



Dinâmica de íons em solo salino-sódico sob fitorremediação com *Atriplex nummularia* e aplicação de gesso¹

Monaliza A. dos Santos², Maria B. G. dos S. Freire², Brivaldo G. de Almeida²,
Cíntia M. T. Lins² & Emanuelle M. da Silva²

RESUMO

Desenvolveu-se este trabalho em um Cambissolo salino sódico do Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, PE, com o objetivo de avaliar a dinâmica de cátions e ânions básicos em um solo salino sódico submetido a fitorremediação com *Atriplex nummularia* e correção com aplicação de gesso. Realizaram-se amostragens semestrais com quatro coletas de solo (0, 6, 12 e 18 meses). O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso avaliando-se quatro tratamentos: controle (sem nenhum manejo do solo), correção química com gesso (sem cultivo) e dois com cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl (espaçamentos 1 x 1 m e 2 x 2 m), com quatro repetições. Os resultados das análises do solo revelaram a contribuição da aplicação de gesso, especialmente do cultivo de plantas de atriplex na redução dos teores de sais no solo.

Palavras-chave: solos afetados por sais, erva-sal, corretivo químico

Dynamics of ions in saline-sodic soil under phytoremediation with *Atriplex nummularia* and gypsum applications

ABSTRACT

The study was conducted in a saline-sodic Inceptisol from the Cachoeira II Irrigation Perimeter, Serra Talhada (PE), with the objective of evaluating the dynamics of basic cations and anions in a saline-sodic soil subjected to phytoremediation with *Atriplex nummularia* and correction with application of gypsum. Samples were taken every six months, at four times (0, 6, 12 and 18 months). The experimental design was in randomized blocks, the four treatments evaluated were: control (without any management practice), chemical correction with gypsum (no crop) and two *Atriplex nummularia* cultivation (1 x 1 m and 2 x 2 m plant spacing), with four replications. The results of soil analysis revealed the contribution of gypsum application and especially the cultivation of Atriplex plants in reducing the levels of salts in the soil.

Key words: salt affected soils, saltbush, chemical amendment

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Ciências do solo, com bolsa da CAPES

² DEPA/UFRPE. R. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320.6241. E-mail: alves.monaliza@yahoo.com.br; betania@depa.ufrpe.br; brivaldo@depa.ufrpe.br

INTRODUÇÃO

A exploração dos recursos naturais não é apenas recorrente haja vista que está em elevado grau de crescimento constituindo-se, portanto, em um dos fatores negativos fomentadores da depleção da diversidade biológica. Entre os inúmeros processos responsáveis pelo desequilíbrio do meio ambiente, aqueles que contaminam o solo figuram como os principais. Existe uma variedade de agentes de contaminação entre os quais estão os sais, que ocorrem em excesso predominantemente nas regiões áridas e semiáridas.

A salinização pode ser uma das consequências da ausência de um manejo correto da irrigação e de um sistema de drenagem funcional, processo que traz significativas e complexas alterações nas regiões agrícolas, sobretudo em perímetros irrigados do semiárido nordestino.

De maneira geral, solos que apresentam grande quantidade de sais impossibilitando o desenvolvimento adequado da maioria das culturas, são considerados solos salinos. Os sais em excesso Nessosolos e na água de irrigação, por exemplo, prejudicam o comportamento germinativo, vegetativo e produtivo das plantas pela ação direta sobre o potencial osmótico e íons potencialmente tóxicos (Gonçalves et al., 2011). Os sais solúveis predominantes nos solos salinos são cloretos, sulfatos e bicarbonatos de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} (Qadir et al., 2007; Holanda et al., 2010).

É importante conhecer a concentração dos diversos íons envolvidos em ambientes salinos e suas relações, já que o efeito prejudicial de alguns íons sobre o solo e as plantas é mais intenso que em outros. Juntos, o fator clima, as características do solo, seu manejo e a atividade das plantas forneceram subsídios conclusivos para a dinâmica dos íons no meio.

A importância da preservação da biodiversidade justifica a existência de uma gestão eficiente dos recursos naturais primando pela sua sustentabilidade. Segundo Freire & Freire (2007), as áreas salinas e sódicas só deixarão de se expandir no Brasil quando houver maior preocupação com os efeitos da irrigação sobre a capacidade produtiva dos solos, com a adoção de práticas de manejo adequadas para evitar a salinização de locais ainda não afetados pelo problema e também com a melhoria das condições dos solos já afetados.

O uso dos solos degradados pela salinização na agricultura não pode ser negligenciado sendo necessário desenvolver técnicas ambiental e economicamente viáveis para sua remediação possibilitando seu retorno ao uso agrícola produtivo (Qadir et al., 2007; Bennett et al., 2009). Diante da necessidade de produção agrícola e dos altos investimentos exigidos pelo processo convencional de recuperação, a fitorremediação surge como uma alternativa de baixo custo para recuperação de solos salinos, não agressiva ao ambiente, podendo propiciar a reabilitação de tais solos (Leal et al., 2008). A *Atriplex nummularia* Lindl. torna-se relevante neste contexto uma vez que pode atuar na recuperação de solos afetados por sais, dos quais pode extrair grandes quantidades (Souza et al., 2011).

Queiroz et al. (2010) afirmam que em solos salinos as propriedades químicas e físicas têm grande variabilidade espacial e temporal natural, em virtude das influências

das práticas de manejo utilizadas, profundidade do lençol freático, permeabilidade do solo, taxa de evapotranspiração, chuvas, salinidade da água subterrânea e outros fatores geohidrológicos. Em adição a este comentário Santos et al. (2010) também destacam a elevada heterogeneidade química dos solos salinizados.

