

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS EM UM GLEISSOLO MELÂNICO SOB TRÊS
ÁREAS NO MUNICÍPIO ARARI - MA**

Marcelino Silva Farias Filho

Geógrafo - Historiador

2014

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E
QUÍMICOS EM UM GLEISSOLO MELÂNICO SOB TRÊS
ÁREAS NO MUNICÍPIO ARARI - MA**

Marcelino Silva Farias Filho

Orientadora: Profa. Dra. Célia Regina Paes Bueno

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Ciência do Solo).

2014

Farias Filho, Marcelino Silva

F224v Variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos em um Gleissolo Melânico sob três áreas no Município Arari - MA. – Jaboticabal, 2014.

xiv, 98 p.; 18 mm

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014.

Orientadora: Célia Regina Paes Bueno

Banca Examinadora: João Tavares Filho, Gener Tadeu Pereira, José Eduardo Corá, Adeodato Ari Calvacante Salviano.

Bibliografia

1. Cultivo de arroz. 2. Compactação do Solo. 4. Variabilidade Espacial. 5. Geoestatística. 5. Solos hidromórficos. I. Título. II. Jaboticabal - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.412 (633.18)

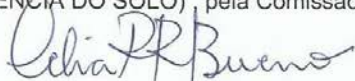
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS
EM UM GLEISSOLO MELÂNICO SOB TRÊS ÁREAS NO MUNICÍPIO
ARARI-MA

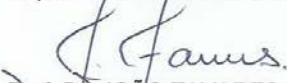
AUTOR: MARCELINO SILVA FARIAS FILHO

ORIENTADORA: Profa. Dra. CELIA REGINA PAES BUENO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de DOUTOR EM AGRONOMIA
(CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:



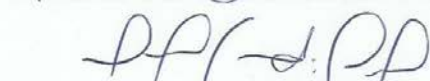
Profa. Dra. CELIA REGINA PAES BUENO
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



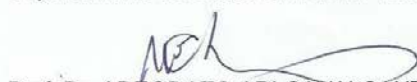
Prof. Dr. JOÃO TAVARES FILHO
Universidade Estadual de Londrina / Londrina/PR



Prof. Dr. GENER TADEU PEREIRA
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO CORA
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



Prof. Dr. ADEODATO ARI CAVALCANTE SALVIANO
Universidade Federal do Piauí / Teresina/PI

Data da realização: 09 de maio de 2014.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Marcelino Silva Farias Filho nasceu em Barras – PI, em 02/10/1980. Filho de Mariana Fortes de Carvalho Farias e Marcelino Silva Farias, iniciou sua vida escolar na cidade de Porto – PI. No ano de 1996, já no Estado do Maranhão, concluiu o Ensino Fundamental na Unidade Integrada “Menino Jesus de Praga” e em 1997, o Curso Profissionalizante em Mecânica de Manutenção de Máquinas Operatrizes pelo Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial - SENAI. No ano de 1999, concluiu o Ensino Médio Profissionalizante (habilitação – Eletrotécnica) na Escola Técnica Estadual do Maranhão (ETEMA) “Dr. João Bacelar Portela”. No mesmo ano, foi estagiário da ComPanhia Vale do rio Doce (atual Vale) no setor metalúrgico. No ano 2000, ingressou nas universidades Estadual do Maranhão - UEMA (Curso de Geografia) e Federal do Maranhão - UFMA (Curso de História), concluindo os dois cursos de graduação em 2004 e 2005, respectivamente. No ano 2004, deu início ao seu Curso de Mestrado em Agroecologia pelo Programa de Pós-Graduação em Agroecologia, concluindo-o em 2006. Ainda em 2004, iniciou suas atividades docentes em Ensino Superior pela Universidade Estadual do Maranhão, ministrando a disciplina Pedologia para alunos de Geografia do Programa de Formação Docente – PQD que se prolongaram até o ano de 2007. Entre 2000 e 2007, foi funcionário da Prefeitura Municipal de São Luís pelo IPLAM (Instituto de Pesquisa e Planejamento do Município), atuando em ações de pesquisa e planejamento do espaço urbano de São Luís – MA, inclusive na reformulação do Plano Diretor Municipal. Em 2007, passou a integrar o quadro de funcionários do Governo do Estado do Maranhão pela Secretaria de Estado do Turismo, atuando como diretor de projetos do Programa de Desenvolvimento do Nordeste (PRODETUR – MA). Em 2008, foi aprovado em Concurso Público para integrar o quadro docente da UFMA, tomando posse em 2009. A partir do referido ano, desenvolve atividades de ensino, pesquisa e extensão em cursos de graduação e pós-graduação *lato sensu*, ministrando disciplinas como Cartografia, Pedologia e Sensoriamento Remoto, coordenando o Grupo de Estudos e Pesquisa em Edafologia e Pedologia – GEPEPE e executando projetos financiados pelo CNPq e FAPEMA. Atualmente é aluno de doutorado pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) da Universidade Estadual Paulista (DINTER UNESP/UFMA/IFMA), curso que teve início em 2011.

A Pedra

"O distraído nela tropeçou
O bruto a usou como projétil
O empreendedor, usando-a, construiu
O camponês, cansado da lida, dela fez assento
Para meninos, foi brinquedo
Drummond a poetizou
Davi matou Golias
Por fim, o artista concebeu a mais bela escultura.
Em todos os casos, a diferença não era a pedra, mas o homem.
Não existe 'pedra' no seu caminho que você não possa aproveitá-la para
o seu próprio crescimento".

Antônio Pereira Dias Neto.

Aos meus pais (Mariana Fortes e Marcelino Farias) e aos meus irmãos Fortes
(Raimunda, Maria José, Luciana, Francisca e Francisco)

OFEREÇO

Aos meus filhos (João Artur L. Farias e Ana Clara L. Farias) e sobrinhos Fortes
(Lucas, Marcelo, Davi, Gabriel, Artur, Lucyla, Luís Felipe, Otávio e Marcelino)

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, oportunidades e pessoas nela presentes;

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Câmpus de Jaboticabal e à Universidade Federal do Maranhão por oportunizarem a realização do Doutorado;

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos e ao povo brasileiro, pelo financiamento da minha formação acadêmica;

À minha orientadora, Profa. Dra Célia Regina Paes Bueno, por aceitar o desafio de me orientar e pelas contribuições na elaboração desta tese;

Aos professores do doutorado em Agronomia (Ciência do Solo) da UNESP Jaboticabal: Afonso Lopes, Arthur Bernardes, Gener Tadeu Pereira, Itamar Andrioli, José Marques Júnior, José Renato Zanini e Marcílio Martins Filho pelos ensinamentos e contribuições à minha formação quando da oferta de disciplinas;

Aos alunos do DINTER UNESP/UFMA/IFMA: Carlos Magno Veras, José Roberto Brito, Jussara Dantas, Paulo Sérgio, José Maria Rezende, Rogério Abreu, James Azevedo, FreDsardson Martins, Edison Fernandes, Izumy Pinheiro, Jeane Rodrigues, Ana Zélia Silva, Cristiane Oliveira, Sandra Cruz, Alexsandra Nascimento e Ariston Pinto pela amizade, convívio e construção de novos saberes durante o curso;

Aos professores Adeodato Ari Calvalcanti Salviano, João Tavares Filho, José Eduardo Corá e Genner Tadeu Pereira, membros da banca de defesa, pelas correções e sugestões à versão final desta tese.

Aos professores Maurício Rizzato Coelho, Marlen Barros e Itamar Andrioli pelas contribuições na classificação do solo.

Aos alunos do Piauí, Carlota Joaquina, Cristiane, Galvão e Laurielson Alencar; que foram incorporados ao grupo do Maranhão, em Jaboticabal, e passaram a compartilhar ansiedades, angústias e alegrias;

Ao Gabriel Damasceno, Saulo Cardoso, Renato Heleotério (alunos do Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UNESP) e José Gomes (ex-funcionário do Departamento de Solos e Adubos da UNESP) pelas contribuições nas práticas laboratoriais, pelo convívio e amizade;

Aos membros do GEPEPE, nas pessoas dos alunos Jamiellisson Cunha, Zélia Nunes e Carlos César Chagas, pela amizade e força de trabalho dedicados nas atividades de coleta no campo;

Ao Ulisses Denache pelas contribuições no conhecimento cartográfico e pela amizade;

Ao Sr. Gilberto de Pelegrini, proprietário da área em que a presente pesquisa foi desenvolvida, pela autorização, confiança e apoio material e logístico;

Ao Eduardo Soares, pela presteza e contribuições nas atividades de pesquisa em campo no município de Arari;

À Marianne Gomes, pelas contribuições na tradução dos resumos e companheirismo ao longo do doutorado;

Aos meus pais, filhos, irmãos e amigos, pelo incentivo e compreensão pela ausência nos momentos em que tive que me ausentar em função das atividades do doutorado.

À Tatiana Maia, pelas contribuições e correções dadas na elaboração deste trabalho e pela amizade;

A todos que aqui não foram mencionados, mas que de algum modo contribuíram para a conclusão deste curso e conquista de mais uma grande vitória.

RESUMO

Os atributos químicos e físicos dos solos possuem variabilidade espacial natural que pode ser alterada pelo manejo. O entendimento do padrão da distribuição espacial desses atributos é questão-chave a ser considerada para o correto uso dos solos. Este trabalho avaliou a variabilidade dos atributos físicos e químicos em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no município de Arari - MA. Para realização da pesquisa foram selecionadas três áreas de um hectare em formato regular, com solo utilizado por arroz irrigado e pecuária (área A), pecuária extensiva em vegetação nativa (área B) e arroz irrigado (área C), onde foram coletadas amostras de solo (deformadas e indeformadas) na camada de 0,0-0,20 m, com malha regular de 10 x 10 m, perfazendo 121 amostras por área e um total de 363. As variáveis analisadas por estatística descritiva e geoestatística nas três áreas foram: resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade (total, macro e microporosidade), areia, silte, argila, pH (CaCl₂), C orgânico, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², P disponível, S, Na⁺, Al³⁺, H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases), T (capacidade de troca catiônica), V% (saturação por bases) e m% (saturação por alumínio). Os valores foram elevados para a variável resistência do solo à penetração nas três áreas, sendo a área A aquela que teve o maior valor médio. Os atributos físicos apresentaram dependência espacial em todas as áreas, com exceção da areia na área A. A porosidade total teve maior dependência espacial e menor variabilidade. Os atributos químicos que apresentaram maior dependência espacial foram o pH e Na. A área B apresentou maior variabilidade química e as áreas A e C, aquelas cujos atributos químicos apresentaram menor variabilidade espacial.

PALAVRAS-CHAVE: Cultivo de arroz; Compactação do solo; Variabilidade espacial; Geoestatística; Solos hidromórficos.

ABSTRACT

The chemical and physical attributes of soils have natural spatial variability that can be changed by management. Understanding the spatial distribution pattern of these attributes is the key issue to be considered for correct soil use. This study evaluated the variability of the physical and chemical properties of an Gleysoil Melanic Alitic typical in three areas in the municipality of Arari - MA. To achievement the survey were selected three areas of one hectare in regular format, with soil used for irrigated rice and livestock (area A), extensive cattle ranching in native vegetation (area B) and irrigated rice (area C), where samples were collected of soil (warped and undeformed) in the 0.0-0.20 m layer, with regular grid of 10 x 10 m, totaling 121 samples per area and a total of 363. The variables analyzed by descriptive statistics and geostatistics in the three areas were: resistance to penetration, density, porosity (total, macro and microporosity), sand, silt, clay, pH (CaCl₂), organic C, K⁺, Ca^{+ 2}, Mg⁺², available P, S, Na⁺, Al³⁺, H+Al (potential acidity), SB (sum of bases), T (cation exchange capacity), V% (base saturation) m% (saturation aluminum). The values were higher for the resistance variable to penetration in the three areas, being the area A one that had the highest average value. The physical attributes present dependence spatial in all areas, with the exception of the sand in the area A. Total porosity had higher spatial dependence and less variability. The chemical attributes that showed greater dependence spatial were pH and Na. The area B showed greater chemical variability and the areas A and C, those whose chemical properties showed less spatial variability.

