocorrido, principalmente pela facilidade de tombamento dessas plantas em condições de campo, onde o grande volume de folhas e ramos força o caule, chegando muitas vezes a rompê-lo.

3.2. Produção de Biomassa

As produções de massa fresca de folha, caule fino, caule grosso e total de plantas com regime de poda aos dezesseis meses após o transplântio foram de 11,29; 4,49; 5,89 e 21,67 Mg ha⁻¹ e para a massa seca foram de 2,19; 2,65, 3,80 e 8,61 Mg ha⁻¹ (Tabela 4). A rebrota após a primeira poda foi responsável por aproximadamente 30% dos valores da produção total de massa fresca e seca das plantas.

Tabela 4 – Produção de biomassa fresca e seca de folha, caule fino, caule grosso e total das plantas com poda e sem poda

Tratamento	Massa fresca				Massa seca				
	Folha	Caule Fino	Caule Grosso	Total	Folha	Caule Fino	Caule Grosso	Total	
	Mg ha ⁻¹								
Com poda ¹	1ª Poda	0,71	0,22	-	0,93	0,14	0,08	-	0,22
	2ª Poda	2,72	1,54	0,89	5,15	0,71	0,99	0,62	2,32
	Coleta Final	7,86	2,73	5,00	15,59	1,34	1,55	3,18	6,07
	Total	11,29a	4,49a	5,89a	21,67a	2,19a	2,62a	3,80a	8,61a
Sem poda	Coleta Final	10,14a	4,09a	6,17a	20,40a	1,72a	2,33a	3,99a	8,04a

¹ Podas realizadas aos seis e doze meses após o transplântio, aos seis meses coletou-se material vegetal acima de 80 cm e aos doze, acima de 60 cm de altura. Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem estatisticamente (P < 0,05) pelo teste de Tukey entre os tratamentos com e sem poda.

Não houve diferença significativa para as produções de biomassa total e das partes fracionadas das plantas podadas e não podadas, o que pode ser atribuído a fatores como tempo de avaliação e alturas de poda. Com relação à segunda hipótese, ao observar os dados de altura da planta (Figura 3), observou-se que um mês após a primeira poda as plantas que sofreram o corte já se aproximavam das não podadas, indicando que a altura base de 80 cm poderia ser reduzida. Essa redução é justificada pelo alto poder de rebrota da Atriplex em campo, apresentado nessa pesquisa.

Quanto ao tempo, caso a coleta final não tivesse ocorrido aos dezesseis meses após o transplântio e, aliado a isso, tivesse ocorrido uma terceira poda, em

avaliação por maior período de tempo, provavelmente a produção de biomassa de plantas podadas superasse a das não podadas. Foi o que ocorreu na pesquisa de Watson & O'Leary (1993), que avaliaram a produção de massa seca da *Atriplex nummularia* em condições de campo, com espaçamento de 0,76 x 2,5 m (5.263 plantas ha⁻¹) e com quatro cortes em alturas de 10-20 cm ao longo de 27 meses de cultivo e encontraram produtividade de 15,6 Mg ha⁻¹, sendo 7,60 Mg ha⁻¹ (48,72%) proveniente da rebrota.

Mesmo sem ter promovido aumento significativo de produção de biomassa, aos dezesseis meses, a adoção da poda pode fornecer forragem de melhor qualidade aos animais durante o ano de cultivo, principalmente por otimizar o surgimento de brotações novas, principalmente folhas e ramos menos lignificados (caule com diâmetro < 3 mm), material de maior palatabilidade pelos animais.

A produção total de massa seca foi 8,61 Mg ha⁻¹, diferindo de Glenn et al. (1998), que cultivaram a *Atriplex nummularia* e obtiveram uma produção de massa seca equivalente a 49,10 Mg ha⁻¹, no entanto, com um espaçamento de 0,6 x 0,6 m (0,36 m²), com densidade de plantio 17,36 vezes superior à utilizada na presente pesquisa, de 2,5 x 2,5 m (6,25 m²). Porto et al. (2006) podaram a *Atriplex nummularia* com um ano de idade em altura superior a 50 cm e obtiveram uma produtividade de massa seca equivalente a 13,82 Mg ha⁻¹ (espaçamento 4 x 4m), enquanto Glenn et al. (2009) obtiveram uma produtividade que variou de 14,00 a 18,00 Mg ha⁻¹ (espaçamento 1,8 x 1,8 m) aos cinco anos de cultivo.

3.3. Potencial de fitorremediação e fator de transferência

A concentração dos elementos avaliados na folha, caule fino e caule grosso das plantas podadas foram semelhantes às não podadas. Observou-se que as plantas podadas apresentaram teores de Ca, Mg, Na, K e Cl de 5,44; 5,01; 107,72; 14,39 e 134,22 g kg⁻¹ de massa seca na folha; 4,81; 1,84; 12,21; 10,10 e 15,47 g kg⁻¹ no caule fino e 2,16; 0,83; 5,82; 5,66 e 7,97 g kg⁻¹ no caule grosso, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 – Teores de Na, Cl, K, Ca e Mg em folha, caule fino (CF) e caule grosso (CG) de plantas de *Atriplex nummularia*, Massa seca de folha, caule fino (CF) e caule grosso (CG). potencial de fitoextração (PF) e fator de transferência (FT) aos dezesseis meses de cultivo em condições de campo com poda e sem poda

