



## Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática

doi: 10.4136/ambi-agua.1014

Mário M. Rolim\* ; Marília Regina C. C Lyra; Anamaria de Sousa Duarte;  
Pedro Róbinson Fernandes de Medeiros; Ênio Farias de França e Silva;  
Elvira Maria Régis Pedrosa

Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE- Pernambuco, Brasil

\*Autor correspondente: e-mail:rolim@dtr.ufrpe.br,

mrlyra@uol.com.br, asousaduarte@gmail.com, prfmede@yahoo.com.br,

effsilva@dtr.ufrpe.br, elvira.pedrosa@dtr.ufrpe.br

### RESUMO

A vinhaça é um resíduo, proveniente do processo de destilação do álcool, rico em matéria orgânica e nutrientes, que, se aplicado em doses excessivas, pode desequilibrar o complexo sortivo do solo e conseqüentemente contaminar o lençol freático. O objetivo deste estudo foi avaliar a influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade da água freática em uma área cultivada com cana-de-açúcar localizada no estado de Pernambuco, Brasil. Foram instalados dez poços de monitoramento distribuídos em três transectos paralelos localizados em uma área circunvizinha à lagoa de distribuição de vinhaça. Ao longo do experimento, avaliou-se a qualidade da água subterrânea no nível freático, assim como da água do rio Ipojuca para verificar-se possível intrusão salina advinda do oceano. Os parâmetros analisados foram: CE, SDT, pH, DQO, DBO,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ . Concluiu-se que o armazenamento da vinhaça na lagoa de distribuição alterou os valores de CE, DBO, DQO e as concentrações de SDT,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  da água do lençol freático.

**Palavras-chave:** cana-de-açúcar, resíduo, fertirrigação, infiltração, potássio.

### Influence of a vinasse-distributing lake on water quality of the groundwater

#### ABSTRACT

Vinasse is an organic matter and nutrient-rich residue generated during alcohol distillation. However, if applied to crops in excess, it may disturb the complex balance of soil absorption and contaminate groundwater. The goal of this research was to evaluate the effect of a vinasse-distributing pool on the quality of groundwater in a sugarcane field in Pernambuco State, Brazil. Samples were collected from 10 observation wells along three parallel transects around the vinasse-distributing pool. The quality of groundwater as well as the fluvial water of the Ipojuca River was assessed as a control for ocean intrusion. The following parameters were measured: CE, SDT, pH, COD, BOD,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  and  $\text{HCO}_3^-$ . Storing vinasse in the distribution lake disturbed CE, COD and BOD values as well TDS,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and  $\text{Mg}^{2+}$  concentrations in groundwater.

**Keywords:** sugarcane, residue, fertirrigation, infiltration, potassium.

## 1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma das culturas mais importante para o agronegócio brasileiro e, neste contexto, o Brasil é considerado o maior exportador mundial de açúcar e álcool combustível. Dados publicados para a safra prevista em 2012/2013 mostram que a área plantada de cana de açúcar será, aproximadamente, igual a 8,5 milhões de hectares e serão produzidas 38,85 milhões de toneladas de açúcar e 23,96 bilhões de litros de álcool (CONAB, 2012). As receitas geradas pela atividade canavieira, apenas, no mês de Junho de 2012 foram iguais a 881,7 e 106,7 milhões de dólares para exportação de açúcar e álcool, respectivamente (CEPEA, 2012).

Entretanto, se por um lado a atividade sucroalcooleira faz com que o Brasil ocupe uma posição de destaque mundial com relação à produção de açúcar e álcool, por outro, tal atividade produz grandes volumes de resíduos. Dentre os resíduos gerados do beneficiamento da cana, a vinhaça é o mais importante, pois a produção de um litro de álcool gera de 10 a 15 litros de vinhaça, dependendo da variedade da cana e do processo industrial utilizado (Barros et al., 2010).

A vinhaça é um líquido marrom claro composto por 93% de água e 7% de sólidos orgânicos e inorgânicos. Em geral, apresenta pH ácido, elevada carga de matéria orgânica, alta concentração de macro e micronutrientes, sobretudo, potássio e nitrogênio; além de apresentar altas temperaturas na saída dos destiladores (Marques, 2006; Gómez e Rodríguez, 2000).

Pelas características químicas apresentadas anteriormente, a vinhaça é considerada um resíduo nocivo, quando disposto no meio ambiente de forma indiscriminada. No Brasil, atualmente, toda vinhaça produzida é reutilizada na adubação dos canaviais, onde os nutrientes presentes neste resíduo de difícil gestão substituem, parcialmente, o uso de fertilizantes minerais, diminuindo, assim, os custos de aquisição de insumos agrícolas (Resende et al., 2006).

Antes de ser utilizada na fertirrigação da cana-de-açúcar, a vinhaça é armazenada em configurações denominadas de lagoas de distribuição, que tem como objetivo principal promover a troca de calor entre o resíduo e o meio ambiente, de modo que a alta temperatura da vinhaça, logo após o processo industrial, não provoque efeitos deletérios aos equipamentos de transporte e irrigação, ao solo e à cultura. No entanto, esta prática pode provocar a contaminação das águas subterrâneas por conta da inexistência de impermeabilização das lagoas de distribuição e dos canais de condução de vinhaça.

Alguns estudos a respeito do uso vinhaça em canaviais como fonte de adubação demonstram que a qualidade das águas subterrâneas sofrem alterações em virtude da aplicação deste resíduo.

Ludovice (1997), estudando o efeito poluente da vinhaça infiltrada em canais de condução de terra sobre o lençol freático, concluiu que o poder de remoção do solo estava comprometido em decorrência do longo tempo de operação dos canais (13 anos), indicando que haveria possibilidade de que alguns elementos presentes na vinhaça pudessem atingir o lençol freático, principalmente, o nitrogênio, que na água freática, se encontrava em concentração superior à permitida pela legislação brasileira para consumo humano.

Gloeden et al. (1991) relataram que a utilização de vinhaça no cultivo de cana-de-açúcar em áreas próximas ao aquífero de Bauru poderia comprometer a qualidade da água subterrânea, devido à saturação do solo e ao afloramento do aquífero. No referido estudo, os autores verificaram que os teores de cloretos, carbono orgânico, nitrogênio e sulfatos aumentaram ao longo de nove safras de cultivo de cana-de-açúcar.