KEYWORDS: Cultivation of rice; Soil compaction; Spatial variability; geostatistics; Hydromorphic soil.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2 – Variabilidade espacial dos atributos físicos e carbono orgânico em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no Município de Arari.....	22
Figura 01: Perfil de um Gleissolo Melânico Alítico típico, textura muito argilosa, analisado na área de coleta de amostras.	27
Figura 02: Áreas selecionadas para a coleta de amostras em Arari – MA.....	29
Figura 03: Preparo do solo para cultivo de arroz irrigado por inundação (à esquerda) com grade niveladora (à direita)	30
Tabela 01: Estatística descritiva, Intervalo de Confiança e correlação de Spearman para os atributos físicos e carbono orgânico em áreas com diferentes usos em Arari – MA, na profundidade 0,0-0,2 m	35
Tabela 02: Modelos e parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos físicos dos solos estudados e da RP (profundidade 0-0,20 m).....	39
Figura 04: Distribuição espacial dos teores de argila e silte nas áreas A, B e C....	42
Figura 05: Distribuição espacial da resistência do solo à penetração (RP) nas áreas A, B e C.....	44
Figura 06: Distribuição espacial da porosidade total, macro e microporosidade nas áreas A, B e C.....	46
CAPÍTULO 3 – Variabilidade espacial dos atributos químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no Município de Arari - MA.....	53
INTRODUÇÃO	54
Figura 01: Localização das áreas de estudo, no município de Arari.	57
Tabela 01: Estatística descritiva e teste de média para os atributos de um Gleissolo Melânico Alítico típico (profundidade 0-0,20 m) sob três áreas em Arari, MA.....	62
Tabela 02: Modelos e parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos físicos do solo analisado nas áreas A, B e C (profundidade 0-0,20 m)	65
Figura 02: Distribuição espacial de teores de enxofre (S) e sódio (Na) nas áreas A, B e C.	67
Figura 03: Distribuição espacial de teores de cálcio (Ca) nas áreas A e C.....	69
Figura 04: Distribuição de valores do potencial hidrogeniônico (pH), nas áreas A e C.	71

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1 Introdução	1
2 Revisão de literatura.....	3
2.1 Variabilidade espacial dos atributos dos solos e a sua importância no manejo da cobertura pedológica.....	3
2.1.1 Efeitos do manejo na variabilidade dos atributos físicoquímicos dos solos.....	4
2.2 A Geoestatística e a análise da variabilidade espacial dos atributos dos solos e dos fenômenos associados ao seu manejo.....	5
2.3 Solos hidromórficos: características, usos e mudanças promovidas pelo manejo.....	8
2.3.1 Características dos solos hidromórficos no Brasil	8
2.3.2 Usos dos solos hidromórficos e mudanças provocadas pelo manejo	9
2.3.3 Alterações promovidas pela agropecuária	10
2.3.4 Índices de compactação e prejuízos à cultura.....	13
2.4 O uso dos solos hidromórficos pela rizicultura e a pecuária no município de Arari, Estado do Maranhão	14
REFERÊNCIAS.....	16
CAPÍTULO 02 – Variabilidade espacial dos atributos físicos e carbono orgânico em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no município de Arari - MA	22
RESUMO.....	22
INTRODUÇÃO	23
MATERIAL E MÉTODOS	26
Área de estudo	26
Coleta de amostras	28
Análises de solos	31
Análises estatísticas.....	32
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
CONCLUSÕES	47
REFERÊNCIAS.....	47
CAPÍTULO 03 – Variabilidade espacial dos atributos químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no Município de Arari - MA.....	53
INTRODUÇÃO	54
MATERIAL E MÉTODOS	57

RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
CONCLUSÕES	72
REFERÊNCIAS.....	72

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1 Introdução

A pecuária e a agricultura são atividades que fazem parte da civilização desde tempos remotos, sendo fundamentais à sobrevivência do homem e à manutenção da economia mundial. Paralelamente ao aumento da produção e intensificação do uso dos solos nos dois últimos séculos, cresceram também os problemas ambientais resultantes das práticas agropecuárias, destacadamente a erosão acelerada e compactação dos solos que resultam em perdas severas e irreparáveis à natureza e humanidade.

A criação de bovinos e cultivo de arroz são atividades bastante antigas e cresceram associadas inicialmente aos solos úmidos e relativamente mais férteis das planícies fluviais em diferentes partes do mundo. Em decorrência disso, as camadas superficiais dos solos hidromórficos, como os Gleissolos, utilizadas em condição de saturação hídrica são deformadas, causando compactação que resulta inicialmente em perdas de produtividade das culturas.

O manejo da terra e a produtividade das culturas têm relação direta com os atributos dos solos que são variáveis no tempo e no espaço, pois são resultantes das interações entre os diversos fatores ambientais que agem no sistema atmosfera-crosta terrestre, junto à superfície. Tal relação é estreita, porque estes atributos controlam os fenômenos físicoquímicos associados à nutrição de plantas e animais, mas estes (os atributos) e sua variabilidade espacial tem seu conhecimento restrito a algumas regiões no mundo. Desse modo, é importante que se conheça sobre a gênese e os atributos físicos e químicos dos solos, para que se determinem os seus corretos manejos e se conheça sua capacidade de uso em relação a determinadas atividades.

Mesmo havendo variabilidade espacial nos atributos dos solos, em algumas regiões estes ainda são utilizados como se não houvessem variações, fato que tem incrementado problemas ambientais e perdas econômicas. Porém, muitos trabalhos científicos já foram e estão sendo desenvolvidos e algumas técnicas como a geoestatística (técnica ou ramo da estatística que une o conceito de variáveis aleatórias ao conceito de variáveis regionalizadas) estão sendo utilizadas com êxito na análise da variabilidade dos atributos dos solos.

É válido ressaltar que em realidades como a do Estado do Maranhão poucos e elementares, salvo algumas exceções, são os trabalhos desenvolvidos na área de Ciência do Solo que se propuseram a caracterizarem e a analisarem a gênese, os atributos e a sua variabilidade, o que tem resultado em manejo inadequado e em danos ambientais em diversas áreas.

Em Arari, município do Maranhão, a rizicultura e pecuária tem se expandido fortemente nos últimos anos. Porém, apesar de ser uma das realidades do Estado em que mais se tem trabalhos científicos de natureza agrônômica, são raros aqueles que têm relação com a Ciência do Solo e os existentes demonstram fragilidades que resultam em erros inclusive no correto enquadramento dos solos analisados no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Assim, mesmo ostentando o maior índice na produtividade rizícola do Maranhão e uma pecuária pujante, pouco se conhece sobre os atributos dos solos e sua variabilidade e problemas ocasionados pelo uso da cobertura pedológica para indicação do seu correto manejo na referida realidade.

Frente à lacuna acima mencionada, esta pesquisa teve por objetivo analisar a variabilidade espacial dos atributos físicos e químicos em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas em propriedade rural, situada na porção oeste do município de Arari, nas planícies do rio Mearim.

2 Revisão de literatura

2.1 Variabilidade espacial dos atributos dos solos e a sua importância no manejo da terra

Os atributos dos solos mantêm relação direta com as condições ambientais, apresentando, portanto, uma grande variabilidade espacial (DALMOLIN; CATEN, 2012). Dessa forma, teores naturais de nutrientes do solo e seus atributos físicos são influenciados por processos e mecanismos pedogenéticos que são controlados pelo clima, material de origem, topografia, tempo e organismos. Essa variabilidade é tanto maior quanto maior for a área em análise, sendo um pré-requisito para a projeção do manejo adequado, formas de uso da terra e as medidas de conservação (TESFAHUNEGBN et al., 2011).

A variabilidade espacial dos solos é afetada não apenas por fatores ditos “naturais”, mas também por atividades antropogênicas. Assim, o uso da terra desempenha um papel dinâmico na regulação dos padrões espaciais dos atributos dos solos, já que o referido uso pode mudar com mais frequência (LIU et al., 2013a).

As atividades humanas influenciam profundamente na variação dos teores de nutrientes, seja pela adição ou perdas de constituintes dos solos. Na agropecuária, as perdas de nutrientes geralmente ocorrem nos primeiros anos devido à conversão de floresta ou de pastagem, para terras agrícolas (LIU et al., 2013a). Por outro lado, a incorporação de pastagens degradadas e de solos ácidos à produção agrícola pode representar a melhoria da sua qualidade química. O manejo do solo também pode alterar profundamente os atributos físicos dos solos, normalmente provocando compactação e erosão (REICHERT et al., 2007).

Pouco se sabe sobre a distribuição espacial e variabilidade das características do solo em muitas regiões do mundo (em especial nas tropicais) em escala de detalhe. No entanto, caracterizar a variabilidade espacial e distribuição das referidas características é essencial para prever as modificações decorrentes do manejo e de processos naturais (TESFAHUNEGBN et al., 2011) e adequar as formas de uso à qualidade do solo.

Gubiane et al. (2012) afirmam que, em escala de campo, é grande o desafio de quantificar o efeito dos fatores físicos do solo em mecanismos que alteram processos biológicos fundamentais como fotossíntese, respiração e nutrição, visto

que há participação de outros efeitos como pragas, doenças, plantas invasoras, nutrientes, carbono e oxigênio atmosféricos, energia fotoquímica e térmica da radiação solar. Tal dificuldade também se aplica ao entendimento dos atributos químicos e suas interações em diversos processos que ocorrem no solo, inclusive o da nutrição de plantas.

Devido à heterogeneidade e dinâmica do compartimento solo, a sua qualidade não pode ser mensurada diretamente, podendo ser estimada a partir de indicadores arbitrados pelo homem (ARAÚJO et al., 2012), no caso os atributos físicos, químicos e biológicos. Desse modo, alterações nos atributos dos solos resultam necessariamente na melhoria ou em prejuízos à sua qualidade.

2.1.1 Efeitos do manejo na variabilidade dos atributos físicos e químicos dos solos

As atividades humanas alteram de forma significativa os atributos dos solos, em geral aqueles que naturalmente são mais instáveis. Porém, há consenso entre autores em diversas partes do mundo que os atributos químicos, biológicos e alguns atributos físicos (especialmente porosidade total, macroporosidade e densidade) podem ser modificados pelo homem (ARAÚJO et al., 2012).

Dias e Thomaz (2011) afirmam que, dentro de uma mesma pastagem, os efeitos do pisoteio do gado resultam em resistência do solo à penetração diferenciada em zonas distintas do solo (onde há pisoteio há maior compactação em relação às áreas não pisoteadas), criando diferentes ambientes (heterogeneidade), visão compartilhada por Hiltburnner et al. (2012).

Quanto à agricultura, autores como Oliveira et al. (2013) afirmam que em áreas sob cultivo existem, além da variabilidade natural, fontes de heterogeneidade que são adicionadas ao solo como aquelas oriundas do manejo. Em relação aos atributos químicos, essas variações interferem principalmente no acúmulo de material orgânico (OLIVEIRA et al., 2013), na modificação do pH e nos teores de macro e micronutrientes. Cavalcante et al. (2007), informam que mesmo quando há incorporação de adubos e corretivos na camada superficial do solo haverá apenas uma homogeneização parcial, visto que irregularidades na topografia, movimentação da água e a própria distribuição irregular e movimentação dos fertilizantes irão manter certo nível de variabilidade espacial.

Nesse mesmo sentido, Reichert et al. (2007) afirmam que variabilidade espacial da compactação ocorre em todos os sistemas de manejo agrícola, pecuária ou silvicultura, pois é difícil um controle rigoroso do tráfego de máquinas e animais nas áreas, concentrando o fenômeno em apenas alguns locais.

2.2 A Geoestatística e a análise da variabilidade espacial dos atributos dos solos e dos fenômenos associados ao seu manejo

Os atributos do solo geralmente apresentam um alto grau de variabilidade espacial devido a uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos que operam em diferentes escalas, sendo a quantificação e interpretação de tal variabilidade espacial questão-chave para o manejo do solo (MILLÁN et al., 2012). Mesmo assim, há atributos cuja variabilidade espacial é pequena como é o caso do pH.

Na última década, as estatísticas tradicionais, em combinação com a geoestatística, têm sido amplamente utilizadas para avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo e suas relações com fatores ambientais, especialmente aqueles associados com o uso da terra (LIU et al., 2013a).

Para Hiltbrunner et al. (2012), a quantificação da variabilidade de alguns atributos e fenômenos que ocorrem no solo, como a compactação, requer um número de amostra muito grande, muitas vezes julgado impraticável, sendo necessário a utilização de técnicas que reduzam as amostragens. Dessa forma, a geoestatística, que busca resolver problemas de estimativa de uma variável regionalizada (MATHERON, 1971), se apresenta como uma técnica bastante útil.