	Folha	CF	CG	Folha	CF	CG	PF	FT
	g kg ⁻¹			Biomassa seca			kg ha ⁻¹	
	<u>Sódio</u>			<u>kg há⁻¹</u>				
Com poda	107,72	12,21	5,82	2.190	2.620	3.800	290,00	39,27
Sem poda	108,31	11,23	4,83	1.720	2.330	3.990	231,73	39,49
	<u>Cloro</u>							
Com poda	134,22	15,47	7,97	2.190	2.620	3.800	364,76	14,83
Sem poda	122,50	13,30	7,97	1.720	2.330	3.990	273,49	13,53
	<u>Potássio</u>							
Com poda	14,39	10,10	5,66	2.190	2.620	3.800	79,48	65,41
Sem poda	9,07	6,93	5,90	1.720	2.330	3.990	55,28	41,23
	<u>Cálcio</u>							
Com poda	5,44	4,81	2,16	2.190	2.620	3.800	32,72	5,49
	<u>Magnésio</u>							
Com poda	5,01	1,84	0,83	2.190	2.620	3.800	18,95	18,42
Com poda - Extração total (Ca, Mg, Na, K e Cl)							785,91	

Os potenciais de fitoextração ou a remoção líquida dos elementos pela planta com poda seguiu a ordem Cl (364,76 kg ha⁻¹) > Na (290,00 kg ha⁻¹) > K (79,48 kg ha⁻¹) > Ca (32,72 kg ha⁻¹) > Mg (18,95 kg ha⁻¹), com uma extração total correspondente a 785,91 kg ha⁻¹. Esses resultados indicam que cerca de 93,43% da extração total são dos elementos Cl, Na e K. Essa característica é típica de plantas halófitas que, para sobreviver em ambientes de alta salinidade absorvem e acumulam nas folhas, principalmente nos vacúolos, altas quantidades de sais para diminuir o potencial osmótico e ser capaz de absorver água. Para isso, dispõem de diversos mecanismos fisiológicos ausentes em plantas sensíveis à salinidade (Flowers & Colmer, 2008; Munns & Tester, 2008; Türkan & Demiral, 2009).

O fator de transferência indica a relação de concentração dos elementos na folha pela concentração no solo, sendo encontrados valores de 65,41 para K; 39,27 para Na; 18,42 para Mg; 14,83 para Cl e 5,49 para Ca. Leal et al. (2008), em experimento de casa de vegetação, encontraram valores de fator de transferência para o sódio, em *Atriplex nummularia*, de 60,2, muito superior ao encontrado neste trabalho; contudo, estes autores trabalharam em casa de vegetação e os volumes de solo explorados em vasos são bem inferiores aos de campo. Adicionalmente, neste estudo contabilizou-se o sódio trocável e o solúvel, pela considerável

proporção deste último no solo, diminuindo os valores do fator de transferência de sódio do solo para a folha da planta.

Um fato interessante é a alta afinidade que esta planta apresenta pelo K, considerando-se que, dentre os elementos químicos do solo, este é o que se encontra em menor concentração (Tabela 3), mas foi o de maior valor para o fator de transferência (Tabela 5). Ou seja, a planta concentrou mais potássio que os outros elementos em relação aos teores de cada um deles presentes no solo. Possivelmente, este potássio desempenha papel importante na eficiência do uso da água, característica da *Atriplex*, planta reconhecidamente tolerante ao estresse hídrico.

3. 4. Solo

Um dos principais elementos químicos absorvidos pela planta de *Atriplex nummularia* é o sódio (Flowers et al., 1977; Glenn et al., 1998; Glenn et al., 1999; Watson & O'Leary, 1993; Ravindran et al., 2007; Qadir et al., 2007; Flowers & Colmer, 2008; Leal et al., 2008; Norman et al., 2008; Silveira et al., 2009). Este se encontra na forma trocável (adsorvido eletrostaticamente às cargas negativas dos coloides), como também solúvel, na solução do solo. A eficiência da fitoextração pode ser avaliada pela exportação do sódio e/ou demais elementos formadores de sais pelos tecidos vegetais da *Atriplex* e pela comparação dos teores encontrados no solo antes e após o período de cultivo.

Quando se trabalha em condições controladas, como casa de vegetação e laboratório, e com quantidades de solo reduzidas, a avaliação que leva em consideração os teores de elementos químicos no solo pode ser realizada. No entanto, em condição de campo (sistema aberto) podem ocorrer alguns eventos que dificultem uma interpretação mais eficiente das análises do solo, pela dificuldade de monitoramento de todas as entradas e saídas. Dependendo do tipo de fornecimento de água, seja via irrigação ou somente água de chuva, haverá uma entrada de sais no solo que pode mascarar a interpretação quando se compara os resultados antes e após o cultivo da *Atriplex*. Além de entradas via águas de subsuperfície ricas em sais que podem, por ascensão capilar, contribuir para a reposição dos teores de elementos solúveis e trocáveis nos solos.

Dentre os dados avaliados durante as quatro coletas de solo, desde a implantação do experimento (0 MAT) até aos 6, 12 e 16 MAT, optou-se por apresentar os resultados de sódio trocável e de percentagem de sódio trocável

(Figuras 5 e 6), por serem estas variáveis as melhores indicadoras quanto a presença de sais de sódio no solo. Em virtude da ausência de diferença significativa para a produção de massa seca entre os tratamentos de cultivo com poda e sem poda (Tabela 3), estão sendo apresentados os resultados dos tratamentos de cultivo com poda e de solo não cultivado.

Ao longo dos 16 meses de cultivo observaram-se variações nos valores de sódio trocável e percentagem de sódio trocável em todas as profundidades e distâncias do caule. De um modo geral, houve uma tendência de aumento dessas variáveis entre a primeira coleta – 0 MAT (Setembro de 2008 – após o período chuvoso) e a segunda coleta – 6 MAT (Março de 2009 – após o período de estiagem). Nas terceira e quarta amostragens – 12 MAT (Setembro de 2009) e 16 MAT (Janeiro de 2010) esses valores tendem a ser reduzidos.

Uma das prováveis explicações para esse comportamento é a dinâmica da pluviosidade e do nível do lençol freático (Tabela 1). No ano de 2008, até o mês de setembro (primeira amostragem de solo) foram registrados 437,20 mm de pluviosidade; entre a primeira e segunda amostragens (0 e 6 MAT) a precipitação foi de 108,80 mm; da segunda à terceira e da terceira à quarta amostragens (6 a 12 e 12 a 16 MAT), os valores foram de 149,50 e 236,60 mm, respectivamente.

