



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 6, nº 1 (2020)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2020v6n1ID18484>



VARIABILIDADE ESPACIAL DA UMIDADE E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO EM VALE ALUVIAL UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS

**Frederico Abraão Costa Lins¹; Iug Lopes²;
Abelardo Antônio de Assunção Montenegro³**

¹Doutorando em Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6498-9805>

Email: frederico_acl@hotmail.com

²Doutorando em Engenharia Agrícola, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0592-4774>

Email: iuglopes@hotmail.com

³Doutor em Water Resources, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Recife/PE, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5746-8574>

Email: montenegro.ufrpe@gmail.com

Resumo

Os métodos de indução eletromagnética na agricultura de precisão possuem alto potencial em aplicações voltadas para estudos da variabilidade espacial da salinidade e umidade do solo. O objetivo deste trabalho foi verificar o desempenho do EM38[®] em vale aluvial no semiárido para fins de aplicação de agricultura de precisão, e avaliar a dinâmica e dependência espacial da umidade e da condutividade elétrica em diferentes profundidades do solo. A área de estudo está localizada no município de Parnamirim, Pernambuco, no Campus Avançado de Agricultura Irrigada de Parnamirim da Universidade Federal Rural de Pernambuco. Duas malhas regulares foram adotadas, uma de 10 x 10 m para amostragem de condutividade elétrica aparente do solo (CEa) estimada com o aparelho EM38[®] e outra de 20 x 10 m para amostragem de solo, para determinação da umidade, salinidade, silte e argila nas camadas de 0-0,3 m, 0,3-0,6 m e 0,6-0,9 m. Informações diretas e indiretas foram utilizadas nas análises geoestatísticas, construção de semivariogramas e krigagem de mapas. O Grau de Dependência Espacial dos atributos avaliados variou entre forte e moderado. Maior umidade na camada mais profunda do solo foi constatada, as maiores CEa

foram encontradas na camada 0,3-0,6 m. O EM38[®] mostrou-se eficiente na estimativa da condutividade elétrica do solo, e possibilitou a validação de modelo de regressão previamente calibrado na mesma área, em período com restrição hídrica no solo.

Palavras-chave: geoestatística, agricultura de precisão, EM38[®]

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL MOISTURE AND ELECTRICAL CONDUCTIVITY IN AN ALLUVIAL VALLEY USING GEOPHYSICAL TECHNIQUES

Abstract

The methods of electromagnetic induction in precision agriculture have high potential in applications aimed at studying the spatial variability of soil salinity and moisture. The objective of this paper was to verify the performance of EM38[®] in an alluvial valley in the semiarid region for the purpose of application for precision agriculture, and to evaluate the dynamics and spatial dependence of soil moisture and electrical conductivity at different depths along the profile. The study area is located in the municipality of Parnamirim, Pernambuco State, on the Advanced Campus of Irrigated Agriculture in Parnamirim from the Federal Rural University of Pernambuco. Two regular meshes were adopted, one of 10 x 10 m for measuring the apparent soil electrical conductivity (Eca) estimated with the EM38[®] device and another of 20 x 10 m for soil sampling, to determine soil moisture, salinity, silt and clay contents in the 0-0.3 m, 0.3-0.6 m and 0.6-0.9 m layers. Direct and indirect information was used in geostatistical analysis, construction of semivariograms and map kriging. The Degree of Spatial Dependence of the evaluated attributes varied from strong to moderate. Higher soil moisture in the deepest layer was found, whereas the highest Eca was found in the 0.3-0.6 m layer. The EM38[®] proved to be efficient in estimating the soil electrical conductivity, and enabled the validation of a previously calibrated regression model for the same area, in a period of soil water restriction.

Keywords: geostatistics, precision agriculture, EM38[®]

VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA HUMEDAD Y CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA DEL SUELO EN UN

VALLE ALUVIAL UTILIZANDO TÉCNICAS GEOFÍSICAS

Resumen

Los métodos de inducción electromagnética en la agricultura de precisión poseen un alto potencial en aplicaciones destinadas a estudiar la variabilidad espacial de la salinidad y la humedad del suelo. El objetivo de este trabajo fue verificar el desempeño del EM38® en un valle aluvial en la región semiárida, con fines de aplicación de agricultura de precisión, y evaluar la dinámica y la dependencia espacial de la humedad y la conductividad eléctrica en diferentes profundidades del suelo. El área de estudio está localizada en el municipio de Parnamirim, Pernambuco, en el Campus Avanzado de Agricultura de Riego de Parnamirim de la Universidad Federal Rural de Pernambuco. Se adoptaron dos mallas regulares, una de 10 x 10 m para el muestreo de la conductividad eléctrica aparente del suelo (CEa) estimada con el aparato EM38® y otra de 20 x 10 m para el muestreo del suelo, para determinación de la humedad, salinidad, limo y arcilla en las capas de 0-0.3 m, 0.3-0.6 m y 0.6-0.9 m. Informaciones directas e indirectas fueron utilizadas en los análisis geoestadísticos, construcción de semivariogramas y kriging de mapas. El Grado de Dependencia Espacial de los atributos evaluados varió entre fuerte y moderado. Se verificó mayor humedad en la capa más profunda del suelo, los CEa más altos se encontraron en la capa de 0.3-0.6 m. El EM38® demostró ser eficiente en la estimación de la conductividad eléctrica del suelo, y permitió la validación de un modelo de regresión previamente calibrado en la misma área, en un período con restricción hídrica en el suelo.