Por outro lado, em estudo realizado em curto período de tempo e conduzido por Dalri et al. (2010) mostrou que a aplicação de doses crescentes de vinhaça (0, 200, 250, 300 e 350 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>) colaborou para a diminuição da taxa de infiltração da água no solo devido à matéria orgânica presente no resíduo que tem ação cimentante, contribuindo para a diminuição da translocação de solutos no perfil do solo. Brito et al. (2007) aplicaram vinhaça em três tipos de solos em taxas que variaram de 0 a 700 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> e observaram uma diminuição de matéria orgânica e cátions nos lixiviados, indicando que grande parte do material orgânico e inorgânico presente na vinhaça ficou retido no solo. Resposta semelhante foi obtida por Silva et al. (2012), quando estudaram a distribuição de solutos em solo argiloso incubado com vinhaça.

Como visto, a bibliografia acerca dos efeitos da vinhaça no lençol freático e nas águas subterrâneas ainda é bastante limitada, sobretudo em trabalhos em escala real e de longo prazo. Assim, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade de água do lençol freático em uma área cultivada com cana-de-açúcar localizada na Mata Sul do Estado de Pernambuco.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em área cultivada com cana-de-açúcar na Usina Salgado, localizada no Município de Ipojuca (07<sup>o</sup> 10' e 07<sup>o</sup> 25' S, 39<sup>o</sup> 10' e 39<sup>o</sup> 30' W) no Estado de Pernambuco (Figura 1). O Município de Ipojuca está inserido na zona fisiográfica da Mata Sul Pernambucana e apresenta um clima do tipo As, segundo Koppen, tropical chuvoso de monção com verão seco, com estação chuvosa entre os meses de março a agosto. A precipitação anual média na área é de 1.800 mm e a temperatura anual média é de 25,2 °C.



**Figura 1.** Localização da área experimental – Usina Salgado.

O solo da área experimental foi classificado como Espodossolo Ferro Cárstico (textura arenosa) segundo a EMBRAPA (2006). A caracterização física e química das amostras provenientes das trincheiras correspondentes ao perfil do solo da área (Tabelas 1 e 2), até a profundidade de 2m, foi realizada no Laboratório de Fertilidade do Solo e no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos, ambos pertencentes à UFRPE, seguindo os métodos descritos pela EMBRAPA (1997).

**Tabela 1.** Características físicas do solo.

Horizontes	Prof.	K <sub>0</sub>	Dg	Dp	P	Umidade (%)		Areia	Silte	Argila
	cm	cm h <sup>-1</sup>	g cm <sup>-3</sup>	g cm <sup>-3</sup>	(%)	CC	PMP	g kg <sup>-1</sup>		
Ap	00 - 30	6	1,4	2,5	44	19,5	13,9	550	100	350
A2	30 - 55	21	1,3	2,5	47	23,5	18,1	560	70	370
E	55 - 110	28	1,5	2,7	43	1,4	0,7	940	20	40
Bh	110 - 144	53	1,8	2,7	33	3,7	2,6	890	30	70
Bsh	144 - 200	15	1,8	2,7	32	17,8	13,2	890	70	40

**K<sub>0</sub>** – Condutividade hidráulica; **Dg** – Densidade global; **Dp** – Densidade de partículas; **P** – Porosidade total; **CC** e **PMP** - Capacidade de campo e ponto de murcha permanente.

**Tabela 2.** Características químicas do solo.

Horizontes	pH	P	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	Al <sup>3+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	S	CTC	V	C	MO
		mg kg <sup>-1</sup>	cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>									%	
AP	5,5	43,26	2,25	0,07	3,78	0,60	3,20	1,01	6,53	10,91	59,85	2,51	4,32
A2	5,6	7,84	1,78	0,05	3,22	0,30	2,05	0,67	4,56	8,08	56,44	1,81	3,12
E	5,5	8,40	0,15	0,04	3,01	0,38	0,70	0,11	0,99	4,38	22,60	0,65	1,12
Bh	5,4	22,11	0,61	0,06	2,91	0,64	0,80	0,21	1,68	5,23	32,12	0,51	0,88
Bsh	5,5	4,48	0,66	0,07	2,68	0,52	1,00	0,33	2,06	5,26	39,16	1,81	3,12

**S** = soma de bases trocáveis; **CTC** = capacidade de troca de cátions; **V** = percentagem de saturação de bases; **C** = carbono orgânico; **MO** = teor de matéria orgânica.

Para fins de monitoramento, foram instalados dez poços confeccionados com tubos de PVC de 75 mm de diâmetro e 3 m de comprimento, perfurados e recobertos com tela filtrante no terço médio inferior. Cada poço de monitoramento foi instalado a 3 metros de profundidade com sua extremidade rente ao solo e protegida por tampa metálica e vedações de borracha de modo a evitar a entrada de água e de pequenos animais para o interior do poço.

Os poços de monitoramento foram distribuídos em três transectos paralelos localizados em uma área circunvizinha à lagoa de distribuição de vinhaça. A distância entre cada poço de monitoramento, dentro de cada transecto, foi igual a 25 m. A lagoa de distribuição de vinhaça ocupava uma área igual a 300 m<sup>2</sup>, com profundidade de 0,60 m e não era impermeabilizada (Figura 2).



**Figura 2.** Lagoa de armazenamento e distribuição de vinhaça pertencente à Usina Salgado.

A vinhaça produzida era conduzida através de um canal principal até a lagoa de distribuição, para ser utilizada na fertirrigação da área de plantio a uma taxa de  $300 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ , após o corte da cana-de-açúcar. A caracterização física e química da vinhaça coletada na lagoa de distribuição (Tabela 3) foi realizada seguindo a metodologia proposta por EMBRAPA (1997) e APHA et al. (1995).

Foram realizadas quatro coletas de água proveniente do lençol freático, sendo as duas primeiras após o corte da cana e as duas últimas após o período de fertirrigação com vinhaça. Para ter referência de uma possível intrusão salina advinda da água do mar, foram coletadas também, no mesmo período, amostras de água do rio Ipojuca, corpo d'água que sofre influência de maré e que entrecorta a área de plantio localizada próxima à lagoa de distribuição.