Yamamoto e Landim (2013) definem a geoestatística como a técnica que tem o objetivo de caracterizar espacialmente uma variável por meio de sua distribuição e variabilidade espaciais, com a determinação das incertezas associadas.

A geoestatística, cujos pressupostos básicos tiveram origem nos trabalhos de Wisj (1951) e Krige (1951), teve seu desenvolvimento atrelado aos trabalhos de Matheron a partir do ano de 1962 (YAMAMOTO; LANDIM, 2013) mediante a formulação da *teoria das variáveis regionalizadas*. Desde então, tem demonstrado ser uma ferramenta valiosa na ciência (LARK, 2012), sendo amplamente aplicada para analisar, modelar e mapear a variação espacial de atributos do solo (LIU et al., 2013a).

Para Millán et al. (2012), a geoestatística tem sido o principal instrumento metodológico para a implementação da agricultura de precisão usando dados de campo coletados em diferentes resoluções espaciais, que normalmente demandam um número grande de amostras.

A difusão do uso da referida técnica se deve ao fato de que, embora amostragem direta forneça a melhor informação acerca dos atributos do solo, a densidade de amostras é raramente adequada para descrever a variação horizontal e vertical das referidas atributos (BENEDETTO et al., 2012), necessitando que valores dos atributos em pontos não amostrados sejam estimados.

O foco principal da análise de dados geoestatística é compreender e descrever os padrões espaciais das variáveis. Um parâmetro chave que distingue estimativa geoestatística de outros tipos de estimação, tais como a distância de interpolação inversa, é um modelo de correlação ajustado ao semivariograma que controla os pesos atribuídos aos dados nas proximidades. O recurso de simulação geoestatística que o diferencia de outros métodos para a construção de modelos de uso da terra é que ele visa explicitamente retratar corretamente a variação espacial (SRIVASTAVA, 2013). Essa correlação pode ser isotrópica - quando a função variograma não varia com a direção e anisotrópicas - quando a função variograma muda com a direção (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Para determinação do modelo de correlação espacial da variável regionalizada, faz-se o cálculo experimental dessa correlação (semivariograma), utilizando-se os dados dos pontos amostrados e ajustando-se posteriormente um modelo teórico. Isso se dá, porque não se pode definir inicialmente a covariância ou a variância para variáveis regionalizadas que tem a possibilidade infinita de dispersão. Os modelos teóricos para ajuste do semivariograma podem ser: esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, pentaesférico e puro (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

O cálculo de um semivariograma requer pelo menos várias dezenas de dados coletados em pontos com localização conhecida, os quais, quando combinados uns com os outros, criam várias centenas de pares de dados com diferentes espaçamentos. Com menos de várias dezenas de dados em pontos georreferenciados, o número de pares em cada intervalo pode tornar-se tão pequeno que o variograma não tem uma estrutura interpretável e consistente, não havendo ajuste satisfatório de modelos matemáticos (SRIVASTAVA, 2013), ou seja, o extremo da aleatoriedade chamado efeito pepita puro – EPP (YAMAMOTO;

LANDIM, 2013). A esse respeito, Soares (2006) afirma que quanto menor for a distância entre pontos amostrados, maior será a dependência entre os pontos.

O semivariograma é, essencialmente, uma versão invertida de uma função de autocorrelação, ou seja, o seu gráfico é uma representação gráfica da diferença média de quadrados entre pares de valores de dados (SRIVASTAVA, 2013). É assim chamado, porque, na prática, corresponde à metade da diferença da variância de pares de pontos separados por uma distância h (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

A partir da estimativa do semivariograma experimental faz-se o ajuste do melhor modelo teórico que deve levar em consideração a menor soma residual dos quadrados (SQR) e o maior coeficiente de determinação (R^2); patamar ($C + C_0$), em que C é a variância espacial e C_0 , o efeito pepita; o alcance (a) – que representa a distância máxima em que as variáveis mostram dependência espacial; e grau de dependência espacial - GDE, dado por $C_0/(C_0+C)$, que podem identificar a estrutura espacial das variáveis em uma escala dada (Liu et al., 2013a).

Uma vez estimados os parâmetros acima mencionados, a adoção do melhor modelo passa por um processo de validação. O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis, segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), é calculado por $C_0/(C_0+C)$ e apresentado em percentual. Na referida classificação, valores inferiores a 25 % indicam dependência espacial forte, entre 25 e 75 %, dependência moderada e maiores que 75 %, dependência espacial fraca.

As estimativas geoestatísticas só podem ser feitas após cálculo do semivariograma e ajuste do modelo. O estimador geoestatístico que tem sido mais comumente utilizado é o da krigagem, que estima os valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou no tempo (modelagem) com base nos valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica (dependência de distância, efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia). A difusão do uso do referido processo se justifica porque ele possui um mecanismo de atenuação que considera pontos distantes (fora do alcance) como vizinhos (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Antes de fazer uso da krigagem para elaboração dos mapas de distribuição espacial da variável analisada, é necessário que se faça a validação do modelo e do procedimento geoestatístico adotados. Isso é possível por meio de validação cruzada, em que se tem como parâmetro decisório o coeficiente de correlação entre

os valores observados e estimados obtidos pela Validação Cruzada (LEENAERS et al., 1990), que deve ser igual a 1.

2.3 Solos hidromórficos: características, usos e mudanças promovidas pelo manejo

Os solos hidromórficos ocorrem em diferentes regiões do mundo e o seu uso tem sido intenso na Ásia, especialmente na China, em função do cultivo do arroz. Entretanto, em planícies e vales fluviais, tanto de regiões de clima úmido como semiárido, esses solos tem passado por uma intensificação dos seus usos, seja pela pecuária seja pela agricultura (especialmente com a orizicultura). No Brasil, a cultura do arroz irrigado e as pastagens podem ser apontadas como as principais atividades desenvolvidas sobre os referidos solos. Dessa forma, várias alterações tem se estabelecido nessas regiões em função das características e manejo dos solos.

É válido lembrar que, diferentes solos respondem diferentemente as forças que podem ocasionar deformações, assim como as culturas respondem de forma diferenciada aos níveis de compactação dos solos, havendo a necessidade de que este fenômeno seja estudado em diferentes condições ambientais e de manejo (REICHERT et al., 2007).

2.3.1 Características dos solos hidromórficos no Brasil

O termo *hidromórfico* é utilizado no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos – SiBCS, para diferenciação dos solos no 2°. e 3°. níveis categóricos, assumindo duas conotações. Para o 2°. nível, o termo indica que o solo tem restrição à drenagem, apresentando horizonte glei. Já para 3°. nível indica que os solos possuem lençol freático elevado durante a maior parte do ano e na maioria dos anos (SANTOS et al., 2013).

O hidromorfismo caracteriza os Gleissolos em todas as suas variações; uma subordem dos Vertissolos; todos os Espodossolos em seu 3°. Nível categórico e; os Neossolos Quartzarênicos no mesmo nível dos Espodossolos (SANTOS et al., 2013). O excesso hídrico também se relaciona à formação dos Organossolos e se faz presente na gênese dos Neossolos Flúvicos.

A classe mais representativa dos solos hidromórficos no Brasil é a dos Gleissolos, ocorrendo próximo às calhas da vasta rede hidrográfica do País e em grande parte das extensas planícies fluviais do Pantanal Matogrossense, da Baixada Maranhense e das várzeas amazônicas. Segundo Santos et al. (2013), encontram-se permanente ou periodicamente saturados por água, salvo se artificialmente drenados, caracterizando-se pela forte gleização, em decorrência do ambiente redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido, em razão da saturação por água durante todo o ano, ou pelo menos por um longo período, associado à demanda de oxigênio pela atividade biológica.

2.3.2 Usos dos solos hidromórficos e mudanças provocadas pelo manejo

Na história de colonização do Brasil e do Nordeste, em especial, os solos hidromórficos foram e ainda continuam sendo utilizados pela agricultura e pecuária. Para Dalmolin & Caten (2012), em função de ocorrerem junto às margens dos rios, lagos, planícies úmidas e costa, estes solos foram aqueles inicialmente utilizados para desenvolvimento da agropecuária.

Os solos hidromórficos vêm sendo utilizados a partir de atividades como a pecuária extensiva e a rizicultura intensiva (ou a combinação delas) que provocam alterações em seus atributos físicos e químicos. O uso desses solos para produção rizícola resulta da sua principal característica (drenagem natural deficiente) que é resultante do relevo predominantemente plano, frequentemente associado à uma camada subsuperficial impermeável que dificulta sua utilização com agricultura diversificada e favorece o desenvolvimento da cultura do arroz irrigado por alagamento, graças à adaptação da cultura a essas condições ambientais (SILVA; RANNO, 2005).

Na Ásia, a intensificação dos sistemas de produção rizícola ajudou a garantir a produção suficiente às demandas alimentares nos últimos 40 anos. Porém, o uso contínuo dos solos por essa cultura tem levado ao declínio na produtividade e levantou preocupações sobre a sustentabilidade produtiva em função do surgimento de problemas ambientais (HUANG et al., 2012) associado à emissão de gases do efeito estufa, contaminação dos recursos hídricos e dos solos e mudanças nos atributos dos solos (ZHU et al., 2012), podendo-se inferir que essa conjuntura se replicará no Brasil em função dos indícios já observados em diferentes áreas de

produção. Outro problema bastante debatido e que tem relação direta com o consumo e contaminação da água, tem apontado inclusive para a necessidade de minimização do uso dessas áreas (GAYDON et al., 2012).

O uso dos solos hidromórficos requer cuidado especial, pois estes quase sempre são utilizados com conteúdo de água elevado. Para autores como Braida et al. (2010), Reichert et al. (2010) e Mentges et al. (2012), essa condição altera o comportamento compressivo do solo em relação a solos bem drenados. Por outro lado, o alto conteúdo de água facilita a destruição dos agregados quando operações agrícolas são desenvolvidas.

As planícies fluviais inundáveis têm sido utilizadas largamente pela pecuária extensiva em todo o País por nelas ocorrerem pastagens naturais abundantes disponíveis nos períodos de déficit hídrico nas terras altas e consequente redução da forragem. Tal realidade foi e tem sido mais comum em pontos dos sertões secos, de ilhas de umidade e solos férteis (ASSIS, 2012), mas o uso desses solos vem sendo intensificado nas últimas décadas em áreas úmidas na porção noroeste da região Nordeste e em toda a região Norte em função da degradação das terras altas (FARIAS FILHO, 2013). Essa forma de uso tem promovido compactação de muitos solos, perdas intensas de sedimentos por erosão, mudanças de canais e destruição da vegetação ripária, se mostrando mais prejudicial quando comparado aos sistemas agrícolas (DIAS; THOMAZ, 2011).

2.3.3 Alterações promovidas pela agropecuária

A agricultura altera as propriedades físicas dos solos, aumentando sua densidade e a resistência do solo à penetração, que são, segundo Stefanoski et al. (2013), importantes indicadores da qualidade física do referido recurso. Mesmo sendo um processo bastante abordado nos últimos anos, o conhecimento sobre a deformação em solos aráveis permanece limitado para algumas regiões do Planeta. No entanto, esse conhecimento é essencial para melhores previsões dos efeitos das práticas de manejo do solo, tais como operações que envolvam trânsito de máquinas (PENG et al., 2012).

A compactação é uma das formas mais comuns de degradação dos solos pela agricultura. Reichert et al. (2007) apontam o tráfego de máquinas quando do cultivo dos solos como uma importante variável na degradação deste recurso, sendo

a mecanização em um solo não saturado uma das principais causas da perda de qualidade física.

Entretanto, quando saturado por água, o solo se comporta de forma diferenciada, mas também sofre deformação ao sofrer pressão ou tensão hidráulica. Mentges et al. (2012), ao analisarem o comportamento de um Gleissolo saturado por água e submetido a operações de cultivo, observaram que a expulsão da água do interior dos agregados durante as operações de preparo e manejo do arroz irrigado pode não ter sido suficiente para que houvesse deformação e alterações expressivas nas atributos estruturais, o que necessariamente não representa maior resistência à compactação.

Em solos hidromórficos que apresentam expansibilidade na Europa, Pietola et al. (2005) concluíram que os efeitos negativos do pastoreio (compactação e ao cisalhamento da superfície que provoca a homogeneização do solo), associado ao movimento de expansão e contração da argila, induzem a uma perda da sua resistência à compactação. Balbino et al. (2011) afirmam ser o manejo inadequado do rebanho no Brasil a principal causa da compactação, estando associado à degradação das pastagens e dos solos, à baixa reposição de nutrientes, aos impedimentos físicos e aos baixos investimentos tecnológicos.

