



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PROGRAMAS ESPECIAIS
PROGRAMA INSTITUCIONAL DE BOLSAS DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA
PIBIC/CNPq/UFRPE

Título do Projeto:

VARIABILIDADE ESPACIAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE PERNAMBUCO (PE)

Plano de Trabalho:

SALINIDADE DO SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE PERNAMBUCO

Recife - Pernambuco

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENADORIA DE PROGRAMAS ESPECIAIS

Título do Projeto:

VARIABILIDADE ESPACIAL DA SALINIDADE DO SOLO E DA PRODUTIVIDADE DE CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE PERNAMBUCO (PE)

Plano de Trabalho:

SALINIDADE DO SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE PERNAMBUCO

Relatório final submetido à Coordenadoria de Programas Especiais, referente às atividades desenvolvidas no período de Agosto de 2015 a Julho de 2016 como parte das exigências do Programa de Iniciação Científica da UFRPE.

Marcelo Henrique de Oliveira Primo

Graduando em Engenharia Agrícola e Ambiental

Dr. Daniel da Costa Dantas

Orientador

Pós doutorando DEAGRI-UFRPE

Recife – Pernambuco

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

O48v Oliveira Primo, Marcelo Henrique de
Variabilidade espacial da salinidade do solo e da produtividade
de cana-de-açúcar na zona da mata norte de Pernambuco (PE) /
Marcelo Henrique de Oliveira Primo. – Recife, 2018.
23 f.: il.

Orientador: Daniel da Costa Dantas.

Coorientador: Ênio Farias de França e Silva.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia Agrícola
e Ambiental, Recife, BR-PE, 2018.

Inclui referências.

1. Geologia - Métodos estatísticos 2. Solos - Salinidade
3. Agricultura de precisão I. Dantas, Daniel da Costa, orient. II. Silva,
Ênio Farias de França e III. Título

CDD 630

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 5 |
| 2 OBJETIVOS..... | 6 |
| 2.1 Objetivo Geral | 6 |
| 2.1 Objetivo Especifico | 6 |
| 3 MATERIAIS E METODOS | 7 |
| 3.1 Estudo do Local..... | 7 |
| 3.2 Amostragens | 7 |
| 3.3 Estatística Descritiva | 10 |
| 4 RESULTADO E DISCUSSÃO | 12 |
| 5 CONCLUSÃO | 19 |
| 6 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 19 |

SALINIDADE DO SOLO CULTIVADO COM CANA-DE-AÇÚCAR NA ZONA DA MATA NORTE DE PERNAMBUCO

1. INTRODUÇÃO

O Estado de Pernambuco apresenta para a safra 2015/2016, uma área cultivada de 276,3 mil hectares de cana-de-açúcar aproximadamente, com uma produtividade média estimada de 55,2 t ha⁻¹, sendo esta 1,29% inferior em relação à produtividade da região e cerca de 23,4% menor que a média nacional (CONAB, 2016).

No Estado de Pernambuco muitas áreas agricultáveis com cana-de-açúcar estão localizadas na zona litorânea, sendo a Zona da Mata Norte a principal região produtora do estado. A produção de cana-de-açúcar nesta região se dá em solos com problemas de salinidade ou com potencial para salinização devido a aplicação de água de irrigação de baixa qualidade, ou pela ascensão capilar do lençol freático da região, nos períodos de maior estiagem. Os principais problemas causados pela salinização do solo são a redução do potencial osmótico da solução do solo, diminuindo sua disponibilidade de água e acentuando a toxicidade de certos íons às plantas (BERNARDO, 1996).

A acumulação de sais na rizosfera prejudica o crescimento e desenvolvimento das culturas, provocando um decréscimo de produtividade e, em casos mais severos, pode levar a um colapso da produção agrícola. Isto ocorre em razão da elevação do potencial osmótico da solução do solo, por efeitos tóxicos dos íons específicos e alteração das condições físicas e químicas do solo (LIMA, 1998). Trabalhos desenvolvidos por Willadino et al. (2011), com estresse salino em duas variedades de cana-de-açúcar têm demonstrado em ambas as variedades o incremento dos níveis de sal, indicaram a perturbação no processo fotossintético.

Segundo Ayers e Westcot (1999) a salinidade é um fator de preocupação mundial, devido ao aumento crescente de áreas de cultivos consideradas não agricultáveis, pois o acúmulo de sais nos solos causa redução nas produções agrícolas a níveis não viáveis economicamente.

Estimativas feitas por Pereira et al. (1986) relacionam uma área 91.000 km² de solos afetados por sais no Nordeste do Brasil. O Aumento da população e a pressão econômica para produção de alimento na Região Nordeste, têm resultado no aumento da área de solos degradados por salinidade e sodicidade, em virtude da expansão das áreas irrigadas em terras marginais, do uso de águas salinas na irrigação, do manejo inadequado da água e do solo e da ausência de drenagem, com grandes prejuízos para a economia regional (RIBEIRO, 2010).

A salinidade, assim como outras propriedades químicas do solo, pode apresentar variabilidade espacial e temporal natural em função das práticas de manejo utilizadas, da profundidade do lençol freático, da permeabilidade do solo, da taxa de evapotranspiração, das chuvas, da salinidade da água subterrânea e de outros tantos fatores hidrogeológicos.

Nesse sentido, a agricultura necessita de ferramentas que promovam a mudança na técnica de quantificação dos atributos do solo e da planta, a fim de auxiliar na caracterização da variabilidade destes atributos de maneira rápida e precisa, buscando a maximização do uso do solo por meio da delimitação de zonas de manejo específicos, objetivando alcançar produtividades ótimas. Porém, os custos envolvidos, a grande demanda de tempo e trabalho e a necessidade de recursos humanos com elevado potencial técnico tornam a execução desses trabalhos mais detalhados, necessitando o uso de técnicas avançadas de amostragem e interpretação dos dados.

Tecnologias ligadas ao sensoriamento remoto, aos sistemas de informações geográficas e ao sistema de posicionamento por satélite (GPS) propiciam o desenvolvimento da agricultura de precisão, que permite o manejo sítio-específico das práticas agrícolas, com maior eficiência de aplicação de insumos, diminuição dos custos de produção e redução dos impactos sobre o ambiente.