O objetivo do trabalho foi avaliar a dinâmica de cátions e ânions básicos em um solo salino sódico submetido a fitorremediação com *Atriplex nummularia* e correção com aplicação de gesso.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no período de fevereiro de 2010 a agosto de 2011 totalizando dezoito meses. A implantação foi feita em solo salino-sódico no lote 4-D do Perímetro Irrigado Cachoeira II, localizado nas coordenadas geográficas: 7° 58' 54" a 8° 01' 36" de Latitude Sul e 38° 18' 24" a 38° 21' 21" de Longitude Oeste município de Serra Talhada, PE, mesorregião do Sertão do Alto Pajeú.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima é do tipo BShw (BSH - clima seco de estepes de baixas latitudes; w = com chuvas de verão retardadas para o outono) (DNOCS, 1999).

O solo da área experimental foi classificado como Cambissolo Flúvico conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006) encontrando-se em elevado grau de salinização e sodificação.

Os tratamentos foram dispostos em delineamento experimental em blocos ao acaso com quatro repetições. Em cada bloco foram montadas parcelas experimentais de 36 m² (6 x 6 m), com parcela útil de 4 m² (2 x 2 m). Nos tratamentos de fitorremediação foram utilizadas mudas de *Atriplex nummularia* Lindl com idade de 90 dias e cerca de 30 cm de altura, tendo sido propagadas por estaquia de uma única planta matriz em substrato preparado a partir de composto orgânico e areia (1:1). No tratamento com cultivo de atriplex no espaçamento 1 x 1 m a parcela foi montada com 36 plantas definindo-se, como parcela útil, as quatro plantas centrais e no tratamento com as plantas espaçadas 2 x 2 m a parcela total foi composta de nove plantas com a parcela útil contendo uma planta central.

No tratamento de correção química com aplicação de gesso a necessidade de aplicação do corretivo foi de 13,89 Mg ha⁻¹, calculada segundo Freire & Freire (2007) pela expressão: $NG = [(PSTi - PSTf \times CTC \times 86 \times h \times d)]/100$, a partir dos dados das análises de caracterização de amostra do solo tomada antes da montagem do experimento. O tratamento testemunha foi mantido sem nenhum manejo.

As coletas de solo foram realizadas a uma distância lateral de 0,5 m em relação ao caule da planta central, no espaçamento 2 x 2 m. No espaçamento 1 x 1 m a coleta das amostras de solo também foi feita a 0,5 m do caule. Para os tratamentos gesso e controle, como não havia plantas cultivadas o centro da parcela serviu como referência para as distâncias do caule sendo as amostragens de solo realizadas também na parcela útil.

Foram realizadas quatro amostragens: no momento da montagem do experimento (fevereiro de 2010), aos seis (agosto de 2010), doze (fevereiro de 2011) e dezoito (agosto de 2011) meses de montagem do experimento. A coleta foi realizada

em quatro diferentes profundidades no perfil de solo: na crosta superficial (2 mm) e nas camadas de 0-10, 10-30 e 30-60 cm.

Para o monitoramento da dinâmica dos íons foi realizada a determinação dos cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} e K^{+}), extraídos com acetato de amônio 1 mol L^{-1} a pH 7,0 (Thomas, 1982), sendo Na^{+} e K^{+} dosados por fotometria de chama e Ca^{2+} e Mg^{2+} por espectrofotometria de absorção atômica (USSL Staff, 1954).

Para a avaliação da solução do solo foi preparada a pasta de saturação e no extrato obtido foram realizadas as determinações dos íons Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} e K^{+} , Cl^{-} , CO_3^{2-} e HCO_3^{-} solúveis (USSL Staff, 1954).

A análise granulométrica fundamentou-se na quantificação dos teores das frações primárias do solo, determinados por metodologia proposta por Ruiz (2005) (Tabela 1).

Tabela 1. Composição granulométrica (n = 64 amostras) e classe textural do solo da área experimental

Prof. (cm)	Composição granulométrica			Silte	Argila total	Classe textural
	Grossa	Fina	Total			
			g kg^{-1}			
0-5	61,89	463,88	525,77	377,90	96,33	Franco arenoso
15-20	54,39	432,42	493,73	374,38	131,89	Franco arenoso
40-45	65,76	392,54	458,30	360,46	181,24	Franco arenoso
75-80	59,32	354,39	413,71	381,71	204,59	Franco

Os dados pluviométricos do período de condução do experimento foram coletados na estação climatológica do IPA (Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária), próxima à área experimental (Figura 1).

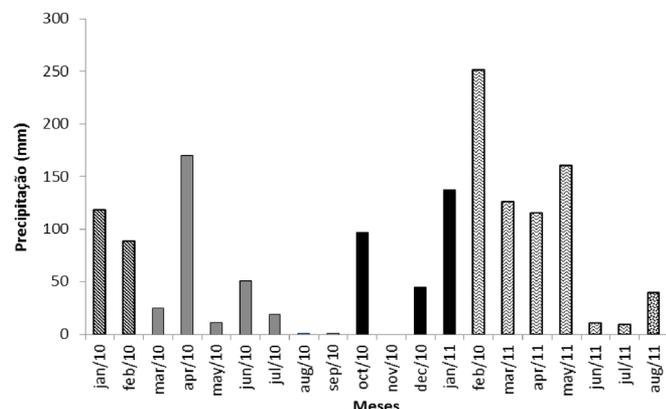


Figura 1. Médias de precipitação mensal registradas nas proximidades da área experimental durante o experimento (IPA, 2011)