**Tabela 3.** Caracterização físico-química da vinhaça.

Parâmetros	Unidades	Valores
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	21.500
DBO	$\text{mg L}^{-1}$	12.000
CE	$\text{dS m}^{-1}$	13,75
SDT	$\text{mg L}^{-1}$	7.690
pH		4,4
Nitrogênio	$\text{mg L}^{-1}$	440
Fósforo	$\text{mg L}^{-1}$	140
Potássio	$\text{mg L}^{-1}$	3.000
Sódio	$\text{mg L}^{-1}$	300
Cálcio	$\text{mg L}^{-1}$	560
Magnésio	$\text{mg L}^{-1}$	280
Cloretos	$\text{mg L}^{-1}$	1.219

As amostras de água foram coletadas, preservadas e determinadas de acordo com a metodologia descrita em APHA et al. (1995). Para avaliar a qualidade da água freática na área onde fica localizada a lagoa de distribuição de vinhaça e do rio Ipojuca, foram determinados os seguintes parâmetros: a) físicos CE e SDT e; b) químicos: pH, DQO, DBO,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$ .

Para análise de dados estáveis em relação à média, foi utilizada a técnica proposta por Vachaud et al. (1985) que se baseia no cálculo da diferença relativa, o qual permite a análise dos desvios entre os valores observados individualmente no espaço e a média entre eles (Equação 1).

$$\delta_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_j}{\bar{X}_j} \quad [1]$$

em que:

$$\bar{X}_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_{ij} \quad [2]$$

em que:

$\delta_{ij}$  é a diferença relativa entre a determinação individual para um local  $i$  no tempo  $j$ ;  $X_{ij}$  é o valor do parâmetro no local  $i$  e no tempo  $j$ ;  $\bar{X}_j$  é o valor médio do parâmetro para todas as  $N$  posições, no momento  $j$ .

A média da diferença relativa para cada locação é definida pela Equação 3.

$$\bar{\delta}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \delta_{ij} \quad [3]$$

em que:

$m$  o número de meses estudados.

Para análise de dispersão e variabilidade dos dados, em torno de um valor de tendência central (média) tomado como ponto de comparação, foram calculadas as médias de dispersão absoluta através das Equações 4, 5 e 6.

$$At = X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n} \quad [4]$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad [5]$$

$$Dm = \frac{|x_i - \bar{x}|}{n} \quad [6]$$

em que:

At é a amplitude total;  $X_{\text{máx}}$  é o valor máximo da população de dados e  $X_{\text{mín}}$  é o valor mínimo da população de dados;  $\sigma$  é o desvio padrão;  $x_i$  é o valor do parâmetro;  $\bar{X}$  o valor médio do parâmetro; Dm é o desvio médio e; n é o número de dados.

Para a avaliação da qualidade da água do lençol freático para irrigação, utilizaram-se os critérios: concentração de sais total, estimada pela CE expressa em  $\mu\text{S cm}^{-1}$ ; proporção relativa de sódio (%), calculada pela equação 7 e; a razão de adsorção de sódio (RAS) expressa em  $(\text{meq L}^{-1})^{1/2}$  e calculada pela equação 8.

$$\text{Na}\% = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+) \times 100}{(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)} \quad [7]$$

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}} \quad [8]$$

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 4, estão expostos os resultados em relação à média, ao desvio padrão, ao desvio médio, à amplitude total (At) e à diferença média relativa (dmr) dos parâmetros físicos e químicos da água freática monitorados pelos poços.

**Tabela 4.** A média, desvio padrão ( $\sigma$ ), desvio médio (Dm), amplitude total (At) e diferença média relativa (dmr) dos parâmetros físico-químicos da água freática.

Parâmetros	unidades	Média	$\sigma$	Dm	At	dmr
SDT	$\text{mg L}^{-1}$	745,67	100,02	74,09	185,30	0,0071
CE	$\mu\text{S m}^{-1}$	1554,5	0,21	0,16	0,40	0,0038
pH		5,81	0,20	0,15	0,36	0,0009
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	325,5	143,0	104,6	271,2	0,0210
DBO	$\text{mg L}^{-1}$	36,71	26,34	19,96	49,00	0,0157
$\text{HCO}_3^-$	$\text{mg L}^{-1}$	385,4	94,9	70,3	180,1	0,0014
$\text{NO}_3^-$	$\text{mg L}^{-1}$	0,17	0,11	0,08	0,21	0,0054
$\text{NO}_2^-$	$\text{mg L}^{-1}$	0,20	0,06	0,04	0,11	0,0191
$\text{Cl}^-$	$\text{mg L}^{-1}$	744,81	512,11	386,24	941,35	0,0308
$\text{Na}^+$	$\text{mg L}^{-1}$	21,41	3,83	2,86	7,32	0,0027
$\text{K}^+$	$\text{mg L}^{-1}$	380,50	75,69	57,07	139,85	0,0058
$\text{Ca}^{2+}$	$\text{mg L}^{-1}$	56,28	49,54	37,86	88,95	0,0626
$\text{Mg}^{2+}$	$\text{mg L}^{-1}$	10,66	4,17	3,12	7,82	0,0236

A partir dos dados de desvio médio e diferença média relativa, verifica-se a existência de dados significativos e consistentes em relação aos parâmetros e em função das épocas analisadas; portanto, quanto mais próximo a zero for a diferença média relativa, maior será a consistência dos dados no aspecto de caracterização da área em estudo. Pode-se assim, assumir que os parâmetros SDT, CE, pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  apresentaram valores mais consistentes ao longo do período de amostragem.

A condutividade elétrica (CE) está relacionada com teor de sais contidos na água e, portanto, tem relação direta com o teor de sólidos dissolvidos totais (SDT). Neste estudo, a CE da água teve uma correlação de 98,08% com o teor de STD, sobretudo, com o teor de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  e  $\text{K}^+$ . A CE e o teor de SDT são parâmetros físicos utilizados para avaliar a qualidade das águas de superfície e subterrâneas utilizadas para os mais diversos usos, incluindo abastecimento humano. A Resolução CONAMA nº 396, de 03 de abril de 2008, que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas preconiza que o valor máximo permissível (VMP) de SDT para consumo humano seja igual a  $1000 \text{ mg L}^{-1}$ . Neste estudo, a concentração de STD na água freática foi bastante elevada e pode estar relacionada com a disposição de vinhaça no solo durante longos períodos de cultivo da cana-de-açúcar, pois tal efluente possui um elevado teor de SDT e por serem altamente dissolutos, lixiviam com facilidade para as camadas mais profundas do solo atingindo, posteriormente, o lençol freático. Segundo Ramesh e Elango (2012), águas contendo alta concentração de SDT podem causar problemas de saúde quando utilizadas para consumo humano; bem como, prejudicar a estrutura do solo, se utilizadas para irrigação.