A análise de dados de salinidade deve ser realizada de modo a permitir a identificação dos fatores que estão contribuindo para o aumento de sais, para a identificação das áreas afetadas e para o monitoramento de variações temporais, tornando possível planejar o estudo de recuperação, definição de estratégias de manejo e identificação dos fatores responsáveis pelo problema. A utilização de recursos da estatística clássica e da geoestatística complementam a análise e interpretação de dados de salinidade numa dada região (QUEIROZ et al., 1997).

Vários estudos relatam que as variabilidades das propriedades do solo apresentam correlação ou dependência espacial (CARVALHO et al., 2002; CARVALHO et al., 2003). Portanto, a análise da variabilidade do solo por meio de técnicas da geoestatística, pode indicar alternativas de manejo, para reduzir os efeitos da variabilidade do solo sobre a produção das culturas, como também a adoção de práticas de manejo visando o manejo sustentável dos perímetros irrigados, otimizando com isso, a utilização de insumos agrícolas e diminuindo os impactos ambientais.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é caracterizar a variabilidade espacial da salinidade do solo e da produtividade de cana-de-açúcar na Zona da Mata-Norte do Estado de Pernambuco, Brasil.

2.2. Objetivos Específicos

Determinar a variabilidade espacial da condutividade elétrica e pH da pasta de saturação (CEps e pH) e de sais solúveis de Ca, Mg, Na, K, carbonatos, bicarbonatos, cloretos e sulfatos;

Determinar a variabilidade espacial da produtividade de cana-de-açúcar e correlacionar com os dados de salinidade.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Local de Estudo

A área de estudo está localizada na Usina Santa Teresa no município de Goiana, na Zona da Mata Norte, e possui aproximadamente 6,5 ha, cujas coordenadas geográficas são: 07° 33' 39'' S e 35° 00' 10'' O.

Os solos da região da área de estudo derivam do grupo Barreiras, constituídos de sedimentos de origem continental do final do terciário, de textura arenosa até argilosa, caracterizados por uma alteração intensa (BRASIL, 1969, 1972). O solo da área de estudo é um Espodosolo Humilúvico órtico textura arenosa de acordo com a classificação Embrapa (2013), cuja classificação física para área de estudo é apresentada na Tabela 1. A textura do solo (argila, silte e areia) foi determinada pelo método da pipeta conforme descrito por proposto por Camargo et al. (1986), utilizando como dispersante químico o hidróxido de sódio e hexametáfosfato de sódio. A densidade do solo e a umidade volumétrica do solo foi determinada no perfil pedológico utilizando anéis volumétricos de 100 cm³, de acordo com metodologia proposta por Camargo et al. (1986).

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, com temperaturas médias anuais variando em torno de 24°C.

Tabela 1. Atributos físicos para o Espodosolo Humilúvico órtico textura arenosa presente na área de estudo.

| Profundidade (m) | ----- Textura (g kg ⁻¹) ----- | | | Densidade do solo (kg dm ⁻³) | Umidade do solo (m ³ m ⁻³) |
|---------------------|---|-------|-------|---|--|
| | Argila | Silte | Areia | | |
| 0,0-0,3 | 44 | 26 | 930 | 1,52 | 34,50 |
| 0,3-0,60 | 43 | 25 | 932 | 1,54 | 36,80 |
| 0,6-1 | 44 | 26 | 930 | 1,60 | 42,60 |
| > 1 m | 32 | 40 | 928 | 1,66 | 47,20 |

3.2. Amostragens

A área de estudo possui aproximadamente 6,5 ha, altitude média de 8,5 m e vem sendo manejada nos últimos anos com cana-de-açúcar com queima da palha para colheita. As amostragens do solo e da planta (biometria e colheita) foram realizadas nos 90 pontos de amostragem distribuídos em malha desuniforme na área experimental (Figura 1).

A

B

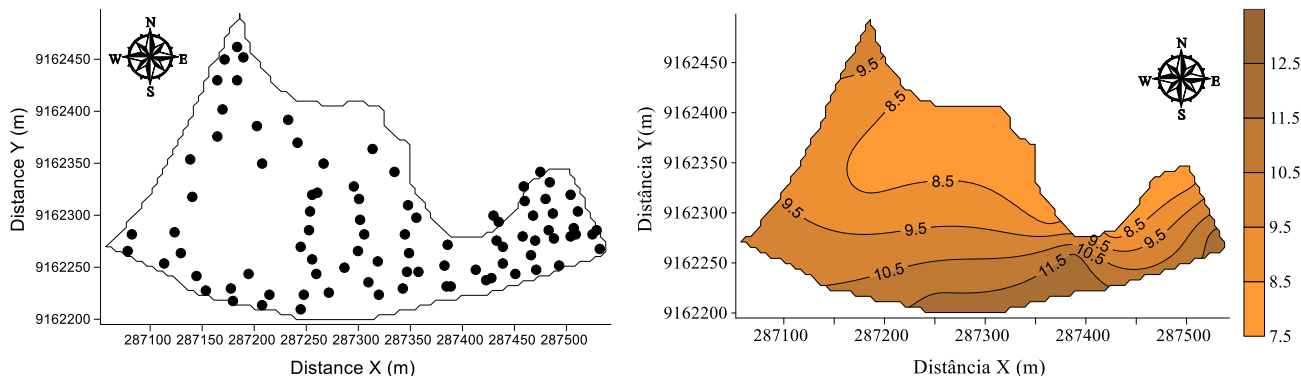


Figura 1. (a) Localização dos pontos amostrados na área de estudo; (b) Planta planialtimétrica da área

A área em estudo apresenta grande importância no contexto regional uma vez que a cultura da cana-de-açúcar é a principal cultivo, estando localizado muitas vezes em zonas influenciadas por salinidade devido a sua proximidade com o mar, sobretudo nos períodos de maré alta, sendo a salinidade mais acentuada nas partes mais baixas. A área está localizada a aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico na direção leste, sofrendo influencia salina de duas fontes.

Foram coletadas amostras deformadas nas camadas de solo nas profundidades de 0 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m, que foram destorroadas, passadas na peneira de 2,00 mm (TFSA) e preparados os extratos a partir de 400 g de solo seco ao ar e adição de água até atingir a saturação. Foram analisados os atributos químicos (condutividade elétrica, pH, Ca, Mg, Na, K, conforme a metodologia da Embrapa (2006), os procedimentos foram realizados no Laboratório de qualidade de água do departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal Rural de Pernambuco DEAGRI, UFRPE.

