



PREDIÇÃO GEOESTATÍSTICA DA ESPESSURA DE HORIZONTES ANTRÓPICOS NA RESERVA BIOLÓGICA DO RIO TROMBETAS

Cauan Ferreira Araújo¹, Mateus Feitosa Siqueira Lobo², Newton Paulo de Souza Falcão³

¹ Mestre em Agricultura no Trópico Úmido, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Av. André Araújo, 2936, Aleixo. 69060-001, Manaus, AM. cauan@kirwane.org.br

² Mestrando em Recursos Naturais da Amazônia, Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA.

³ Pesquisador doutor – INPA, Caixa Postal 478, Manaus, AM- Brasil.

Recebido em: 12/04/2014 – Aprovado em: 27/05/2014 – Publicado em: 01/07/2014

RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo estimar a espessura do horizonte A antrópico em manchas de Terra Preta de Índio. Para este fim foram realizados levantamentos em três sítios na Reserva Biológica do rio Trombetas, região da calha-norte, município de Oriximiná/PA. A distribuição espacial da espessura do horizonte A antrópico em cada mancha foi determinada por meio de sondagens com trado holandês, em grade semirregular de 25m x 25m, e interpolação com o método geoestatístico de interpolação *Krigagem* ordinária. Os modelos teóricos testados para ajuste ao semivariograma experimental foram: circular, esférico, exponencial e gaussiano. O semivariograma para a *Krigagem* da espessura do horizonte A antrópico teve o parâmetro pepita ajustado “a sentimento”, e os parâmetros patamar e alcance ajustados por mínimos quadrados ponderados. A verificação do melhor ajuste foi realizada através da técnica da validação cruzada. Os resultados permitem concluir que o modelo teórico exponencial obteve a predição com menor enviesamento e maior precisão na determinação do desvio padrão, e adicionalmente maiores índices de dependência espacial, sendo este o mais recomendado para o estabelecimento de glebas em função da espessura do horizonte A antrópico nos sítios estudados.

PALAVRAS-CHAVE: *Krigagem*, mapeamento de solos, terra preta de índio .

GEOSTATISTICAL PREDICTION OF ANTHROPIC HORIZONS THICKNESS IN THE BIOLOGICAL RESERVE OF RIO TROMBETAS.

ABSTRACT

The research summarized here aims to estimate the thickness of the anthropogenic A horizon in patches of *Amazonian Dark Earth*. To this end surveys were conducted at three sites in the Biological Reserve of the Rio Trombetas region trough - north city of Oriximiná/PA. The spatial distribution of anthropogenic A horizon thickness in each spot was determined through surveys of Dutch auger, semirregular grid of 25m x 25m, and geostatistical interpolation method of ordinary kriging interpolation. Theoretical models tested to fit the experimental semivariogram were: circular, spherical, exponential and Gaussian. The semivariogram for Kriging thickness

anthropogenic A horizon had the nugget parameter set "the feeling" and the level and range parameters adjusted weighted least squares. Verification of best fit was performed using the technique of cross-validation. The results indicate that the exponential model Theoretical prediction obtained with less bias and greater precision in determining the standard deviation, plus higher levels of spatial dependence, which is the most recommended for the establishment of plots depending on the thickness of the anthropogenic A horizon studied sites.

KEYWORDS: *Kriging*, soil mapping, amazonian dark earth.

INTRODUÇÃO

Na Amazônia ocorrem áreas onde as características originais dos horizontes superficiais do solo foram modificadas pela presença humana pré-colombiana (SOMBROEK, 1966), formando horizontes A antrópicos. Em função da coloração escura da camada superficial, tais solos são conhecidos por designações como Terra Preta, Terra Preta de Índio, Terra Preta Antropogênica e Terra Preta Arqueológica (KÄMPF et al., 2010). Segundo KERN et al. (2003), o horizonte A antrópico pode variar de 10 a 200cm de espessura, porém a grande maioria apresentam de 30 a 60cm de espessura.

O processo de antropogênese produziu alterações nos perfis de solo por meio de acréscimos de material e modificações *in situ* (GLASER & BIRK, 2012), e como resultado os solos com horizonte A antrópico apresentam altos teores de fósforo, cálcio, magnésio, zinco e manganês contrastando com os Argissolos e Latossolos adjacentes (FALCÃO et al., 2010). Essa variação está diretamente relacionada com os padrões de assentamento humano pré-histórico, resultando em áreas heterogêneas quanto aos parâmetros de fertilidade.