O pH é um parâmetro indicador de qualidade da água que exerce influência nos processos unitários de tratamento de água, como a coagulação, a floculação, a desinfecção e controle da dureza e de agressividade da água (Brito et al., 2012, Brouyère et al., 2004); este parâmetro se relaciona diretamente com duas características químicas importantes da água, a acidez e a alcalinidade. Neste estudo, o pH da água foi igual 5,81, evidenciando que o constituinte principal da alcalinidade da água é o bicarbonato com uma concentração igual a  $385,4 \text{ mg L}^{-1}$ . A alcalinidade não apresenta risco potencial para o meio ambiente, porém alguns de seus constituintes conferem alteração do gosto da água, podendo impossibilitar o uso da água para consumo humano.

Os parâmetros DQO e DBO estimam a quantidade de oxigênio requerida para degradar a matéria orgânica presente na água. Os valores médios de DQO e DBO encontrados na água freática foram de 325,5 e 36,7  $\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente. Os elevados valores de DQO e DBO encontrados na água do lençol freático na área de influência da lagoa de distribuição podem estar associados à infiltração dos nutrientes e da carga orgânica presentes na vinhaça ao longo do perfil de solo, tanto verticalmente como pelos fluxos laterais subsuperficiais. Reconhecidamente, a vinhaça é um resíduo que tem elevada concentração de matéria orgânica e de nutrientes que se dispostos em excesso ou por longos períodos podem atingir e contaminar o lençol freático através das vias hidrológicas, apesar do solo ter um excelente poder filtrante.

Silva et al. (2012) comentam que o uso contínuo de resíduos agrícolas para fins de fertilidade do solo podem elevar a concentração de contaminantes nas águas subterrâneas, principalmente, em áreas onde o lençol freático é raso (menor que 3 m de profundidade). Por outro lado, Lyra et al. (2003) relataram uma diminuição nos valores de DQO e DBO na água do lençol freático de uma área cultivada com cana-de-açúcar que utiliza vinhaça para fins de irrigação, e esta diminuição está associada ao poder de retenção de matéria orgânica pelo solo. O decréscimo de matéria orgânica no percolado de solos tratados com vinhaça também foi relatado por Brito et al. (2007).

Contaminações por nitrato têm sido amplamente relacionadas ao uso de fertilizantes nitrogenados na atividade agrícola. Entretanto, existem fontes não agrícolas, como a disposição inadequada de efluentes domésticos e industriais sem tratamento prévio que, também, propiciam a contaminação das águas dos mananciais superficiais e subterrâneos por nitrato (Wakida e Lerner, 2005). Dessa maneira, nem todo o nitrato presente na água freática pode ser atribuído ao uso de fertilizantes na atividade agrícola e sua presença pode estar associada a outras fontes antrópicas que tenham o potencial de contaminar as águas subterrâneas de uma mesma bacia ou aquífero, como a disposição inadequada de vinhaça, por exemplo.

Ressalta-se que o íon nitrato é o contaminante mais comum encontrado na água subterrânea (Zheng et al., 2005). De acordo com CETESB (2007), quando as concentrações de nitrato na água do lençol freático variam de 2 a 5 mg L<sup>-1</sup>, há uma indicação de que houve poluição de origem antrópica. Na literatura é relatado que altas concentrações de nitrato podem poluir o meio ambiente, principalmente, os mananciais subterrâneos (Singh et al., 2006) e pode trazer sérios problemas de saúde a quem consome essas águas (Sankararamakrishnan et al., 2008). Neste estudo, as concentrações médias de nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) foram iguais 0,17 e 0,20 mg L<sup>-1</sup>, respectivamente, indicando que a acumulação de vinhaça na lagoa de distribuição não afetou a qualidade da água do lençol freático quanto a estes íons, estando tais valores dentro dos limites preconizados pela Resolução CONAMA n° 396 de 2008 (Brasil, 2008) para todos os usos da água subterrânea. Entretanto, há de se ressaltar que como a água freática é pobre em oxigênio, pode não ter ocorrido a conversão do nitrogênio orgânico (NO) ou do íon amônia (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) presente na água em NO<sub>2</sub><sup>-</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, fato que pode ter contribuído para os baixos valores destas duas últimas formas de nitrogênio apresentadas. No entanto, tanto o NO, como o NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, são indicadores de atividades antrópicas que podem poluir as águas.