Como a área de estudo caracteriza-se por ser de relevo plano e estar localizada no centro da microbacia, à medida que houve aumento na precipitação pluvial, o nível do lençol freático aproximou-se mais da superfície, o que pode explicar os baixos valores de sódio trocável e PST no solo coletado nestes períodos (Figuras 5 e 6).

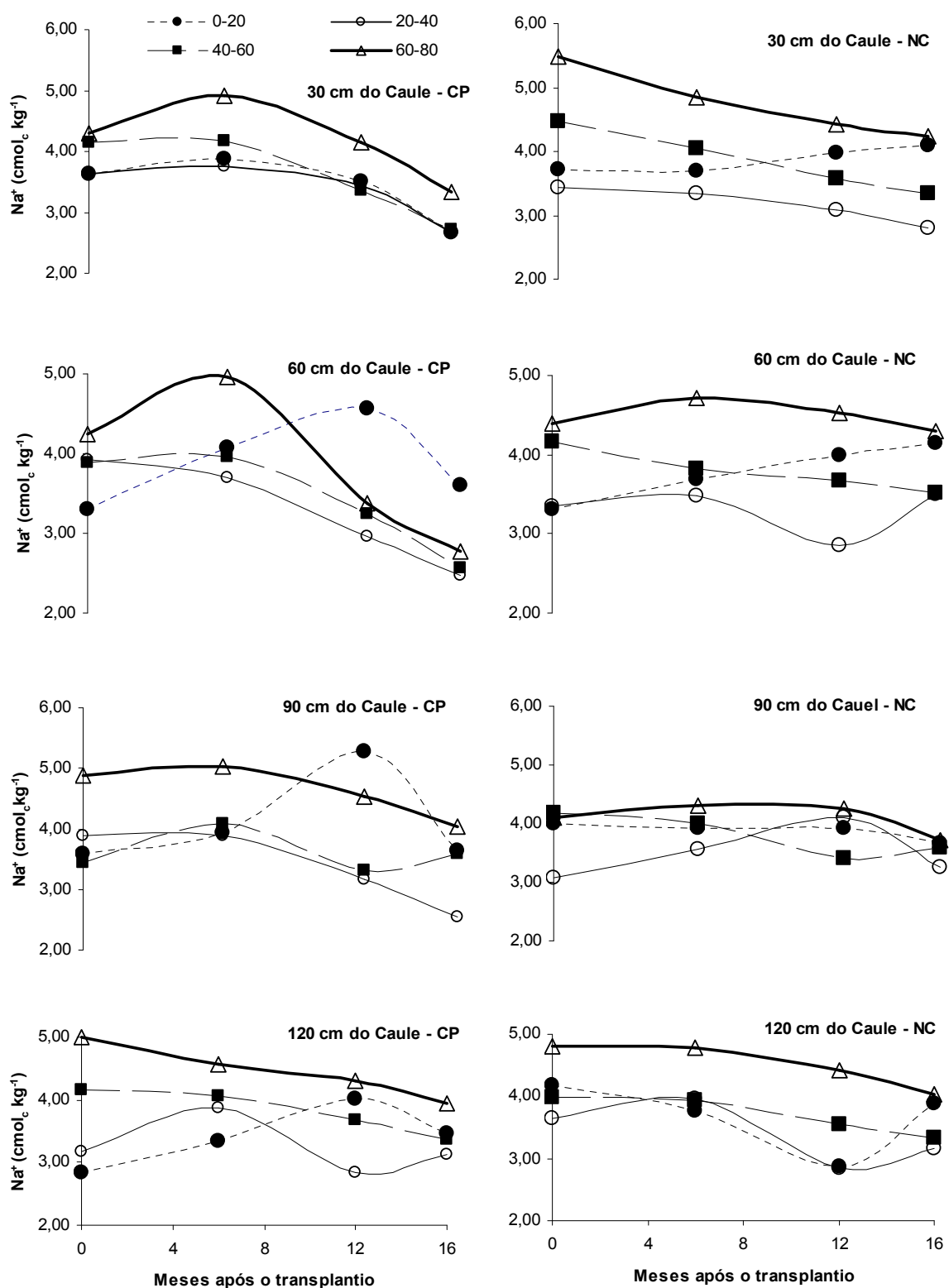


Figura 5. Sódio trocável do solo das coletas realizadas aos 0, 6, 12 e 16 MAT nas distâncias de 30, 60, 90 e 120 cm do caule e profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, sob cultivo com poda (CP) e solo não cultivado (NC).

