



Monitoramento da salinidade de águas subterrâneas em várzea cultivada com cana-de-açúcar fertirrigada com vinhaça

Wellington P. da Silva¹, Ceres D. G. C. de Almeida², Mario M. Rolim³,
Ênio F. de F. e Silva⁴, Elvira M. R. Pedrosa⁵ & Vamberto G. F. Silva⁶

¹ DEAGRI/UFRPE. Recife, PE. E-mail: welleng_pereira@hotmail.com (Autor correspondente)

² CODAI/UFRPE. E-mail: ceres@codai.ufrpe.br

³ DEAGRI/UFRPE. Recife, PE. E-mail: rolim@dtr.ufrpe.br

⁴ DEAGRI/UFRPE. Recife, PE. E-mail: enio.silva@dtr.ufrpe.br

⁵ DEAGRI/UFRPE. Recife, PE. E-mail: elvira.pedrosa@dtr.ufrpe.br

⁶ Usina Cucaú. Rio Formoso, PE. E-mail: vamberto Franca@usinacucau.com.br

Palavras-chave:

Saccharum spp.
resíduo
lençol freático
doses
precipitação pluviométrica

RESUMO

Propôs-se, neste trabalho, avaliar o risco potencial da vinhaça em proporcionar a salinidade e sodicidade das águas subterrâneas em área de várzea cultivada com cana-de-açúcar. O experimento foi conduzido em uma Usina da Mata Sul de Pernambuco durante o período de dezembro de 2010 a setembro de 2011. O dispositivo experimental adotado foi composto de uma malha georreferenciada de 81 poços de monitoramento distribuídos ao longo de uma área de 7,5 ha constituindo três subáreas com 2,5 ha, todas cultivadas com cana-de-açúcar. Na área foram aplicadas doses equivalentes a 50, 60 e 65 m³ ha⁻¹ de vinhaça de mosto de melaço. Para a avaliação da qualidade da água subterrânea foram realizadas seis amostragens e analisados os parâmetros CE, pH, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS. A aplicação de doses de vinhaça até 65 m³ ha⁻¹, em áreas de várzea, para os parâmetros analisados, não proporcionou riscos de salinização das águas subterrâneas nem, tampouco, a CE e a RAS para a salinidade e sodicidade no período avaliado. O monitoramento dos parâmetros químicos do lençol freático mostrou, ao longo do tempo, redução de suas concentrações em função da precipitação pluviométrica ocorrida no período estudado.

Key words:

Saccharum spp.
residue
subsurface water
rate
rainfall

Monitoring of groundwater salinity in lowland under sugarcane cultivation fertigated with vinasse

ABSTRACT

This study evaluated potential risk of vinasse to provoke salinity and sodicity in groundwater in a lowland area under sugarcane crop. The research was carried out in Pernambuco State, in the Northeast of Brazil, from December 2010 to September 2011. A georeferenced grid of 81 wells over 7.5 ha (three subareas with 2.5 ha each) under sugarcane crop was monitored. Vinasse was applied at three rates 50, 60 and 65 m³ ha⁻¹ from molasses fermentation. Quality of groundwater was monitored through six samples along period of plant growing. EC, pH, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ and SAR were measured. Rate up to 65 m³ ha⁻¹, in lowland areas, for the variables analysed, provided no risk to groundwater for salinity and sodicity, as well as EC and SAR for salinity and sodicity during the experimental stage. This study showed that rainfall provided reduction of salt concentrations in groundwater under monitoring along the time.

INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é de grande importância no cenário agrícola brasileiro ocupando uma área de aproximadamente 8,5 milhões de hectares, destinada à produção sucroalcooleira colocando o Brasil como maior produtor mundial (CONAB, 2012). A cana-de-açúcar se adapta aos climas tropical e subtropical e produz relevante quantidade de biomassa (Tejera et al., 2007) sobretudo quando adequadamente suprida por água e nutrientes.

A região Nordeste possui cerca de um milhão de hectares cultivados com cana-de-açúcar, com produtividade em torno de 51 t ha⁻¹ e produção na safra 2012/2013 de 57 milhões de toneladas. O estado de Pernambuco, por sua vez, tem

área estimada em 328 mil ha plantados com a cultura, com produtividade média de 46 t ha⁻¹ (CONAB, 2012).

Na safra 2012/2013 esmagará cerca de 15 milhões de toneladas, das quais 11,7 milhões serão para produção de açúcar e 3,3 milhões para fabricação de etanol (CONAB, 2012).

O aumento na produtividade de cana-de-açúcar verificado nos últimos anos se deve, entre outros fatores, às melhorias no uso das tecnologias agrícolas e ao aumento da área cultivada. A incorporação de novas áreas promove o plantio desta cultura em áreas antes consideradas marginais, em especial por deficiência hídrica. Vale ressaltar que as principais consequências do déficit hídrico no solo são a redução no número e o peso de colmos (Hossain et al., 2009).

Na região Nordeste um dos grandes limitadores de produção nas unidades sucroalcooleiras é o déficit hídrico. Em função disto, as usinas têm utilizado a vinhaça em seus canaviais visto que, além de fornecer nutrientes ao solo, supre sua necessidade hídrica. No processo de produção do etanol a vinhaça é um subproduto gerado em grande escala, em média, na razão de 10 a 15 L por litro de etanol destilado (Cruz et al., 2008). É um resíduo de natureza ácida que atinge altas temperaturas ao sair do destilador e caracterizado por apresentar elevados teores de matéria orgânica (Salomon & Lora, 2005).