Palabras-clave: geoestadística, agricultura de precisión, EM38®

1. INTRODUÇÃO

A variabilidade espacial de atributos do solo interfere nas práticas agrícolas, e na disponibilidade hídrica, afetando a distribuição de umidade e salinidade do solo. Montenegro et al. (2010) enfatizam o elevado potencial dos vales aluviais para oferta de recursos hídricos no semiárido, e alertam para susceptibilidade de tais áreas a processos de degradação, devido à acumulação de sais. Nesse estudo, os autores utilizaram com sucesso técnicas geofísicas para avaliar a variabilidade espacial da salinidade em diferentes escalas.

O uso de instrumentos de medição eletromagnética, a exemplo do EM38®, para investigação de características do solo já foi alvo de várias pesquisas, em que foi observada ampla aplicabilidade, a exemplo de Montenegro et al. (2010) e Lopes & Montenegro (2019a). Adicionalmente, a adoção de técnicas geofísicas na agricultura de precisão permite maior rapidez e redução de custos na determinação de variáveis físico-hídricas do solo, em comparação com métodos diretos (BRAMLEY & OUZMAN, 2019; LOPES & MONTENEGRO, 2019b).

Lopes & Montenegro (2019a) desenvolveram análise geoestatística utilizando o EM38® na mesma área objeto desse estudo, em período seco e de baixa disponibilidade hídrica no solo, constatando adequado desempenho dos modelos na análise espacial da salinidade e umidade do solo, em particular do modelo de Rhoades & Corwin (1981).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi ampliar a investigação do desempenho do EM38® para fins de aplicação de agricultura de precisão, e avaliar a dinâmica e dependência espacial da umidade e da condutividade elétrica em diferentes profundidades, em área aluvial no semiárido, contemplando período sem restrição hídrica no solo.

2. METODOLOGIA

O presente estudo foi desenvolvido no primeiro trimestre de 2018, em área aluvial inserida em região semiárida. A área de estudo está localizada no município de Parnamirim-PE, no Campus Avançado de Agricultura Irrigada de Parnamirim (EAIP) da Universidade Federal Rural de Pernambuco (Figura 1), inserido na bacia hidrográfica do Rio Brígida, em vale aluvial, a jusante da Barragem do Fomento nas coordenadas geográficas 08° 05' 08" de latitude Sul, 39° 34' 27" de longitude Oeste e altitude de 397 m.

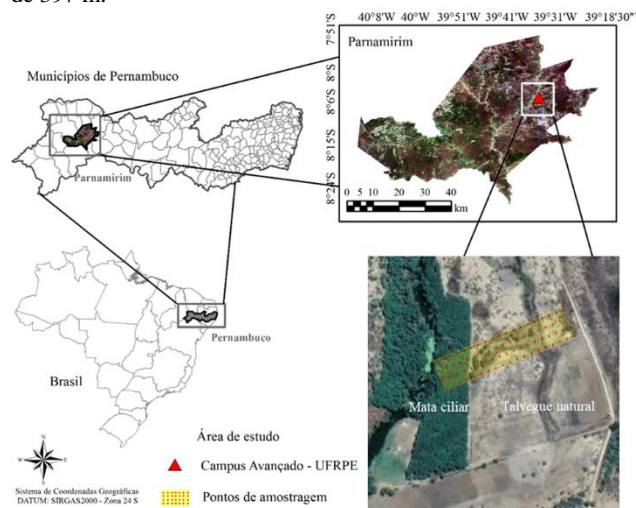


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, em vale aluvial do Rio Brígida. Fonte: elaborado pelos autores.

A região possui clima tropical semiárido BShw', com período chuvoso iniciando em novembro, e com término em abril (ALVARES et al., 2013). A temperatura média é 26 °C, precipitação média anual de 569 mm e evapotranspiração potencial de aproximadamente 1600 mm. Na Figura 2, pode-se observar a precipitação histórica do período de 1990 a 2018, bem como a precipitação acumulada de meses anteriores ao experimento, que ocorreu de 05 a 09 de março de 2018. A precipitação acumulada antecedente de 90 dias foi de 230 mm.

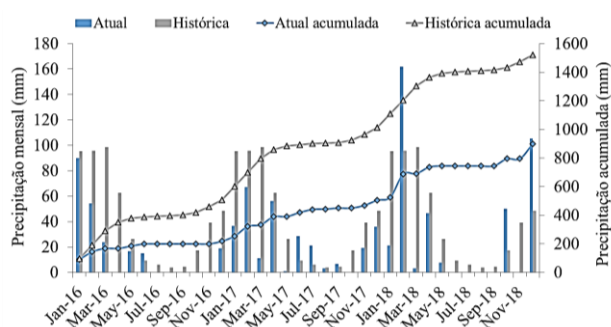


Figura 2 - Precipitação mensal e acumulada para o histórico e o ano de 2018. Fonte: elaborado pelos autores.