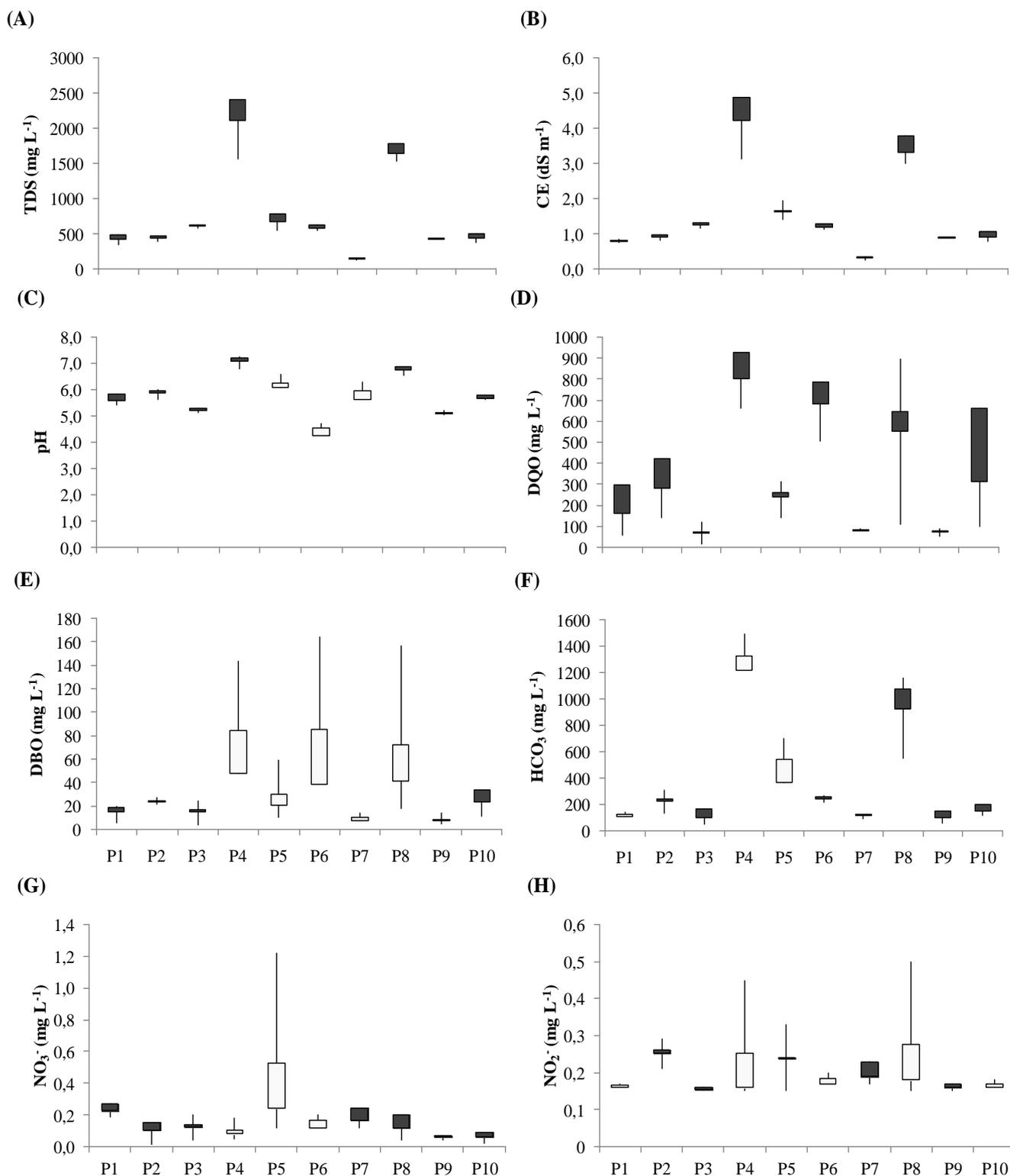
Os resultados obtidos neste estudo, quanto ao nitrato, divergem dos resultados encontrados por Gloeden et al. (1991) e Ludovice et al. (1997), quando encontraram teores elevados nas águas subterrâneas em áreas cultivadas com cana-de-açúcar adubadas com vinhaça por longos períodos.

De maneira geral, foi constatada boa consistência dos parâmetros de qualidade da água, sobretudo, pela baixa dispersão dos dados em relação à média (Figuras 5A, 5B, 5C, 5F, 5G, 6B e 6C).

Com relação aos SDT e a CE, verifica-se que o comportamento destes dois parâmetros foi semelhante, e isto já era esperado, uma vez que a CE estima, indiretamente, a concentração de sólidos dissolvidos existentes na água. Verifica-se, também, pelas Figuras 5A e 5B, que a maior concentração de SDT e maior CE ocorreram nos pontos P4 e P8, pois estavam situados mais próximos à lagoa de distribuição de vinhaça. Observa-se, ainda, que o pH mensurado nas águas do lençol freático (Figura 5C) variou de levemente ácido (P6) a neutro(P4).

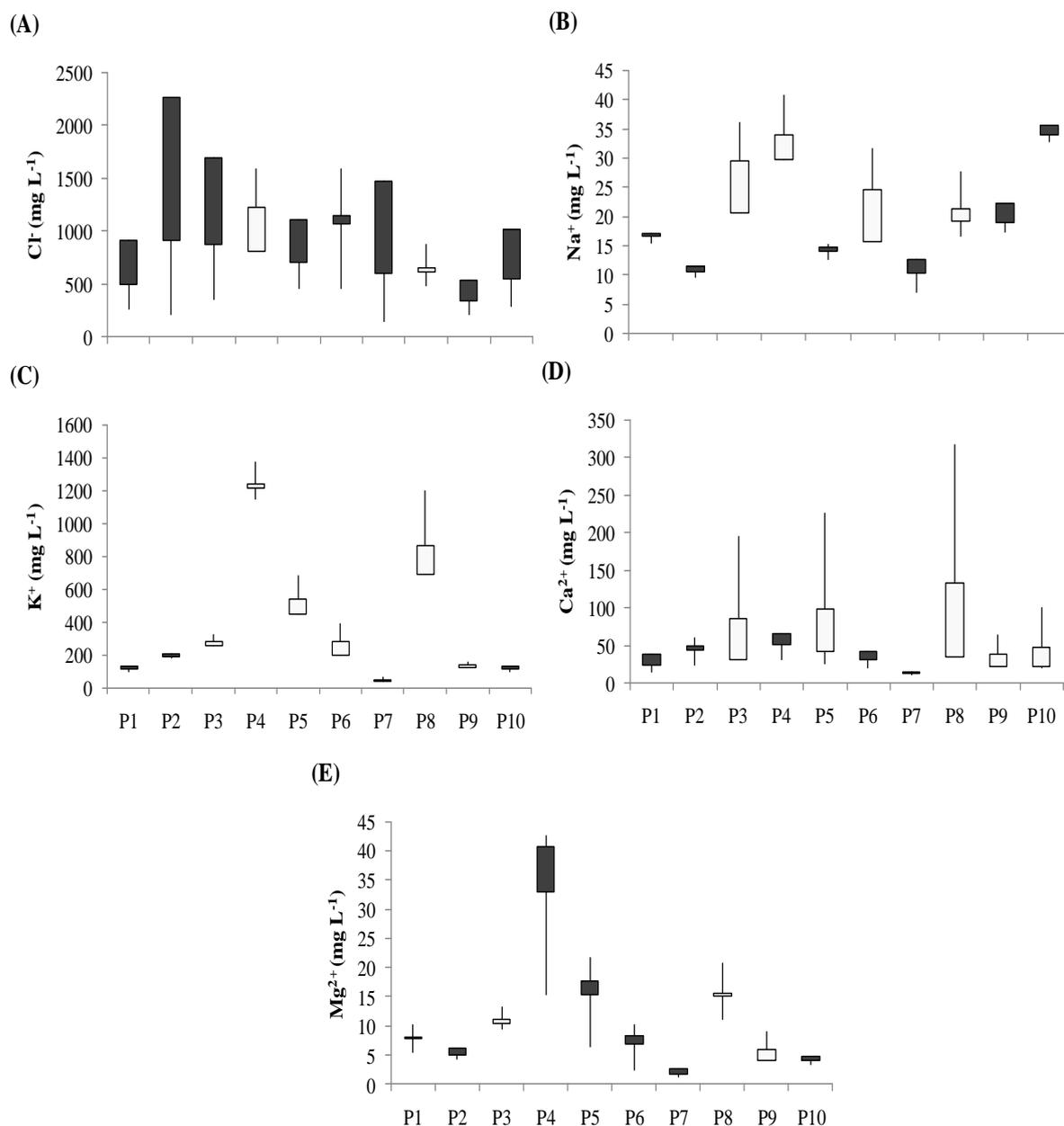
Segundo Zheng et al. (2005), nas águas provenientes de lençol freático, os parâmetros pH, CE, SDT e HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> tendem a ter baixa variação quantitativa em termos de concentração, corroborando com os resultados encontrados neste estudo.