A relação de adsorção de sódio (RAS) foi calculada a partir dos resultados de sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) conforme a Equação (1):

$$RAS = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

Onde:

RAS= Relação de adsorção de sódio, $(\text{mmol L}^{-1})^{1/2}$;

Na^+ = Concentração de sódio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})$;

Ca^{2+} = Concentração de cálcio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})$;

Mg^{2+} = Concentração de magnésio solúvel, $(\text{mmol}_c \text{ L}^{-1})$.

A colheita da cana-de-açúcar foi realizada em novembro de 2015, a partir de medições obtidas em 90 pontos amostrais em malha irregular de 30 x 60 m. Em cada ponto amostral, foi utilizado o método proposto por Gheller et al. (1999), onde foram selecionadas três linhas de plantio de cana-de-açúcar de 10 metros de comprimento, contados o número de colmos colhidos e a massa média de colmo foi obtida, por meio da pesagem de dez colmos ao acaso dentre as três linhas amostradas (Figura 2 C).

A produtividade da cana-de-açúcar foi amostrada em 90 pontos, em cada ponto amostral, foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de 10 m de comprimento, nestas foram contados os números de colmos para o cálculo de seu peso médio. Posteriormente, foram colhidos dez colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem. A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral foi calculada a produtividade.



Figura 2. Colheita da área de cana-de-açúcar: (A) detalhe do cortador da cana-de-açúcar; (B) feixes com dez colmos de cana-de-açúcar, utilizado para estimativa da produtividade; (C) pesagem do feixe de cana (D) vista da área colhida.

A produtividade por Gheller et al. (1999) foi calculada a partir das equações (2) e (3):

a) Peso médio por colmo:

$$p_{mc} = \frac{pf}{tcolmos} \quad (2)$$

em que: pf é o peso do feixe com os 10 colmos; $tcolmos$ é o total de colmos contados nas três linhas.

b) Peso estimado no ponto amostral:

$$p_{ep} = \frac{p_{mc}}{tcolmos} \quad (3)$$

A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral foi estimada a produtividade.

3.3. Estatística descritiva

A estatística descritiva foi utilizada determinando-se a média, a mediana, o desvio padrão, os valores máximos e mínimos, os coeficientes de assimetria e curtose e o coeficiente de variação, para obter informações sobre a dispersão e a distribuição das variáveis, a análise de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade, para ambas as análises foi utilizado o programa Surfer 11.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

A variabilidade das variáveis foi classificada por meio dos valores de coeficiente de variação (CV), segundo Warrick & Nielsen (1980), como baixa ($CV < 12\%$), média ($12 < CV < 62\%$) e alta ($CV > 62\%$).

A análise da dependência espacial foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA 2000, ROBERTSON, 1998) e do ajuste de semivariogramas, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada através da semivariância $\gamma(h)$ a qual é estimada pela Equação (4):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (4)$$

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ separados por uma distância h . O semivariograma é representado pelo gráfico (h) versus h .

Para construção e ajuste dos semivariogramas foi utilizado o programa Microsoft Excel. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos conforme Vieira et al. (1983).

Foram ajustados modelos matemáticos e definidos os parâmetros para os semivariogramas:

a) efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$; b) alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ;

c) patamar (C0+C1) que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

Após a obtenção dos semivariogramas, testaram-se os modelos gaussiano, esférico e exponencial descritos pela Equação (5), (6) e (7), respectivamente, para a seleção dos modelos ajustados foi utilizado o método das tentativas, selecionando os modelos que permitiram visualizar a estrutura de variação espacial das variáveis.

Modelo Esférico:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1.5 \frac{h}{A} - 0.5 \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right] \quad 0 < h < A \quad (5)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \quad h > A$$

Modelo Gaussiano:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-\left(\frac{h^2}{A^2} \right)} \right] \quad h \neq 0 \quad (6)$$

Modelo Exponencial:

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e^{-(h/A)} \right] \quad h \neq 0 \quad (7)$$

A análise geoestatística preliminar indicou que os dados da produtividade da cana-de-açúcar ($t \text{ ha}^{-1}$) apresentaram tendência, sendo então retirada a tendência por meio das seguintes equações para estimação dos resíduos:

1. Linear

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3xy \quad (8)$$

2. Quadrática ou parabólica

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy \quad (9)$$

3. Cúbica

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy + A_6x^3 + A_7y^3 + A_8x^2y + A_9xy^2 \quad (10)$$

O grau de dependência espacial (GDE) foi analisado segundo Cambardella et al. (1994), em que se preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C0) em relação ao patamar (C0+C1), apresentando: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca > 75%, calculado pela Equação (11):

$$GDE = \left(\frac{c_0}{c_0 + c} \right) \times 100 \quad (11)$$

Para a construção dos mapas espaciais e visualização da distribuição espacial utilizou-se o programa Surfer 11.0 (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estatísticos (Tabela 2) demonstram que a produtividade média da cana-de-açúcar na área de estudo foi de 99,90 t ha⁻¹, sendo esta 41% superior em relação à produtividade média nacional, e representa um aumento médio de 76% em relação à produtividade média do Estado de Pernambuco para a safra de 2013/2014 (CONAB, 2014).

A produtividade apresentou maior variância entre os dados, uma vez que a mesma varia consideravelmente com as mudanças do solo ao longo da paisagem. Os valores de coeficiente de variação (CV %) são classificados como medianos (12 < CV < 62), enquanto que os da textura do solo argila, silte e areia apresentaram baixo CV (< 12%).

Todos os atributos em estudos apresentaram distribuição de frequência normal, por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS) com probabilidade de erro de 5%. A média e mediana foram próximas para os valores de pH, cloreto, bicarbonato, potássio, sódio, argila e areia. A curtose e assimetria tenderam a zero (0) para os atributos pH, argila, silte e areia, mostrando um comportamento simétrico.

O pH do solo foi influenciado pela composição e concentração de sais solúveis apresentando-se moderadamente ácidos (PEREIRA, 1998; RIBEIRO et al., 1999).