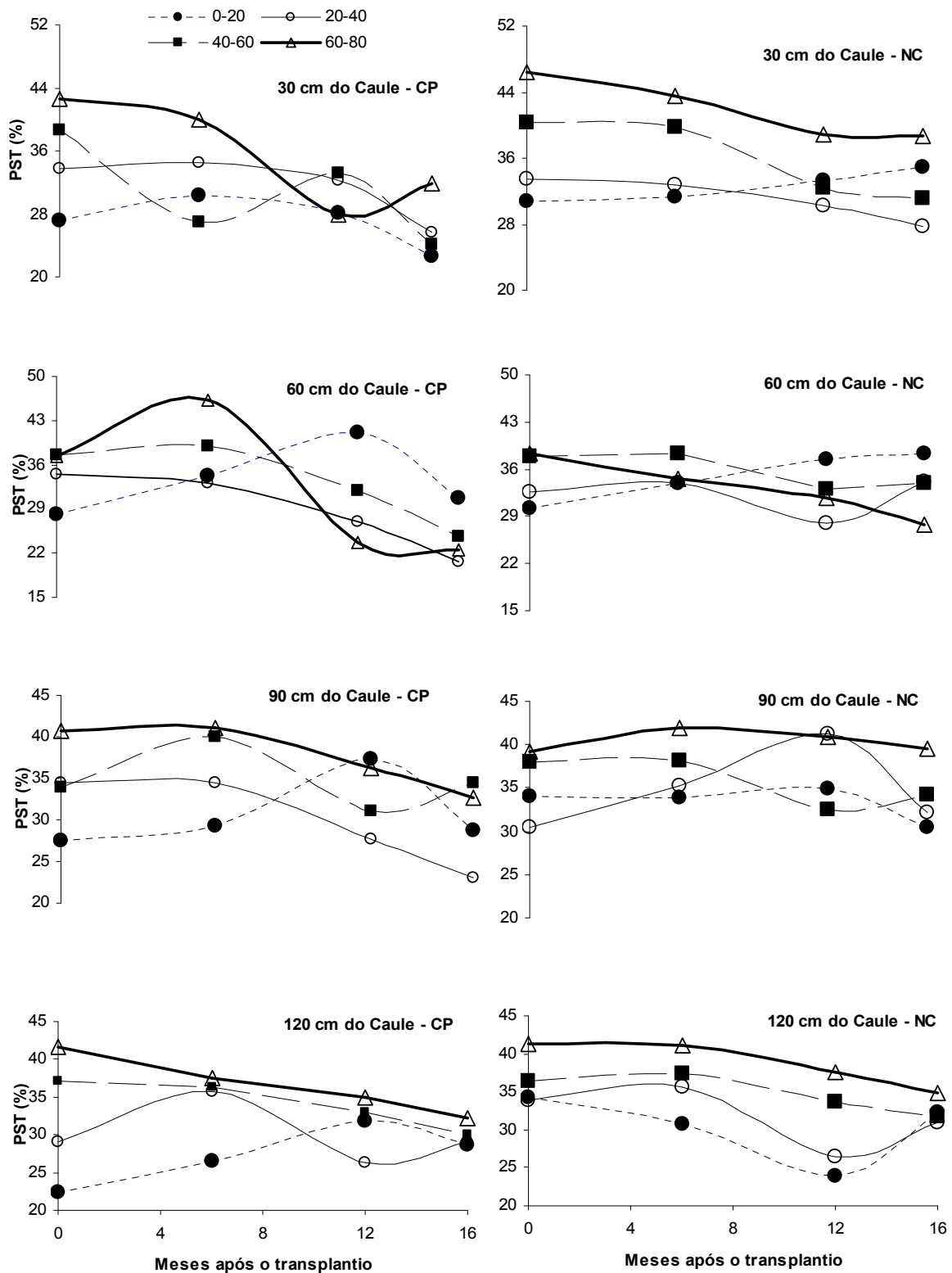


Figura 6. Percentagem de sódio trocável do solo das coletas realizadas aos 0, 6, 12 e 16 MAT nas distâncias de 30, 60, 90 e 120 cm do caule e profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, sob cultivo com poda (CP) e solo não cultivado (NC).

A proximidade entre as parcelas dentro da área, sob a influência do lençol freático, também pode ser o motivo de não terem sido observadas diferenças entre o tratamento com (CP) e sem cultivo (NC) da *Atriplex* (Figuras 5 e 6).

Devido a sazonalidade das precipitações pluviais, altas taxas de evapotranspiração, mudanças periódicas no nível do lençol freático e também elevados teores de bases trocáveis e solúveis, não foi possível evidenciar uma diminuição dos teores de sais durante o período de condução do experimento com o cultivo da *Atriplex*. Akhter et al. (2003) conduziram pesquisa em solo com característica físico-químicas semelhantes a esta pesquisa avaliando a performance da gramínea kallar grass [*Leptochloa fusca* (L.) Kunth] durante cinco anos de cultivo, com três a quatro podas por ano. A salinidade do solo, a sodicidade e o pH decresceram exponencialmente. Esses efeitos amenizantes no ambiente químico foram pronunciados após três anos de cultivo. Observou-se, ainda, o crescimento de novas espécies vegetais durante este período, evidenciando a sustentabilidade do cultivo de plantas tolerantes aos sais, promovendo a melhoria das condições deste ambiente inóspito ao desenvolvimento de outros organismos vivos, animais e vegetais. Além disso foram verificados aumentos significativos nos teores de matéria orgânica.

Estes mesmo autores, em ano subsequente (Akhter et al., 2004), relataram benefícios para a parte física do solo cultivado com a gramínea, como aumento na água disponível, na condutividade hidráulica, porosidade, retenção de água e melhoria na estrutura do solo.

Ainda com relação ao tempo de condução e o uso de plantas fitoextratoras de sais, Ghaly (2002) avaliou a capacidade de recuperação de um solo afetado por sais cultivando as gramíneas *Phragmites communis* e *Panicum repens* comparando-as com tratamentos de lixiviação e aplicação de gesso durante dois anos em condição de campo. O autor concluiu que as duas gramíneas reduziram a salinidade e alcalinidade na camada de 50 cm mais do que a lixiviação e a aplicação do gesso. Percebe-se através dessas duas pesquisas, uma com cinco anos de condução e a última com dois anos, que se faz necessário um longo período de monitoramento para se detectar diminuição dos teores de sais.

Já Cabral (1998) avaliou a influência das halófitas do gênero *Atriplex* na salinidade e sodicidade do solo no município de São Bento do Una – PE em três sub-áreas (sem cultivo de *Atriplex*, cultivo de *Atriplex nummularia*, cultivo de *Atriplex undulata*) com espaçamento de 5 x 5 m. As amostragens iniciaram-se aos dois anos

de idade para a *Atriplex nummularia* e 3 meses para a *Atriplex undulata* em profundidades variando de 0 a 120 cm em pontos localizados a 0,5; 1,0; 1,5 e 2,0 m do caule da planta. Verificou-se através desse estudo que a *Atriplex nummularia* foi eficiente no processo de ciclagem do sódio e contribuiu para maior retenção de umidade do solo.