Para Albuquerque et al. (2001), a compactação pelo pisoteio animal e tráfego de máquinas e implementos agrícolas em áreas sob integração lavoura-pecuária, tem sido uma das principais causas da degradação da capacidade produtiva de solos agrícolas.

A compactação do solo não saturado, resultante do estresse hidráulico (ψ) ou do esforço mecânico (σ), reduz a condutividade hidráulica saturada, provocando o escoamento superficial e a erosão do solo pela água (que pode induzir o fluxo preferencial em macroporos), facilitando o transporte de nutrientes e pesticidas para horizontes mais profundos e corpos d'água. Além desses prejuízos, a compactação reduz o crescimento das raízes e induz à perda de nitrogênio e à emissão de gases do efeito estufa através de denitrificação por processos anaeróbios, resultando em significativos prejuízos econômicos à sociedade (PENG et al., 2012).

A compactação é mensurada indiretamente pela resistência do solo à penetração que o solo oferece a um instrumento (penetrômetro), sendo de fácil e rápida determinação (ARAÚJO et al., 2012). A sua interpretação está relacionada às atributos físicas e ao comportamento do solo quando submetido a algum esforço

mecânico ou estresse hídrico e se volta, dentro da agricultura, ao entendimento de sua influência sobre o crescimento das plantas, conforme proposição de Letey (1985) em torno da determinação do intervalo hídrico ótimo - IHO.

Num processo de compactação, os macroporos são mais afetados pela tensão mecânica, em comparação com os microporos (PENG et al., 2012). Ou seja, há o aumento de massa por unidade de volume, resultando em aumento na densidade, na resistência do solo à penetração de raízes e na microporosidade, o que contribui para redução da porosidade total e da macroporosidade (STEFANOSKI et al., 2013).

Por outro lado, a expulsão do ar dos poros dos solos hidromórficos quando submetidos a operações agrícolas em condições de excesso hídrico reduz brusca e imediatamente a oxidação do CH_4 junto à superfície, fazendo com que o referido gás seja conduzido em maior quantidade à atmosfera, o que representa um problema ambiental preocupante (CHOWHURY; DICK, 2013). Isso ocorre porque durante o alagamento do solo, o oxigênio molecular é consumido pelos microrganismos aeróbios, os quais são substituídos pelos anaeróbios, ocasionando um ambiente de redução e acúmulo de CO_2 (SILVA; RANNO, 2005). Tal situação permite entender porque a produção de arroz é uma fonte significativa de emissão de CH_4 nas grandes áreas cultivadas sob condições de inundação mundialmente, representando cerca de 38% do total emitido no Planeta (CHOWHURY; DICK, 2013).

As alterações do volume do solo podem ocorrer devido ao comportamento dos materiais minerais que o constituem (em especial a fração argila) quando saturados e não saturados por água, pois a tensão hidráulica é definida pela expansão do seu volume (quando hidratado) e seu encolhimento, (quando há perdas de água) (PENG et al., 2012). Em solo com a presença de argila 2:1, os ciclos de umedecimento e secagem permitem uma alteração significativa do seu volume, o que resulta em compactação natural (adensamento) dos solos e numa coesão severa quando seco e que só tende a piorar com o manejo, seja pela agricultura ou pecuária.

Com o aumento da compactação, a superfície dos solos em ambiente hidromórfico tende a ficar por mais tempo submersa, contribuindo para o aumento na emissão de metano, em função do comprometimento das trocas gasosas na região inundada. Com os ciclos periódicos de secagem e umedecimento e a consequente exposição da superfície do solo, pode haver a redução da emissão de

metano pela oxigenação da superfície dos solos e oxidação do metano, o que não tem ocorrido satisfatoriamente nos solos compactados para cultivo do arroz inundado.

Chowhury e Dick (2013) informam que a oxidação do metano em ambientes com elevada metanogênese (campos de arroz, solos de turfa, aterros, etc.) tem baixa intensidade, sendo que concentrações do gás na água armazenada nos primeiros centímetros do solo de um campo de arroz pode chegar a 100 ppm e no ar de um solo drenado da mesma cultura é muitas vezes menor que 45 ppm.

É importante lembrar que da compactação resultam alguns benefícios, principalmente para a rizicultura irrigada. Dentre esses benefícios, os principais são a melhoria das condições de tráfego de máquinas e implementos agrícolas (Reichert et al., 2010) e a redução das perdas de água por percolação (KEEN et al., 2013).

2.3.4 Índices de compactação e prejuízos às culturas

A resistência do solo à penetração tem sido frequentemente utilizada para avaliar sua compactação, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas (ARAÚJO et al., 2012). A compactação do solo pelo tráfego de máquinas, originada da compressão do solo insaturado, é a principal causa da degradação física dos solos agrícolas, e aumenta com a intensidade de tráfego em condições de elevada umidade do solo (STEFANOSKI et al., 2013). Porém, seus limites críticos são muito variáveis, em consequência do comportamento da cultura e dos atributos dos solos.

Embora varie com o solo e com a espécie cultivada, a resistência do solo à penetração, a partir de determinados limites, pode resultar em prejuízos ambientais e econômicos.

Reichert et al. (2007) informam que há uma grande diversidade de valores críticos de resistência do solo à penetração apresentados por diferentes autores para diferentes solos e culturas e a dificuldade em estabelecer os referidos valores reside no fato de que solos, culturas e até mesmo os cultivares dentro de uma mesma espécie respondem diferentemente aos níveis de compactação do solo. Por outro lado, além da questão anteriormente mencionada, há dificuldade em padronizar nas pesquisas a umidade em que são realizadas as avaliações de resistência do solo à penetração, bem como os tipos de equipamentos utilizados.

Vial et al. (2013), ao analisarem os efeitos da compactação sobre a produtividade da cultura, identificaram que em um solo argiloso, o índice de 3,1 MPa não produz efeito negativo sobre o rendimento de grãos de milho. Já em um solo franco-arenoso com um índice de 4,5 MPa, a interrupção da camada compactada aumentou a produção de arroz em 14% e não houve interação com entrada de água no solo. Porém, com índices superiores a 5,2 MPa, os autores informam que a compactação promoveu interação negativa com a entrada de água e com o rendimento de grãos e a interrupção da camada compactada aumentou em até 24 % a produção.

Stefanoski et al. (2013), porém, informam que para o Brasil valores críticos de resistência do solo à penetração podem variar de 1,5 MPa a 4,0 MPa, mas valores próximos a 2,0 MPa são, de maneira geral, aceitos como impeditivos ao crescimento radicular, resultando em prejuízos econômicos.

Desse modo, é possível afirmar que ainda existem dúvidas sobre a intensidade de compactação na qual sistemas de manejo influenciam negativamente os atributos físico-hídrico-mecânicos do solo, o desenvolvimento e a produtividade das culturas (REICHERT et al., 2007).

2.4 O uso dos solos hidromórficos pela rizicultura e a pecuária no município de Arari, Estado do Maranhão

O município de Arari está situado na porção sul da Baixada Maranhense (IBGE, 2013), microrregião caracterizada ambientalmente pela vasta rede hidrográfica e extensas planícies que passam grande parte do ano inundadas e durante aproximadamente quatro meses são recobertas por pastagens naturais que tem proporcionado a expansão da pecuária extensiva.

A Baixada Maranhense tem como principais acessos a BR 222 que corta os municípios de Anajatuba, Arari, Vitória do Mearim (onde tem início a principal rodovia local, a MA 014 que corta diversos municípios da Microrregião, até o Município de Santa Helena) e Igarapé do Meio e a BR 316, que coincide com o seu limite oeste, possibilitando acesso ao seu interior pelos municípios de Pedro do Rosário e Santa Helena. A presença dessas rodovias, a proximidade desses municípios com São Luís (capital do Estado do Maranhão), o crescimento populacional regional e a ocorrência de solos relativamente mais férteis quando

comParados aos da Ilha do Maranhão (em que estão situados quatro municípios, inclusive São Luís, a Capital do Estado) que abrigam um contingente populacional de mais de 1.250.000 habitantes, tem promovido a rápida ocupação dos solos e a intensificação do seu uso com a pecuária e agricultura (FARIAS FILHO, 2013).

A região está localizada em uma zona de baixa latitude que, segundo Gering (2006), é caracterizada pela combinação de altas taxas de precipitação (acima de 2000 mm por ano) e por uma distribuição bimodal destas chuvas, o que resulta em condições perúmidas com mais de nove meses úmidos (precipitação > evapotranspiração) e com pouca severidade da época seca.

As elevadas temperaturas e as intensas chuvas da região permitem que os solos sejam imensamente intemperizadas, atribuindo baixa fertilidade aos Plintossolos e Gleissolos ali dominantes (FARIAS FILHO, 2013). Porém, no município de Arari, existem Gleissolos com a presença marcante de argilas expansivas (2:1) depositadas por atividade marinha (GERING et al., 2013), que lhe conferem média fertilidade, baixa condutividade hidráulica e textura argilosa, permitindo a expansão da orizicultura irrigada e da pecuária extensiva na atualidade.

Os solos argilosos, as baixas cotas altimétricas e as elevadas precipitações pluviométricas atribuem características únicas aos ecossistemas locais: superumidade durante a estação chuvosa, com a formação de grandes lagos e um déficit hídrico nos solos durante a estiagem.

A Baixada Maranhense está assentada numa área influenciada geologicamente pelo Golfão Maranhense, acidente geográfico que corresponde à região de contato entre a Bacia de Barreirinhas e a Bacia de São Luís. Geologicamente, a região é constituída por rochas do Terciário, apresentando exposição da Formação Itapecuru; da Série Barreiras e predominância de sedimentos do Quaternário que constituem os Aluviões Flúviomarinhos (FARIAS FILHO, 2013).

Nos Aluviões Flúviomarinhos, as características dos sedimentos, a dinâmica das águas e o acúmulo de matéria orgânica em função de condições hidromórficas locais originam Gleissolos e pequenas manchas de Organossolos nos locais mais baixos dos campos (planícies fluviais que passam grande parte do ano inundadas) (FARIAS FILHO, 2006).

Os Gleissolos têm sido utilizados pela rizicultura irrigada, fato que tem desencadeado alguns problemas ambientais relacionados à compactação e à

contaminação com resíduos de agrotóxicos (GASPAR et al., 2005). A compactação dos solos, a queda no preço do arroz e a redução na produtividade, estão permitindo a expansão da piscicultura com atividade alternativa.

Os referidos solos cultivados na região tem textura argilosa a muito argilosa (VALLADARES, 2009), o que facilita a manutenção da água na superfície do solo, garantido níveis mais ou menos estáveis da produção rizícola. Em outras regiões do mundo, como no Laos, a textura mais grossa dos solos, mesmo em várzea, permite uma oscilação muito grande nos níveis de produção, porque a água percola muito rapidamente, resultando em estresse hídrico às plantas (INTHAVONG; TSUBO; FUKAI, 2011).

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, J. A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas atributos físicos do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.717-723, 2001.

ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012. doi: 10.5777/PAeT.V5.N1.12

ASSIS, N. P. D. de. **A Capitania de São José do Piauí na racionalidade espacial Pombalina (1750-1777)**. Natal, RN: UFRN, 2012. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em História).

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PROFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.; SANTOS, H. P. DOS; FRANCHINI, J. C.; GALERANI, P. R.. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, n.10, p.01-12, 2011.

BENEDETTO, D. de; CASTRIGNANO, A.; SOLLITTO, D.; MODUGNO, F.; BETTAFUOCO, G.; PAPA, G. Io. Integrating geophysical and geostatistical techniques to map the spatial variation of clay. **Geoderma**, v. 171-172, p. 53-63, 2012. doi:10.1016/j.geoderma.2011.05.005

BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; VEIGA, M. Teor de carbono orgânico e a susceptibilidade à compactação de um Nitossolo e um Argissolo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 131-139, 2010.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 58, p.1501-1511, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. de; PEREIRA, G. T.. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa – MG, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CHOWHURY, T. R.; DICK, R. P. Ecology of aerobic methanotrophs in controlling methane fluxes from wetlands. *Applied Soil Ecology* v. 65, p. 8-22, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsoil.2012.12.014>

DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. ten. Uso da terra dos biomas brasileiros e o imPacto sobre a qualidade do solo. *Entre-Lugar*, Dourados – MS, n.6, v. 2, p. 181-193, 2012.