Logo, as variações na espessura do horizonte A antrópico são de suma importância para o estabelecimento de glebas homogêneas para amostragem em tais solos. Portanto, se faz necessário o uso de um método para estimar, ou prever, de forma eficaz tal propriedade. Diversos autores (KNOTTERS et al., 1995; BOURENNANE, 2000; VANWALLEGHEM, 2010) utilizaram a *Krigagem* para construir mapas preditivos da espessura dos horizontes do solo. O termo *Krigagem* foi usado primeiramente por MATHERON (1963), em homenagem ao engenheiro de minas sul-africano KRIGE (1951), que primeiro formulou e implementou essa técnica de interpolação. PIRES (2010) afirma que a *Krigagem* é o melhor interpolador linear não tendencioso, ou seja, a média da diferença entre os valores preditos e verdadeiros é nula e as previsões produzidas tem variância mínima.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo determinar o modelo teórico mais eficiente para gerar superfícies de predição e desvio padrão da predição da espessura do horizonte A antrópico em mapeamentos de solo ultra detalhados.

MATERIAL E METODOS

A área de estudo, denominada Reserva Biológica do Rio Trombetas, está localizada no município de Oriximiná, extremo noroeste do estado do Pará. Os três sítios estudados estão localizados a margem do lago Erepecú, conforme apresentado na Figura 1. As classes de solo mais abundantes na área são os Latossolos Amarelos, Latossolos Vermelho Amarelo e Plintossolos (IBGE, 2001).

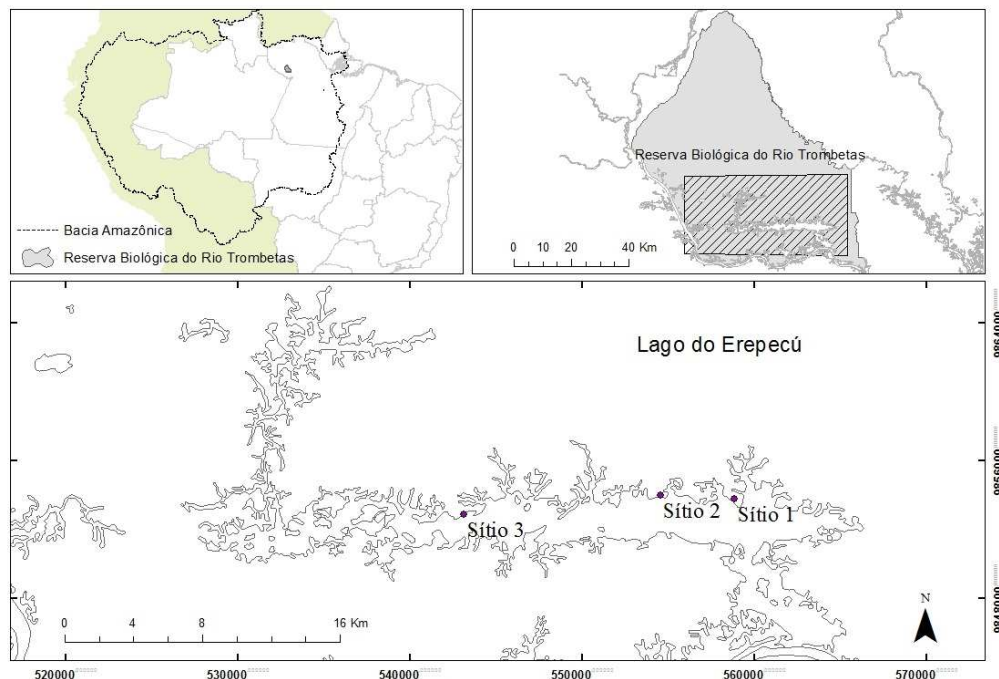


FIGURA 1. Mapa de localização dos sítios estudados.
FONTE: Acervo pessoal.

A espessura do horizonte A antrópico nos transectos estudados foi observada através de sondagens com trado holandês, em caminhamento perpendicular a linha d'água até alcançar o solo adjacente, com distância de 25 metros entre sondagens e 25 metros de entrelinhas, formando grades semirregulares com área aproximada de dois hectares. Os pontos das sondagens foram georreferenciados utilizando coordenadas Universais Transversas de Mercator e DATUM South American 1969.