Ainda com relação à eficiência do uso de plantas em ambientes salinos, Qadir et al (2003) testaram a recuperação de um solo salino sódico usando gesso e alfafa como espécie fitoextratora em experimento de coluna com lixiviação, concluindo que a performance dessas duas técnicas foi semelhante. No entanto, grande quantidade do sódio saiu do sistema através da lixiviação.

Ravindram et al. (2007), avaliando a recuperação de um solo salino na Índia, constataram que as espécies halófitas *Suaeda maritima* e *Sesuvium portulacastrum* removeram 504 e 474 kg ha⁻¹ de cloreto de sódio em quatro meses, respectivamente. Houve ainda uma redução significativa da condutividade elétrica do extrato de saturação na camada de 0-40 cm. No entanto, estes autores não avaliaram a solução lixiviada e uma possível remoção de sais pela mesma.

Um ponto a ser discutido nesses trabalhos citados acima é a necessidade de uma caracterização mais detalhada quanto ao regime pluvial das regiões de estudo, presença de sistema de drenagem, lâmina e qualidade de água utilizada, condições de relevo, presença e níveis do lençol freático, para que se possa efetuar uma interpretação adequada do processo de fitorremediação.

Os dados de condutividade elétrica do extrato de saturação (Figura 7) e sódio solúvel (Figura 8) do solo sob os dois tratamentos (CP e NC), embora com apenas três amostragens, mostram a mesma variação que ocorreu para sódio trocável (Figura 5) e percentagem de sódio trocável (Figura 6).

É importante salientar que os solos salino sódicos, na maioria das vezes, apresentam baixa permeabilidade à água, o que dificulta a aplicação de lâminas de lixiviação para sua recuperação. Portanto, o cultivo de plantas tolerantes a salinidade, como as halófitas, melhoram a estrutura do solo e a permeabilidade da água através da penetração das raízes (Akhter et al., 2003).

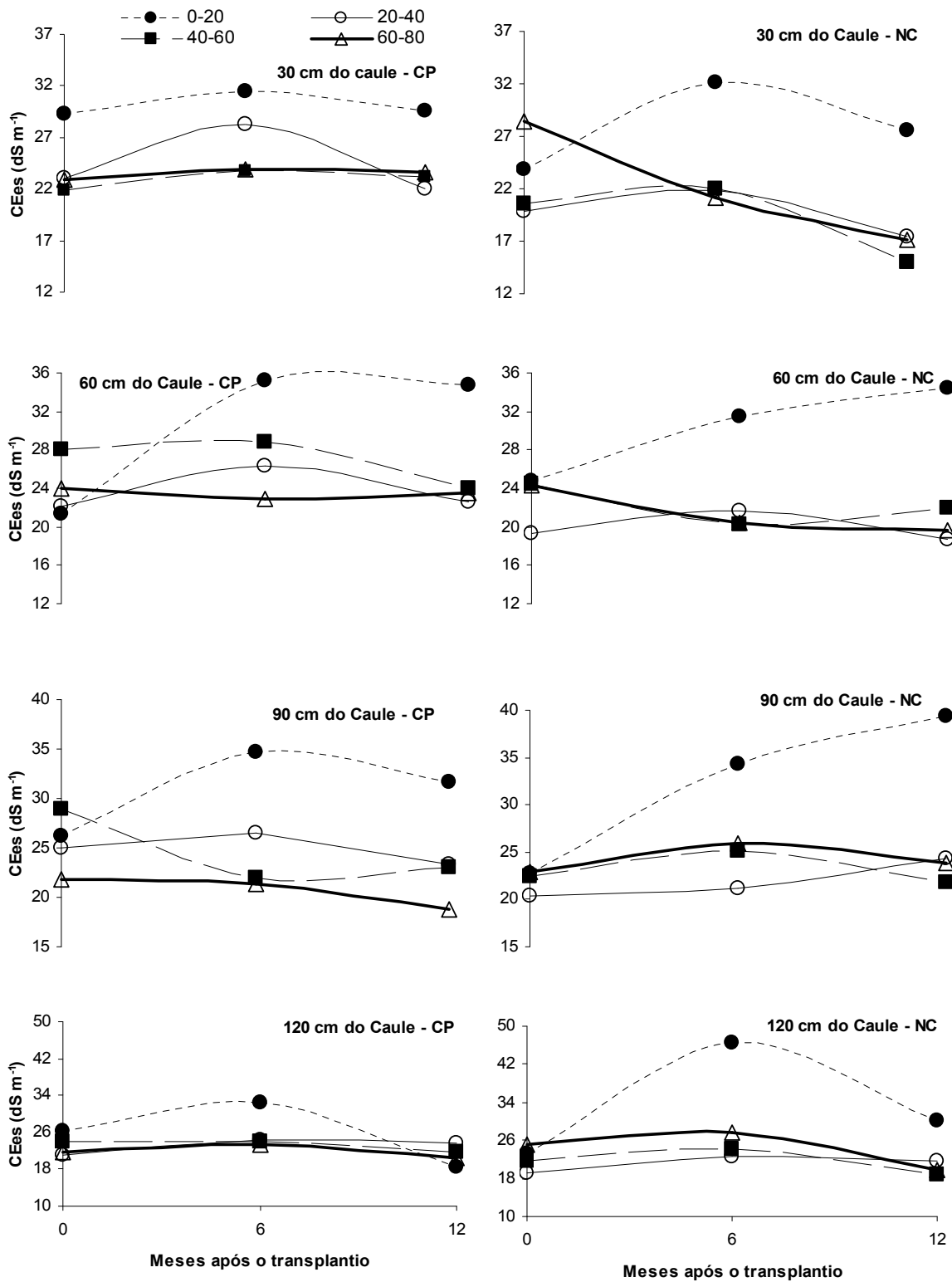


Figura 7. Condutividade elétrica (dS m⁻¹) do extrato de saturação do solo das coletas realizadas aos 0, 6 e 12 MAT nas distâncias de 30, 60, 90 e 120 cm do caule e profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, sob cultivo com poda (CP) e solo não cultivado (NC).