Mediante os dados expostos nas Figuras 5D e 5E, observa-se que as maiores variações, dentre todos os parâmetros analisados, ocorreram para a DQO e DBO, pois se percebe a existência de elevado número de valores discrepantes e extremos, os quais podem representar, significativamente, a indicação de contaminação da água do lençol freático pelo uso da vinhaça.



**Figura 5.** Representação box-plot dos parâmetros relacionados à qualidade da água freática.

As concentrações médias, em relação a todos os poços, dos íons  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  (Figuras 6A, 6B, 6C, 6D e 6E) foram iguais a 744,21, 21,41, 380,50, 56,28 e 10,66  $\text{mg L}^{-1}$ , respectivamente.



**Figura 6.** Representação box-plot dos principais íons cátions e ânions relacionados à qualidade da água freática

As baixas concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  encontradas na água freática podem estar relacionadas com as características químicas da vinhaça, a qual apresenta baixa concentração dos referidos cátions. As concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  na água freática se mantiveram aquém das concentrações encontradas por Ramesh e Elango (2012), quando monitoraram a qualidade da água de um aquífero localizado na Índia utilizado para consumo humano e irrigação.

Por outro lado, observa-se uma elevada concentração de cloretos na água freática, indicando que o uso da vinhaça pode ter sido uma fonte de contaminação deste, pois tal resíduo apresentou alta concentração em sua composição. A concentração de cloretos encontrada na água do lençol freático monitorado neste estudo é três vezes superior à recomendada pela Resolução CONAMA nº 396 de 2008 para os seguintes usos: consumo humano, irrigação e recreação. Bhardwaj e Singh (2010) relataram que águas cuja composição química apresente altos teores de cloretos podem exercer efeitos laxativos nas pessoas que a consomem; bem como concentrações de cloretos acima de  $100 \text{ mg L}^{-1}$  podem causar queimaduras nas folhas das plantas mais sensíveis, particularmente, quando se emprega a irrigação por aspersão diretamente sob a folhagem e durante as estações quentes (Feigin, 1991).

Possivelmente, a elevada concentração de cloretos esteja associada ao fato dos cloretos, assim como os nitratos, serem facilmente lixiviáveis no perfil do solo por terem carga iônica negativa, não sendo adsorvidos pelos colóides do solo. Descarta-se, ainda, a hipótese de intrusão salina na água do lençol freático, pois apesar da respectiva área estar localizada na mesorregião da Mata Sul do Estado do Pernambuco, que é entrecortada por diversos rios interligados que sofrem influência de marés, a concentração de cloretos da água proveniente do rio Ipojuca, rio situado próximo à área onde foram instalados os poços de monitoramento, foi igual a  $36 \text{ mg L}^{-1}$ , ficando esta bem aquém da concentração encontrada na água do lençol freático em monitoramento. Além disso, Costa Filho et al. (1998) afirmam que um bom indicador de possível contaminação de água continental por água de origem marinha é a relação iônica entre os íons cloreto e o bicarbonato, a qual sendo superior a 20 mostra um forte indicativo de que o cloreto seja proveniente da intrusão de água salina. No presente estudo, a relação entre os íons cloreto e bicarbonato foi igual a 1,93, comprovando que a alta concentração de cloretos encontrada não está associada à intrusão de água marinha, mas sim à acumulação de vinhaça na lagoa de distribuição. Adicionalmente, pode ressaltar que se tivesse havido intrusão salina, a concentração de sódio teria sido elevada, o que não ocorreu neste estudo (Tabela 4).

O íon potássio (Figura 6 C) é encontrado em elevadas concentrações na vinhaça, sendo, por isso, utilizado como indicador para aplicação deste resíduo na fertirrigação dos canaviais. Neste estudo, a água freática na área circunvizinha à lagoa de distribuição apresentou alta concentração de potássio, indicando que o poder de retenção do solo pode ter diminuído, favorecendo a lixiviação do mesmo para a água do lençol freático. Apesar das legislações ambientais não se referirem ao potássio como contaminante da água, isto é um indicativo de que a qualidade das águas pode ser alterada devido à aplicação contínua e em taxas não adequadas de resíduos, já que em um determinado momento pode ocorrer a saturação do solo, diminuindo, assim, seu poder de retenção.

Com o propósito de avaliar a qualidade da água do lençol freático apenas para uso na irrigação, utilizou-se a classificação baseada na condutividade elétrica da água e perigo em relação à salinidade (Tabela 5). Segundo os dados obtidos, observa-se que em nenhum dos poços, a água foi classificada como excelente para irrigação e a maioria dos poços teve suas águas permitidas para tal uso. Entretanto, a água dos poços P4 e P8 foi classificada como inapropriada para irrigação, provavelmente por sofrer influência da lagoa de distribuição de vinhaça, uma vez que tais poços se situavam próximos à lagoa de distribuição. Porém, não se pode concluir que, em longo prazo, a qualidade da água seja ainda mais prejudicada em função da prática de disposição de vinhaça. Para afirmar, com certeza, tal fato, seria necessário estudo um estudo exploratório por vários anos, em que pudesse relacionar a prática da disposição de vinhaça com as variações de precipitação ocorrida durante o tempo de estudo.