Os valores de média e mediana das variáveis apresentadas na Tabela 2 foram relativamente próximos para os valores de pH, CEes, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, e RAS nas duas camadas do solo. Que caracterizaram-se por ter uma grande quantidade de valores baixos que induziram à pequena diferença entre a média e a mediana. Resultados semelhantes foram encontrados por Souza et al. (2010) para pH, Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ do solo nas camadas de 0-0,2m e 0,2-0,4m como também para a produtividade de cana-de-açúcar.

Tabela 2. Parâmetros da estatística descritiva dos valores da produtividade da cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca²⁺), magnésio (Mg²⁺), sódio (Na⁺), potássio (K⁺), e relação de adsorção de sódio (RAS) safra 2014/2015.

| Variáveis (2013) | Camada (m) | Média | Mediana | Variância | DP | CV (%) | Assimetria | Curtose | D |
|--|------------|-------|---------|-----------|-------|--------|------------|---------|--------|
| Produtividade (t ha ⁻¹) | | 99,73 | 98,24 | 188,5 | 13,73 | 13,77 | -0,26 | 0,09 | 0,09 n |
| pH | 0-0,2 | 5,68 | 5,69 | 0,175 | 0,42 | 7,37 | -0,45 | -0,32 | 0,08 n |
| | 0,2-0,4 | 5,71 | 5,77 | 0,140 | 0,37 | 6,55 | -0,60 | 0,85 | 0,09 n |
| CEes (dS m ⁻¹) | 0-0,2 | 0,70 | 0,68 | 0,034 | 0,19 | 26,36 | 0,53 | -0,45 | 0,16 n |
| | 0,2-0,4 | 0,64 | 0,65 | 0,007 | 0,08 | 12,82 | -0,31 | -0,11 | 0,08 n |
| Na ⁺ (mmolc L ⁻¹) | 0-0,2 | 0,68 | 0,56 | 0,083 | 0,29 | 42,67 | 1,98 | 5,22 | 0,19 n |
| | 0,2-0,4 | 0,69 | 0,69 | 0,049 | 0,22 | 31,92 | 0,94 | 1,17 | 0,12 n |
| Ca ²⁺ (mmolc L ⁻¹) | 0-0,2 | 4,96 | 4,77 | 2,025 | 1,42 | 28,69 | 0,39 | -0,84 | 0,18 n |
| | 0,2-0,4 | 4,34 | 4,54 | 0,443 | 0,67 | 15,33 | 0,04 | 3,04 | 0,20 n |
| Mg ²⁺ (mmolc L ⁻¹) | 0-0,2 | 0,81 | 0,80 | 0,010 | 0,10 | 12,32 | 0,98 | 0,99 | 0,15 n |
| | 0,2-0,4 | 0,83 | 0,82 | 0,010 | 0,10 | 12,17 | 0,21 | -1,04 | 0,09 n |
| K ⁺ (mmolc L ⁻¹) | 0-0,2 | 0,46 | 0,43 | 0,101 | 0,32 | 68,66 | 2,50 | 9,11 | 0,17 n |
| | 0,2-0,4 | 0,38 | 0,36 | 0,034 | 0,19 | 48,94 | 1,07 | 1,58 | 0,10 n |
| RAS (mmol L ⁻¹) ^{1/2} | 0-0,2 | 0,41 | 0,35 | 0,031 | 0,18 | 43,14 | 1,56 | 2,52 | 0,18 n |
| | 0,2-0,4 | 0,43 | 0,42 | 0,018 | 0,13 | 30,92 | 0,89 | 0,70 | 0,10 n |

*DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smimov. n = normal. Ln = lognormal. DP = desvio-padrão.

Os valores de coeficiente de variação para produtividade, CEes, Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS nas duas camadas do solo foram classificados como medianos (12 < CV < 62%). O CV para o pH foi classificado como de baixa variação (< 12%), revelando assim a baixa heterogeneidade desse atributo na área. Resultados semelhantes foram encontrados por Machado et al. (2007), Artur et al. (2014), Bottega et al. (2015).

Para o K⁺ observou-se alta variação dos dados (CV > 62%), corroborando com valores obtidos por Machado et al. (2007).

A assimetria e curtose para os atributos, Ca²⁺ e Mg²⁺ nas duas camadas e Na⁺ na camada de 0,20-0,40m como também para a produtividade, tenderam a zero, isso representa um comportamento simétrico para tais características.

As variáveis produtividade da cana-de-açúcar, pH, CEes, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, e RAS nas duas camadas apresentaram distribuição de frequência normal (p<0,01).

Conforme a Tabela 3, o modelo esférico e gaussiano foram os que mais se ajustaram. A presença do modelo gaussiano pode estar associada à presença de relevo côncavo na área de estudo (SIQUEIRA et al., 2015). Em estudos com a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo em área com gradiente topográfico Siqueira et al. (2009), também ajustaram o modelo esférico para a CEa na camada superficial e em profundidade.

Não houve ajuste dos semivariogramas para o K^+ nas duas camadas e para o Na^+ na camada de 0-0,20m, RAS, Mg^{2+} e pH na camada de 0,20-0,40m (Tabelas 3). Pois os mesmos apresentaram efeito pepita puro, ou seja, não houve dependência espacial. Portanto, recomenda-se que seja reduzido o espaçamento em amostragens posteriores, a fim de se detectar dependência espacial.

Conforme a Tabela 3, os valores de CEes nas duas camadas; Ca^{2+} e Mg^{2+} na camada de 0-0,20m; pH, Na^+ e RAS na camada de 0,20-0,40m apresentaram moderada variação nos dados (25 e 75%) em que a produtividade da cana-de-açúcar apresentou fraca dependência espacial (> 75%).

A variabilidade dos atributos do solo pode ser atribuída a fatores intrínsecos ou extrínsecos; no primeiro caso, predominam os fatores relacionados à formação do solo (mineralogia, granulometria), enquanto no segundo, estão mais relacionados com as práticas de manejo adotadas.

Geralmente, uma forte dependência espacial dos atributos do solo é atribuída aos fatores intrínsecos; aos extrínsecos, uma fraca dependência (CAMBARDELLA et al., 1994; CARVALHO et al., 2003).