Experimento anterior, na mesma área de estudo, foi desenvolvido por Lopes & Montenegro (2019a), em setembro de 2016, durante a estação seca e com elevado déficit hídrico. Observou-se uma precipitação acumulada de 500 mm e uma evapotranspiração potencial de aproximadamente 2400 mm entre os experimentos.

A área da pesquisa está inserida no bioma Caatinga. O município de Parnamirim possui aproximadamente 55% da cobertura florestal original da Caatinga (RIBEIRO et al. 2015). O solo é um Neossolo Flúvico de textura franco argilosa.

Dentro da área de estudo foram adotadas duas malhas regulares, uma de 10 x 10 m para amostragem de condutividade elétrica aparente do solo (CEa), estimada com o aparelho EM38®, totalizando 148 amostras, e outra de 20 x 10 m para amostragem de solo para determinação da umidade, salinidade e teor de silte e argila, totalizando 74 amostras. Tais variáveis foram amostradas em três camadas diferentes (0-0,30 m; 0,30-0,60 m e 0,60-0,90 m).

A umidade gravimétrica do solo foi obtida pela relação entre a massa de água existente no solo e a massa seca (TEIXEIRA et al., 2017). As medidas de indução eletromagnética com o EM38® foram efetuadas nos modos verticais e horizontais, posicionando o equipamento a diferentes alturas em relação a nível do solo (0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 m), conforme recomendado por Rhoades & Corwin (1981). Para avaliar a condutividade elétrica aparente do solo (CEa), foram utilizadas as seguintes funções de regressão:

1. Funções propostas por Rhoades & Corwin (1981) envolvendo 5 alturas do EM38® (0; 0,3; 0,6; 0,9; 1,2 m), para as camadas de 0-0,3 m, 0,3-0,6 m, 0,6-0,9 m, 0,9-1,2 m, expressas nas Eqs. 1a, 1b, 1c, 1d, respectivamente.

$$CE_a = -0,1285EM_0 + 0,1446EM_1 + 5,3878EM_2 - 17,4476EM_3 + 15,0549EM_4 - 0,1309 \quad (1a)$$

$$CE_a = -1,3259EM_0 + 4,8939EM_1 + 55,825EM_2 - 94,0405EM_3 + 47,4196EM_4 - 0,9169 \quad (1b)$$

$$CE_a = 9,1705EM_0 - 8,4116EM_1 - 18,3090EM_2 + 50,6298EM_3 - 42,5033EM_4 - 0,1224 \quad (1c)$$

$$CE_a = 1,1090EM_0 - 0,2352EM_1 - 23,3536EM_2 + 221,01EM_3 - 266,8789EM_4 - 3,5012 \quad (1d)$$

2. Funções propostas por Rhoades et al. (1989), baseadas na transformação de raiz quarta, das leituras horizontais (EMH) e verticais (EMV), considerando o equipamento posicionado na superfície do solo, apresentadas nas Eqs. 2a, 2b e 2c, para $EMH \leq EMV$ e nas equações 2d, 2e e 2f para $EMH > EMV$.

$$CE_a^{0,25} = 2,539EM_H^{0,25} - 1,413EM_V^{0,25} - 0,068 \quad (2a)$$

$$CE_a^{0,25} = 2,092EM_H^{0,25} - 0,81EM_V^{0,25} - 0,179 \quad (2b)$$

$$CE_a^{0,25} = 1,894EM_H^{0,25} - 0,407EM_V^{0,25} - 0,292 \quad (2c)$$

$$CE_a^{0,25} = 1,164EM_H^{0,25} - 0,078EM_V^{0,25} \quad (2d)$$

$$CE_a^{0,25} = 0,640EM_H^{0,25} + 0,568EM_V^{0,25} - 0,114 \quad (2e)$$

$$CE_a^{0,25} = 1,367EM_V^{0,25} - 0,209 \quad (2f)$$

3. Funções propostas por Rhoades et al. (1999) utilizando relações lineares entre o logaritmo neperiano de EMH e a diferença entre $\ln(EMH) - \ln(EMV)$, de modo a remover a colinearidade entre a leitura horizontal e vertical do EM38®, detectada por Lesche et al. (1992). Para enquadrar os perfis em regulares, uniformes ou invertidos estabeleceu-se a relação teórica observada na Eq. 3.

$$CE_a = \ln(EM_H) - \ln(EM_V) 0,04334 + 0,03058 \ln(EM_H) + 0,00836(EM_H)^2 \quad (3)$$

Os três tipos de perfis foram especificados com base na Eq. 3:

3.1) Perfil regular, quando a medida $\ln(EM_H) - \ln(EM_V) < 5\%$ do $\ln(EM_H) - \ln(EM_V)$ teórico (Eq. 3);

3.2) Perfil uniforme, quando a medida $\ln(EM_H) - \ln(EM_V)$ está no intervalo $\pm 5\%$ do valor teórico $\ln(EM_H) - \ln(EM_V)$;

3.3) Perfil invertido, quando a medida $\ln(EM_H) - \ln(EM_V) > 5\%$ do valor teórico $\ln(EM_H) - \ln(EM_V)$.