DIAS, W. A.; THOMAZ, E. L. Avaliação dos efeitos do pastoreio sobre a erosão em margens de canal fluvial em sistema de faxinal. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia – MG, v. 23, n. 1, p. 23-35, 2011.

FARIAS FILHO, M. S (org.). **O Espaço Geográfico da Baixada Maranhense**. 2ª. Ed. São Luís, MA: EDUFMA, 2013.

FARIAS FILHO, M. S.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. de L. A cultura do arroz em sistema de vazante na Baixada Maranhense, periferia do sudeste da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 82-91, abr./jun. 2009.

FARIAS FILHO, M. S. **Caracterização e Avaliação do Cultivo de Arroz em Sistema de Vazante na Baixada Maranhense**. São Luís, MA: UEMA, 2006. (Dissertação de Mestrado).

GASPAR, S. M. F. S.; NUNES, G. S.; PINHEIRO, C. U. B.; AMARANTE JÚNIOR, O. P. A.. Avaliação de risco de pesticidas aplicados no município de Arari, Maranhão,

Brasil: base para programa de controle ambiental do rio Mearim. **Pesticidas: r.ecotoxicol e meio ambiente**, Curitiba, v.15, p. 57-62., 2005.

GAYDON, D. S.; PROBERT, M. E.; BURESH, R. J.; MEINKE, H.; SURIADI, A.; DOBERMANN, A.; BOUMAN, B.; TIMSINA, J. Rice in cropping systems—Modelling transitions between flooded and non-flooded soil environments. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v. 39, p. 9-24, 2012. DOI:10.1016/j.eja.2012.01.003

GEHRING, C.; MOURA, E. G.; SANTOS, R. R. S.; AGUIAR, A. C. F.; SOUSA, A. M. B.; BODDEY, R. M.. Ecological intensification of rice production in the lowlands of Amazonia. Options for smallholder rice producers. **European Journal Agronomy**, v. 46, p.25-33, 2013.

GEHRING, C. O ambiente do trópico úmido e o manejo sustentável dos agrossistemas. São Luís, MA: EDUEMA, 2006. *In*: MOURA, E. G. de; AGUIAR, A. das C. F. **O desenvolvimento rural como forma de ampliação dos direitos no campo: princípios e tecnologias**. São Luís: UEMA, 2006.

HILTBRUNNER, D.; SCHULZE, S.; HAGEDORN, F.; SCHMIDT, M. W. I.; ZIMMERMANN, S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. **Geoderma**, v. 170, p.369–377, 2012.

HUANG, M. Effect of tillage on soil and crop properties of wet-seeded flooded rice. **Field Crops Research**, v. 129, p. 28-38, 2012. doi:10.1016/j.fcr.2012.01.013. IBGE. Cidades, Maranhão – Arari. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=210100&search=maranhao|arari>>. Acesso em:<20/09/2013>.

INTHAVONG, T.; TSUBO, M.; FUKAI, S. A. A water balance model for characterization of length of growing period and water stress development for rainfed lowland rice. **Field Crops Research**, v. 121, p. 291–301, 2011. doi:10.1016/j.fcr.2010.12.019

KEEN, A.; HALL, N.; SONI, P.; GHOLKAR, M. D.; COOPER, S.; FERDOUS, J.. A review of the tractive performance of wheeled tractors and soil management in lowland intensive rice production. *Journal of Terramechanics*, v. 50, p. 45–62, 2013.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2012.08.001>

LARK, R. M. Towards soil geostatistics. **Spatial Statistics**, v. 1, p. 92-99, 2012. doi:10.1016/j.spasta.2012.02.001 <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.10.004>

LEENAERS, H.; OHX, J. P.; BURROUGH, P. A. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. **Catena**, v. 17, p. 535-550, 1990.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop productions. **Advanced Soil Science**, v. 1, p. 277-294, 1985.

LIU, L.; YAN, Z.; TANG, L.; CAO, W.; WANG, E. Impacts of climate changes, soil nutrients, variety types and management practices on rice yield in East China: A case study in the Taihu region. **Field Crops Research**, v.149, p. 40–48, 2013a. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.022>

LIU, Y.; LV, J.; BI, J. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. **Science of the Total Environment**, v. 450, n.451, p. 108–119, 2013b. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.083>

MATHERON, G. The theory of regionalized variables and its applications. **Paris School of Mines Publications**, 1971.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; XAVIER, A. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 221-231, 2012.

MILLÁN, H.; TARQUÍS, A. M.; PÉREZ, L. D.; MATO, J.; GONZÁLEZ-POSADA. Spatial variability patterns of some Vertisol properties at a field scale using standardized data. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 20, p. 76–84, 2012.

OLIVEIRA, I. A. de; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E. de; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. do. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1103-1112, 2013.

PENG, X.; ZHANG, Z. B.; WANG, L. L.; L. GAN. Does soil compaction change soil shrinkage behaviour? **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 125, p. 89–95, 2012. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.04.001>

PIETOLA, L.; HORN., R.; YLI-HALLA, M.. Effects of trampling by cattle on the hydraulic and mechanical properties of soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 99–108.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; HORN, R. Mecânica do solo. In: van LIER, Q. J. (ed.). **Física do solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos em Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3 ed. revista e ampliada Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SILVA, L. S.; RANNO, S. K. Liming in lowland soils and nutrient availability in soil solution after flooding. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35 n. 5, 2005.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e ambiente**. 2 ed. Lisboa: IST Press, 2006.

SRIVASTAVA, R. M. Geostatistics: A toolkit for data analysis, spatial prediction and risk management in the coal industry. **International Journal of Coal Geology**, v.112 p. 2-13, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coal.2013.01.011>

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus imPactos sobre a qualidade física. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande - PB, v.17, n.12, p.1301–1309, 2013.

TESFAHUNEGN, G. B.; TAMENE, L.; VLEK, P. L. G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 117, p. 124–139, 2011. DOI: 10.1016/j.still.2011.09.005

VALLADARES, G. S. Caracterização química e granulométrica de solos do Golfão Maranhense. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 39, n. 4, p. 923-934, 2009.

VIAL, L. K.; LEFROY, R. D. B.; FUKAI, S. Effects of hardpan disruption on irrigated dry-season maize and on subsequent wet-season lowland rice in Lao PDR. **Field Crops Research**, v. 152, p. 65-78, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.016>

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

YAMAMOTO, J. K.; MAO, X. M.; CROSTA, K. K. A. P.; LANDIM, P. M. B.; HU, H. Z.; WANG, C. Y.; YAO, L. Q.. Mapping of uncertainty zone between interpolated types of a categorical variable. **Computers and Geosciences**, v. 40, p. 146-152, 2012.

ZHU, B.; YI, L.; GUO, L.; GHEN, G.; HU, Y.; TANG, H.; XIAO, C.; XIAO, X.; YANG, G.; ACHARYA, S. N.; ZENG, Z.. Performance of two winter cover crops and their imPacts on soil properties and two subsequent rice crops in Dongting Lake Plain, Hunan, China. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 124, p. 95–10, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2012.05.007>

CAPÍTULO 2 – Variabilidade espacial dos atributos físicos e carbono orgânico em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no Município de Arari

RESUMO

O entendimento da distribuição espacial dos atributos do solo é de grande importância para definição do correto manejo deste recurso. Este trabalho analisou a variabilidade dos atributos físicos e carbono orgânico em um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no município de Arari, situado na região centro norte do estado do Maranhão. Foram selecionadas três áreas de um hectare em formato regular, com solo utilizado por arroz irrigado e pecuária (área A), pecuária extensiva em vegetação nativa (área B) e arroz irrigado (área C), onde foram coletadas amostras de solo (deformadas e indeformadas) na camada 0-0,20 m, com malha regular de 10 x 10 m, perfazendo 121 amostras por área e um total de 363. As variáveis analisadas foram resistência do solo à penetração, densidade do solo, porosidade (total, macro e microporosidade), areia, silte, argila e carbono orgânico. As análises dos dados foram feitas por estatística descritiva, teste de média e geoestatística. Os valores foram elevados para a variável resistência do solo à penetração nas três áreas, sendo a área A aquela que teve o maior valor médio, indicando a influência da combinação lavoura-pecuária no incremento da compactação do solo. As variáveis apresentaram dependência espacial em todas as áreas, com exceção da areia e carbono orgânico na área A, cuja variabilidade pode ter sido alterada pelo manejo. A porosidade total teve maior dependência espacial e menor variabilidade, apresentando valores diferentes para as três áreas, apesar da semelhança textural, o que indica que houve alterações dos seus valores com o manejo.

PALAVRAS-CHAVE: Compactação do solo; Atributos do solo; Geoestatística.

CHAPTER 2: Spatial variability of the physical attributes and organic carbon in a typical Melanic Gleisol Alitic in three areas in the Municipality of Arari

ABSTRACT

Understanding the spatial distribution of soil attributes is of great importance to define the proper management of this resource. This study analyzed the variability of the physical attributes and organic carbon in a typical Melanic Gleisol Alitic in three areas in the municipality of Arari, located in the northern center of the state of Maranhão. Were selected three areas of one hectare in regular format, with soil used for irrigated rice and livestock (area A), extensive cattle ranching in native vegetation (area B) and irrigated rice (area C), where were collected soil samples (deformed and undeformed) in the layer 0-0.20 m, with regular grid of 10 x 10 m, totaling 121 samples per area and a total of 363. The variables analyzed were resistant to penetration, density, porosity (total, macro and microporosity), sand, silt, clay and organic carbon. Data analyzes were performed using descriptive statistics, mean and geostatistics test. The values were higher for the variable resistance to penetration in the three areas, being the area A that had the highest average value, indicating the influence of crop-livestock combination in increased soil compaction. The variables presented spatial dependence in all areas, with the exception of sand and organic carbon in area A, whose variability may have been changed by management. Total porosity had greater spatial dependence and less variability, with different values for the three areas, despite the textural similarity, indicating that there were changes in their values with the management.

KEYWORDS: Soil compaction; Soil attributes; Geostatistics.

INTRODUÇÃO

A compactação é a principal causa da degradação física dos solos em decorrência da redução dos seus espaços porosos. Devido à compactação há alteração estrutural do solo em função da reorganização das partículas e dos seus

agregados, o que aumenta a densidade e a resistência do solo à penetração (Mentges et al. 2010). A compactação pode ser mensurada indiretamente pela resistência que um solo oferece à penetração de um instrumento como o penetrômetro, refletindo o comportamento do solo quanto ao conteúdo de água, à textura e aos seus espaços porosos (Mion et al. 2012).

A compactação é variável no espaço, dependendo da variabilidade natural dos atributos físicos dos solos e do manejo adotado. Desse modo, admite-se que o uso da terra desempenha um papel dinâmico na variabilidade dos padrões espaciais dos atributos dos solos, pois o referido uso pode mudar com frequência (Liu et al. 2013).

O uso de máquinas e implementos em solos com elevada umidade provoca a sua deformação e compactação, pois a água reduz a coesão e atua como lubrificante entre as partículas de solo, permitindo o deslizamento e empacotamento destas quando os solos são submetidos a algum tipo de pressão (Liu et al. 2013). Os aspectos acima mencionados são relevantes no manejo de solos hidromórficos, como os Gleissolos.

A compactação é muito frequente nas áreas de cultivo de arroz irrigado por inundação, realizado em solos com relevo plano a suave-ondulado que ocorrem em várzeas, em razão da facilidade de manejo da irrigação para a cultura (Munareto et al. 2010). Porém, esses solos normalmente dificultam o estabelecimento de sistemas alternativos que envolvam culturas de sequeiro (Lorensi 2011), especialmente quando compactados.

A pecuária bovina também pode degradar fisicamente o solo pela compactação e erosão, uma vez que o pastoreio pode reduzir a porosidade e

ocasionar a perda da cobertura vegetal em áreas de trânsito intenso de animais (Hiltbrunner et al. 2012).

O pastoreio também pode heterogeneizar o padrão espacial dos recursos do solo por meio de processos biológicos mediados pela remoção de biomassa vegetal, favorecimento da erosão e deposição de esterco formando “ilhas férteis” pela concentração de recursos em torno de árvores e arbustos ou empobrecimento acentuado pelo sobrepastoreio e erosão (Daryanto et al. 2013) o que pode explicar a heterogeneização da distribuição espacial da matéria orgânica e de outros atributos.