**Tabela 5.** Classificação da água do lençol freático em relação à salinidade.

CE ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ ) (25°C)	Salinidade (classes)	Poços
< 250	Excelente (C1)	-
250 – 750	Bom (C2)	-
750 – 2250	Permitido (C3)	P1, P2, P3, P5, P6, P7, P9, P10
> 2250	Inapropriado (C4)	P4, P8

Fonte: USDA (1954).

Os critérios de qualidade da água podem ser usados como diretrizes por agricultores, para seleção de práticas de gestão apropriada, a fim de se evitar perigos potenciais advindos da salinização. A adequação das águas para fins de irrigação depende dos efeitos dos componentes minerais da água sobre as plantas e o solo, sendo a qualidade água um fator preponderante para manter as propriedades físico-químicas adequadas dos solos para o cultivo das culturas (Ramesh e Elango, 2012).

Segundo Pizzaro (1996), as águas subterrâneas têm elevado poder de salinizar ou sodificar os solos quando são utilizadas para irrigação por longos períodos, em virtude de sua composição química. Neste estudo, avaliou-se a razão de adsorção de sódio (RAS) da água dos poços localizados circunvizinhos à lagoa de distribuição de vinhaça. A RAS é a relação que se refere ao efeito da alta concentração de  $\text{Na}^+$  contido na água, em relação à concentração dos cátions  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , que pode elevar a porcentagem de sódio trocável no solo (PST), causando danos aos seus atributos físicos do solo e, conseqüentemente, às culturas. Neste estudo, em relação ao efeito da sodicidade, apenas três poços apresentaram águas cuja RAS foi muito alta (Tabela 6), sendo o seu uso impróprio para irrigação.

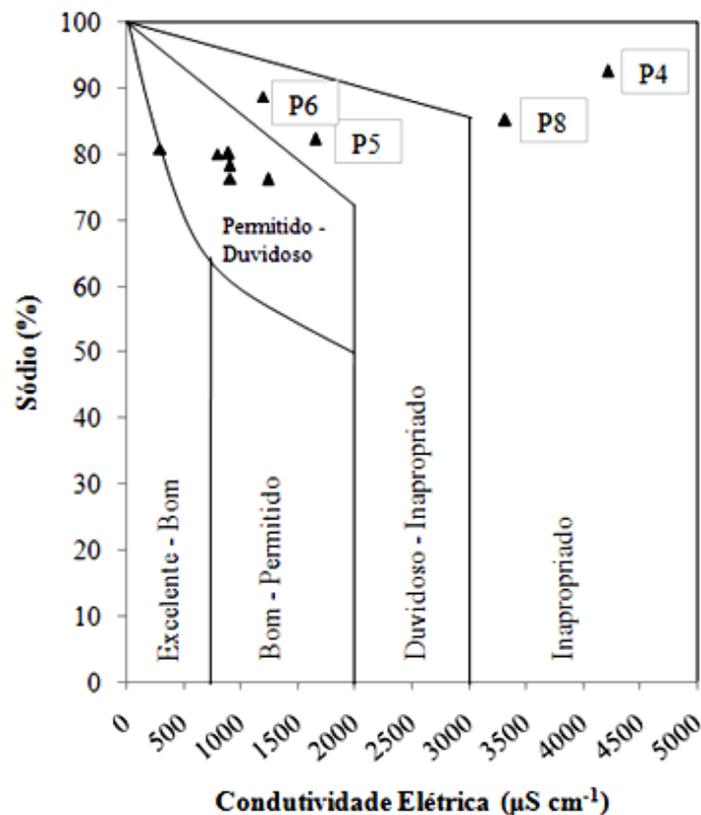
Além da RAS, quando o uso preponderante da água for para irrigação, recomenda-se que todos os parâmetros físico-químicos sejam avaliados simultaneamente, a fim de definir a adequação correta da água para tal uso. Para as águas provenientes do lençol freático monitorado neste estudo, foi observado que 50 e 20% da água dos poços monitorados foram classificadas como C3-S4 e C3-S2, respectivamente e; os 30% restante foram classificadas como C4-S4 segundo USDA (1954), indicando possível risco de contaminação da água freática pelo uso da lagoa de distribuição vinhaça.

**Tabela 6.** Classificação da água do lençol freático levando-se em consideração a RAS.

RAS	Categorias	Poços
< 10	Excelente	-
10 – 18	Bom	P2, P5, P8
18 – 26	Duvidoso	P1, P3, P7, P9
> 26	Inapropriada	P4, P6, P10

Fonte: USDA (1954).

A adequabilidade da água a ser utilizada para irrigação também pode ser determinada relacionando o teor de sódio contido na água de irrigação com os teores dos íons potássio, cálcio e magnésio (Wilcox, 1955). De acordo com os dados expostos na Figura 7, verifica-se que a água de 60% dos poços analisados foi classificada como uso permitido a duvidoso e as águas provenientes de dois poços seriam inapropriadas para a irrigação e poderiam ser prejudiciais ao solo e às culturas.



**Figura 7.** Adequabilidade da água do lençol freático para uso na irrigação segundo diagrama de Wilcox.

#### 4. CONCLUSÕES

O uso de lagoas de distribuição de vinhaça altera as concentrações de SDT, DBO, DQO,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e os valores de CE da água do lençol freático.

Os parâmetros SDT, CE, pH,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$  apresentam resultados consistentes em relação a caracterização da área em estudo; em contrapartida os íons mais discrepantes e assimétricos (outliers) temporal e espacialmente foram  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ .

A avaliação da qualidade da água proveniente do lençol freático de alguns poços monitorados neste estudo se mostra inadequada para fins de irrigação devido ao risco iminente de salinização do solo.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Fundação de Amparo à

Pesquisa do Estado de Pernambuco (FACEPE), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PNPD), através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Salinidade (INCTSal).