A escolha do modelo de melhor representação da CE do solo foi baseada no coeficiente de determinação R^2 entre a CEa e CER (condutividade elétrica real do solo). Para determinação da CER foi realizado o método da pasta saturada em 47 amostras, conforme Teixeira et al. (2017).

As variáveis silte e argila, umidade gravimétrica e CEa foram analisadas por meio de estatística descritiva (mínimo, máximo, amplitude, média, mediana, coeficiente de variação, assimetria, curtose e desvio padrão). Coeficientes de variação foram analisados de acordo Warrick & Nielsen (1998) que consideram baixa variabilidade quando $CV < 15\%$; moderada para $15\% \leq CV < 50\%$ e alta variabilidade quando $CV \geq 50\%$. A dispersão e a

distribuição dos dados foram submetidas ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (KS) ao nível de 5% de probabilidade.

Posterior às etapas de regressão, estatística descritiva e normalidade dos dados, efetuou-se a análise de dependência espacial utilizando técnicas geoestatísticas e ajustes de semivariogramas. A função clássica para o semivariograma foi utilizada para descrever a dependência espacial da textura, umidade do solo e CEa a diferentes profundidades, conforme Vieira et al. (1981). As semivariâncias experimentais foram estimadas pela Eq. 4:

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

em que:

$\gamma(h)$ - semivariâncias; e,

$N(h)$ - número de pares a cada distância de separação (h).

Os semivariogramas e seus respectivos ajustes foram obtidos a partir do software Geoeas®, sendo testados os modelos gaussiano, esférico e exponencial, e escolhidos os semivariogramas dos modelos que apresentaram melhor ajuste. O processo de validação cruzada (método Jack-knifing) foi utilizado, que consiste em se reavaliar, pelo estimador, os valores amostrais conhecidos, retirando-se um a um, e os recalculando como se não fossem conhecidos (VAUCLIN et al., 1983).

A análise do GDE (Grau de Dependência Espacial) foi realizada segundo Cambardella et al. (1994), baseado na proporção em porcentagem do efeito pepita (C0) em relação ao patamar (C0+C1) com a seguinte classificação: (a) dependência forte < 25%; (b) dependência moderada de 25 a 75% e (c) dependência fraca > 75%.

A distribuição espacial da textura, umidade gravimétrica e da condutividade elétrica do solo foi realizada utilizando algoritmo da interpolação da krigagem para as variáveis individualizadas, gerando assim os mapas de isolinhas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O método que apresentou melhor desempenho foi o de Rhoades & Corwin (1981) com coeficiente de determinação R^2 de 0,82, conforme pode ser observado na Figura 3A, adotando-se então a CEa calculada por este método para as análises geoestatísticas. Resultados semelhantes foram obtidos por Lopes & Montenegro (2019a) na mesma área e em período de alto déficit hídrico com R^2 de 0,86 para o mesmo método. Os demais métodos testados apresentaram R^2 de 0,12 e 0,14, para Rhodes et al. (1989) e Rhodes et al. (1999), respectivamente.

A Figura 3B apresenta a relação entre as CEa de Rhoades & Corwin (1981) e CEes considerando conjuntamente as medições efetuadas neste estudo e as obtidas por Lopes & Montenegro

(2019a), verificando-se elevado coeficiente de determinação e coeficiente angular da reta de regressão próximo a 1.

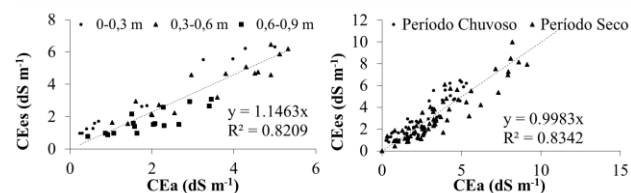


Figura 3 - Desempenho do modelo de Rhoades & Corwin (1981) para as condutividades elétricas em diferentes profundidades (A) e em períodos sem restrição hídrica e com restrição hídrica considerando Lopes & Montenegro (2019a) (B), (**, * - Significativo a $p \leq 0,01$ e $0,05$, respectivamente, pelo teste F). Fonte: elaborado pelos autores.

Narjary et al. (2017) encontraram relações da condutividade elétrica estimada com métodos de indução eletromagnética em leituras verticais (EMV) e horizontais (EMH), com a condutividade elétrica do extrato de saturação do solo, apresentando um coeficiente de determinação R^2 de 0,77 para o perfil de 0-0,9 m, indicando que o instrumento EM38® foi confiável para caracterizar a salinidade do solo, corroborando com o presente trabalho.