As variáveis avaliadas foram submetidas à análise da variância em função dos fatores tratamento, tempo e profundidade considerando-se os que foram significativos. As médias das variáveis significativas foram submetidas ao teste de Tukey ($P < 0,05$) utilizando-se o software SAEG 9.1 (UFV, 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Variações foram observadas ao longo do estudo com oscilações nos valores das variáveis estudadas nas épocas de

avaliação (Tabelas 2, 3 e 4). De modo geral, os valores dos íons trocáveis e solúveis assumiram uma mesma tendência de redução na área, no período de fevereiro de 2011, exceto para os teores de sódio trocável no tratamento controle, onde a concentração foi crescente (Tabela 2). A incidência de chuva ocorrida nos períodos chuvosos antagoniza ao padrão do clima local pode ter causado redução nos teores dos íons devido ao efeito de diluição na solução do solo.

Tabela 2. Teores médios de Na^{+} , K^{+} , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis e capacidade de troca de cátions (CTC) no solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* Lindl nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
	Na^{+} (cmol _c kg^{-1})			
Controle	3,83 A	3,85 A	5,11 A	7,30 A
Gesso	4,78 A	4,53 A	4,03 A	4,00 AB
Atriplex (1 x 1)	5,95 A	2,98 A	2,97 B	3,12 B
Atriplex (2 x 2)	4,61 A	2,90 A	2,20 B	3,23 B
CV (%)	44,69 A	58,33 A	52,59 A	52,90 A
	K^{+} (cmol _c kg^{-1})			
Controle	0,26 A	0,17 A	0,12 A	0,53 A
Gesso	0,28 A	0,15 A	0,11 A	0,21 A
Atriplex (1 x 1)	0,37 A	0,14 A	0,23 A	0,44 A
Atriplex (2 x 2)	0,32 A	0,14 A	0,20 A	0,24 A
CV (%)	31,00	105,18	73,44	228,86
	Ca^{2+} (cmol _c kg^{-1})			
Controle	2,02 A	1,21 B	1,12 B	1,64 B
Gesso	2,25 A	1,81 AB	1,87 A	3,08 A
Atriplex (1 x 1)	2,07 A	1,52 AB	0,96 B	2,41 AB
Atriplex (2 x 2)	2,24 A	2,35 A	1,08 B	2,35 AB
CV (%)	25,74	54,29	41,99	64,96
	Mg^{2+} (cmol _c kg^{-1})			
Controle	0,61 A	0,55 A	0,23 A	0,93 A
Gesso	0,62 A	0,47 A	0,46 A	1,26 A
Atriplex (1 x 1)	0,50 A	0,57 A	0,20 A	1,17 A
Atriplex (2 x 2)	0,60 A	0,56 A	0,22 A	1,23 A
CV (%)	24,94	33,28	127,75	56,08
	CTC (cmol _c kg^{-1})			
Controle	10,96 A			
Gesso	13,97 A			
Atriplex (1 x 1)	13,16 A			
Atriplex (2 x 2)	10,91 A			
CV (%)	37,92			

Médias seguidas de letras iguais nas colunas não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação

Adicionalmente, é provável que a supressão dos teores nesta amostragem também se deva à lixiviação dos sais em decorrência do total de chuva precipitada enfatizando a ação da chuva na lavagem dos sais dos solos. Lopes et al. (2008) alegam ser a lixiviação no perfil do solo maior quando determinada lâmina, que ocorreria em um longo período de tempo, se concentra em curto espaço de tempo.

Paralelamente, a ação física das raízes nos tratamentos com cultivo contribuiu para o aumento da condutividade hidráulica do solo e, assim, a lixiviação de sais deve ter sido estimulada. Este processo, aliado à possível absorção de íons pelas plantas de *A. nummularia* foi determinante, sem dúvida, para a redução de alguns elementos nos tratamentos referentes ao cultivo dessa planta durante o período de estudo.

Tabela 3. Teores de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} solúveis no solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
	Na^+ (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	1014,96 A	999,27 A	448,69 A	435,62 A
Gesso	1013,43 A	1089,18 A	374,09 A	389,69 AB
Atriplex (1 x 1)	1107,37 A	781,87 A	267,44 A	155,38 C
Atriplex (2 x 2)	1096,44 A	784,89 A	377,13 A	290,30 B
CV (%)	60,54	89,70	70,00	88,60
	K^+ (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	3,35 A	2,52 A	0,91 A	2,74 A
Gesso	3,70 A	2,30 A	1,44 A	1,44 A
Atriplex (1 x 1)	4,22 A	2,80 A	0,87 A	1,64 A
Atriplex (2 x 2)	3,93 A	2,25 A	0,93 A	2,05 A
CV (%)	75,69	82,86	115,99	105,03
	Ca^{2+} (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	34,59 A	49,10 AB	32,69 A	152,59 B
Gesso	35,80 A	30,05 AB	32,23 A	222,44 A
Atriplex (1 x 1)	29,22 A	21,76 B	17,75 A	140,54 B
Atriplex (2 x 2)	35,97 A	65,36 A	26,66 A	152,30 B
CV (%)	58,57	103,57	85,69	46,11
	Mg^{2+} (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	10,12 A	15,07 A	5,08 A	65,10 A
Gesso	9,57 A	9,75 A	4,35 A	51,83 A
Atriplex (1 x 1)	11,63 A	8,83 A	3,94 A	36,83 A
Atriplex (2 x 2)	12,80 A	10,84 A	4,63 A	47,66 A
CV (%)	107,64	87,89	88,13	70,41 v

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação

Na Tabela 2 são apresentados os valores médios dos cátions trocáveis da capacidade de troca de cátions entre os tratamentos. Observou-se predomínio dos íons Na^+ no complexo de troca em relação a Ca^{2+} , K^+ e Mg^{2+} trocáveis, íons esses em equilíbrio com a fração que permanece na solução (íons solúveis). Com a elevação da salinidade do solo os cátions anteriormente adsorvidos podem ser substituídos por ação de massa, por outros cátions com maior atividade na solução do solo, como neste caso específico, o Na^+ .