## 6. REFERÊNCIAS

- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION- APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION - WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 17. ed. Washington, 1995. 2198p.
- BARROS, R. P.; VIÉGAS, P. R. A.; SILVA, T. L.; SOUZA, R. M.; BARBOSA, L.; VIÉGAS, R. A. et al. Alterações em atributos químicos de solo cultivado com cana-de-açúcar e adição de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 40, p. 341-346, 2010.
- BHARDWAJ, V.; SINGH, D. S. Surface and groundwater quality characterization of Deoria District, Ganga Plain, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 184, p. 3887-3899, 2010. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-010-0709-x>
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Portaria n. 396, de 07 de abril de 2008. **Diário Oficial [da] União**, Brasília, 07 abr. 2008.
- BRITO, I. A.; FREIRE, C. A.; YAMAMOTO, F. Y.; ASSIS, H. C. S.; SOUZA-BASTOS, L. R.; CESTARI, M. M. et al. Monitoring water quality in reservoirs for human supply through multi-biomarker evaluation in tropical fish. **Journal of Environmental Monitoring**, v. 14, p. 615-625, 2012. <http://dx.doi.org/10.1039/C2EM10461J>
- BRITO, F. L.; ROLIM, M. M.; PEDROSA, E. R. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 318-323, 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662007000300012>
- BROUYÈRE, S.; DASSARGUES, A.; HALLET, V. Migration of contaminants through the unsaturated zone overlying the Hesbaye chalky aquifer in Belgium: a field investigation. **Journal of Contaminant Hydrology**, v. 72, n. 1/4, p. 135-164, 2004. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jconhyd.2003.10.009>
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. **Indicadores de exportação brasileira de açúcar e álcool do terceiro trimestre do ano de 2012**. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/>>. Acesso em: 18 ago. 2012.
- COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL - CETESB. **Relatório de qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo: 2004-2006**. São Paulo, 2007. 199 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar – estimativa safra 2012/2013**. Disponível em: <[www.conab.gov.br](http://www.conab.gov.br)>. Acesso em: 18 ago. 2012.

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. **Ambi-Agua**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 155-171, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1014>)

---

COSTA FILHO, W. D.; SANTIAGO, M. M. F.; COSTA, W. D.; MENDES FILHO, J. Isótopos estáveis e a qualidade das águas subterrâneas na planície do Recife. CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABAS, 1998. 1 CD-ROM.

DALRI, B. A.; CORTEZ, C. E. P.; RIUL, L. G. S.; ARALEO, J. A. C.; CRUZ, R. L. Influência da aplicação de vinhaça na capacidade de infiltração de um solo de textura franco arenosa. **Revista Engenharia Agrícola**, v. 15, n. 4, p. 344 – 352, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 2006. 306p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: CNPS, 1997. 212p.

FEIGIN, A.; RAVINA, I.; SHALHEVET, J. **Irrigation with treated sewage effluent**. Berlin: Springer-Verlang, 1991. 216p. (Advanced Series in Agricultural Science).

GLOEDEN, E.; CUNHA, R. C. A.; FRACCAROLI, M. J. B.; CLEARY, R. W. The behavior of vinasse constituents in the unsaturated and saturated zones in the Botucatu aquifer recharge area. **Water Science and Technology**, v. 24, n. 11, p. 147–157, 1991.

GÓMEZ, J.; RODRÍGUEZ, O. Effects of vinasse on sugarcane (*Saccharum officinarum*) productivity. **Revista de la Facultad de Agronomía**, v. 17, p. 318-326, 2000.

LUDOVICE, M. T. F. **Estudo do efeito poluente da vinhaça infiltrada em canal condutor de terra sobre o lençol freático**. 1997. 117f. Dissertação (Mestrado em engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

LYRA, M. R. C. C.; ROLIM, M. M.; SILVA, J. A. A. Topossequência de solos fertirrigados com vinhaça: contribuição para a qualidade das águas do lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 525-532, 2003. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662003000300020>

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S. V.; PINTO, A. S.; JENDIROBA, E.; NÓBREGA, J. C. M. (Org.). **Atualização em produção de cana-de-açúcar**. Piracicaba: Livro Ceres, 2006. p. 369-375.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia - goteo - microaspersión – exudación**. 3. ed. Madri: Mundi, 1996. 513p.

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, n. 6, p. 3887-3899, 2012. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-011-2231-3>

RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, R. J.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse application on yield of sugarcane and carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, NE. Brazil. **Plant and Soil**, v. 281, n. 1/2, p. 339-351, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s11104-005-4640-y>

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. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 155-171, 2013. (<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.1014>)

---

SILVA, N. F.; LELIS NETO, J. A.; TEIXEIRA, M. B.; CUNHA, F. N.; MIRANDA, J. H.; COELHO, R. D. Distribuição de solutos em colunas de solo com vinhaça. **Irriga**, v. 1, n. 1, p. 340-350, 2012. Edição especial.

SANKARARAMAKRISHNAN, N.; SHARMA, A. K.; LYENGAR, L. Contamination of nitrate and fluoride in groundwater along the Ganges Alluvial Plain of Kanpur district, Uttar Pradesh, India. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 146, n. 1/3, p. 375–382, 2008. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-007-0085-5>

SINGH, K. P.; SINGH, V. K.; MALLIK, A.; BASANT, N. Distribution of nitrogen species in groundwater aquifers of an industrial area. **Environmental Geochemical and Health**, v. 28, n. 5, p. 473–485, 2006. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-006-9053-1>

UNITED STATES. Salinity Laboratory. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, DC: USDA, 1954. 160 p. (Agricultural Handbook, 60).

VACHAUD, G.; SILANS, A. P.; BALABANIS, P.; VAUCLIN, M. Temporal stability of spatially measured soil water probability density function. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, n. 4, p. 822-827, 1985.

WAKIDA, F. T.; LERNER, D. N. Non-agricultural sources of groundwater nitrate: a review and case study. **Water Research**, v. 39, p. 3–16, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2004.07.026>

WILCOX, L. V. **Classification and use of irrigation waters**. Washington, DC: USDA, 1955. Circular 969.

ZHENG, Y.; Van GEEN, A.; STUTE, M.; DHAR, R. K.; MO, Z.; CHENG, Z. et al. Geochemical and hydrogeological contrasts between shallow and deeper aquifers in the two villages of Araihasar, Bangladesh: implications for deeper aquifers as drinking water sources. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 69, n. 22, p. 5203–5218, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2005.06.001>