O desempenho das funções de regressão pode variar devido a diferentes características físicas, químicas ou condições do solo como textura, matéria orgânica ou umidade, que influenciam nas induções eletromagnéticas (THIESSON et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2016). Montenegro et al. (2010) ao desenvolver estudos também em vale aluvial em região semiárida, localizado em perímetro irrigado, constataram baixo desempenho do método Rhoades & Corwin (1981), sendo o método de Rhoades et al. (1999) o que apresentou melhor desempenho, diferindo deste estudo possivelmente devido a diferença das características de uso do solo.

Os “Box-Plots” para as variáveis analisadas silte e argila, umidade e CEa do solo estão apresentados nas Figuras 4A, B e C, para as camadas de 0-0,3 m, 0,3-0,6 m e 0,6-0,9 m.

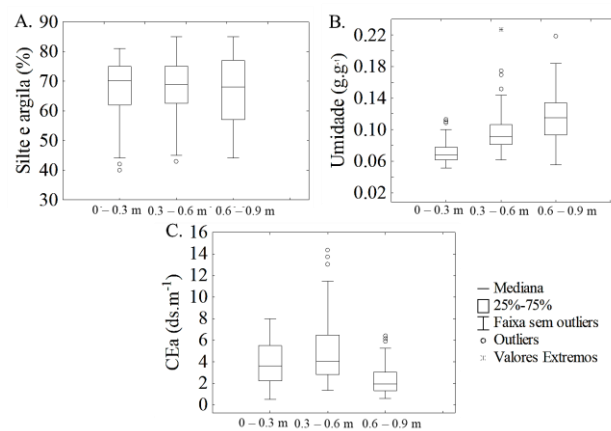


Figura 4 - Box-Plots para diferentes camadas das variáveis silte e argila (A), Umidade (B) e CEa (C). Fonte: elaborado pelos autores.

Observa-se na Figura 4A, que a camada superficial e a camada intermediária de 0,3-0,6 m apresentam outliers na faixa de 40% de teor de silte e argila.

Verificou-se uma homogeneidade entre a composição de silte e argila para as três profundidades. Essa similaridade da textura (silte e argila) pode ser atribuída ao revolvimento do solo (aração), principalmente nas camadas superficiais. Schlindwein & Anghinoni (2000) citam que o revolvimento frequente do solo no sistema convencional como aração e gradagem provoca uma homogeneização da camada mobilizada. Ainda sobre os “Box-Plots”, na Figura 4B, constatou-se que a camada de 0-0,3 m é a que apresenta menores valores de umidade e, na Figura 4C, observa-se que a camada de 0,3-0,6 m é a que apresenta maiores valores de CE.

A análise estatística para o teor de silte e argila, umidade do solo e condutividade elétrica aparente do solo para todas as camadas é apresentada na Tabela 1. É possível observar que as medidas de tendência central como média e mediana apresentam valores aproximados, o que sugere uma distribuição simétrica. Dessa forma, os resultados indicam que não há dominância de valores atípicos. Além disso, todas as variáveis seguem uma distribuição Normal, de acordo com teste de Kolmogorov-Smirnov a 5%, o que é desejável para as análises geoestatísticas de dependência espacial e construção dos semivariogramas.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos atributos do solo para diferentes profundidades do solo. Fonte: elaborado pelos autores.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	CV (%)	Assimetria	Curtose	DP
Silte e argila (0-0,3 m)	40,04	81,04	67,88	70,29	15,03	-0,94	0,17	10,20
Silte e argila (0,3-0,6 m)	43,04	85,04	68,04	69,04	14,19	-0,61	-0,04	9,65
Silte e argila (0,6-0,9 m)	44,04	85,04	67,28	68,04	17,28	-0,25	-0,93	11,63
Umidade (0-0,3 m)	0,05	0,11	0,07	0,07	20,29	1,10	0,59	0,01
Umidade (0,3-0,6 m)	0,06	0,23	0,10	0,09	27,70	2,12	6,78	0,03
Umidade (0,6-0,9 m)	0,06	0,22	0,12	0,12	26,18	0,35	0,95	0,03
CEa (0-0,3 m)	0,51	7,98	3,90	3,65	50,16	0,21	-1,18	1,96
CEa (0,3-0,6 m)	1,36	14,39	4,81	4,05	54,42	1,17	1,42	2,62
CEa (0,6-0,9 m)	0,62	6,39	2,31	1,95	54,57	1,04	0,59	1,26

*CV = coeficiente de variação; *DP = Desvio Padrão.

Nota-se ainda na Tabela 1, que os valores de CEa variam de 0,51 a 14,39 dS m⁻¹ e possuem valores médios de 3,90, 4,81 e 2,31 dS m⁻¹, para as camadas de 0-0,3 m; 0,3-0,6 m e 0,6-0,9 m, respectivamente. Em período de restrição, hídrica Lopes & Montenegro (2019a) relataram valores de CE que variaram de 0,3 a 10 dS m⁻¹, que se assemelha com o do presente estudo. Apesar deste estudo ser em período sem restrição hídrica, é notado que a evapotranspiração potencial é maior que a precipitação acumulada no intervalo entre os referidos trabalhos, o que contribui para limitar a lixiviação dos sais.