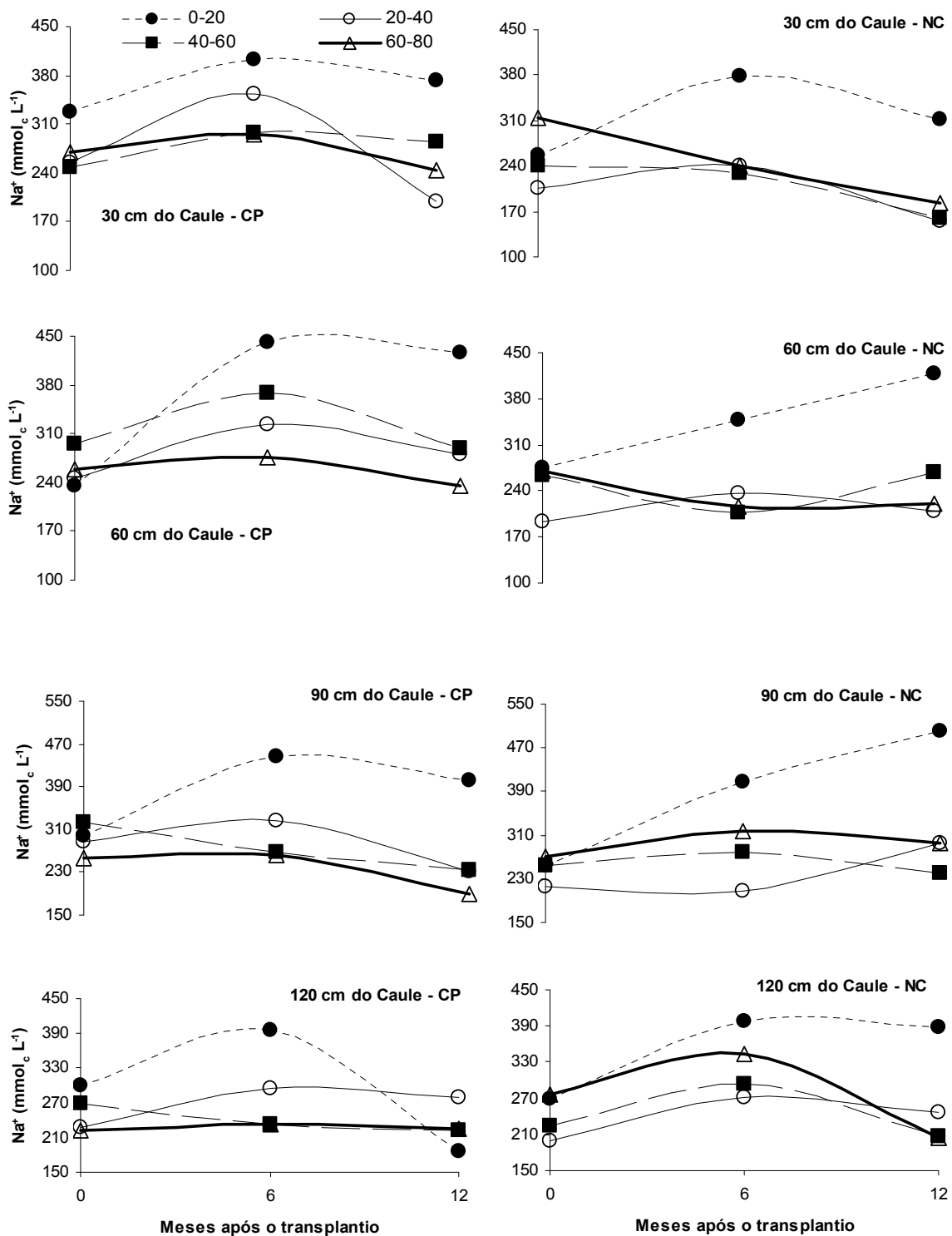


Figura 8. Sódio solúvel ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$) do extrato de saturação do solo das coletas realizadas aos 0, 6 e 12 MAT nas distâncias de 30, 60, 90 e 120 cm do caule e profundidades de 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, sob cultivo com poda (CP) e solo não cultivado (NC).

Por outro lado, quando se avalia a concentração de sais nos tecidos das plantas coletadas ao final do ciclo ou durante as podas, é possível quantificar a extração de sais exclusivamente pelas plantas. No caso da *Atriplex nummularia* isso pode causar um esforço maior por parte dos pesquisadores devido ao tamanho que essas plantas alcançam, bem como à grande quantidade de folhas com reduzido tamanho, já que se recomenda que a planta seja fracionada em folhas, caules tenros e caules mais lignificados, em virtude da variação da alocação de sais em cada uma dessas frações. Deste modo, a avaliação da fitorremediação na extração de sais seria mais recomendada através dos sais exportados pela biomassa, principalmente em experimentos em condição de campo com variação em regime pluviométrico, nível freático e relevo.

4. Conclusões

a) Apesar da não ocorrência de diferença significativa da produção de massa seca entre as plantas podadas e não podadas, o regime de poda se mostrou eficiente, principalmente pelo fato de estimular a rebrota de material menos lignificado (folhas, caule com diâmetro < 3 mm), de maior palatabilidade para os animais;

b) Através dos valores de potencial de fitoextração e fator de transferência é possível ratificar a capacidade de extração de determinados elementos, principalmente sódio, cloreto e potássio, e recomendar o cultivo desta halófito em solos afetados por sais;

c) Não foi possível detectar no solo reduções nos teores de sódio trocável, percentagem de sódio trocável, condutividade elétrica do extrato de saturação e sódio solúvel com *Atriplex nummularia* cultivada por 16 meses em campo.