Os parâmetros observados foram organizados em planilha eletrônica com o software Microsoft Excel versão 2010 e submetidos a análises estatísticas no módulo Geostatistical Analyst do software ArcGis versão 10.2. Foram realizadas análises estatísticas descritivas básicas, tais como média, mediana, mínimo, máximo e desvio padrão, assimetria e curtose. As frequências foram observadas por meio de histograma, e a normalidade das distribuições foi verificada por meio do teste Kolmogorov-Smirnov.

A presença de tendência foi verificada por meio da plotagem da variável espessura do horizonte A antrópico no eixo Z em função das coordenadas X e Y. As tendências foram ajustadas por regressão com polinômio de 1ª ordem. Em seguida os dados foram interpolados utilizando o método de predição geoestatística *Krigagem* ordinária, com remoção de tendência de 1ª ordem. Posteriormente, a superfície de tendência foi automaticamente adicionada para a obtenção de predições razoáveis (ESRI, 2003).

Os modelos teóricos testados foram: o modelo circular, esférico, exponencial e gaussiano (CRESSIE, 1993). O ajuste do semivariograma foi realizado segundo os critérios sugeridos por YAMAMOTO & LANDIN (2013): o parâmetro pepita foi ajustado “a sentimento”, observando as médias próximas à origem; o ajuste do incremento e alcance foi realizado por mínimos quadrados ponderados; o passo foi ajustado em 25 metros e o número de passos ajustado em cinco. Os parâmetros de busca do interpolador foram definidos conforme os critérios recomendados para distribuições amostrais regulares e semirregulares por YAMAMOTO & LANDIN (2013): Número de

setores, 4, com 45° de inclinação; número mínimo de vizinhos 3; número máximo de vizinhos igual a $n/2$, onde n é igual ao número de observações.

A fim de escolher a melhor predição dentre o conjunto de modelos foi utilizada a técnica da validação cruzada (ISAAKS & SRIVASTAVA 1989; VIEIRA, 1998; REIS, 2013). Foram consideradas as estatísticas geradas na validação cruzada: média dos erros de predição padronizados (*Mean Standardized Error, MS*); a Raiz Quadrada da Média do Quadrado das Diferenças entre os Valores Estimados e o Verdadeiro (*Root-Mean-Square, RMS*); a raiz quadrada da média do quadrado das diferenças entre os valores estimados e o verdadeiro padronizado (*Root-Mean-Square-Standardized, RMSS*); o erro padrão da média do erro de predição (*Average Standard Error, ASE*). Segundo estes autores, o modelo mais ajustado é aquele em que o valor de *MS* e *RMS* estão mais próximos à zero, o valor de *RMSS* mais próximo a um, e *ASE* mais próximo de *RMS*.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados do mapeamento do horizonte A antrópico através do método da predição geoestatística são apresentados nesta seção. As estatísticas básicas estão apresentadas na Tabela 1. Os valores médios e medianos foram aproximados, corroborando com as estatísticas de assimetria e curtose que indicaram séries com tendências centralizadas. Os valores máximos foram semelhantes para os três sítios, indicando possivelmente períodos de ocupação semelhantes (KERN et al., 2003). As séries foram consideradas distribuições normais pelo teste Kolgomorov-Smirnov.

TABELA 1. Estatísticas descritivas básicas das sondagens no horizonte A antrópico nos sítios 1, 2 e 3.

Sítio	n*	média	Mediana	mínimo	Máximo	desvio padrão	assimetria	curtose
1	18	58	61	10	86	21,73	-0,947	0,517
2	20	47	46	2	82	19,82	-0,308	-0,003
3	22	51	57	5	80	23,42	-0,742	-0,452

n* = numero de observações.

O posicionamento dos transectos, perpendiculares ao rio seguindo até encontrar solo adjacente, gerou tendência externa (*external drift*) de diminuição da espessura do horizonte A antrópico, conforme apresentado na Figura 3.