A grande geração de vinhaça representa um problema no acondicionamento e nos processos de tratamento. De maneira geral, a cada safra a área de cana-de-açúcar fertilizada aumenta mostrando a preocupação em se buscar maior rendimento agrícola e redução no uso de fertilizantes minerais, tal como a adequação da dose de vinhaça que não cause prejuízo ao meio ambiente (Junqueira et al., 2009).

Tendo em vista os altos teores de elementos existentes na vinhaça, como potássio, cálcio, magnésio e, sobretudo, de matéria orgânica, a disposição da vinhaça no solo não deve, como fertilizante ultrapassar, quando aplicada em grandes quantidades, a capacidade de retenção de água do solo (Silva et al., 2007; Jiang et al., 2012), uma vez que pode ocorrer lixiviação de vários desses elementos, sobretudo do potássio, presente em grande quantidade neste resíduo, com a possibilidade de alcançar as águas subsuperficiais (Silva et al., 2007; Ribeiro et al., 2007; Junqueira et al., 2009; Rolim et al., 2013). Neste cenário alguns estudos, como o de Ribas et al. (2009) buscam propor melhores formas de disposição do resíduo no solo agrícola através do seu tratamento prévio.

Desta forma, atenção especial tem sido dada, nas últimas décadas, ao estudo da concentração natural de íons e metais nas águas subterrâneas a fim de estabelecer as fontes antropogênicas e geogênicas que afetam a qualidade das águas subterrâneas, bem como as reações que ocorrem dentro do aquífero (Ramesh & Elango, 2012).

As águas subterrâneas são a principal fonte de água para fins domésticos, agrícolas e industriais, em muitos países.

A qualidade da água é influenciada pelos efeitos naturais e antropogênicos incluindo clima, local, geologia e práticas de irrigação. Uma vez que constituintes indesejáveis são aplicados ao solo eles podem sofrer lenta dissolução por um longo período, o que torna difícil seu controle.

Os efeitos da salinidade do solo e da água já estão amplamente discutidos na literatura especialmente em relação à sua influência na redução da produção. Dentro deste contexto objetivou-se, no presente trabalho, avaliar

o risco potencial da vinhaça na salinização e a sodificação das águas subterrâneas em áreas de várzea cultivada com cana-de-açúcar.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Engenho Aldeia situado a 1,5 km da Usina Cucaú, localizado na latitude 08° 38' 91" S e longitude 35° 16' 08" W, a 60 m de altitude, no município de Rio Formoso Mata Sul de Pernambuco a 108 km da capital Recife, com média pluviométrica anual de 2100 mm. O clima da região é classificado, segundo Köppen como Ams, tropical chuvoso, com verão seco, estação chuvosa entre os meses de maio a agosto e temperaturas que variam entre 24 e 29 °C. A variedade de cana-de-açúcar plantada na área experimental foi a RB92579 5ª corte (RIDESA, 2010).

Para classificação taxonômica do solo foi aberto um perfil antes da aplicação da vinhaça no qual se coletaram amostras de cada horizonte diagnosticado morfológicamente. A classe de solo identificada na área experimental foi denominada, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), como Gleissolo Háptico Tb Distrófico Sólodico A moderado. Nas Tabelas 1 e 2 estão descritas as propriedades físicas e químicas do perfil de solo representativo da área estudada.

Os dados pluviométricos referentes ao período do experimento (dezembro de 2010 a setembro de 2011)

Tabela 2. Propriedades químicas do solo coletado no perfil

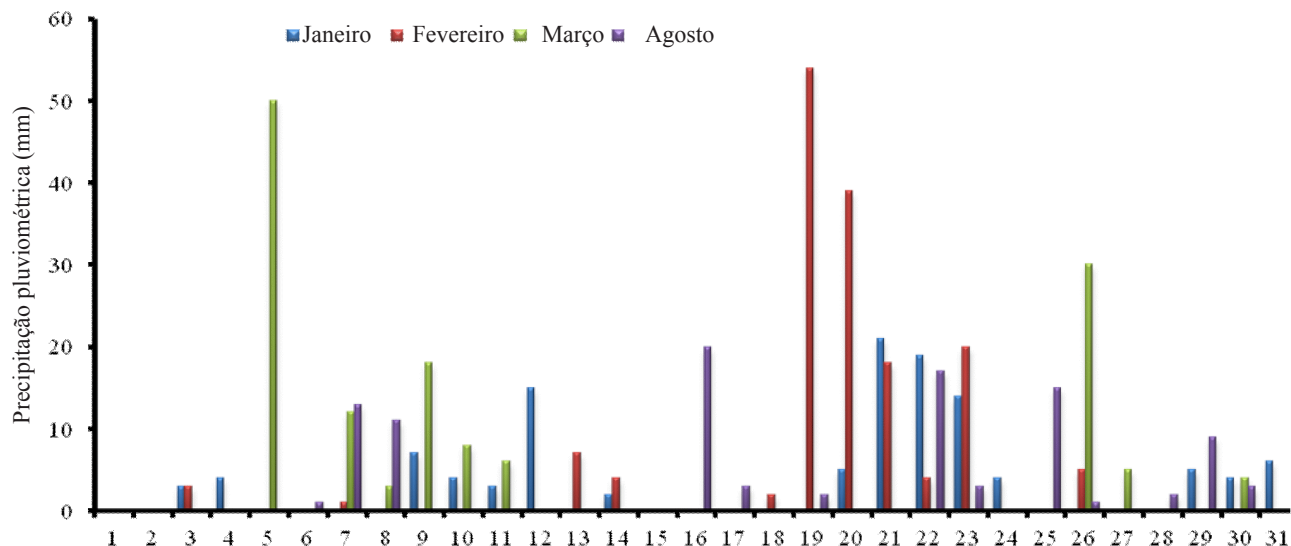
Atributo	Horizonte				
	Ap	BA	Bi	Big	
	Profundidade (cm)				
	0-24	24-48	48-72	72-98+	
CO ⁽¹⁾ (g kg ⁻¹)	267,10	78,10	57,30	51,80	
pH	H ₂ O	5,90	5,30	5,00	4,90
	KCl	5,10	4,30	4,00	3,90
CE ⁽²⁾ (dS m ⁻¹)	0,44	0,15	0,11	0,10	
Ca ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	7,24	3,32	1,07	0,64	
Mg ²⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	5,23	2,57	2,66	3,51	
K ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,51	0,14	0,12	0,11	
Na ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,14	0,06	0,07	0,06	
Al ³⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	0,06	0,32	0,85	1,28	
H ⁺ (cmol _c kg ⁻¹)	12,47	9,10	8,84	7,81	
T (cmol _c kg ⁻¹)	25,65	15,51	13,61	13,41	
V (%)	51,15	39,26	28,80	32,21	
m (%)	0,46	4,99	17,82	22,86	
N ⁽³⁾ (g kg ⁻¹)	3,05	1,25	0,75	1,15	