Os coeficientes de variação para silte e argila apresentaram moderada variabilidade, exceto para camada intermediária de 0,3-0,6 m, que apresentou baixa variabilidade. A umidade apresentou em todas as camadas uma moderada variabilidade e a CEa apresentou alta variabilidade para todas as profundidades. As variáveis foram analisadas segundo o critério de Warrick & Nielsen (1998).

Os parâmetros dos semivariogramas teóricos ajustados aos atributos do solo estão expostos na Tabela 2, enquanto a Figura 5, apresenta as semivariâncias para as camadas de 0-0,3 m, 0,3-0,6 m e 0,6-0,9 m. A análise do GDE (Grau de Dependência Espacial) indicou forte dependência espacial para silte e argila na camada de 0-0,3 m de, para a umidade nas camadas 0-0,3 m e 0,6-0,9 m e para CEa nas camadas 0-0,3 m e 0,3-0,6 m. A dependência espacial foi considerada moderada para silte e argila nas camadas 0,3-0,6 m e 0,6-0,9 m, para umidade na camada de 0,3-0,6 m e para CEa na camada 0,6-0,9 m, acordo com Cambardella et al. (1994).

Andrade et al. (2017) encontraram fraca dependência espacial para umidade do solo e condutividade elétrica nas camadas de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m e para conteúdo de argila na camada de 0-0,2 m, enquanto que para o teor de argila na camada 0,2-0,4 m observou-se uma dependência moderada, corroborando parcialmente com este trabalho.

É possível observar na Tabela 2 que os semivariogramas ajustados apresentaram resultados adequados ao passar pelo teste da validação cruzada pelo método Jack-Knifing, com média do resíduo variando entre -0,018 e 0,009 e os desvios padrão do Resíduo variando de 0,89 e 1,068.

Tabela 2 – Parâmetros dos modelos teóricos para as semivariâncias das variáveis analisadas e a validação cruzada (método Jack-Knifing). Fonte: elaborado pelos autores.

Variável	Modelo	C0	C+C0	Alcance (A)	*GDE	R ²	*XVALID	
							*Média	*DP
Silte e argila (0,0-0,3 m)	Esférico	11,5	83,35	49,30	0,14	0,96	0,009	0,890
Silte e argila (0,3-0,6 m)	Esférico	28,8	73,87	53,50	0,39	0,71	0,006	0,938
Silte e argila (0,6-0,9 m)	Gaussiano	35,5	88,9	71,20	0,40	0,84	-0,005	0,964
Umidade (0,0-0,3 m)	Esférico	0,000033	0,000252	51,70	0,13	0,95	0,002	1,028
Umidade (0,3-0,6 m)	Esférico	0,000304	0,000872	39,30	0,35	0,66	-0,002	0,976
Umidade (0,6-0,9 m)	Esférico	0,000227	0,001054	74,30	0,22	0,92	0,001	1,068
CEa (0,0-0,3 m)	Gaussiano	0,51	5,029	235,4	0,10	0,97	-0,006	1,017
CEa (0,3-0,6 m)	Gaussiano	1,89	9,789	268,8	0,19	0,99	-0,018	1,022
CEa (0,6-0,9 m)	Gaussiano	0,499	1,788	155,2	0,28	0,99	-0,012	1,039

*GDE = grau de dependência espacial; *XVALID = validação cruzada *Média = média dos resíduos; *DP = Desvio Padrão dos resíduos.

Os modelos que melhor se ajustaram foram o esférico e gaussiano para umidade e CEa, respectivamente, e esférico e gaussiano para silte e argila. Observa-se na Figura 5, os semivariogramas elaborados a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 2. Rodrigues et al. (2017) avaliaram a variabilidade espacial da umidade e da textura do solo e encontraram modelo de semivariograma exponencial para todas as variáveis analisadas como tendo o melhor ajuste, diferindo deste trabalho. Para a condutividade elétrica encontrou-se modelo de semivariograma para todas as camadas, corroborando com Souza et al. (2008) e Montenegro et al. (2010), ambos em vale aluvial irrigado.

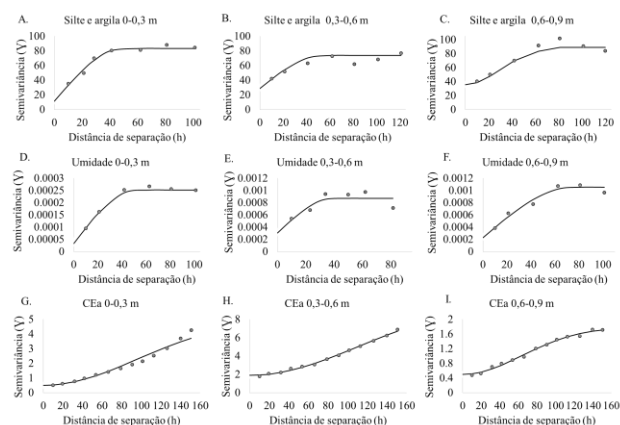


Figura 5 - Semivariogramas dos atributos do solo ajustados para diferentes profundidades. Distância de separação (h) em metros. Fonte: elaborado pelos autores.