Os tratamentos com aplicação de gesso e cultivo da atriplex foram mais efetivos na redução do teor de Na^+ no solo, diferindo da testemunha ao final do experimento (Tabela 2). No final do estudo a média de redução em relação aos teores originais foi de 16,31% para o tratamento com gesso, 47,96 e 29,93%, respectivamente, para os tratamentos com cultivo de atriplex nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m. Contrariamente, no tratamento controle foi observado um aumento do teor de Na^+ ao longo do tempo com um incremento de 90,3% em relação aos valores encontrados no solo, no período de implantação do estudo.

A efetividade da aplicação de gesso pode ser devida à substituição do Na^+ trocável pelo Ca^{2+} fornecido pelo corretivo, eficiência que tem sido largamente relatada na literatura, como nos trabalhos de Barros et al. (2004), Vital et al. (2005); Leite et al. (2007); Melo et al. (2008); Barros et al. (2009); Leite et al. (2010) e Miranda et al. (2011).

Comparativamente ao emprego do corretivo químico as reduções percentuais nos teores de Na^+ trocável foram mais significativas nos tratamentos com atriplex diferindo estatisticamente ($P < 0,05$). Leal et al. (2008) também

Tabela 4. Teores de Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^- na solução do solo nos tratamentos controle, uso de gesso e cultivo de *Atriplex nummularia* nos espaçamentos 1 x 1 e 2 x 2 m aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento

Tratamento	Tempo (meses)			
	0	6	12	18
	Cl^- (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	1015,90 A	830,20 A	367,90 A	504,45 A
Gesso	876,50 A	975,80 A	454,60 A	467,75 A
Atriplex (1 x 1)	1040,86 A	727,00 A	281,30 A	462,91 A
Atriplex (2 x 2)	1012,41 A	718,40 A	350,40 A	356,59 A
CV (%)	56,97	90,52	70,14	136,54
	CO_3^{2-} (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	0,36 A	0,37 AB	0,37 A	3,06 A
Gesso	0,34 A	0,18 B	0,18 A	3,09 A
Atriplex (1 x 1)	0,36 A	1,69 A	1,69 A	3,94 A
Atriplex (2 x 2)	1,54 A	0,18 B	0,18 A	1,34 A
CV (%)	253,18	247,74	247,56	122,67
	HCO_3^- (mmol _c L ⁻¹)			
Controle	2,31 A	3,37 B	5,38 A	7,06 A
Gesso	2,57 A	3,69 AB	6,69 A	8,67 A
Atriplex (1 x 1)	3,01 A	5,96 A	9,96 A	7,72 A
Atriplex (2 x 2)	3,26 A	5,12 A	5,13 A	7,84 A
CV (%)	59,15	251,29	63,56	52,58

Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade, entre os tratamentos. CV – coeficiente de variação

obtiveram, trabalhando com solo de características bem semelhantes, resultados que demonstram a capacidade das plantas de *A. nummularia* em promover o decréscimo no teor de Na^+ no complexo de troca do solo.

A mesma tendência foi observada em relação à concentração de Na^+ solúvel, com diferença entre os tratamentos nos teores deste elemento aos 18 MAT (Tabela 3). Esta variação entre os tratamentos não ocorreu com o Cl^- , possivelmente pelos elevados valores de coeficiente de variação verificados para esta variável (Tabela 4).

O Na^+ trocável diminuiu ao longo do experimento sobremaneira nos tratamentos com cultivo de atriplex confirmando a absorção desse íon pelas plantas de *A. nummularia* que, como halófitas obrigatórias, absorvem grandes quantidades de sódio (Oh et al., 2007; Flowers & Colmer, 2008).

A presença de plantas também fornece outras consequências ao fluxo de sódio no solo, pelo estímulo à atividade biológica na zona radicular, que eleva a concentração de CO_2 e a taxa de dissolução de carbonatos a um nível suficiente para a remoção de parte do Na^+ trocável, deixando-o livre na solução para que seja lixiviado, corrigindo o solo (Carmona et al., 2010).

Observou-se, também, que na última amostragem de solo os teores de Ca^{2+} foram bastante elevados (Tabela 2) provavelmente pela dissolução de minerais liberando este cátion em função da elevada precipitação verificada no período anterior aos 18 MAT (Figura 1).

Os teores de Cl^- solúvel parecem ter diminuído com o uso do gesso e o plantio de atriplex nos dois espaçamentos; entretanto, ainda não foram detectadas diferenças significativas (Tabela 4). Este comportamento de diminuição nos teores de Na^+ e Cl^- ratifica a afinidade da *A. nummularia* por esses íons, destacando seu potencial na recuperação de áreas sob influência de sais.