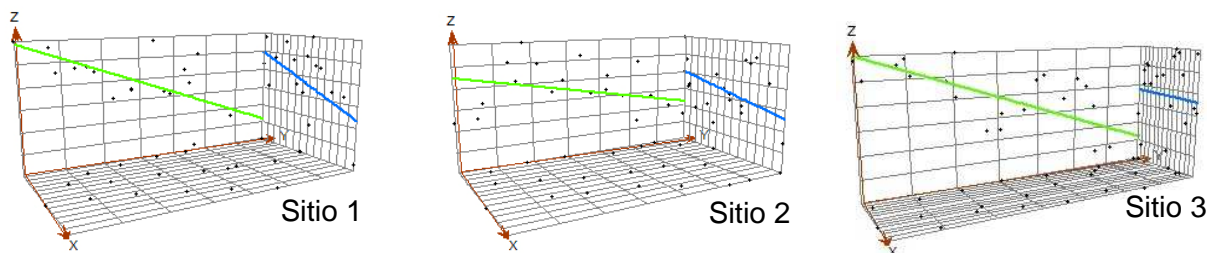


FIGURA 2. Análise de tendência externa nos sítios 1,2 e 3; ajuste por polinômio de 1ª ordem.

Os parâmetros para ajustes dos semivariogramas teóricos circular, esférico, exponencial e gaussiano, ao semivariograma experimental nos sítios 1,2 e 3 estão apresentados na Tabela 2. Os altos valores do parâmetro pepita nos ajustes de todos os modelos aos três sítios possivelmente estão relacionados à interferência antrópica, geradora de padrões complexos e descontínuos (GOMES, 2007). Isso, pois, sítios de Terra Preta de Índio geralmente são frutos de múltiplos assentamentos, sobrepondo em sua estratificação áreas de habitação, despejo de resíduos e cultivo (SOMBROEK, 1966). Já nos solos não-antrópicos as espessuras dos horizontes tendem a apresentar alta continuidade na origem (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978); ou seja, baixos valores pepita, mostrando comportamento parabólico característico de uma variabilidade espacial regular. Segundo KACHANOSKI et al. (1985) a microtopografia explica 25% da variação da espessura dos horizontes A nesses casos, sendo a principal variável independente a ser considerada para sua predição.

TABELA 2. Parâmetros de ajuste para os semivariogramas dos sítios 1,2 e 3.

Sítio	Modelo	Pepita	Contribuição	Patamar	Alcance
1	Circular	50	146,2	196,2	66,4
	Esférico	50	133,1	183,1	65,3
	Exponencial	10	183,9	193,9	61,8
	Gaussiano	70	124,8	194,8	61,8
2	Circular	5	307,2	312,2	61,8
	Esférico	5	297,7	302,7	61,8
	Exponencial	5	314,0	319,0	81,4
	Gaussiano	35	277,7	312,7	61,8
3	Circular	180	63,3	243,3	69,1
	Esférico	180	63,7	243,7	79,8
	Exponencial	180	65,4	245,4	100,0
	Gaussiano	195	56,1	251,1	83,5

As estatísticas descritivas da validação cruzada estão apresentadas na Tabela 3. Os modelos apresentaram leve enviesamento positivo; o modelo exponencial apresentou esta tendência de forma mais atenuada nos três sítios estudados. Os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a acurácia do desvio padrão da predição, estimada através da estatística *RMSS*, nos três sítios estudados. Quanto à incerteza associada às predições, comparando *RMS* e *ASE*, os modelos exponencial e esférico superestimaram o desvio padrão da predição em dois dos três sítios estudados, sendo, portanto modelos conservadores; enquanto os modelos circular e gaussiano obtiveram resultado oposto.

Por outro lado, o desvio do valor modelado em relação ao valor mensurado, associado à estatística *RMS*, foi bastante significativo em todos os casos. Este resultado provavelmente ocorre devido às incertezas associadas a descontinuidades resultantes da interferência antrópica no processo de pedogênese.

TABELA 3. Estatísticas obtidas por validação cruzada nos modelos ajustados dos sítios 1,2 e 3.