⁽¹⁾ CO - Carbono orgânico; ⁽²⁾ CE - Condutividade elétrica do solo; ⁽³⁾ N - Nitrogênio

Tabela 1. Propriedades físicas do solo coletado no perfil

Horizonte	Profundidade (cm)	Classe textural	Composição granulométrica (g kg ⁻¹)			Ds ⁽¹⁾	Dp ⁽²⁾	P ⁽³⁾ (%)
			Areia	Silte	Argila			
Ap	0-24	Franco argilo-siltosa	152	492	356	1,42	2,53	44
BA	24-48	Argila	108	367	525	1,47	2,58	43
Bi	48-72	Argila	150	360	490	1,55	2,54	39
Big	72-98+	Argila	159	352	489	1,50	2,59	42

⁽¹⁾ Ds - Densidade do solo; ⁽²⁾ Dp - Densidade da partícula; ⁽³⁾ P - Porosidade



Coleta antes da aplicação da vinhaça: T0 - 07/01/2011

Coletas após a aplicação da vinhaça: T1 - 12/01/2011; T2 - 28/01/2011; T3 - 12/02/2011; T4 - 11/03/2011; T5 - 11/08/2011

Figura 1. Valores diários da precipitação pluviométrica (mm) registrados no período de condução do experimento

foram medidos em um pluviômetro localizado no Engenho Aldeia distante 1 km da área experimental. A precipitação pluviométrica no período de condução do experimento foi de 2613 mm.

Na Figura 1 pode-se observar valores diários da precipitação pluviométrica para os meses de janeiro, fevereiro, março e agosto de 2011, respectivamente, e suas épocas de coleta da água subterrânea.

O desenho amostral adotado foi composto de uma malha georreferenciada de 81 poços de monitoramento distribuídos ao longo de uma área de 7,5 ha constituindo três subáreas com 2,5 ha, todas vegetadas com cana-de-açúcar (Figura 2) com topografia plana.

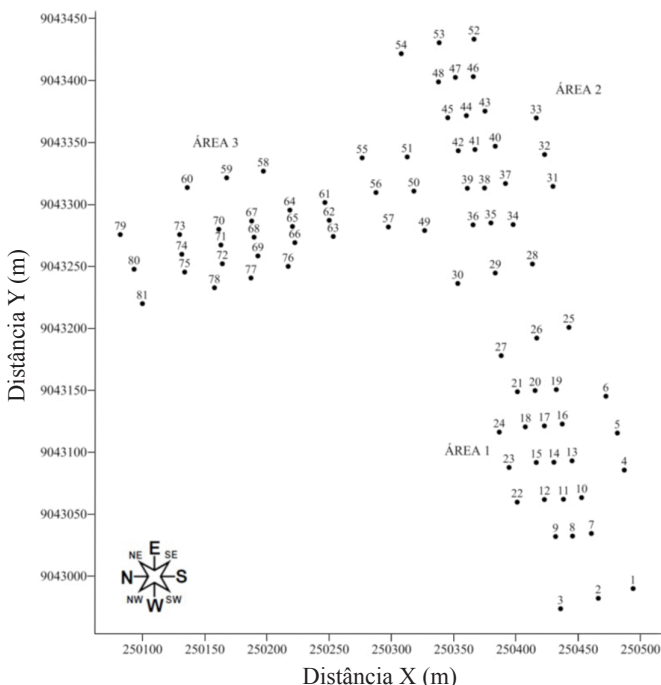


Figura 2. Distribuição espacial dos poços de monitoramento na área experimental

Os poços de monitoramento foram distribuídos em duas formas, sendo 15 poços na área submetida à aplicação de vinhaça e 12 poços na bordadura totalizando 27 poços em cada subárea. O distanciamento dos poços foi de 30 × 30 m na área de bordadura e 15 × 30 m nas áreas submetidas à aplicação de vinhaça.

As estações de monitoramento foram constituídas de poços confeccionados com tubos de PVC de 75 mm de diâmetro e 3 m de comprimento, perfurados e recobertos com tela filtrante a partir do terço médio inferior, conforme Lyra et al. (2003).

Os poços de monitoramento foram instalados em dezembro de 2010 a uma profundidade que variou de 1,30 a 3 m de profundidade em função da presença do lençol freático no local. Na Tabela 3 estão relacionadas as profundidades de instalação dos poços de monitoramento em função do lençol freático, em toda a área experimental.

Após a instalação dos tubos no solo cada um foi fechado com uma tampa de PVC (CAP), identificada com o número do tratamento evitando ainda qualquer contaminação do meio externo no lençol freático. A sinalização nos respectivos CAPS foi realizada para facilitar a identificação no período em que o solo estivesse totalmente recoberto pelo canal.