5. Referências Bibliográficas

ACCIOLY, M. A. A. & SIQUEIRA, J. O. Contaminação química e biorremediação do solo. In: Novais, R. F.; Alvarez V., Schaefer, C.E. (Eds). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Volume I. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa: UFV, 2000. p. 299-352.

AKHTER, J., MAHMOOD, K., MALIK, K. A., AHMED, S. & MURRAY, R. Amelioration of a saline sodic soil through cultivation of a salt-tolerant grass. *Leptochloa fusca*. Environmental Conservation. 30:168–174, 2003.

AKHTER, J.; MURRAY, R.; MAHMOOD, K.; MALIK, K.A. & AHMED, S. Improvement of degraded physical properties of a saline-sodic soil by reclamation with kallar grass (*Leptochloa fusca*). Plant and Soil 258: 207–216, 2004

ARAÚJO, R. F. S. S. Avaliação nutricional e função renal de ovinos alimentados com feno de erva-sal (*Atriplex nummularia* L) e farelo de milho em substituição a palma forrageira (*Opuntia ficus-indica* mill). Recife: UFRPE, 2009. 46p. Dissertação de Mestrado

BENNETT, S. J.; BARRETT-LENNARD, E. G. & COLMER, T. D. Salinity and waterlogging as constraints to saltland pasture production: A review. Agriculture, Ecosystems and Environment, 129: 349–360, 2009.

BEN SALEM, H.; NORMAN, H.C. ; NEFZAOU, A.; MAYBERRY, D.E.; PEARCE, K.L. & REVELL, D.K. Potential use of oldman saltbush (*Atriplex nummularia* Lindl.) in sheep and goat feeding. Small Ruminant Research. doi:10.1016/j.smallrumres.2009.10.017, 2010

CABRAL, C. D. G. Dinâmica da salinidade no sistema solo-planta sob cultivo de *Atriplex* spp. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Ciência do Solo, 80 f. UFRPE. 1998.

CHHABRA, R. Soil salinity and water quality. Rotterdam, A. A. Balkema Publishers, 1996. 283 p.

CORRÊA, M. M. & RIBEIRO, M. R. Levantamento detalhado de solos da Fazenda Nossa Senhora do Rosário. Recife, UFRPE/UFPE/CNPq/BNB, 2001. (Relatório de Projeto).

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FLOWERS, T. J.; TROKE, P. F. YEO, A. R. The mechanism of salt tolerance in halophytes. *Annual Review of Plant Physiology*, 28:89-121, 1977.

FLOWERS, T. J.; COLMER, T. D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, 179:945-963, 2008.

GHALY, F. M. Role of natural vegetation in improving salt affected soil in northern Egypt. *Soil Tillage Research*, 64:173–178, 2002.

GLENN, E.; TANNER, R.; MIYAMOTO, S.; FITZSIMMONS, K. & BOYER, J. Water use, productivity and forage quality of the halophyte *Atriplex nummularia* grown on saline waste water in a desert environment. *Journal of Arid Environmental*, 38: 45–62, 1998.

GLENN, E. P.; BROWN, J. J. & BLUMWALD, E. Salt tolerance and crop potential of halophytes. *Critical Reviews in Plant Sciences*, v.18, p. 227–255, 1999.

GLENN, E. P.; MCKEON, C.; GERHART, V.; NAGLER, P. L.; JORDAN, F. & ARTIOLA, J. Deficit irrigation of a landscape halophyte for reuse of saline waste water in a desert city. *Landscape and Urban Planning*, 89: 57–64, 2009.

KOS, B., GRČMAN, H. & LEŠTAN, D. Phytoextraction of lead, zinc and cadmium from soil by selected plants. *Plant Soil Environment*, 49:548–553, 2003

LEAL, I. G.; ACCIOLY, A. M. A.; NASCIMENTO, C. W. A.; FREIRE, M. B. G. S.; MONTENEGRO, A. A. A. & FERREIRA, F. L. Fitorremediação de solo salino sódico

por *Atriplex nummularia* e gesso de jazida. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 32: 1065-1072, 2008.

LE HOUÉROU, H. N. The role of saltbushes (*Atriplex* spp.) in arid land rehabilitation in the Mediterranean basin: a review. Agroforestry Systems. 18:107–148, 1992.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. & OLIVEIRA, S.A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 219p.

MASTERS, D. G.; BENES, S. E. & NORMAN, H. C. Biosaline agriculture for forage and livestock production. Agriculture, Ecosystems and Environment, 119: 234–248, 2007.

MATTOS, C. W. Associação de palma forrageira (*opuntia ficus-indica* Mill) e feno de erva-sal (*Atriplex nummularia* L.) em dietas para cordeiros Santa Inês em confinamento. Recife: UFRPE, 2009, 101 p. Tese de doutorado.

MONTENEGRO, S. G.; MONTENEGRO, A. & RAGAB, R. Improving agricultural water management in the semi-arid region of Brazil: experimental and modelling study. Irrigation Science, 2009. DOI 10.1007/s00271-009-0191-y

MUNNS, R. & TESTER, M. Mechanisms of Salinity Tolerance. Annual Review of Plant Biology, 59: 651–81, 2008.

NASCIMENTO, C. W. A.; ACCIOLY, A. M. A. & BIONDI, C. M. Fitoextração de metais pesados em solos contaminados: Avanços e perspectivas. In: Ribeiro, M. R. et al. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. v. VI. 497p.

NORMAN, H. C.; MASTERS, D. G.; WILMOT, M. G. & RINTOUL, A. J. Effect of supplementation with grain, hay or straw on the performance of Weaner Merino sheep grazing old man (*Atriplex nummularia*) or river (*Atriplex Amnicola*) saltbush. Grass and forage Science, 63: 179-192, 2008.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C. & SILVA JÚNIOR, L. G. de A. Uso do rejeito da dessalinização de água salobra para irrigação da erva-sal (*Atriplex nummularia*). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 5:111-114, 2001.