Na Baixada Maranhense, o uso dos solos com arroz irrigado e pecuária extensiva e por meio da combinação destes dois sistemas vem sendo expandido, especialmente no município de Arari, Vitória do Mearim, São Mateus e Viana (Farias Filho & Ferraz Júnior 2009). Desse modo, supõe-se que esses diferentes manejos tem promovido a compactação e alterações no padrão de distribuição espacial dos atributos físicos dos solos.

A espacialização dos atributos do solo requer um número muito grande de amostras. Porém, a geoestatística, técnica que vem se mostrando eficaz no estudo da variabilidade espacial do solo, pode ser utilizada para reduzir a amostragem com eficácia por meio da interpolação e estimativa de valores (Mion et al. 2012) e fundamentar a definição do correto manejo de determinada área.

O presente estudo analisou a variabilidade espacial dos atributos físicos e do carbono orgânico em um Gleissolo Melânico Alítico sob três áreas no município de Arari, estado do Maranhão.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, situada no extremo oeste do município de Arari que está localizado na porção centro norte do Estado do Maranhão (Figura 01), compondo a Microrregião da Baixada Maranhense.

O clima da região é úmido com um período de estiagem que se evidencia entre os meses de julho a novembro, sendo tipificado como B1WA'a' (Thornthwaite 1948). Em Arari, a precipitação pluviométrica média anual é de 1332 mm, oscilando entre 1057 (ano seco) e 3871 mm ano⁻¹ (ano chuvoso) nos últimos 14 anos, com o máximo das chuvas situado no mês de março (MAPA, 2013). As temperaturas variam entre 24° e 35° C. O relevo local é relativamente plano, com poucas variações e uma altitude média de 6 m, o que submete os solos ao hidromorfismo porque permite o extravasamento das águas do rio Mearim para as suas planícies durante o período chuvoso e a permanência da água nos solos durante grande parte do ano.

A geomorfologia local, associada às características climáticas, sujeita esse solo a um alagamento prolongado que é favorecido pela baixa permeabilidade deste devido a sua textura, normalmente argilosa ou muito argilosa (Farias Filho & Ferraz Júnior 2009). O lento escoamento das águas possibilita o acúmulo de material orgânico e fertilidade química maior que favorecem as principais e mais importantes atividades humanas desenvolvidas localmente (pecuária e agricultura).

As características acima mencionadas favorecem a formação de Gleissolos e Neossolos Flúvicos. Na área analisada o solo foi classificado como Gleissolo Melânico Alítico típico, A proeminente, textura muito argilosa (Figura 01).

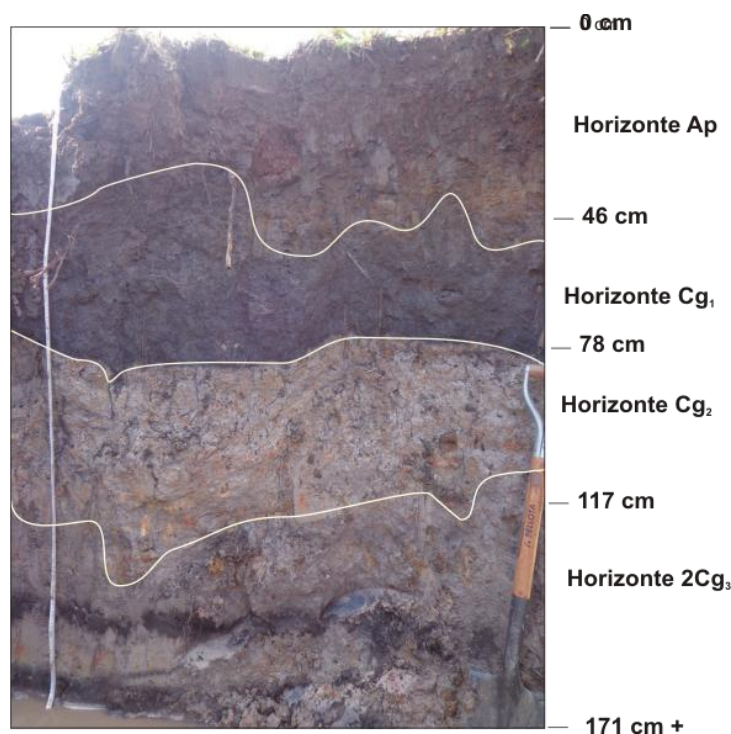


Figura 01: Perfil de um Gleissolo Melânico Alítico típico, textura muito argilosa, analisado na área de coleta de amostras.

O ambiente pedogenético associado aos mecanismos e ciclos deposicionais fluviomarinhos pode atribuir grande variabilidade aos atributos dos solos, porque há camadas de acumulação de matéria orgânica, provavelmente devido aos ciclos de regressão marinha, gerando descontinuidade nos horizontes minerais.

A textura argilosa é predominante nos solos locais, o que é comum em área de deposição fluvial em canais senis (meândricos) como é o caso do rio Mearim no seu baixo curso. A deposição de sedimentos muito finos na área de estudo também tem relação com o refluxo das águas do rio mencionado em razão do avanço das marés, caracterizando deposição fluviomarina. Moura (2004) informa que o solo na mesma planície fluvial próximo área analisada apresenta argila expansiva, normalmente montmorilonita, classificando-o como Vertissolo Hidromórfico, ainda que apresente baixa saturação por base.

Gehring et al. (2013) ao analisarem um solo na mesma condição topográfica e muito próximo à área de estudo, indicaram o predomínio de silte e argila montmorilonítics, com valores médios de pH 4,2 (CaCl₂), C orgânico 8,4 g kg⁻¹, P (resina) 7 mg dm⁻³, K⁺ 4,2, Ca²⁺ 30 e Mg²⁺ 41, acidez trocável 142 e CTC 217 mmol_c.dm⁻³ e saturação por bases de 35%.

Coleta de amostras

Foram selecionadas três áreas (A, B e C) com uma distância média entre uma e outra de 200 m em que são desenvolvidos três diferentes sistemas de manejo sob condições pedológicas similares (Figura 02).

A área A (coordenadas 3° 30' 17,24" S e 44° 48' 8,32" O) tem sido cultivada nos últimos seis anos com arroz irrigado por inundação no período de estiagem (julho a novembro), arroz de sequeiro no período chuvoso (dezembro a maio) e após colheita, nos dois ciclos produtivos, há a inserção de bovinos para aproveitamento da palhada como forragem.



Figura 02: Áreas selecionadas para a coleta de amostras em Arari – MA.

No preparo do solo para cultivo de arroz inundado os principais implementos utilizados são a grade niveladora (Figura 03), a semeadora com trator adaptado para o tráfego nos solos pegajosos locais e a colhedora. Já no cultivo de sequeiro, os principais implentos são o arado de disco e aqueles anteriormente mencionados para o cultivo irrigado.

A área B (coordenadas $3^{\circ} 30' 38,41''$ S e $44^{\circ} 48' 14,76''$ O), que possui remanescentes de vegetação nativa, com espécies herbáceas, arbustivas e arbóreas, tem sido utilizada no período de estiagem por pecuária extensiva nos últimos 10 anos. No manejo da área não há observação quanto ao número de animais e à capacidade de suporte, sendo o rebanho transferido para ali

observando-se apenas a disponibilidade de forragem. Os animais só são transferido para outra área quando a vegetação nativa não oferece mais forragem ao animais.



Figura 03: Preparo do solo para cultivo de arroz irrigado por inundação (à esquerda) com grade niveladora (à direita)

A área C (cordenadas $3^{\circ} 29' 46,79''$ S e $44^{\circ} 48' 14,76''$ O) é utilizada pelo cultivo de arroz irrigado por inundação durante o período de estiagem e por arroz de sequeiro (com as mesmas máquinas e implementos utilizados na área A) nos últimos 11 anos.

Cada uma das áreas tem dimensões de 100x100 m (1 ha) em que foram coletadas amostras de solos na camada de 0,0 a 0,2 m, em malha regular de 10x10 m, totalizando 121 amostras de solos deformadas para realização de análise granulométrica e de carbono orgânico (C orgânico) e 121 amostras indeformadas em anéis volumétricos para determinação da resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (Ds), porosidade total (Pt), macro e microporosidade em cada uma das áreas, perfazendo 363 amostras para cada modalidade. As amostras foram coletadas no mês de julho de 2013 antes do preparo do solo para o cultivo de arroz irrigado (áreas A e C) e durante o uso por pecuária extensiva na área B. Os pontos de coleta foram georreferenciados com o uso de um receptor GPS (Trimble, modelo Juno).

Análises de solos

A argila foi determinada pelo método da pipeta, utilizando-se como dispersante químico na solução NaOH 0,1 mol L⁻¹. A areia foi determinada por tamisagem e o silte, subtraindo-se do total da alíquota as massas de argila e areia (Claessen 1997).

Para determinação da resistência do solo à penetração as amostras indeformadas coletadas em cilindro de 5 cm de altura e 48 cm de diâmetro foram saturadas por água durante 12 horas, pesadas e levadas à câmara de Richards, a um potencial matricial de -6 kPa até o equilíbrio, conforme os trabalhos de Lima et al. (2006) e de Santos et al. (2012a). Em seguida, as amostras foram pesadas, procedendo-se o ensaio de resistência do solo à penetração em um penetrógrafo de bancada (Marconi, versão 1205/01), com sensor deslocando-se verticalmente a uma velocidade de 2 mm s⁻¹.

Em seguida, as amostras foram colocadas em estufa a 105–110 °C por 48 h, para obtenção da massa de solo seco e posterior determinação da umidade saturação, que equivale à porosidade total (Camargo et al. 2009). A microporosidade foi obtida pela determinação da umidade volumétrica de cada amostra correspondente ao potencial mátrico de -6 kPa (Claessen 1997) e a macroporosidade, pela diferença entre porosidade total e microporosidade. A densidade do solo foi obtida conforme metodologia descrita por Camargo et al. (2009). A determinação do C orgânico foi realizada de acordo com Raij et al. (1987).

Análises estatísticas

A variabilidade dos dados foi avaliada por meio de estatística descritiva, calculando-se média, mediana, mínimo, máximo, desvio padrão (DP) e coeficiente de variação (CV). Foi realizada a correlação de Spearman entre a resistência do solo à penetração e areia, silte, argila, densidade, porosidade (total, macro e micro) e carbono orgânico. Nesta etapa, os dados foram processados no software Minitab Release 14.1 (Minitab Inc. 2003).

A distribuição e dependência espaciais entre as variáveis foram avaliadas por técnica geoestatística que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas (Vieira et al. 1981).

Sob a hipótese intrínseca de estacionaridade a dependência espacial entre as amostras foi estimada pelo semivariograma experimental (Vieira et al. 1981), segundo a Equação 1.

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

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 .

Os modelos ajustados aos semivariogramas experimentais (Apêndice 01) foram o esférico (equação 2) que é menos errático para pequenas áreas e permitiu compreender a natureza da distribuição espacial das variáveis estudadas, a excessão da RP na área, para qual o modelo permissível ajustado foi o exponencial (equação 3).

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 < h \leq a \\ C_0 + C_1, & 0 \geq a \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \quad (3)$$

Em que: C_0 é o efeito pepita, $C_0 + C_1$ é o patamar e a é o alcance do semivariograma.

A decisão pelo melhor modelo, isto é, do melhor ajuste ao semivariograma experimental, baseou-se na menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), maior coeficiente de determinação (R^2) e nos coeficientes de regressão da validação cruzada (a e b).

O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis em estudo foi avaliado segundo a classificação de Cambardella et al. (1994). Quando não houve dependência espacial, ou seja, quando o efeito pepita foi igual ao patamar, ocorreu o chamado efeito pepita puro – EPP (Trangmar et al. 1985), não sendo possível espacializar os valores para a variável em que isso ocorreu.

A técnica da validação cruzada foi aplicada para decisão quanto ao melhor modelo de ajuste aos dados, método do semivariograma e cálculo do gráfico de isolinhas por krigagem (Isaaks & Srivastava 1988). Os semivariogramas, ajustes dos modelos e validação cruzada foram feitos no software GS+ 9.0 (Gamma Design Software 2008), sendo a espacialização das variáveis realizada no Surfer 11 (Golden Software Inc. 2012).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos atributos físicos apresentaram valores de média e mediana próximos (Tabela 01), indicando que possuem uma distribuição normal e seguem distribuições simétricas. Oliveira et al. (2013), ao avaliarem a variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, no Amazonas identificaram variabilidade similar dos dados. Porém, a evidência supramencionada não se confirmou para a RP na área A, o silte e argila na área B e para a argila na área C, cujos valores de média e mediana tiveram diferenças relativamente maiores, indicando assimetria dos dados em função da grande diferença entre valores mínimos e máximos.