Sítio	Modelo	<i>MS</i>	<i>RMSS</i>	<i>RMS</i>	<i>ASE</i>
1	Circular	0,0765	1,217	15,072	12,358
	Esférico	0,0759	1,172	14,859	12,618
	Exponencial	0,0667	1,120	14,702	13,234
	Gaussiano	0,0762	1,185	14,945	12,503
2	Circular	0,0772	0,984	14,410	14,169
	Esférico	0,0621	0,940	14,712	15,298
	Exponencial	0,0616	0,979	15,727	15,889
	Gaussiano	0,0728	0,971	13,985	13,831
3	Circular	0,0738	0,979	15,117	15,536
	Esférico	0,0538	0,975	15,025	15,511
	Exponencial	0,0351	0,992	15,328	15,533
	Gaussiano	0,0432	0,979	15,079	15,488

Os mapas de predição da espessura do horizonte A antrópico e do desvio padrão da predição, gerados através de quadro modelos de semivariogramas teóricos, são apresentados nas figuras 3, 4, 5 para os sítios um (1), dois (2) e três (3), respectivamente. O modelo gaussiano apresentou uma distribuição mais uniforme do desvio padrão da predição para toda a área amostrada, significando uma distribuição mais regular do erro. No modelo exponencial, por sua vez, foi verificada tendência oposta. Os modelos circulares e esféricos obtiveram resultados intermediários.

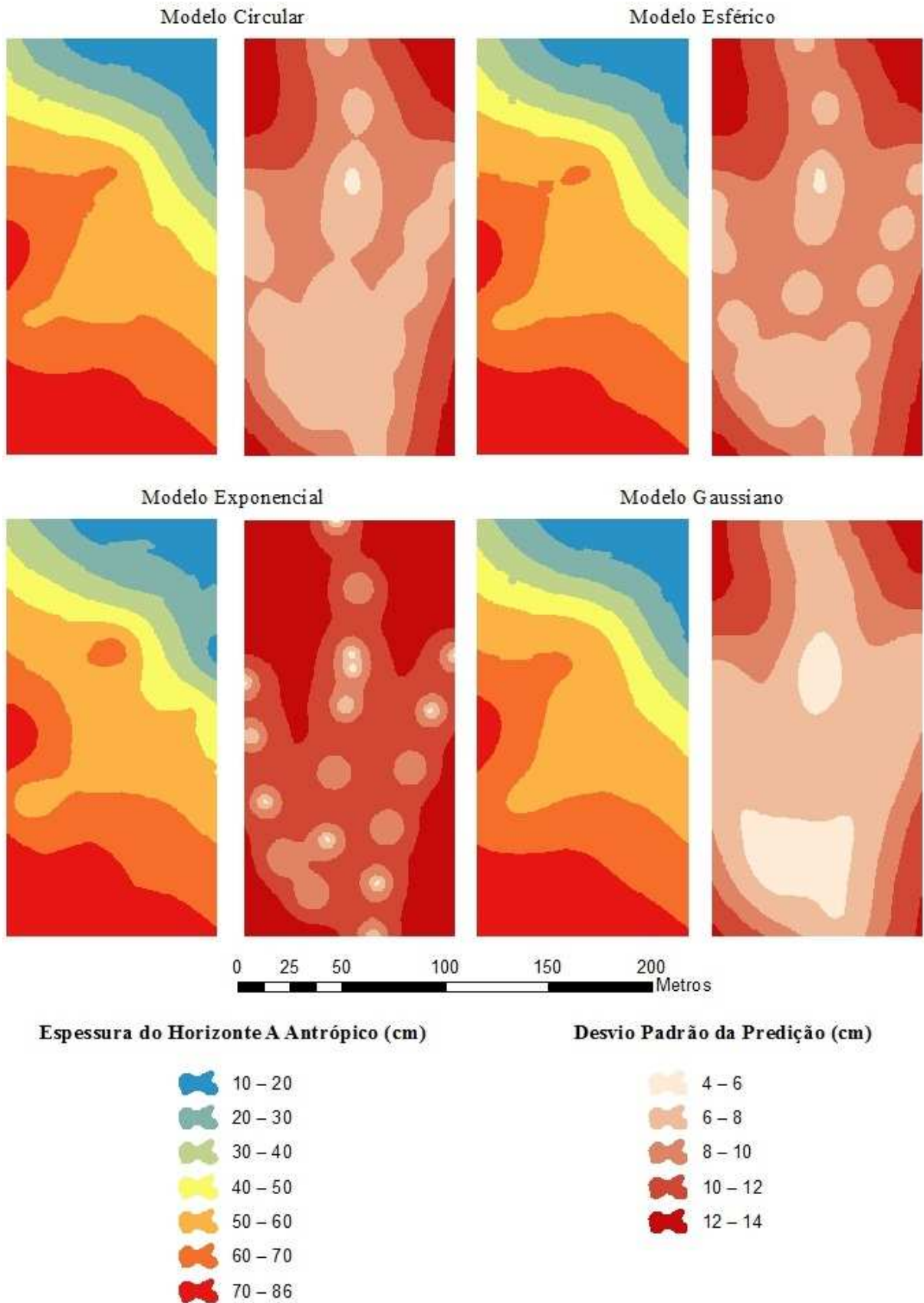


FIGURA 3. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 1.