Os maiores valores de alcance (m) foram obtidos com a CEes (121 e 199), Na^+ (146), Ca^{2+} (99), Mg^{2+} (195), e RAS (133). A CEes, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e RAS apresentaram os maiores valores de alcance de todos os atributos analisados, com dependência espacial moderada e forte, e são os atributos que podem considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo de sítio específico.

Os dados CEes nas duas camadas e Ca^{2+} na camada de 0-0,20m apresentaram tendência nos semivariogramas, e foram retiradas a tendência, sendo calculados os seus resíduos, por meio das equações linear, quadrática e cúbica. A tendência dos dados, provavelmente ocorreu devido à direção do fluxo e pelo gradiente de umidade das maiores cotas para as menores.

Os semivariogramas experimentais dos dados apresentaram, como esperado, uma tendência, pois não apresentaram um patamar. Nesta situação foi utilizado a krigagem com tendência, pois a krigagem ordinária exige que não haja tendência (ou deriva) nos dados. Para tanto foi necessário preliminarmente remover a tendência e trabalhar com os resíduos (VIEIRA, 1997). Ao final, quando obtido o mapa pela krigagem ordinária dos resíduos, foi necessário acrescentar o mapa de tendência como correção (SILVA et al., 2008).

Tabela 3. Parâmetros da análise semivariográfica dos valores da produtividade da cana-de-açúcar, condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes); do potencial hidrogeniônico (pH) e dos íons solúveis: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+) e relação de adsorção de sódio (RAS).

| Variáveis | Camada (m) | C_0 | C_0+C_1 | A_0 (m) | GD (%) | Classificação | Modelo | R^2 |
|---|------------|--------|-----------|-----------|--------|---------------|-------------|-------|
| Produtividade (t ha^{-1}) | - | 168 | 198 | 70 | 84 | Fraca | Esférico | 0,65 |
| pH | 0-0,20 | 0,145 | 0,193 | 81 | 75 | Moderada | Esférico | 0,56 |
| | 0,20-0,40 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| CEes (dS m^{-1}) | 0-0,20 | 0,02 | 0,0343 | 121 | 58 | Moderada | Gaussiano | 0,89 |
| | 0,20-0,40 | 0,0042 | 0,0076 | 199 | 55 | Moderada | Gaussiano | 0,99 |
| CEes (dS m^{-1}) _{resíduo} | 0-0,20 | 0,017 | 0,0294 | 130 | 58 | Moderada | Esférico | 0,81 |
| | 0,20-0,40 | 0,0031 | 0,0039 | 140 | 79 | Fraca | Gaussiano | 0,35 |
| Na^+ (mmolc L^{-1}) | 0-0,20 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| | 0,20-0,40 | 0,0339 | 0,0542 | 146 | 63 | Moderada | Gaussiano | 0,83 |
| Ca^{2+} (mmolc L^{-1}) | 0-0,20 | 0,55 | 1,85 | 99 | 30 | Moderada | Exponencial | 0,84 |
| | 0,20-0,40 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| Ca^{2+} (mmolc L^{-1}) _{resíduo} | 0-0,20 | 0,49 | 1,68 | 72 | 29 | Moderada | Exponencial | 0,80 |
| | 0-0,20 | 0,0051 | 0,0096 | 69 | 53 | Moderada | Exponencial | 0,74 |
| Mg^{2+} (mmolc L^{-1}) | 0,20-0,40 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| | 0-0,20 | 0,0068 | 0,0089 | 195 | 76 | Fraca | Esférico | 0,701 |
| Mg^{2+} (mmolc L^{-1}) _{resíduo} | 0-0,20 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| | 0,20-0,40 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| K^+ (mmolc L^{-1}) | 0-0,20 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| | 0,20-0,40 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| RAS (mmol L^{-1}) ^{1/2} | 0-0,20 | - | - | - | - | - | EPP | - |
| | 0,20-0,40 | 0,0131 | 0,0190 | 133 | 69 | Moderada | Gaussiano | 0,580 |

C_0 -Efeito pepita, C_0+C_1 -Patamar, A_0 -Alcance, GD-Grau de dependência, R^2 -coeficiente de determinação e EPP-Efeito Pepita Puro.

Para uma melhor visualização da distribuição espacial dos valores de produtividade da cana-de-açúcar, CEes, pH e íons solúveis: K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ e RAS, foram elaborados mapas de isolinhas adotando-se a técnica da krigagem (Figuras 3 e 4).

Observou-se que na parte mais estreita do mapa corresponde à maior cota topográfica (Figura 2) foram obtidas as produtividades mais baixas (Figura 3A), havendo também esta tendência na parte superior esquerda do mapa onde ocorrem as menores cotas topográficas, evidenciando que o excesso de umidade e provavelmente maior acúmulo de sais, afetando diretamente a produtividade de cana-de-açúcar.