A variabilidade dos dados com base nos valores de coeficiente de variação (CV), segundo critérios estabelecidos por Warrick & Nielsen (1980), foi considerada baixa ($CV < 12\%$) para a Pt e Micro em todas as áreas e média ($12\% < CV < 62\%$) para as demais variáveis. Para Frogbrook et al. (2002), valores elevados de CV podem ser considerados como os primeiros indicadores da existência de heterogeneidade nos dados. Valores altos de CV também justificam o uso da geoestatística para análise dos dados.

As três áreas possuem textura semelhante, com sensível diferença apenas nos teores de argila na área C e de silte na área B em relação às outras áreas. Os valores para RP, C orgânico e Macro foram diferentes nas três áreas, sugerindo que os usos influenciaram na variabilidade dos dados. Já os valores de Macro e Micro foram diferentes na área A quando comparados aos das áreas B e C.

Tabela 01: Estatística descritiva, Intervalo de Confiança e correlação de Spearman para os atributos físicos e carbono orgânico em áreas com diferentes usos em Arari – MA, na profundidade 0,0-0,2 m

Estát. Desc.	RP	Argila	Silte	Areia	C orgânico	Ds	Pt	Macro	Micro
	mPa	g.kg-1			g dm-3	g cm-3	%		
<i>Area A</i>									
Média	6,6	556,0	415,0	15,0	11,0	1,5	52,9	4,7	48,2
Mediana	5,9	550,0	419,0	16,0	10,9	1,5	53,1	4,3	47,1
Mínimo	2,3	399,0	294,0	7,0	6,1	0,9	43,4	2,0	40,8
Máximo	12,7	675,0	502,0	27,0	18,9	1,7	63,5	10,0	52,9
DP	2,7	55,6	50,5	4,9	2,3	0,3	3,4	2,0	2,4
CV (%)	41,0	10,0	12,1	31,3	23,1	8,7	6,6	43,4	5,2
IC (1)	6,0-7,2	545-566	406-425	15-16	10,5-11,4	1,2-1,3	53,1-63,5	4,2-5,1	46,4-47,5
CS(2)	-	0,01	0,04	-0,06	-0,16	0,58*	-0,49*	-0,10	-0,44*
<i>Area B</i>									
Média	3,9	508,0	441,0	17,0	6,7	1,3	57,3	6,8	50,5
Mediana	3,5	533,0	433,0	16,0	6,7	1,3	57,1	6,5	50,0
Mínimo	1,1	241,0	289,0	7,0	5,9	0,8	37,5	2,0	39,6
Máximo	10,7	698,0	680,0	31,0	7,7	1,6	69,0	16,3	58,7
DP	1,6	73,5	63,0	5,7	0,3	0,1	4,5	3,3	3,6
CV (%)	40,0	13,7	14,2	33,9	4,5	8,6	7,9	49,9	7,3
IC	3,6-4,2	549-551	428-454	16-18	6,6-6,7	1,0-1,1	56,5-58,2	6,1-7,4	49,1-50,6
CS	-	0,01	0,12	-0,04	-0,03	0,14	-0,12	-0,20	-0,57*
<i>Area C</i>									
Média	4,4	567,0	417,0	17,0	14,4	1,4	55,3	5,9	49,4
Mediana	4,1	586,0	412,0	17,0	14,4	1,4	55,0	5,3	50,3
Mínimo	1,4	350,0	282,0	10,0	6,1	0,8	44,0	2,2	40,8
Máximo	9,6	720,0	588,0	28,5	22,3	1,5	67,0	14,4	59,9
DP	1,8	101,6	87,0	4,3	3,5	0,2	5,5	2,3	4,7
CV (%)	41,6	17,9	20,9	25,1	24,4	13,3	9,9	38,7	9,5
IC	4,1-4,8	548-586	400-436	16-18	13,8-15,1	1,2-1,5	54,3-56,4	5,4-6,3	49,2-51,1
CS	-	0,03	0,42*	-0,01	-0,22	0,61*	-0,64*	-0,01	-0,51*

(1) Intervalo de confiança da média a 95%. (2) Correlação de Spearman entre a RP e argila, silte, areia, C orgânico, Ds, Pt, Macro e Micro: *Significativa a 5% de erro da probabilidade. CV – coeficiente de variação. DP – desvio padrão. RP – resistência do solo à penetração. Ds – densidade do solo. Macro – macroporosidade. Micro – microporosidade. Pt – porosidade total.

Os valores de RP foram considerados altos nas três áreas (Tabela 01), de acordo com classificação proposta por Arshad et al. (1996), sendo a área A aquela que apresentou o solo mais compactado, a área B teve os menores valores e a área C, valores intermediários. O valor médio para RP obtido na área A (6,6 mPa) está acima do limite superior de restrição ao enraizamento proposto por Richart et al. (2005) que destacam que o valor restritivo pode variar entre 1,00 a 5,00 MPa para os diferentes tipos de solo e culturas.

Apesar de haver discordância entre valores limitantes ao crescimento da cultura pela RP, autores como Vial et al. (2013) evidenciam que com índices superiores a 5,20 mPa, a compactação promove interação negativa com a entrada de água no solo, trocas gasosas e com o rendimento de grãos na cultura do arroz. Para Stefanoski et al. (2013), no Brasil valores críticos de resistência do solo à penetração podem variar de 1,50 mPa a 4,00 mPa, mas valores próximos a 2,00 mPa são, de maneira geral, aceitos como impeditivos ao crescimento radicular, resultando em prejuízos econômicos. Mitchell et al. (2013) detectaram que os solos argilosos cultivados com arroz em várzea no Camboja ao apresentarem um RP de 3,00 mPa já indicam fortes sinais de compactação. A partir dos valores apontados, é possível afirmar que nas áreas analisadas o solo já está compactado.

A variabilidade espacial da RP é comumente alta e seus valores tendem a serem elevados quando o solo é cultivado por sucessivos anos com arroz irrigado por inundação em função das perdas de macroporos na camada superficial (Munareto et al. 2010).

A correlação significativa e positiva entre RP e Ds foi detectada na área A e B, indicando que estas áreas podem estar sendo modificadas pelo pisoteio animal e operações agrícolas. Torres et al. (2013) informam que o aumento da Ds é um indicador de degradação do solo por compactação, fenômeno também caracterizado pelo aumento da resistência do solo à penetração e pela redução da macroporosidade.

A RP se correlacionou negativamente às variáveis Pt (nas áreas A e C) e Micro (nas três áreas). Por outro lado, a RP não teve correlação com areia, argila e C orgânico nas três áreas.

Apesar da compactação ser benéfica em cultivo de arroz irrigado, porque reduz as taxas de percolação da água durante todo o período de crescimento das culturas, permitindo o controle de ervas espontâneas e facilitando o nivelamento do campo agrícola e plantio (Keen et al. 2013), mas quando os solos são utilizadas sequencialmente por culturas de sequeiro estas são prejudicadas (Lorensi 2011), o que provavelmente está ocorrendo nas áreas A e C que também são cultivadas no referido sistema. Esse problema tende a se intensificar porque as características físicas desfavoráveis dos solos hidromórficos vão se agravando em função da aplicação de manejo inadequado ao longo dos anos, fazendo com que se formem regiões compactadas logo abaixo da camada arável (Borges et al. 2004), o que resultará em perdas das culturas.

A Ds teve valores elevados nas três áreas e foi maior na área A quando comparados a valores detectados para outros solos no Brasil. Reinert et al. (2001) informam que para solos com teores de argila de $550,0 \text{ g kg}^{-1}$ (como é o caso daquele aqui analisado), valores de densidade acima de $1,45 \text{ Mg m}^{-3}$ já indicam elevado grau de compactação e prováveis perdas na cultura. Por outro lado, a macroporosidade foi menor nas áreas A e C em que há mecanização, coincidindo com valores maiores para o C orgânico e Ds. Isso ocorreu, porque a destruição dos macroporos pela mecanização agrícola, segundo Mitchell et al. (2013), aumenta a Ds e reduz a condutividade hidráulica e, em várzeas sistematizadas para cultivo do arroz, ocasiona o acúmulo de água e conseqüente acúmulo de matéria orgânica.

Para Borges et al. (2005) em solos hidromórficos,, possuem reduzida condutividade hidráulica, baixa velocidade de infiltração, relação micro/macroporos muito alta e baixa capacidade de armazenamento e disponibilidade de água às plantas na camada superficial.

Os valores para C orgânico situaram-se entre 11,00 (área A) e 14,4 g dm⁻³ (área C), o que coincide com valores encontrados para solos hidromórficos cultivados com arroz no Rio Grande do Sul (Torres et al. 2013). Porém, na área B os valores para a referida variável foram pequenos, com média de 6,6 g dm³, sugerindo interação negativa com o pastoreio. Valores mais altos de C orgânico nas áreas cultivadas com arroz irrigado podem ser explicados pela formação de ambiente anóxico de decomposição, fato que resulta na presença de ácidos orgânicos na solução da água que podem reduzir a produtividade da cultura quando em excesso (Beutler et al. 2012). Os menores valores de C orgânico coincidiram com as áreas em que a pecuária é mais desenvolvida (áreas A e B), indicando que este manejo tende a reduzir o teor de matéria orgânica no solo. Para Torres et al. (2013), este fenômeno ocorre porque a maior intensidade de pastejo determina menor massa de forragem e redução da cobertura vegetal, incorrendo em redução de matéria orgânica adicionada ao solo.

A análise geoestatística permitiu inferir que nas três áreas as variáveis apresentaram grau de dependência espacial isotrópica predominantemente forte, sendo moderado apenas para silte e porosidade total em B e microporosidade em C (Tabela 02).

Os modelos ajustados foram o exponencial para RP na área C e o esférico para as demais variáveis nas três áreas, com exceção dos teores de C orgânico e de areia que não tiveram dependência espacial (efeito pepita puro) que pode ter sido reduzida pela mecanização agrícola.

Tabela 02: Modelos e parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos físicos dos solos estudados e da RP (profundidade 0-0.20 m)

Atributo	Área	Modelo	C_0	C_0+C_1	GDE	A	R^2	SQR	b	A	N
RP	A*	Esférico	0,36	15,77	2,28	18,80	0,88	8,62	0,88	0,73	119
	B	Esférico	0,28	3,07	9,12	17,50	0,98	0,03	0,65	1,26	121
	C*	Exp.	0,25	2,99	8,36	39,90	0,90	0,195	0,91	-0,03	114
Argila	A*	Esférico	0,01	30,83	0,03	30,41	0,70	212,00	0,97	1,54	115
	B*	Esférico	16,20	188,11	8,61	22,70	0,69	1448,00	1,00	0,28	113
	C*	Esférico	6,28	103,30	6,08	21,70	0,56	93,90	0,92	4,83	110
Silte	A*	Esférico	0,08	26,04	0,31	27,68	0,82	114,00	1,01	-0,29	111
	B*	Esférico	45,07	109,40	41,20	40,60	0,92	139,00	0,60	88,8	113
	C*	Esférico	0,10	83,40	0,12	23,60	0,63	1096,00	1,23	-4,36	111
Areia	A*	Esférico	0,10E-2	0,37	0,27	16,95	0,96	0,01	0,97	0,05	118
	B	EPP ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C*	Esférico	0,07	0,27	25,93	45,60	0,88	2,93E-04	0,80	0,36	118
Ds	A*	Esférico	0,10E-02	0,01	10,00	28,03	0,94	4,62E-06	1,00	-0,01	118
	B*	Esférico	5,77E-04	7,61E-03	7,58	18,40	0,80	2,83E-06	0,72	1,01	110
	C*	Esférico	0,20E-05	0,02	0,01	21,20	0,74	2,97E-06	0,94	0,08	116
Pt	A*	Esférico	1,01E-3	1,01E-2	10,00	22,14	0,85	5,19E-08	0,92	0,04	118
	B*	Esférico	1,06E-3	1,97E-3	53,81	16,90	0,82	1,94E-07	0,78	0,12	116
	C*	Esférico	0,23E-03	0,30E-2	7,67	20,10	0,76	3,48E-07	0,95	0,02	117
Macro	A	Esférico	3,37	19,71	17,10	46,10	0,97	5,46	1,07	-0,34	121
	B*	Esférico	0,42	19,83	2,12	20,60	0,88	14,1	0,77	1,52	120
	C*	Esférico	2,74	7,87	34,82	41,60	0,97	0,32	0,82	0,98	116
Micro	A*	Esférico	2,98	24,45	12,19	43,60	0,96	9,59	0,85	7,05	115
	B*	Esférico	0,02	20,26	0,10	22,80	0,86	30,6	0,47	26,45	117
	C*	Esférico	0,48	34,70	1,38	24,20	0,87	39,70	0,82	-0,03	118
C orgânico	A*	Esférico	0,08	19,37	0,41	27,70	0,81	81,4	1,04	-0,69	117
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C*	Esférico	0,49	36,29	1,35	23,70	0,82	49,00	0,82	1,31	120

⁽¹⁾ Efeito pepita puro. Exp. – exponencial. C_0 - Efeito pepita; $C_0+ C_1$ - Patamar; GDE – grau de dependência espacial $100[C_0/(C_0+C)]$, em %. R^2 - coeficiente de determinação. SQR – soma de quadrado dos resíduos. A – alcance; b – coeficiente de regressão da validação cruzada. a – eixo de origem no valor zero da validação cruzada. RP – resistência do solo à penetração. Ds – densidade do solo. Pt – porosidade total. Macro – macroporosidade. Micro – microporosidade. n – número de vizinhos utilizados no ajuste dos modelos aos dados. *Retirada de tendência.