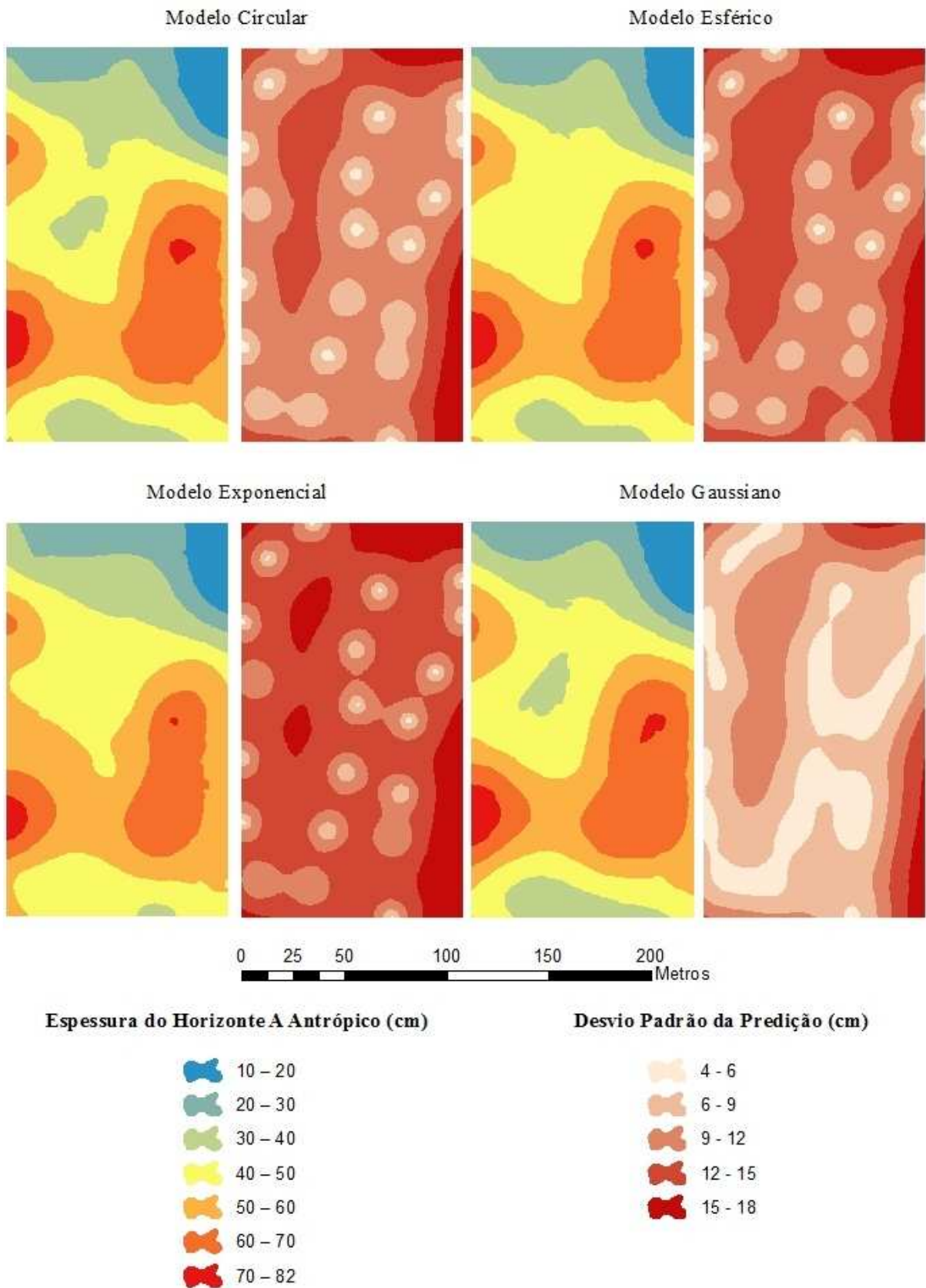
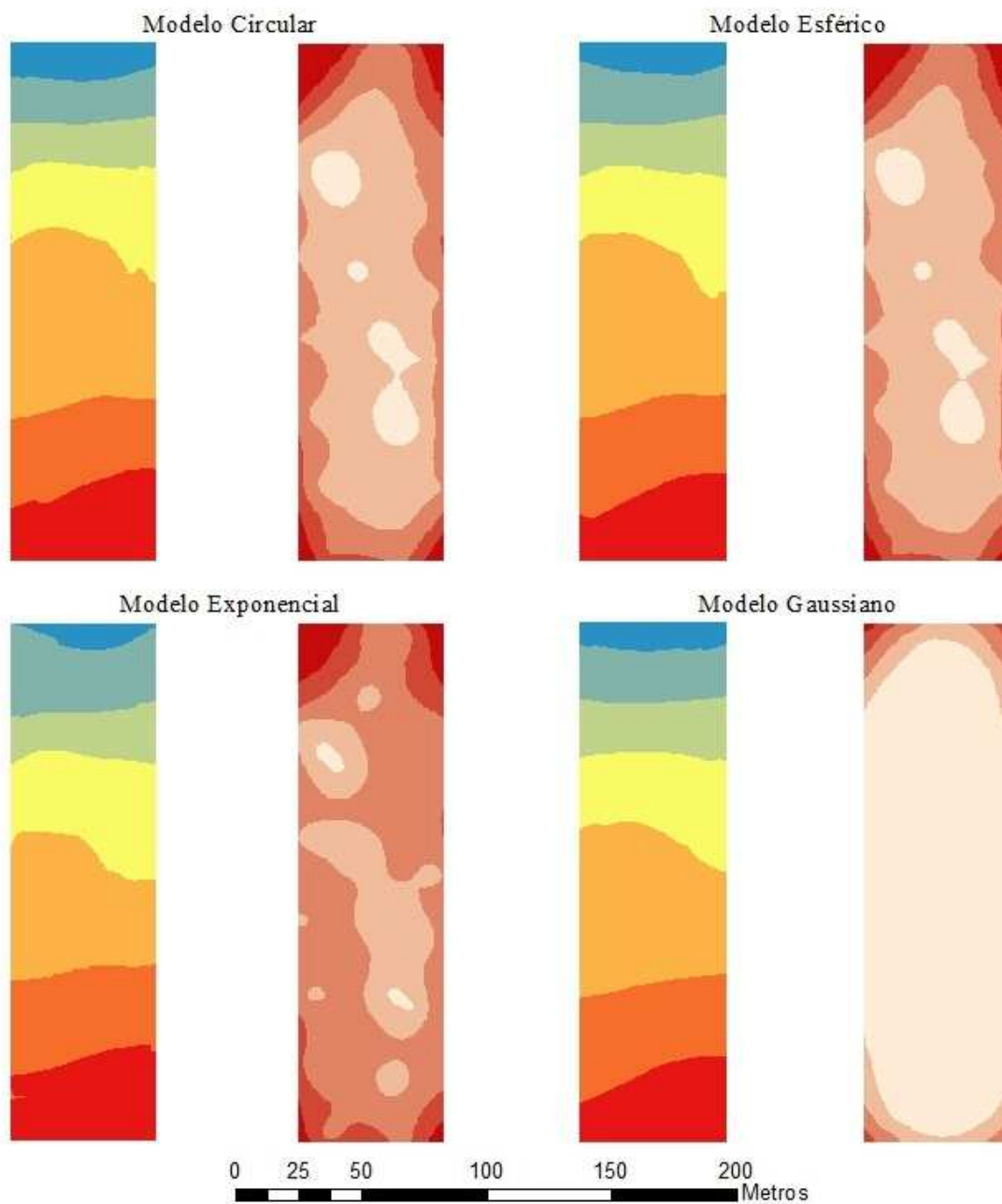
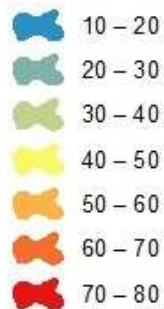