Nas áreas fertirrigadas da usina com vinhaça a lâmina aplicada é de 150 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, porém esta prática não é adotada em áreas de várzea uma vez que não há estudos que assegurem ausência de poluição no lençol freático. Excepcionalmente foram aplicadas, para este estudo, doses únicas equivalentes a 50, 60 e 65 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ de vinhaça pura de mosto de melaço pelo tempo de uma hora na pressão de 300 kPa. Ao redor de cada subárea foi estabelecida uma área de bordadura sem aplicação

Tabela 3. Profundidade (m) de instalação dos poços de monitoramento

Poços	Área 1	Área 2	Área 3
Mínimo	1,30	1,91	1,65
Médio	1,78	2,40	2,11
Máximo	2,38	3,00	3,00

de vinhaça, delimitada por uma faixa de 30 m de largura na qual se encontravam 12 poços de monitoramento.

A vinhaça utilizada e cuja composição química está na Tabela 4 foi produzida pela Destilaria da Usina Cucaú enquanto sua aplicação foi realizada por aspersão, tipo montagem direta, com canhão de 2^{1/2} modelo Plúvio 250. Uma linha lateral, com três aspersores espaçados em 60 m, foi instalada no centro de cada subárea para aplicação da dosagem de fertirrigação.

As amostras de água provenientes do lençol freático foram coletadas em seis épocas distintas ao longo do ciclo com o intuito de avaliar sua qualidade ao longo do tempo. A primeira amostragem foi realizada antes da aplicação da vinhaça (07/01/2011). Após a fertirrigação foram realizadas mais três coletas com intervalo de 15 dias (12/01/2011, 28/01/2011 e 12/02/2011), buscando identificar quaisquer modificações na composição química da água subterrânea.

A quarta coleta foi realizada com intervalo de trinta dias da terceira coleta (11/03/2011) uma vez que já se observava, nos resultados preliminares, certa uniformidade nos dados. A última coleta foi realizada com intervalo de cento e cinquenta dias da quarta coleta (31/08/2011) visando realizar uma amostragem em época chuvosa.

Em todos os casos a coleta foi realizada com auxílio de uma bomba a vácuo manual e as amostras de água foram acondicionadas em recipientes de 100 mL e conservadas com gelo em caixa térmica para transporte até o laboratório onde foram realizadas as análises.

A condutividade elétrica (CE) a 25 °C foi determinada pelo método eletrométrico, o potencial hidrogeniônico (pH) por leitura direta com eletrodo combinado calibrado com soluções tampões de pH 4,0 e 7,0, os teores de Na determinados por fotometria de emissão de chama e teores de Ca e Mg, por espectrofotometria de absorção atômica nas amostras diluídas com cloreto de estrôncio; todos os parâmetros foram determinados segundo APHA (1995).

As análises foram realizadas no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos e no Centro de Apoio à Pesquisa (CENAPESQ) ambos na Universidade

Tabela 4. Composição química da vinhaça de mosto de melaço

Característica	Valores
pH	3,98
CE (mS cm ⁻¹)	9,32
K (mg L ⁻¹)	18.894,00
Na (mg L ⁻¹)	759,00
Ca (mg L ⁻¹)	57,90
Mg (mg L ⁻¹)	423,45

Federal Rural de Pernambuco. De posse dos dados foi calculada a Relação de Adsorção de Sódio (RAS). Para efeito de classificação da qualidade da água subterrânea tomou-se como referência a classificação preconizada por Ayers & Westcot (1999).

Para a análise estatística foi utilizada a análise multivariada de medidas repetidas ao longo do tempo; para isto, os dados das variáveis CE, pH, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS da água coletada nos poços de monitoramento foram agrupados por doses e por tempo.

Os resultados obtidos foram submetidos às análises de variância pelo teste de F utilizando-se o programa estatístico SAS e as médias comparadas pelo teste de Tukey, em nível de 0,05 de probabilidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados dos valores médios das concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, RAS, CE e pH da água subterrânea coletada em toda área experimental foram agrupados de modo a diferenciar apenas as doses aplicadas e não o tempo (Tabela 5). Os valores obtidos na área em que não houve aplicação de vinhaça (D₀) foram inferiores aos das demais áreas fertirrigadas para todos os parâmetros avaliados, condição esta já esperada.

Não houve diferença significativa (p < 0,05) para as concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺, Ca²⁺+Mg²⁺, RAS e CE entre as diferentes doses aplicadas. Com relação à concentração de Na⁺, a dose D₅₀ foi a que apresentou maiores valores médios (1,1022 mmol_c L⁻¹), diferindo estatisticamente das demais e da bordadura (D₀).

A maior concentração média (Tabela 5) de cálcio + magnésio foi obtida na área em que se aplicou a D₅₀ (5,4276 mmol_c L⁻¹) que, segundo os parâmetros para risco de salinização da água para irrigação, seria de restrição moderada (Ayers & Westcot, 1999).

Os valores de pH na água subterrânea obtida da área de bordadura (D₀) apresentaram a maior média 5,76 (Tabela 5) não diferindo estatisticamente das doses (D₆₀ e D₅₀), porém a dose D₆₅ foi a que apresentou menor média 5,38 diferindo estatisticamente das demais. Ramesh & Elango (2012) encontraram, avaliando a qualidade das águas subterrâneas e sua adequação para uso doméstico e agrícola em 45 poços distribuídos na Bacia do Rio Tondiar na Índia, variações de pH em torno de 6,58 a 8,55 prescritos para água potável pela WHO (1996); mesmo assim, os autores encontram valores médios de pH 7,04 sinalizando uma natureza alcalina da água subterrânea na área estudada. Os valores encontrados para as diferentes dosagens de vinhaça aplicadas mais a área de bordadura se apresentaram inferiores aos aceitáveis pela WHO (1996).