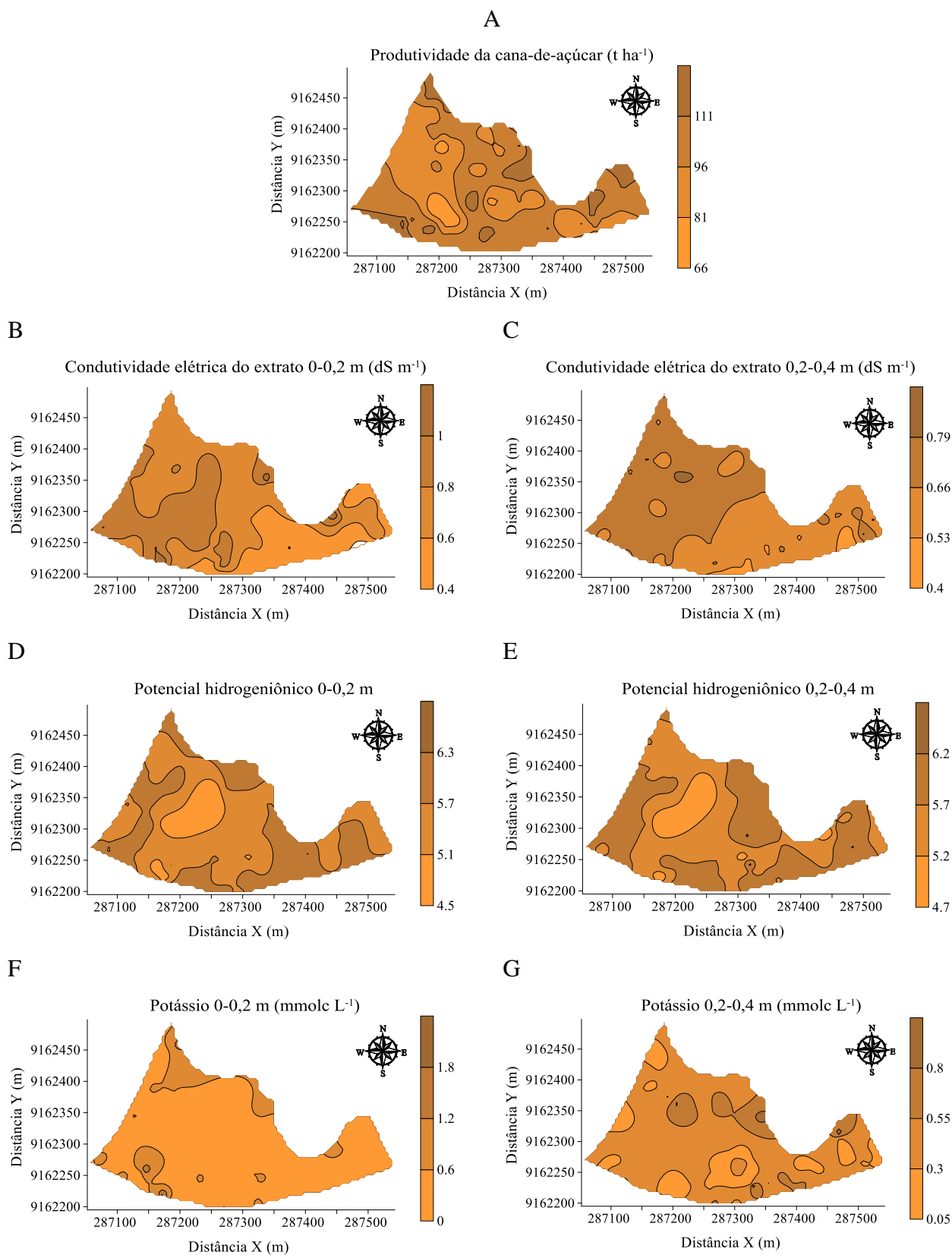


Figura 3. Mapa de isolinhas para teores de: (A) Valores da produtividade da cana-de-açúcar; (B) CEes na camada de 0-0,20 m e (C) CEes na camada de 0,20-0,40 m; (D) pH na camada de 0-0,20 m e (E) pH na camada 0,20-0,40 m; (F) K^+ na camada de 0-0,20 m e (G) K^+ na camada de 0,20-0,40 m do solo.

A distribuição espacial dos mapas para CEes (Figuras 3B e 3C), Ca^{2+} (Figuras 4A e 4B), do Mg^{2+} (Figuras 4C e 4D), nas duas camadas apresentaram o mesmo padrão espacial com o mapa topográfico e maior concentração de sais na parte de menor cota da área. Devido à proximidade com o mar, estando localizada a aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico a leste, como também a 2,5 km a nordeste de um rio, a área em estudo sofre influencia salina destas fontes hídricas tanto em períodos de marés altas, por elevação e rebaixamento do lençol freático nos períodos de marés altas, como também em período de chuvas intensas, sendo as áreas de menores cotas receptoras das enxurradas provenientes de escoamento superficial, como também por ascensão capilar.

Os mapas do pH (Figuras 3D e 3E) foram em ordem de grandeza inversamente proporcionais aos da produtividade da cana-de-açúcar, CEes (Figuras 3B e 3C), Ca^{2+} (Figuras 4A e 4B), do Mg^{2+} (Figuras 4C e 4D), nas duas camadas, quanto mais alcalino o pH do solo, menor foi a concentração dessas variáveis.

Os mapas de isolinhas para K^+ (Figuras 3F e 3G), Na^+ (Figuras 4E e 4F) e RAS (Figuras 4G e 4H) apresentaram a mesma distribuição espacial.

Os pontos amostrados em cotas mais baixas obtiveram maiores CEes. Confirmado por meio da análise do mapa topográfico da área de estudo, uma vez que no momento das amostragens as partes mais baixas do terreno encontravam-se encharcadas. A ocorrência desse fato está relacionada ao excedente hídrico na área de estudo, representado pelo lençol freático que estava muito próximo à superfície do solo no momento das amostragens dos demais atributos do solo em estudo, conseqüentemente, ocorreu devido má drenagem da área (GHEYI et al., 1997; WANDERLEY, 2009; DIAS e BLANCO, 2010; SILVA et al., 2011; AMARAL JÚNIOR, et al., 2012; ARTUR et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2015).

A variabilidade espacial da produtividade de cana-de-açúcar foi influenciada pela CEes, pH, Na^+ , RAS. Com isso, os mapas temáticos favorecerão a tomada de decisão no processo de produção de cana-de-açúcar, bem como definir servirão de bases estratégicas para otimizar a amostragem de solos para aplicação de fertilizantes e corretivos, e conseqüentemente a lucratividade da área (SILVA et al., 2013). O relevo foi o fator que mais interferiu sobre a variabilidade de todos os atributos estudados.