PORTO, E. R.; AMORIM, M. C. C.; DUTRA, M. T.; PAULINO, R. V.; BRITO, L. T. L. & MATOS, A. N. B. Rendimento da *Atriplex nummularia* irrigada com efluentes da criação de tilápia em rejeito da dessalinização de água. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, 10: 97-103, 2006.

QADIR, M., STEFFENS, D., YAN, F., AND SCHUBERT, S. Sodium removal from a calcareous saline-sodic soil through leaching and plant uptake during phytoremediation. Land Degradation & Development. 14:301–307, 2003.

QADIR, M.; OSTER, J.D.; SCHUBERT, S.; NOBLE, A.D. & SAHRAWAT, K.L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. Advances in Agronomy, 96: 197-247, 2007.

RAVINDRAM, K. C.; VENKATESAN, K.; BALAKRISHNAN, V. CHELLAPPAN, K. P. & BALASUBRAMANIAN, T. Restoration of saline land by halophytes for Indian soils. Soil Biology & Biochemistry, 39:2661-2664, 2007.

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

SILVA, F. C., ed. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2 ed. Brasília, DF: Embrapa Informação tecnológica, 2009. 627p.

SILVEIRA, J. B. A.; ARAÚJO, S. A. M.; LIMA, J. P. M. S.; VIÉGAS, R. A. Roots and leaves display contrasting osmotic adjustment mechanisms in response to NaCl-salinity in *Atriplex nummularia*. Environmental and Experimental Botany, 66:1–8, 2009.

SOUTO, J. C. R; ARAUJO, G. G. L.; SILVA, D. S.; PORTO, E. R.; TURCO, S. H. N. & MEDEIROS, A. N.; Desempenho produtivo de ovinos alimentados com dietas

contendo níveis crescentes de feno de erva sal (*Atriplex nummularia* Lindl.). *Revista de Ciências Agronômicas*, 36: 376-381, 2005.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. *In*: Page, A. L. (ed). *Methods of soil analysis. Part-2 chemical methods*. Madison: American Society of Agronomy, 1982, p.159-165.

TÜRKAN, I. & DEMIRAL, T. Recent developments in understanding salinity tolerance. *Environmental and Experimental Botany*, 67: 2–9, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA – UFV. SAEG 9.1: Sistema de Análises Estatística. Viçosa, MG: Fundação Arthur Bernardes, 2007. (CD-ROM).

WATSON, M. & O'LEARY, J. Performance of *Atriplex* species in the San Joaquin Valley, California, under irrigation and with mechanical harvests. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 43: 255–266, 1993.

YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science Plant Analysis*, 19:1467-1476, 1988.

Considerações Finais

De acordo com os resultados do experimento conduzido em casa de vegetação, adotando diferentes níveis de umidade do solo durante um período de quatro meses e meio com o cultivo de *Atriplex nummularia* em solo salino sódico oriundo de uma região com focos de ocorrência de solos afetados e por sais; e do monitoramento do solo e do crescimento, produção e extração de sais da mesma espécie em condição de campo por um período de dezesseis meses, é possível recomendar o uso desta halófita em programas de recuperação de solos salinos e sódicos, especialmente pela sua capacidade extratora de sais, produção de biomassa e possibilidade de revegetação de áreas inóspitas a maioria das espécies agrícolas convencionais. Quanto ao regime de umidade, a *Atriplex* respondeu a tal variável em condições controladas, mas é de grande importância avaliar a qualidade e as lâminas de água a serem aplicadas no cultivo, para que não ocorram incrementos na salinidade do solo. Outro ponto que se deve considerar é o cultivo em solos com características distintas, tanto em textura como concentração de sais.

O tempo de recuperação de um solo salino sódico vai depender da capacidade extratora da *Atriplex*, que se mostrou eficiente nesses experimentos, mas principalmente pela maximização da biomassa, que pode ser conseguida por um manejo baseado na redução do espaçamento (aumento da densidade de plantio) e aumento do número de cortes a menores alturas dos que os relatados nesta pesquisa.

As recomendações para trabalhos futuros devem se orientar em testar diferentes espaçamentos, como: 1 x 1 m (10.000 plantas ha⁻¹); 1,5 x 1,5 m (~ 4.444 plantas ha⁻¹) e 2,0 x 2,0 m (2.500 plantas ha⁻¹); tempos de poda após o transplântio: a cada seis meses, como o adotado nesse trabalho, mas deixando a planta em campo por um maior período, para que a extração de sais seja maximizada. As alturas de poda, em virtude da capacidade de rebrota da *Atriplex* podem ser reduzidas para 40-50 cm, indicando-se também testar alturas menores. Outra observação que pode ser fornecida é com relação ao tipo de poda, vertical ou ramos laterais. Pelo que foi observado nessa pesquisa, antes de um ano de cultivo as copas das plantas já apresentavam diâmetro maior que 1 metro, podendo-se reduzi-lo efetuando-se a poda dos ramos laterais, o que não foi testado nesse trabalho, mas que seria viável quando se cogita a diminuição do espaçamento.

Enfim, pesquisas futuras avaliando esses e outros fatores possibilitariam o desenvolvimento e estabelecimento de técnicas de manejo adequadas à recuperação de solos afetados por sais por fitoextração com *Atriplex nummularia* aplicadas às condições de solo e clima do Brasil, como vem ocorrendo em outros países. Isso permitiria o retorno de áreas atualmente alijadas do processo produtivo no semiárido, bem como o aumento da cobertura vegetal em solos degradados, contribuindo para a melhoria da capacidade produtiva dos solos, aumento da captação de água via infiltração, além do sequestro de carbono em solos atualmente sem cobertura vegetal.