Tabela 5. Valores médios da composição química da água subterrânea em função das doses de vinhaça aplicadas

Dose	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺ + Mg ²⁺	Na ⁺	RAS	CE	pH
m ³ ha ⁻¹	mmol _c L ⁻¹				(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	dS m ⁻¹	
D ₀ *	0,0286 b ± 0,02	1,4201 b ± 0,62	1,4487 b ± 0,56	0,6757 b ± 0,41	1,2357 a ± 2,74	0,20 b ± 0,13	5,78 a ± 0,50
D ₅₀	0,0568 ab ± 0,07	5,3708 a ± 6,00	5,4276 a ± 4,44	1,1022 a ± 0,85	1,4881 a ± 4,20	0,37 a ± 0,40	5,57 a ± 0,40
D ₆₀	0,0776 a ± 0,16	2,9766 a ± 2,47	3,0542 a ± 2,01	0,6178 b ± 0,35	0,8860 a ± 1,59	0,28 a ± 0,31	5,60 a ± 0,31
D ₆₅	0,0661 a ± 0,05	4,4100 a ± 5,43	4,4761 a ± 3,98	0,6444 b ± 0,43	1,2862 a ± 4,11	0,34 a ± 0,35	5,38 b ± 0,35

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

Para fins de CE, Ramesh & Elango (2012) encontraram valores nas águas subterrâneas que variaram de 0,47 a 4,8 dS m⁻¹. No presente estudo foram observados baixos valores de CE com uma variação de 0,2 dS m⁻¹ para área de bordadura e valores entre 0,28 e 0,37 dS m⁻¹ nas áreas submetidas às diferentes dosagens de vinhaça. Esta grande variação na CE pode ser atribuída principalmente ao processo geoquímico, à troca iônica, ao intemperismo aos processos de oxidação e, sobretudo, às atividades antrópicas, como a aplicação de agroquímicos em áreas agrícolas, conforme sugerem Ramesh & Elango (2012). Por outro lado, a relação de absorção de sódio não apresentou, neste trabalho, diferença significativa entre as áreas estudadas.

A composição química da água subterrânea ao longo do tempo pode ser observada na Tabela 6 por meio dos valores médios de Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, RAS, CE e pH, antes e depois da aplicação de vinhaça.

Na coleta após a aplicação da vinhaça as concentrações de Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS no lençol freático foram superiores às das demais épocas coletadas em virtude da precipitação pluviométrica ocorrida logo após a fertirrigação (Figura 1) o que promoveu a percolação do resíduo. Entretanto ocorreu, ao longo do tempo, diminuição dos valores a ponto de ficarem abaixo da concentração encontrada antes da aplicação da vinhaça. Este resultado indica que a precipitação pluviométrica na área (Figura 1), a movimentação da água no solo, a flutuação do lençol e a recarga do aquífero, proporcionaram diluição dos elementos químicos das águas subterrâneas.

Observa-se que o magnésio (Tabela 6) apresentou concentração média maior na coleta T1 (5,8315 mmol_c L⁻¹), diferindo estatisticamente das demais épocas analisadas, da mesma forma em que foi observada, na coleta T5, a menor média (0,9086 mmol_c L⁻¹).

Em águas subterrâneas a concentração de magnésio ocorre com teores entre 0,082 e 3,28 mmol_c L⁻¹, como verificado em estudo realizado no Município de Figueira, PR, em um Argissolo Vermelho Amarelo álico abrupto (Shuqair, 2002). Ramesh & Elango (2012) encontraram, avaliando a qualidade da água subterrânea em áreas agricultáveis da Índia, concentrações que variaram entre 0,375 e 2,9167 mmol_c L⁻¹; os autores citam que 93% das amostras coletadas em um total de 45 poços de observação estavam dentro do limite desejável pela WHO (1996) que é de 2,0833 mmol_c L⁻¹. Os valores das concentrações de magnésio logo após a aplicação da vinhaça (T1 e T2) foram superiores aos limites aceitáveis (Tabela 6), quando comparados pelos valores citados por Shuqair (2002). Porém, quando se utilizou como referência o limite proposto por WHO (1996) o período

de tempo em que as concentrações foram superiores aumentou (T0 a T4). Quando avaliada a última coleta (T5) a contração apresentou-se abaixo dos limites permitidos, o que pode ter sido em decorrência da precipitação pluviométrica neste período de coleta (Figura 1) o que também lixiviaria o íon até o lençol freático, por se tratar de um elemento solúvel e com alto poder de lixiviação, conforme citado por (Bebé et al., 2009).

Verifica-se ainda, na Tabela 6, que o valor médio de Ca²⁺ na coleta T1 foi estatisticamente superior (0,1131 mmol_c L⁻¹) ao das demais épocas de amostragem; mesmo comportamento foi observado para Mg²⁺. Para os valores do Ca²⁺, a menor média foi observada na última coleta, 0,0150 mmol_c L⁻¹. Com relação às concentrações médias de cálcio + magnésio na coleta T1, o valor médio encontrado foi de 5,9446 mmol_c L⁻¹, classificada, portanto, como água de restrição moderada para uso em irrigação, segundo Ayers & Westcot (1999) porém nas demais épocas de coleta valores inferiores indicam que não haveria risco para uso em irrigação (Tabela 6).