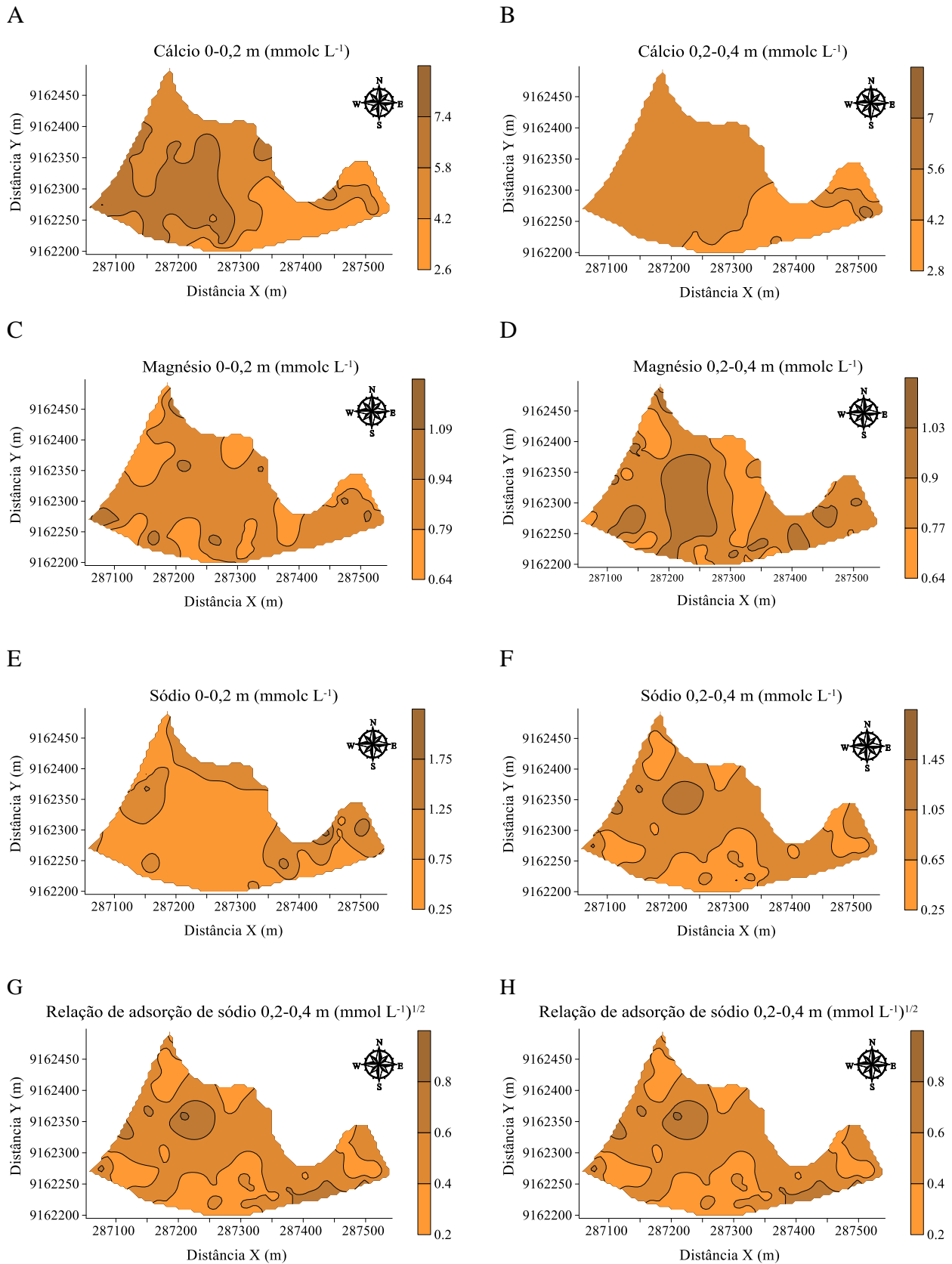


Figura 4. Mapa de isolinhas para tores de: (A) Ca²⁺ na camada de 0-0,20 m e (B) Ca²⁺ a 0,20-0,40 m; (C) Mg²⁺ na camada de 0-0,20 m e (D) Mg²⁺ de 0,20-0,40 m; (E) Na⁺ na camada de 0-0,20 m e (F) Na⁺ a 0,20-0,40 m; (G) RAS na camada de 0-0,20 m e (H) RAS na camada de 0,20-0,40 m.

No presente estudo, por meio das correlações espaciais, a CEes, Na⁺ e RAS no solo foram os atributos do solo que mais influenciaram na produtividade de cana-de-açúcar, e considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo diferenciado na área.

5. CONCLUSÕES

- A análise geoestatística demonstrou que o modelo esférico e gaussiano foram o que mais se ajustaram ao conjunto de dados;

- A CEes, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ e RAS apresentaram os maiores valores de alcance entre as variáveis de solo analisadas, com dependência espacial moderada e forte, e foram os atributos considerados para a delimitação de zonas homogêneas para fins de manejo sítio específico;

- Os mapas de variabilidade espacial da CEes, pH, Na⁺ e RAS apresentaram homogeneidade com o mapa topográfico e da produtividade da cana-de-açúcar e foram inversamente proporcionais aos mapas temáticos do pH.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral Júnior, V. P.; Barreto, H. B. F.; Miranda, N. O.; Medeiros, J. F.; Lima, A. S. Parâmetros da equação de Van Genuchten e índices de solo sob lâminas crescentes de irrigação com água salina. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 8, n. 4, p. 60-65, 2012.

Artur, A. G.; Oliveira, D. P.; Costa, M. C. G.; Romero, R. E.; Silva, M. V. C.; Ferreira, T. O. Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 141–149, 2014.

Ayers, R. S.; Westcot, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Traduzido por Gheyi, H. R.; Medeiros, J. F.; Damasceno, F. A. V. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29 revisado). Campina Grande: UFPB/FAO, 1999, 153 p.

Bottega, E. L.; Queiroz, D. M.; Santos, N. T.; Pinto, F. A. C.; Souza, C. M. A. Correlação entre condutividade elétrica aparente e atributos químicos e físicos de um Latossolo. **Comunicata Scientiae**, v. 6, n. 2, p. 134-142, 2015.

Brasil. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco** (Boletim Técnico, 26, Série Pedologia, 14). Convênio de mapeamento de solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN convênio MA/ CONTAP/USAID/ETA. Recife, 1972.

- Brasil. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. **Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema** (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro, 1969. 84 p.
- Camargo, O. A., Moniz, A. C., Jorge, J. A., Valadares, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas** (Boletim técnico, 106). Campinas: Instituto Agronômico, 1986, 94 p.
- Cambardella, C. A.; Moorman, T. B; Novack, J. M; Parkin, T. B; Karlen, D. L; Turco R. F.; Knopka, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society America Journal**, v. 58, p. 1240-1248, 1994.
- Carvalho, J.R.P.; Silveira, P.M.; Vieira, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, p.1151-1159, 2002.
- Carvalho, M. P.; Takeda, E. Y.; Freddi, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 695-703, 2003.
- Conab - Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, safra 2014/2015**. Quarto Levantamento, v. 1, n. 4, p. 1-29, Brasília, 2015. Disponível em: <
http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_04_13_08_45_51_boletim_cana_portugues_-_4o_lev_-_14-15.pdf>. Consultado em 5 de ago. 2015.
- Conab-Companhia Brasileira de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira Cana-de-açúcar safra 2015/2016** – Primeiro Levantamento abril/2015. Acomp. safra bras. cana-de-açúcar, v. 2 – Safra 2015/16, n.1 – Primeiro Levantamento, Brasília, p. 1-28, abr. 2015.
- Dias, N. S.; Blanco, F. F. **Efeitos dos sais no solo e na planta**. In: GHEYI, H. R.; DIAS, N. S.; LACERDA, C. F. Manejo da salinidade na agricultura: Estudos básicos e aplicados. Fortaleza, INCT Sal, 2010, 472 p.
- Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2013, 353 p.
- Embrapa. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília, 2009, 627 p.

- Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2006. 212p.
- Gheller, A. C. A. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCar, CCA, DBV, 1999, 7 p.
- Gheyi, H. R., Queiroz, J. E., Medeiros, J. F. **Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada**. Paraíba: UFPB, 1997, 383 p.
- Golden Software. **Surfer 11.0 - user's guide**. New York: Golden Software, 2002.
- Lima, V. L. A. **Efeitos da qualidade da água de irrigação e da fração de lixiviação sobre a cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em condições de milímetro de drenagem**. 1998. 87 p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1998.
- Machado, L. O.; Lana, A. M. Q.; Lana, R. M. Q.; Guimarães, E. C.; Ferreira, C. V. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em áreas sob sistema plantio convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 591-599, 2007.
- Pereira, J.R.; Valdivieso, C.R.; Cordeiro, G.G. Recuperação de solos afetados por sódio através do uso do gesso. In: Semiárido sobre o uso do fósforo na agricultura, 1. 1985, Brasília, **Anais...** Brasília: IBRAFOS, 1986. p.85-106.
- Pereira, S. R. Solos afetados por sais. In: Cavalcanti, F.V. A. (Coord.). **Recomendações de adubação para o estado de Pernambuco**. 2 ed. Recife: IPA, p.76-82, 1998.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez V. V. H. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª aproximação**. Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. Viçosa, MG, 1999. 359 p.
- Ribeiro, M.R.; Origem e classificação dos solos afetados por sais. In: **Manejo da salinidade na agricultura: estudos básicos e aplicados**. 2010. p. 11-19.
- Robertson, G.P. **GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide**. Plainwell: Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- Silva, A. R.; Guimarães, E. C.; Tavares, M. Efeito de tendência no ajuste de semivariogramas esféricos. **FAMAT em revista**, n. 10, p. 107-116, 2008.

- Silva, J. L. A.; Alves, S. S. V.; Nascimento, I. B.; Silva, M. V. T.; Medeiros, J. F. Evolução da salinidade em solos representativos do Agropólo Mossoró-Assu cultivado com meloeiro com água de diferentes salinidades. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v. 7, n. 4, p. 26-31, 2011.
- Silva, J. S.; Montenegro, A. A. A.; Silva, E. F. F.; Andrade, C. W. L.; Silva, J. R. L. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 6, n. 4, p. 764-776, 2013.
- Siqueira, G. M.; Dafonte, J.; Paz González, A. **Estimación de la textura y contenido de agua en el suelo a partir de datos de conductividad eléctrica utilizando geoestadística multivariante**. Estudios de la Zona No Saturada del Suelo, v. 9, p. 228-23, 2009.
- Siqueira, G. M.; Silva, E.F.F.; Dafonte, J. D. Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar. **Bragantia**, v. 74, n. 2, p.215-223, 2015.
- Souza, Z. M.; Cerri, D. G. P.; Colet, M. J.; Rodrigues, L. H. A.; Magalhães, P. S. G.; Mandoni, R. J. A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 4, p. 840-847, 2010.
- Vieira, S. R.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W.; Tillotson, P. M. The Scaling of semivariograms and the kriging estimation. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 525-533, 1997.
- Wanderley, R. A. **Salinização de solos sob aplicação de rejeito de dessalinizadores com e sem adição de fertilizantes**. 2009. 52 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2009.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (ed.). Application of soil physics, New York: **Academic Press**, p. 319-324, 1980.
- Willadino, L.; Oliveira Filho, R. A.; Silva Junior, E. A.; Gouveia Neto, A.; Camara, T. R. Estresse salino em duas variedades de cana-de-açúcar: enzimas do sistema antioxidativo e fluorescência da clorofila. **Revista Ciência Agronômica**, 42(2), 417-422, 2011.

7. DIFICULDADES ENCONTRADAS

A área experimental está localizada em uma área com cultivo comercial de cana-de-açúcar na Usina Santa Teresa no município de Goiana (PE), tal fato, faz com que os pesquisadores estejam sujeitos ao cronograma de colheita da usina.

8. ATIVIDADES PARALELAS DESENVOLVIDAS PELO BOLSISTA

a) Publicação de 2 artigos em eventos científicos:

Primo, M.H.O.; Dantas, D.C.; Silva, E.F.F.; Siqueira, G.M.; Silva, J.S.; Santos, J.S.G. Variabilidade espacial do cálcio solúvel no solo na Zona da Mata Norte de Pernambuco. In: XV Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão (JEPEX), 2015, Recife. XV Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão (JEPEX), 2015.

Daniel da Costa Dantas; Ênio Farias de França Silva; Jenyffer da Silva Gomes Santos; **Marcelo Henrique de Oliveira Primo**; Maria Victtoria Carvalho Alves; Laudemir Francisco de Souza Júnior. Uso de efluentes domésticos tratados como alternativa hídrica e nutricional do girassol em região semiárida. In: I Congresso de Agroecologia do Semiárido e VII Simpósio Brasileiro sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável do Semiárido, 2015 Mossoró.

b) No período atual o bolsista colaborou com as seguintes atividades paralelas e relacionadas com o presente projeto:

- Demarcação dos pontos de amostragem com uso de GPS;
- Amostragem de solo em campo, e preparo das mesmas (secagem, destorroamento e tamissagem a 2 mm);
- Realização de análise de solo dos atributos químicos (condutividade elétrica, pH, Ca, Mg, Na, K).
- Identificação de macrofauna edáfica.