É provável que as concentrações dos cátions Ca^{2+} e Mg^{2+} se deram em resposta ao antagonismo com o Na^+ do solo

sendo, ao longo do tempo, afetadas significativamente pelos tratamentos (Tabela 2). Observou-se uma diminuição deste efeito à medida em que os teores de Ca^{2+} se elevaram pois sua maior participação no complexo de troca do solo tende a reagir com o Na^+ , substituindo-o.

Dentre os cátions trocáveis pela sua valência e maior raio iônico hidratado, o Na^+ se situa no último lugar quanto à seletividade de adsorção (série liotrópica) o que, em si, é um fator favorável à sua substituição visto que em condições de igualdade de concentração é o último dos cátions comuns a ser adsorvido às cargas elétricas após o preenchimento por $\text{H}^+ \gg \text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$ (Holanda et al., 2010).

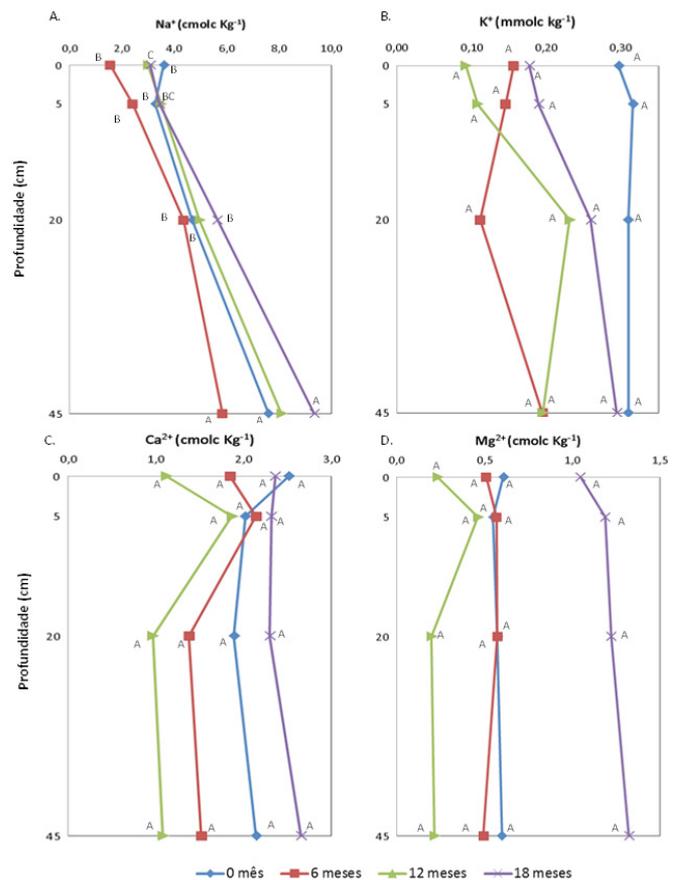
Houve maior contribuição do tratamento com aplicação de gesso nos teores de Ca^{2+} solúvel e trocável demonstrando que, embora o gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) apresente baixa solubilidade, próximo de 2 g L^{-1} (Leite et al., 2010), as disponibilidades de Ca^{2+} , proporcionadas pelo gesso solubilizado em função das chuvas, resultaram em aumento do conteúdo deste elemento, tanto na solução (Tabela 3) como no complexo de troca do solo (Tabela 2). No caso do Mg^{2+} os aumentos observados aos 18 MAT podem estar associados à solubilização de minerais após a incidência das chuvas no período que antecedeu esta amostragem.

Com relação aos tratamentos com planta o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} pode ser explicado pela sugestão de Qadir et al. (2007) argumentando que, entre os vários processos químicos da fitorremediação de solos sódicos e/ou salinos, está a capacidade das plantas em liberar cálcio e magnésio de minerais presentes no solo como a calcita, por meio da acidificação do solo próximo ao sistema radicular das plantas e assim com contribuição percentual nos teores dos elementos.

De modo geral, constatou-se um incremento na concentração de Ca^{2+} e Mg^{2+} na solução do solo no último mês de avaliação em todos os tratamentos adotados; este aumento também pode ser atribuído à elevação e à qualidade da água do lençol freático funcionando como fonte alternativa desses elementos. A área experimental está localizada nas cotas mais baixas do Perímetro Irrigado Cachoeira II com o lençol freático próximo à superfície e o movimento ascendente de água no perfil do solo pode ter promovido as oscilações dos teores desses elementos na área (Figura 2).

Garcia et al. (2008) também relataram aumento na concentração desses macronutrientes no solo, e relacionaram o evento, dentre outras causas, à ascensão de água com sais do lençol freático. Aguiar Netto et al. (2007) relatam, trabalhando com Neossolo no Perímetro Irrigado Califórnia, SE, que quando águas freáticas se aproximam da superfície do solo a evapotranspiração provoca a concentração de CO_3^{2-} de Ca^{2+} e Mg^{2+} no perfil; de fato, as maiores concentrações de CO_3^{2-} e HCO_3^- no solo foram observadas neste período e referido comportamento pode ter sido determinado pela movimentação das águas subterrâneas no perfil do solo.