Com referência aos valores médios da RAS ao longo do tempo observa-se uma redução em suas concentrações (Tabela 6) passível de ser explicado pela recarga direta do aquífero dos poços situados na área experimental diluindo sistematicamente os sais a cada período chuvoso (Figura 1). A coleta T1 foi a que apresentou maior média da RAS diferindo estatisticamente das demais épocas de amostragem. Este resultado pode estar associado diretamente à pluviosidade ocorrida na época de coleta (Figura 1) haja vista que existia alta concentração dos elementos presentes no solo logo após a aplicação da vinhaça. Desta forma pode-se inferir que, possivelmente, a chuva proporcionou a lixiviação do Ca²⁺, Mg²⁺ e principalmente do Na⁺, o que gerou tal concentração na água subterrânea. Observa-se que os valores encontrados são inferiores a 3 (mmol_c L⁻¹)^{0,5} não apresentando riscos de sodificação do solo causados pela RAS da água (Ayers & Westcot, 1999).

Os valores de condutividade elétrica (CE) medidos no experimento ao longo do tempo apresentaram valores inferiores a 0,7 dS m⁻¹ (Tabela 6), sendo os maiores valores encontrados nas coletas T0, T1, T2 e T3, não diferindo estatisticamente entre si. Souza et al. (2007) encontraram, avaliando a CE da água subterrânea em três diferentes períodos, de acordo com o regime pluviométrico, forte dependência espacial no período úmido e moderada no período seco. Andrade et al. (2012) relatam que as concentrações de CE acima de 3,5 dS m⁻¹ são as que receberam maior influência da precipitação na variação espacial de sua qualidade e informam que no mês de maior precipitação pluviométrica tende a apresentar maiores valores

Tabela 6. Valores médios das variáveis analisadas ao longo do tempo, independentes da dose de vinhaça aplicada

Tempo	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	RAS	CE	pH
	mmol _c L ⁻¹			(mmol L ⁻¹) ^{0,5}	dS m ⁻¹	
T0*	0,0461 b ± 0,02	2,5620 b ± 1,13	0,7162 b ± 0,62	0,6824 bc ± 0,78	0,28 ab ± 0,24	5,56 bc ± 0,72
T1	0,1131 a ± 0,19	5,8315 a ± 7,61	0,7566 b ± 0,64	2,1267 a ± 6,48	0,32 a ± 0,35	5,62 b ± 0,67
T2	0,0640 b ± 0,05	3,9363 b ± 4,03	0,8002 b ± 0,51	0,9921 b ± 1,20	0,34 a ± 0,38	5,54 bc ± 0,54
T3	0,0373 b ± 0,02	2,6432 b ± 2,07	0,9147 a ± 0,67	1,2524 b ± 3,29	0,31 a ± 0,34	5,70 b ± 0,49
T4	0,0252 b ± 0,02	2,1796 bc ± 2,09	0,5646 c ± 0,30	0,9828 b ± 1,47	0,20 b ± 0,17	5,82 a ± 0,33
T5	0,0150 c ± 0,01	0,9086 c ± 0,46	0,7202 b ± 0,42	1,3993 b ± 1,63	0,18 c ± 0,09	5,53 c ± 0,34

* Corresponde à coleta realizada antes da aplicação da vinhaça. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05)

de condutividade elétrica devido à lavagem de sais da zona não saturada. O comportamento sazonal da condutividade elétrica vindo sendo observado por diversos autores, como Lemos et al. (2010), em açude e Zaccaria et al. (2010) e Burte et al. (2011), em aquífero de áreas irrigadas. Os resultados encontrados diferem dos apresentados por Lemos et al. (2010), Zaccaria et al. (2010), Burte et al. (2011) e Andrade et al. (2012). Observa-se que há influência do regime pluviométrico quando comparadas as coletas nos diferentes tempos (Tabela 6). Na coleta T2 os valores de CE se apresentam em maior concentração observando-se que, ao longo do tempo e sob a influência da precipitação (Figura 1), há uma redução da concentração de CE em que a coleta T5 apresenta a menor concentração, em função de que se constata haver uma redução da concentração de sais na água subterrânea com o aumento do regime pluviométrico sendo um indicativo de que a aplicação da vinhaça não provoca degradação por salinização do lençol freático. De acordo com Ayers & Westcot (1999) água com condutividade elétrica menor do que 0,7 dS m⁻¹ não oferece risco algum de salinização do solo. Resultados semelhantes foram encontrados por Andrade Júnior et al. (2006), quando avaliaram a qualidade da água subterrânea nos municípios que compõem a bacia hidrográfica do Rio Gurgueia (0,3 e 0,45 dS m⁻¹) e recomendaram que, quando do uso de águas destinadas para irrigação, que apresentarem CE superiores a 1,2 dS m⁻¹, sejam utilizadas técnicas de controle do processo de salinização do solo. Resultados diferentes foram encontrados por Medeiros et al. (2003), quando caracterizaram as águas subterrâneas usadas para irrigação na chapada do Apodi, RN, região produtora de melão, constatando valores que variaram de 1,17 a 2,98 dS m⁻¹ e por Oliveira & Maia (1998) nas águas do aquífero calcário (3 dS m⁻¹).

Com relação ao potencial hidrogeniônico (pH), a coleta T4 apresentou maior média (5,82) diferindo estatisticamente dos demais avaliados podendo os resultados estarem associados ao regime pluviométrico no período avaliado, favorecido pela recarga do lençol freático proporcionando uma diluição maior dos sais presentes. Ayers & Westcot (1999) citam uma faixa normal de pH para água compreendida entre valores de 6,5 e 8,4. Os valores de pH obtidos variaram de 5,53 a 5,82 ao longo do tempo; todavia, Nakayama (1982) cita que não existe restrição de uso para irrigação em águas com pH inferior a 7, com restrição moderada para águas com pH entre 7 e 8 e com severa restrição para pH acima de 8.