Foi possível observar que todos os alcances foram inferiores aos maiores comprimentos da área de estudo. Nota-se que os alcances dos semivariogramas para silte e argila, para as camadas de 0,0-0,3 m e 0,3-0,6 m, Figura 5A e B, respectivamente, são similares, atribuindo-se esse resultado a processos de homogeneização provocados pelo preparo do solo.

Verificou-se menores alcances para umidade do solo nas camadas de 0-0,3 m e 0,3-0,6 m no período sem restrição hídrica, quando comparado com Lopes & Montenegro (2019a). Para CEA, igualmente verificou-se redução dos alcances, em relação aos obtidos por Lopes & Montenegro (2019a), o que pode ser explicado por eventos de precipitação pluviométrica e por fluxos subsuperficiais variáveis espacialmente.

Os mapas de isolinhas foram elaborados e estão apresentados nas Figuras 6A (silte e argila), 6B (Umidade), 6C (CEa) e 6D (Resíduo da validação cruzada para CEA). É possível observar na Figura 6A, a baixa variabilidade entre as camadas do solo para silte e argila. A Figura 6B, apresenta a distribuição espacial da umidade do solo, constatando-se um acréscimo com o aumento da profundidade. Maiores umidades foram encontradas na camada mais profunda a sudoeste da área, próximo às margens do Rio Brígida, tanto na faixa de mata ciliar quanto nas proximidades do talvegue natural (Figura 1).

Andrade et al. (2017) encontraram maiores umidades na camada superficial do solo, condição que foi atribuída à irrigação do local, divergindo dessa forma dos resultados encontrados neste estudo.

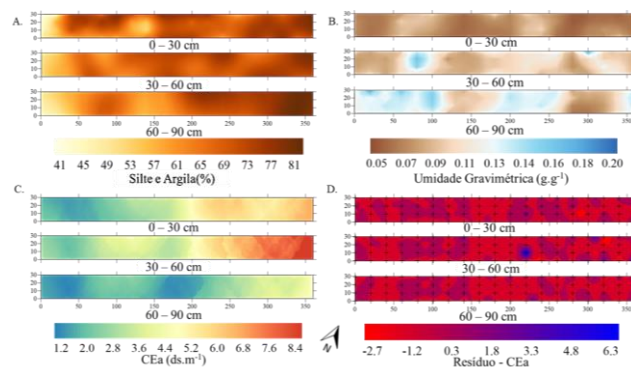


Figura 6 - Mapas de isolinhas para os atributos do solo silte e argila (A), umidade gravimétrica (B), CEA (C) e Resíduo da CEA (D). Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 6C, observa-se que há uma maior CEA na camada de 0,3-0,6 m, corroborando com Lopes & Montenegro (2019a), o que indica que o período chuvoso não influenciou significativamente a lixiviação de sais. Nota-se que as maiores salinidades ocorrem a distâncias superiores a cerca de 200 metros da margem do Rio Brígida. Por sua vez Andrade et al. (2017) encontraram maiores condutividades elétricas para camada mais superficial, diferentemente do presente estudo, por se tratar de área com cultivo agrícola.

De acordo com Singh et al. (2016), os mapas interpolados espacialmente podem apresentar uma estreita relação entre as propriedades do solo e a CEA, porém tal relação não fica evidente neste trabalho, entretanto, ressalta-se uma forte relação inversa entre a umidade do solo e a CEA na camada de 0,6-0,9 m, nas proximidades do Rio Brígida. O mapa de resíduos da CEA apresentado na Figura 6D permite observar claramente a aleatoriedade dos resíduos, o que sugere não haver tendência nos dados. Desse modo, observa-se um domínio estacionário quanto à condutividade elétrica, conferindo maior precisão aos mapas elaborados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As análises geoestatísticas permitiram avaliar adequadamente a dependência espacial de atributos do solo (silte e argila, umidade e condutividade elétrica) para região aluvial no semiárido. O revolvimento do solo influenciou para que houvesse uma homogeneidade nas camadas sub-superficiais.

A validação cruzada e krigagem dos mapas de isolinhas permitiram uma adequada observação da distribuição espacial dos atributos do solo, detectando maior umidade na camada mais profunda do solo, principalmente em locais próximos às linhas de drenagem.

Os maiores níveis de condutividade elétrica foram observados na camada intermediária. Constata-se a relevância da função ecológica da mata ciliar na manutenção de elevadas umidades e baixas salinidades nas camadas mais profundas do solo.

Na área aluvial, o método de Rhoades & Corwin (1981) apresentou bom desempenho, tanto para o período sem restrição hídrica, como previamente verificado para período seco. O

EM38® permitiu estimar a condutividade elétrica do solo de maneira adequada.

5. REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, p.711-728, 2013.
- ANDRADE, C. W. L., MONTENEGRO, A. A. DE A., MONTENEGRO, S. M. G. L., DA SILVA, J. S., TAVARES, U. E. Spatial patterns of soil attributes in a fluvial in the semiarid region, Brazil. *African Journal of Agricultural Research*, v.12, p.362-370, 2017.
- BRAMLEY, R. G. V.; OUZMAN, J. Farmer attitudes to the use of sensors and automation in fertilizer decision-making: nitrogen fertilization in the Australian grains sector. *Precision Agriculture*, v.20, p.157-175, 2019.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KERLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society America Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- LESCH, S. M.; RHOADES, J. D.; LUND, L. J.; CORWIN, D. L. Mapping soil salinity using calibrated electromagnetic measurements. *Soil Science Society America Journal*, v.56, p.540-548, 1992.
- LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Spatialization of electrical conductivity and physical hydraulic parameters of soils under different uses in an alluvial valley. *Revista Caatinga*, v.32, p.222-233, 2019a.
- LOPES, I.; MONTENEGRO, A. A. A. Space dependence of soil moisture and soil electrical conductivity in alluvial region. *Irriga*, v.24, p.1-15, 2019b.
- MONTENEGRO, A. A. A.; NETTO, M. L. C.; MONTENEGRO, S. M. G.; SILVA, E. F. F.; SILVA, FONTES JÚNIOR, R. V. P. Avaliação da salinidade de Neossolo usando-se dispositivo de indução eletromagnética. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.608-617, 2010.
- NARJARY, B.; JANGRA, P.; ABHISHEK, R.; KUMAR, N.; RAJU, R.; THIMAPPA, K.; MEENA, R.L.; KUMAR, S.; KUMAR, P.; CHICHMATALPURE, A. R.; KAMRA, S. K. Quantitative assessment of soil salinity using electromagnetic induction technique and geostatistical approach. *Journal of Soil Salinity and Water Quality*, v.9, p.156-166, 2017.
- RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F.; LESCH, S. Soil salinity assessment methods and interpretation of electrical conductivity measurements. *Irrigation and Drainage*, Rome: FAO-57, 1999. 155p.
- RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Determining soil electrical conductivity – depth relations using inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science Society America Journal*, v.45, p.255-260, 1981.
- RHOADES, J. D.; LESCH, S. M.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. New calibrations for determining soil electrical conductivity-depth relations from electromagnetic measurements. *Soil Science Society America Journal*, v.53, p.74-79, 1989.
- RIBEIRO, E. M. S.; ARROYO-RODRÍGUEZ, V.; SANTOS, B. A.; TABARELLI, M.; LEAL, I. R. Chronic anthropogenic disturbance drives the biological impoverishment of the Brazilian Caatinga vegetation. *Journal of Applied Ecology (Print)*, v.52, p.611-620, 2015.
- RODRIGUES, R. A. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; SANTOS, D. P.; MAGALHÃES, A. G.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial da umidade e das frações granulométricas do solo em um plantio de bananeiras irrigado no semiárido Pernambucano. *Conexão Ciência e Tecnologia*, v.1, p.134-143, 2017.
- SCHLINDWEIN, J. A.; ANGHINONI, I. Variabilidade horizontal de atributos de fertilidade e amostragem do solo no sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.85-91, 2000.
- SINGH, G.; WILLIARD, K.W.; SCHOONOVER, J. E. Spatial relation of apparent soil electrical conductivity with crop yields and soil properties at different topographic positions in a small agricultural watershed. *Agronomy*, v.6, p.01-22, 2016.
- SIQUEIRA, G. M.; DAFONTE J. D.; GONZÁLEZ, A. P.; ARMESTO, M. V.; SILVA, E. F. F.; COSTA, M. K. L.; SILVA, R. A. Measurement of apparent electrical conductivity of soil and the spatial variability of soil chemical properties by electromagnetic induction. *African Journal of Agricultural Research*, v.11, p.3751-3762, 2016.
- SOUZA, E. R.; MONTENEGRO, A. A. A.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE T. S.; PEDROSA, E. R. Variabilidade espacial das frações granulométricas e de salinidade em um Neossolo Flúvico no semiárido. *Ciência Rural*, v.38, p.698-704, 2008.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; ADEMIR FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. *Manual de métodos de análises de solos*. 3.ed. Brasília, DF, EMBRAPA, 2017, 574p.
- THIESSON, J.; KESSOURI, P.; SCHAMPER, C.; TABBAGH, A. Calibration of frequency-domain electromagnetic devices used in near-surface surveying. *Near Surface Geophysics*, v.12, p.481-491, 2014.
- VAUCLIN, M.; VIEIRA, S. R.; VACHAUD, G.; NIELSEN, D. R. The use of cokriging with limited field soil observations. *Soil Science Society of America Journal*, v.47, p.175-184, 1983.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, v.45, p.1040-1048, 1981.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. *Environmental soil physics*, New York: Academic, p.655-675, 1998.

6. AGRADECIMENTOS

O presente estudo foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE - APQ-0300-5.03/17) – Consórcio Universitas, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), o Laboratório de Água e Solo (LAS) e a Universidade Federal Rural de Pernambuco, em particular a Coordenação de Campus Avançado da UFRPE. Os autores gostariam de agradecer o apoio do Sr. Eurico Lustosa, Coordenador do Campus Avançado de Agricultura Irrigada em Pamamirim - UFRPE.

Recebido em: 13/08/2019

Aceito para publicação em: 05/05/2020