Os baixos teores do K^+ no complexo de troca (Tabela 2) e na solução do solo (Tabela 3) são resultantes do referido equilíbrio entre cátions do solo, relacionados com os teores de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , que predominam no sistema. Holanda et al. (1998) indicaram, estudando os efeitos do uso de condicionadores nas propriedades químicas do solo, a existência de um desbalanço natural nas relações K:Ca:Mg trocáveis no solo, que se acentua



Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade entre as camadas de solo

Figura 2. Teores dos cátions (Na^+ - A, K^+ - B, Ca^{2+} - C e Mg^{2+} - D) no complexo de troca do solo aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm

com a gessagem, salientando a necessidade de correção potássica para que se atinja o equilíbrio em proporções mais adequadas para a maioria das culturas situando a relação entre 1:9:3 e 1:25:5. Esses autores destacam que o desequilíbrio nas relações desses cátions é admitido como o problema mais importante para o estabelecimento de culturas, superando a própria saturação com sódio. Santos et al. (2005) afirmam que, de modo geral, a concentração de K^+ tende a ser menor com o aumento da relação Na:Ca na solução do solo.

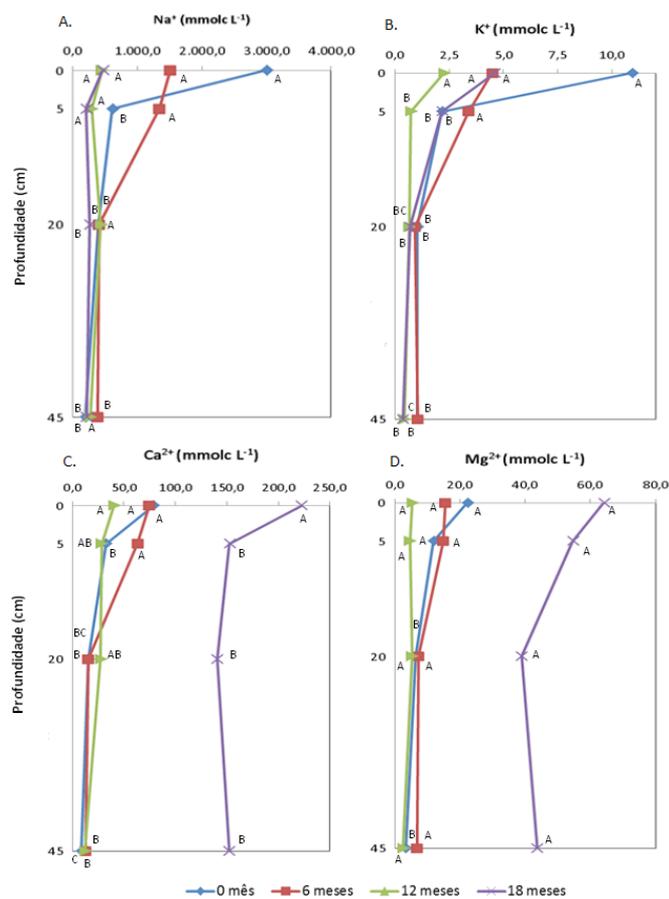
A menor participação deste elemento na fase solúvel observada nos tratamentos com a atriplex em relação ao tratamento controle é decorrente, muito provavelmente, da absorção deste macronutriente pelas plantas. Como já discutido, o potássio desempenha função relevante, sendo essencial na ativação enzimática e em algumas halófitas, como a *A. nummularia*, sua concentração a nível citossólico é de extrema importância para manter uma relação $\text{K}^+:\text{Na}^+$ adequada, de forma a garantir a integridade do ciclo vegetativo desses organismos.

A Figura 2 contempla os valores médios de distribuição dos cátions trocáveis entre as profundidades de coleta. A variação em profundidade do Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis evidencia o aumento dos teores de Na^+ em camadas mais profundas do perfil em todos os períodos de avaliação, o que não foi observado para os outros cátions avaliados (Figura 2). Este incremento de Na^+

acompanha o aumento dos teores de argila em profundidade que, por sua vez, deve estar associado à migração de coloides ao longo do perfil em função da dispersão do sistema saturado por Na^+ (Fernandes et al., 2009).

A distribuição uniforme em profundidade dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (Figura 2B, C e D) se deve, provavelmente, aos menores níveis desses íons no solo, pela competição decorrente da presença dominante do Na^+ no complexo sortivo.

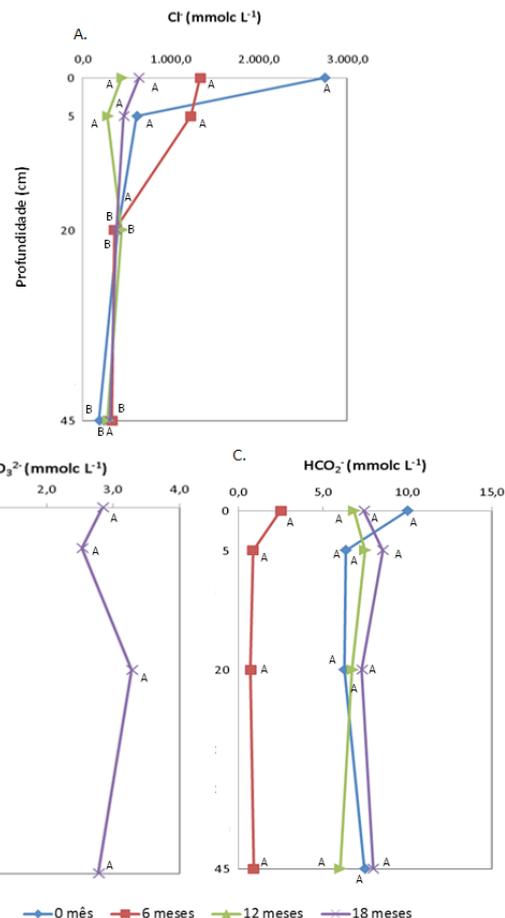
As Figuras 3 e 4 se referem, respectivamente, aos teores médios dos cátions e ânions solúveis entre as camadas do solo. Ao se avaliar as concentrações médias dos íons solúveis entre todos os tratamentos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} e HCO_3^-) ao longo do perfil do solo, registraram-se diferenças entre os horizontes com maiores concentrações desses íons na camada superficial do solo (crosta), em decorrência do processo evaporativo da água, deixando sais precipitados em superfície (Figuras 3 e 4).



Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade, entre as camadas de solo

Figura 3. Teores dos cátions Na^+ (A), K^+ (B), Ca^{2+} (C) e Mg^{2+} (D) solúveis aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm

Esta é uma característica natural de solos salinos que apresentam uma crosta salina na superfície, promovida pela presença de sais em excesso nesta fina camada de solo; crosta esta que representa impedimento à infiltração de água no solo aumentando o transporte da água em superfície e, com esta, dos sedimentos que desencadeiam os processos erosivos no solo.



Médias seguidas de letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a nível de 0,05 de probabilidade, entre as camadas de solo

Figura 4. Teores dos ânions Cl^- (A), CO_3^{2-} (B) e HCO_3^- (C) solúveis do solo aos 0, 6, 12 e 18 meses após tratamento na crosta superficial (0-2 mm) e nas profundidades de 0-10, 10-30 e 30-60 cm

Tal comportamento está em consonância com a afirmação de Santos et al. (2010) ao relatarem que a heterogeneidade dos atributos químicos dos solos salinizados é uma realidade. Tanto nos salinos como nos salino-sódicos ou sódicos observa-se que não há continuidade nesses atributos, o que está fortemente ligado à ocorrência de manchas esbranquiçadas ou escuras na superfície desses solos, as crostas de sais.

Além disto, tal comportamento também evidencia o manejo inadequado da irrigação realizada no perímetro que, sem dúvida, promoveu o acúmulo de sais na profundidade efetiva do sistema radicular das plantas.

Os menores teores de íons solúveis foram verificados no solo coletado aos 12 meses de implantação do experimento, período posterior à maior incidência de chuvas e lixiviação natural de parte dos sais da superfície (Figuras 3 e 4).

Destaca-se, também, a diminuição das concentrações de Na^+ e Cl^- , especialmente na crosta superficial amenizando os efeitos nocivos já citados tal como o aumento dos teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} aos 18 MAT em função, provavelmente, da melhoria das condições do solo.

Andrade et al. (2004) observaram que durante a estação chuvosa o íon Na^+ esteve presente em concentrações maiores na camada superficial dada à elevada solubilidade deste íon e pelas

altas taxas de evapotranspiração registradas nas regiões semiáridas, com um consequente acúmulo de sais na superfície do solo.

No entanto, os teores de CO_3^{2-} e HCO_3^- não diferiram significativamente entre as camadas ($P > 0,05$) em nenhuma das épocas de avaliação (Figura 4B e C), o que pode ser atribuído às baixas concentrações desses ânions, quando comparados ao Cl⁻.

Este comportamento dinâmico dos elementos, muitas vezes com discrepância espacial e temporal, é bem característico dos solos salinos, o que foi decisivo nos altos valores dos coeficientes de variação das variáveis estudadas. A análise e o entendimento dessa dinâmica tornam-se importantes visto que os mesmos se relacionam e determinam critérios e limites de caracterização dos solos afetados por sais e/ou sódio, influenciando sua eficiência do manejo agrícola.

CONCLUSÕES

1. O conteúdo de íons é muito variável e está altamente relacionado com o manejo implantado no solo.
2. A fitorremediação com *Atriplex nummularia* Lindl e a correção química com gesso foram favoráveis à diminuição dos íons sódio e cloro no solo.
3. O cultivo da atriplex configura-se como boa alternativa com potencial de uso na fitoextração, principalmente de sódio e cloro de solos afetados por sais.