Segundo Oliveira & Maia (1998) as determinações de pH e CE fornecem subsídios para se avaliar a possibilidade de precipitação de sais no solo e a indução a salinidade em função da prática de irrigação; os autores informam que a RAS assume papel preponderante posto que a combinação CE e RAS serve para avaliar os perigos que a água oferece ao solo, em termos de indicação de salinidade, aumento no teor de sódio na solução do solo e, conseqüentemente, problemas de infiltração de água no solo.

Na Tabela 7 estão apresentados os parâmetros estatísticos para as variáveis de qualidade da água analisada.

Em termos de classificação da água quanto ao risco de salinidade, segundo Richards (1954) e Ayers & Westcot (1999),

Tabela 7. Parâmetros estatísticos para as variáveis de qualidade da água analisada

Variáveis	Mínimo	Máximo	Média	Desvio padrão
pH	3,80	7,30	5,63	0,55
CE (dS m ⁻¹)	0,02	1,89	0,27	0,29
Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,0588	4,6348	0,7459	0,5532
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,0002	2,8950	0,0508	0,1628
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,0002	77,8361	3,0619	7,5163
RAS (mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}	0,0002	27,3419	1,2256	2,2664

a água subterrânea da área estudada poderia ser classificada como C₁ (água de baixa salinidade) com condutividade elétrica (CE_a) de 0,27 dS m⁻¹. Quanto ao risco de sodicidade a RAS da área experimental apresentou média de 1,2256 (mmol_c L⁻¹)^{0,5} o que a classificaria, segundo Ayers & Westcot (1999), como S₁ não apresentando, portanto, risco de sodicidade. Desta forma, tal classificação indica que o manejo com a vinhaça na área estudada não favoreceu a salinidade ou sodicidade da água subterrânea.

Os níveis de tolerância à salinidade da água (CE_a) para cultura da cana-de-açúcar é de 2,3 dS m⁻¹, segundo Ayers & Westcot (1999). A água do lençol freático com CE superior a 2,3 dS m⁻¹, poderia causar prejuízos à cultura, tanto em termos de desenvolvimento como em produtividade. De acordo com os resultados obtidos não foi observado risco de salinizar a água subterrânea no período avaliado.

Na Tabela 8 observa-se o resultado da ANOVA da composição química da água subterrânea por meio do teste F das concentrações de cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), sódio (Na⁺), razão de absorção de sódio (RAS), condutividade elétrica (CE) e potencial hidrogeniônico (pH) na área estudada.

A análise de variância (Tabela 8) mostrou que não houve efeito da interação entre Doses x Tempo para concentrações de Ca²⁺, Na⁺, RAS e CE enquanto para Mg²⁺ e pH a interação foi significativa. O fator isolado Doses promoveu efeito significativo com níveis de probabilidade variando de 5% para Mg²⁺ e 1% para Na⁺, CE e pH; para as concentrações de Ca²⁺ e RAS o efeito não foi significativo.

Quanto ao Tempo a análise promoveu efeito significativo para todos os parâmetros analisados a nível de 0,01 de probabilidade, com exceção do Ca²⁺ que apresentou efeito significativo a 0,05 de probabilidade.

Tabela 8. Efeito das doses (D), do tempo (T) e da interação tempo (T) x dose (D) na composição química da água do lençol freático

FV variável	D			T			D x T		
	Pr > F			Pr > F			Pr > F		
Mg ²⁺	0,0249*			<0,0001**			0,0114*		
Ca ²⁺	0,2195 ^{ns}			0,0029*			0,2571 ^{ns}		
Na ⁺	0,0040**			0,0005**			0,5450 ^{ns}		
RAS	0,3163 ^{ns}			<0,0001**			0,6416 ^{ns}		
CE	0,0071**			0,0048**			0,1262 ^{ns}		
pH	0,0049**			0,0003**			<0,0001**		
GL	3			5			15		
Resíduo	52			260			260		

^{ns}Não significativo até 0,05. *Significativo a 0,05 e **Significativo a 0,01 de probabilidade pelo teste F. D - Doses; T - Tempo; T x D - Tempo x doses

CONCLUSÕES

1. A aplicação de doses de vinhaça até $65 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, em áreas de várzea para os parâmetros analisados, não proporcionou riscos de salinização das águas subterrâneas.

2. A relação de absorção de sódio mostrou que não existe risco de sodicidade da área no período avaliado.

3. O monitoramento dos parâmetros químicos do lençol freático ao longo do tempo indicou que houve redução de suas concentrações em função da precipitação pluviométrica ocorrida no período estudado.

4. A vinhaça pode ser aplicada em áreas de várzea a cada safra, em regiões de elevada pluviosidade.

5. A classificação da água subterrânea como C_1S_1 indica que o manejo com a vinhaça na área estudada não favoreceu a salinidade ou sodicidade do lençol.

6. A condutividade elétrica do lençol freático foi abaixo do nível de tolerância à salinidade da água (CE_d) para a cultura da cana-de-açúcar, não comprometendo seu uso para irrigação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao CNPq, pelas bolsas dos autores, e à Usina Cucaú Açúcar e Etanol S/A, pelo apoio técnico.