FIGURA 4. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 2.



Espessura do Horizonte A Antrópico (cm)



Desvio Padrão da Predição (cm)

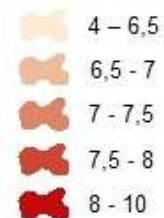


FIGURA 5. Mapas de predição e desvio padrão da predição, Sítio 3.

CONCLUSÕES

O modelo teórico exponencial é o que produz melhores superfícies de predição e desvio padrão da predição, e, portanto é o mais indicado para interpolação por *Krigagem* ordinária na escala de estudo proposta, em solos com horizontes A antrópicos.

A interferência antrópica na produção dos solos gera padrões complexos e sobrepostos, resultando em descontinuidades na espessura do horizonte A antrópico. Como consequência as superfícies de predição são ligeiramente suavizadas.

REFERÊNCIAS

BOURENNANE, H.; KING, D.; COUTURIER, A. Comparison of kriging with external drift and simple linear regression for predicting soil horizon thickness with different sample densities. **Geoderma** 97 (2000) 255-271.

CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data**. New York: John Wiley, 1993.

ESRI. ArcGIS 9: **Using ArcGIS Geostatistical Analyst**. California, USA, 2003.

FALCÃO, N.P.S.; MOREIRA, A.; COMENFORD, N.B. 2010. A fertilidade dos solos de terra preta de índio da Amazônia Central. In: Teixeira, W.G. (org.). **As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia. **Geochimica et Cosmochimica Acta** 82 (2012) 39–51.

GOMES, N.M. Métodos de Ajuste de Modelos de Semivariograma Aplicados ao Estudo da Variabilidade Espacial de Atributos Físico-Hídricos do Solo. Universidade Federal de Lavras - **Dissertação (Mestrado)** – Lavras, MG, 2007.

IBGE. 2001. **Mapa de solos do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 2001. 1 mapa, color. Escala 1:5.0.0. Disponível em: <<http://w.ibge.gov.br>>. Acesso em: 18 mai. 2012.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to Applied Geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.

JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics**. London: Academic Press, 1978. 600p.

KACHANOSKI, R.G.; ROLSTON, D.E; JONGE, E. Spatial variability of a cultivated soil as affected by past and present microtopography. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 49(5) 1082=1087, 1985.

KÄMPF, N.; WOODS, W.I.; KERN, D.C.; CUNHA, T.J. 2010. Classificação de Terras Pretas de Índio e Outros Solos Antrópicos Antigos. In: Teixeira, W.G. (org.). **As terras Pretas de Índio da Amazônia: Sua Caracterização e Uso deste Conhecimento na Criação de Novas Áreas**. 1ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA.

KERN D.C.; D'AQUINO, G.; RODRIQUES, T.E.; FRANZÃO, F.J.L.; SOMBROEK, W.; MYERS T.P.; NEVES, E.G. 2003. Distribution of Amazonian Dark Earths in the Brazilian Amazon. In: LEHMAN et al. (eds), **Amazonian Dark Earths: Origin, properties, management**. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands: 51-75

KNOTTERS, M.; BRUS, D.J.; OUDE VOSHAAR, J.H. A comparison of kriging, co-kriging and kriging combinend with regression for spatial interpolation of horizon depth with censored observations. **Geoderma** 67 (1995) 227-246.

KRIGE, D.G.A. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the witwatersrand. **Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy**, Johannesburg, v. 52, p.119-139, 1951.

MATHERON, G. Principles of geoestatistics. **Economic Geology**, v. 58, p.1246-1266, 1963.

PIRES, C.A.F. **Geoestatística Aplicada**. Instituto de Geociências – Universidade Federal do Pará, Belém, 2010. 154p.

REIS, C.P. Simulação de fatores que afetam as predições obtidas por Krigagem Ordinária. Universidade Federal de Viçosa - **Dissertação (Mestrado)**, Viçosa, MG, 2013.

SOMBROEK, W.G. 1966. **Amazon Soils: A Reconnaissance of The Soils of the Brazilian Amazon Valley**. Pudoc, Wageningen. 292p.

VANWALLEGHEM, T.; POESEN, J.; MCBRATNEY, A.; DECKERS, J. Spatial variability of soil horizon depth in natural loess-derived soils. **Geoderma** 157 (2010) 37-45.

VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada à agricultura de precisão. In: **Sistema de Informações Geográficas**. Curitiba, PR: [s.n.], 1998. p.-1-48.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIN, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo : Oficina de Textos, 214p.2013.