LITERATURA CITADA

- Aguiar Netto, A. O.; Gomes, C. C. S.; Lins, C. C. V. Características químicas e salino-sodicidade dos solos do Perímetro Irrigado Califórnia, SE, Brasil. *Ciência Rural*, v.37, p.1640-1645, 2007.
- Andrade, E. M.; D'Almeida, D. M. B. A.; Meireles, A. C. M.; Lemos Filho, L. C. A.; Arruda, F. E. R. Evolução da concentração iônica da solução do solo em áreas irrigadas na Chapada do Apodi, Ceará. *Revista Ciência Agronômica*, v.35, p.9-16, 2004.
- Barros, M. de F. C.; Bebé, F. V.; Santos, T. O. dos; Campos, M. C. C. Influência da aplicação de gesso para correção de um solo salino-sódico cultivado com feijão caupi. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.9, p.77-82, 2009.
- Barros, M. de F. C.; Fontes, M. P. F.; Alvarez, V. H.; Ruiz, H. A. Recuperação de solos afetados por sais pela aplicação de gesso de jazida e calcário no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.8, p.59-64, 2004.
- 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*, v.129, p.349-360, 2009.
- Carmona, F. de C.; Anghinoni, I.; Holzschuh, M. J.; Andrighetti, M. H. Cation dynamics in soils with different salinity levels growing irrigated rice. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.1851-1863, 2010.
- DNOCS - Departamento Nacional de Obras Contra as Secas. Estudos para a avaliação da disponibilidade hídrica do Açude Público Cachoeira II - Município de Serra Talhada - PE. Relatório apresentado ao DNOCS em julho de 1999.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema Brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 2006. 412p.
- Fernandes, J. G.; Freire, M. B. G. dos S.; Cunha, J. C.; Galvêncio, J. D.; Correia, M. M.; Santos, P. R. dos. Qualidade físico-química das águas utilizadas no Perímetro Irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.4, p.27-34, 2009.
- Flowers, T. J.; Colmer, T. D. Salinity tolerance in halophytes. *New Phytologist*, v.179, p.945-963, 2008.
- Freire, M. B. G. dos S.; Freire, F. J. Fertilidade do solo e seu manejo em solos afetados por sais. In: Novais, R. F.; Alvarez V., V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. 1017p.
- Garcia, G. de O.; Martins Filho, S.; Reis, E. F. dos; Moraes, W. B.; Nazário, A. de A. Alterações químicas de dois solos irrigados com água salina. *Revista Ciência Agronômica*, v.39, p.7-18, 2008.
- Gonçalves, I. V. C.; Freire, M. B. G. dos S.; Santos, M. A. dos; Souza, E. R. de; Freire, F. J. Alterações químicas de um Neossolo Flúvico irrigado com águas salinas. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.589-596, 2011.
- Holanda, J. S.; Amorim, J. R. A.; Neto, M. F.; Holanda, A. C. Qualidade da água para irrigação. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. (ed.) Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- Holanda, J. S.; Vitti, G. C.; Salviano, A. A. C.; Medeiros, J. D. F.; Amorim, J. R. A. Alterações nas propriedades químicas de um solo aluvial salino-sódico decorrentes da subsolagem e do uso de condicionadores. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.22, p.387-394, 1998.
- IPA - Instituto agrônomo de Pernambuco. Sessão de índices pluviométricos. Disponível em: <http://www.ipa.br/indice_pluv.php#calendario_indices> Acesso em: 20. set. 2011.
- 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*, v.32, p.1065-1072, 2008.
- Leite, E. M.; Cavalcante, L.F.; Diniz, A. A.; Santos, R. V. dos.; Alves, G. da S.; Cavalcante, I. H. L. Correção da sodicidade de dois solos irrigados em resposta à aplicação de gesso agrícola. *Irriga*, v.12, p.168-176, 2007.
- Leite, E. M.; Diniz, A. A.; Cavalcante, L. F.; Raij, H. G.; Campos, V. B. Redução da sodicidade em solo irrigado com a utilização de ácido sulfúrico e gesso agrícola. *Revista Caatinga*, v.23, p.110-116, 2010.
- Lopes, J. F. B.; Andrade, E. M. de; Chaves, L. C. G. Impacto da irrigação sobre os solos de perímetros irrigados na Bacia do Acaraú, Brasil. *Engenharia Agrícola*, v.28, p.34-43, 2008.
- Melo, R. M.; Barros, M. de F. C.; Santos, P. M. dos; Rolim, M. M. Correção de solos salino-sódicos pela aplicação de gesso mineral. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.12, p.376-380, 2008.
- Miranda, M. A.; Oliveira, E. E. M. de, Santos, K. C. F. dos; Freire, M. B. G. S.; Almeida, B. G. de. Condicionadores químicos e orgânicos na recuperação de solo salino-sódico em casa de vegetação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.484-490, 2011.

- Oh, D-H.; Gong, Q.; Ulanov, A.; Zhang, Q.; Li, Y.; Ma, W. Yun, D-J.; Bressan, R. A.; Bohnert, H. J. Sodium stress in the halophyte *Thellungiella halophila* and transcriptional changes in a thsos1-RNA interference line. *Journal of Integrative Plant Biology*, v.49, p.1484-1496, 2007.
- Qadir, M.; Oster, J. D.; Schubert, S.; Noble, A. D.; Sahrawat, K. L. Phytoremediation of sodic and saline-sodic soils. *Advances in Agronomy*, v.96, p.197-247, 2007.
- Queiroz, J. E.; Gonçalves, A. C. A.; Souto, J. S.; Folegatti, M. V. Avaliação e monitoramento da salinidade do solo. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. da S.; Lacerda, C. F. Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- Ruiz, H. A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.297-300, 2005.
- Santos, M. de F. G. dos; Oliveira, F. A. de; Cavalcante, L. I. F.; Medeiros, J. F. de; Souza, C. C. de. Solo sódico tratado com gesso agrícola, composto de lixo urbano e vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.307-313, 2005.
- Santos, R. V. dos; Cavalcante, L. F.; Vital, A. de. F. M. Interações salinidade-fertilidade do solo. In: Gheyi, H. R.; Dias, N. S.; Lacerda, C. F. (ed.) Manejo da salinidade na agricultura. Fortaleza: INCT Sal, 2010. 472p.
- Souza, E. R. de; Freire, M. B. G. DOS S; Nascimento, C. W. A. do; Montenegro, A. A. de A.; Freire, F. J.; Melo, H. F. de. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.477-483, 2011.
- 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.
- USSL - United States Salinity Laboratory-Staff. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: Department of Agriculture, 1954. 160p. Handbook 60
- UFV - Universidade Federal de Viçosa. SAEG 9.1: Sistema de análises estatística. Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, 2007. CD Rom
- Vital, A. F. M.; Santos, R. V.; Cavalcante, L. F.; Santo, J. S. Comportamento de atributos químicos de um solo salino-sódico tratado com gesso agrícola e fósforo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.9, p.30-36, 2005.