LITERATURA CITADA

- Andrade Júnior, A. S.; Silva, E. F. F.; Bastos, E. A.; Melo, F. B.; Leal, C. M. Uso e qualidade da água subterrânea para irrigação no semi-árido piauiense. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.873-880, 2006.
- Andrade, T. S.; Montenegro, S. M. G. L.; Montenegro, A. A.; Rodrigues, D. F. B. Variabilidade espaço-temporal da condutividade elétrica da água subterrânea na região semiárida de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.496-504, 2012.
- APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, WPCF - Washington Press Club Foundation. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington: American Public Health Association, 19.ed. 1995. 798p.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. Campina Grande: UFPB, 1999. 153p. Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29.
- Bebé, F. V.; Rolim, M. M.; Pedrosa, E. M. R.; Silva, G. B.; Oliveira, V. S. Avaliação de solos sob diferentes períodos de aplicação de vinhaça. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.781-787, 2009.
- Burte, J. D. P.; Coudrain, A.; Marlet, S. Use of water from small alluvial aquifers for irrigation in semi-arid regions. *Revista Ciência Agronômica*, v.42, p.635-643, 2011.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. 3º Levantamento Safra 2012/2013 Dezembro 2012. http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_12_10_34_43_boletim_cana_portugues_12_2012.pdf 23 Jan. 2013.
- Cruz, J. I.; Portugal, R. S.; Lucendo, M. C. H.; Elis, V. R.; Fachin, S. J. S.; Ustra, A. T.; Borges, W. R. Detecção de contaminação de solo por vinhaça através de análise de dados de eletrorresistividade. *Revista Brasileira de Geofísica*, v.26, p.481-492, 2008.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília: Embrapa Produção de Informática; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006. 306p.
- Hossain, S. M. I.; Eusufzai, S. U. K.; Rahman, M. A. Effect of different irrigation level on grown and yield parameters of sugarcane. *Pakistan Journal Agriculture Research*, v.22, p.28-35, 2009.
- Jiang, Z. P.; Li, Y. R.; Wei, G. P.; Liao, Q.; Su, T. M.; Meng, Y. C.; Zhang, H. Y.; Lu, C. Y. Effect of long-term vinasse application on physico-chemical properties of sugarcane field soils. *Sugar Tech*, v.14, p.412-417, 2012.
- Junqueira, C. A. R.; Molina Júnior, V. E.; Lossardo, L. F.; Felício, B. C.; Moreira Júnior, O.; Foschini, R. C.; Mendes, R. M.; Lorandi, R. Identificação do potencial de contaminação de aquíferos livres por vinhaça na Bacia do Ribeirão do Pântano, Descalvado (SP), Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, v.39, p.507-518, 2009.
- Lemos, M.; Ferreira Neto, M.; Dias, N. da S. Sazonalidade e variabilidade espacial da qualidade da água na Lagoa do Apodi, RN. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.155-164, 2010.
- Lyra, M. R. C. C.; Rolim, M. M.; Silva, J. A. A. Toposequência de solos fertirrigados com vinhaça: Contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.525-532, 2003.
- Medeiros, J. F. de; Lisboa, R. de A.; Oliveira, M. de; Silva Júnior, M. J. da S.; Alves, L. P. Caracterização das águas subterrâneas usadas para irrigação na área produtora de melão da Chapada do Apodi. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, p.469-472, 2003.
- Nakayama, F. S. Water analysis and treatment techniques to control emitter plugging. In: *Irrigation Association Conference, 1982, Portland, Proceedings...* Portland: Irrigation Association. 1982. p.97-112,
- Oliveira, O.; Maia, C. E. Qualidade físico-química da água para a irrigação em diferentes aquíferos na área sedimentar do Estado do Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.2, p.17-21, 1998.
- Ramesh, K.; Elango, L. Groundwater quality and its suitability for domestic and agricultural use in Tondiar river basin, Tamil Nadu, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, v.184, p. 3887-3899, 2012.
- Ribas, M. M. F.; Chinalia, F.; Foresti, E. Microbial succession within an anaerobic sequencing batch biofilm reactor (ASBBR) treating cane vinasse at 55 °C. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, v. 42, p.1027-1036, 2009.
- Ribeiro, M. N.; Lourencetti, C; Pereira, S. Y.; Marchi, M. R.

- R. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. *Química Nova*, v.30, p.688-694, 2007.
- Richards, L. A. (ed.) *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*. Washington: U.S. Salinity Laboratory, 1954, 160p. *Agriculture Handbook*, 60.
- RIDESA - Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. Catálogo nacional de variedades "RB" de cana-de-açúcar. Curitiba: RIDESA, 2010. 83p.
- Rolim, M. M.; Lyra, M. R. C. C.; Duarte, A. S.; Medeiros, P. R. F.; Silva, E. F. F.; Pedrosa, E. M. R. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água. *Revista Ambiente Água*, v.8, p.155-171, 2013.
- Salomon, K. R.; Lora, E. E. S. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. *Biomassa e Energia*, v.2, p.57-67, 2005.
- Shuqair, S. M. S. Estudo da contaminação do solo e água subterrânea por elementos tóxicos originados dos rejeitos das minas de carvão de Figueira no estado do Paraná. São Paulo: USP, 2002. 125p. Tese Doutorado
- Silva, M. A. S.; Griebeler, N. P.; Borges, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.108-114, 2007.
- Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Santos, F. X.; Costa Neto, M. Dinâmica da condutividade elétrica em neossolo flúvico no semi-árido. *Revista de Biologia e Ciências da Terra*, v.7, p.132-139, 2007.
- Tejera, N. A.; Rodés, R.; Ortega, E.; Campos, R.; Lluch, C. Comparative analysis of physiological characteristics and yield components in sugarcane cultivars. *Field Crops Research*, v.102, p.64-72, 2007.
- WHO – World Health Organization. *Guidelines to drinking-water quality*. Geneva: World Health Organization, v.2 1996. 989p.
- Zaccaria, D.; Oueslati, I.; Neale, C. M. U.; Lamaddalena, N.; Vurro, M.; Pereira, L. S. Flexible delivery schedules to improve farm irrigation and reduce pressure on groundwater: A case study in southern Italy. *Irrigation Science*, v.28, p.257-270, 2010.