Os valores dos coeficientes da validação cruzada (Tabela 02) permitiram inferir que os ajustes foram aceitáveis para as variáveis Pt nas três áreas, RP na área C, argila em B e areia em A e B. As variáveis cujo ajuste não foi satisfatório foram silte na área B e microporosidade nas áreas A e B.

Os valores para C_0 foram baixos (Tabela 02) para quase todas as variáveis que apresentaram dependência espacial, com exceção do silte que apresentou valor

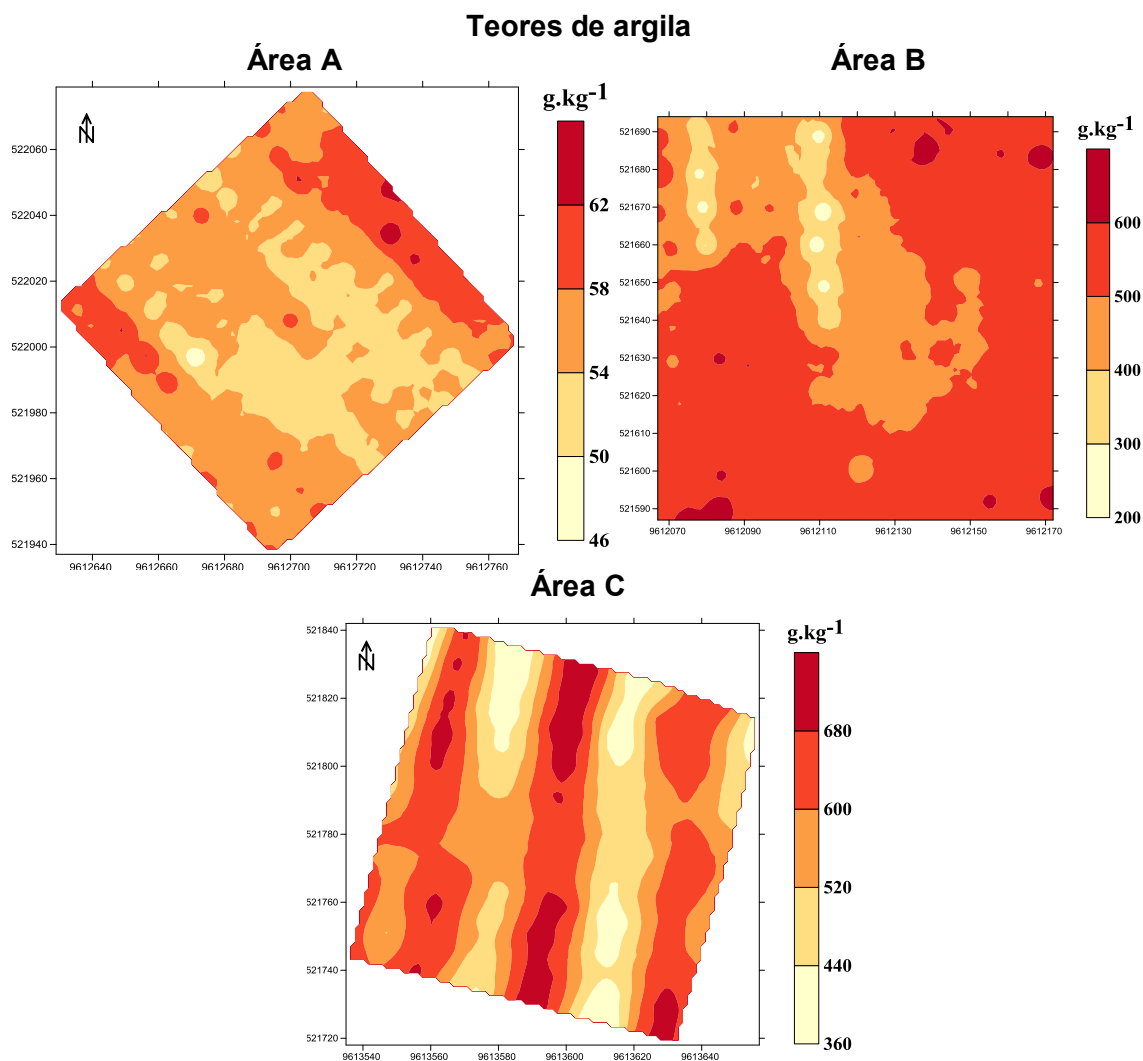
alto. Valores de C_0 baixo indicam pequena aleatoriedade dos dados e pequenos erros de amostragem e de análise, sendo um bom indicador de qualidade dos dados. Já o R^2 , um dos critérios utilizados para a escolha do modelo (Yamamoto & Landim 2013), teve valores próximos a 1 para quase todas as variáveis, apresentando os menores valores para a argila nas três áreas.

O alcance variou entre 16,90 (para Pt na área B) e 46,10 m (areia na área C), o que indica que, mesmo diante da variabilidade nas três áreas, condição comum aos solos, os valores estimados se mostram próximos daqueles amostrados. Ou seja, os pontos localizados numa área de raio igual ao alcance tiveram maior dependência espacial entre si do que com aqueles localizados fora desta área, conforme constatação de Santos et al. (2012b). Os maiores valores para alcance foram obtidos para a variável macroporosidade, indicando contribuição do manejo agrícola para uma maior continuidade espacial dos dados pela redução dos macroporos.

Silte e argila apresentaram menor espacial espacial, pois possuem valores elevados para a SQR. Porém, apresentam forte dependência espacial. Os teores de argila (em A) e o silte (em A e C) foram maiores nas áreas de menores cotas altimétricas (Figura 04), o que tem relação com os processos deposicionais e com a mistura dos sedimentos em função das operações de preparo do solo. Para Coringa et al. (2012), os atributos dos solos hidromórficos (dentre eles a textura) guardam estreita relação com a natureza dos sedimentos depositados, consequência da natureza do material de origem e dos mecanismos de deposição/sedimentação.

Na área C, argila e silte são distribuídos com tendência anisotrópica em relação à topografia (Figura 04). Esse padrão de distribuição tem relação com o

sistema de preparo da área para o cultivo que revolve sedimentos na área alta para aterros nas áreas mais baixas e, quando ocorre a inundação, os sedimentos mais finos ficam em suspensão na água, decantando onde há acúmulo de água por um tempo maior. Reichert et al. (2008) também detectaram padrão de distribuição similar em um Planossolo Hidromórfico cultivado em Santa Maria, RS.



Continuação: Figura 04

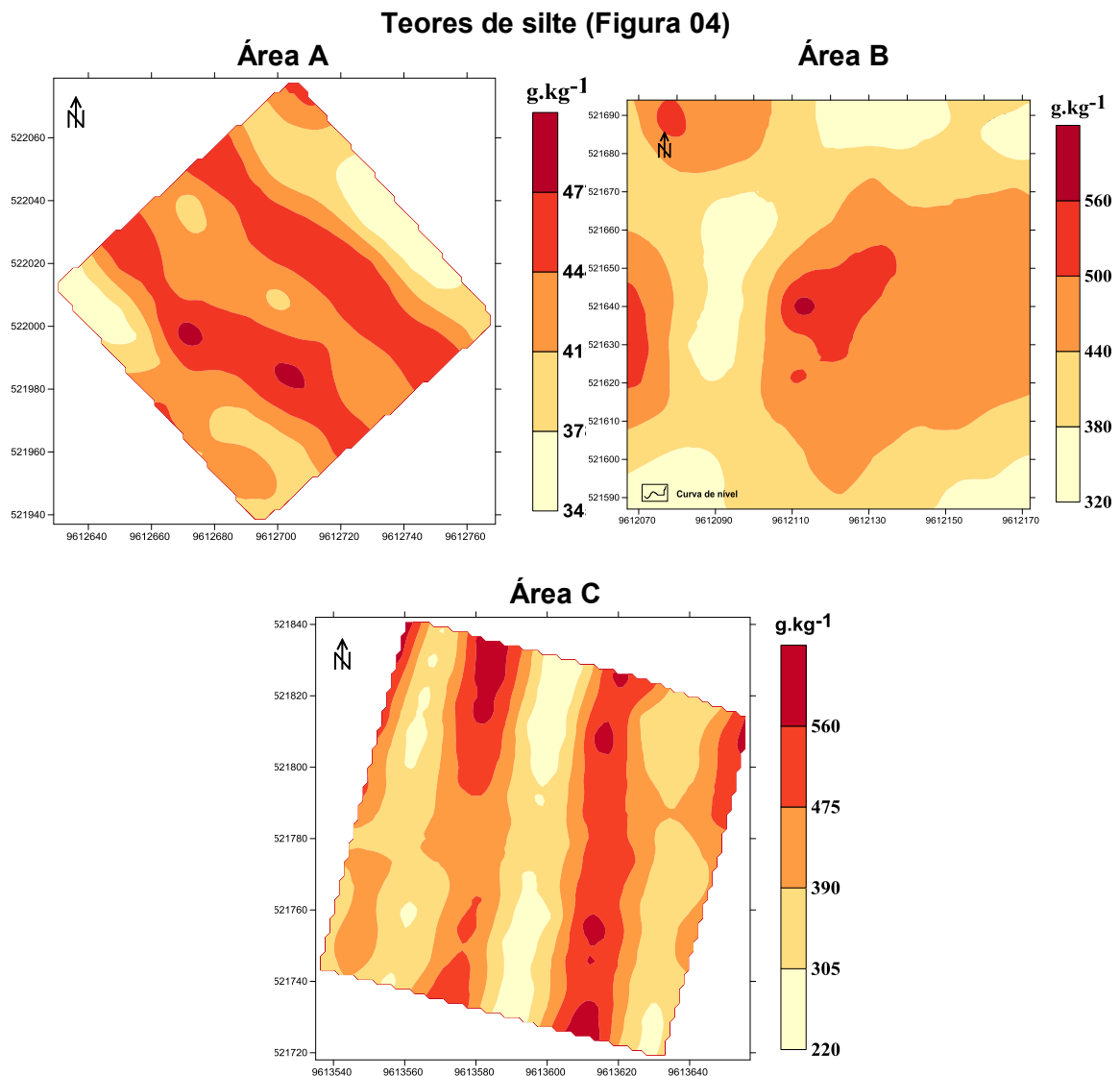


Figura 04: Distribuição espacial dos teores de argila e silte nas áreas A, B e C.

O C orgânico na área B não apresentou dependência espacial (EPP). A não existência de dependência espacial do C orgânico na área B pode ser justificada pela formação de pontos de acúmulo de matéria orgânica pela concentração da vegetação (plantas não utilizadas como forragem) em alguns locais e em outros, perda da cobertura vegetal em decorrência do pisoteio e pastejo excessivos onde há gramíneas. Hiltburnner et al. (2012) constataram que o pastejo do gado conduz ao

processo de heterogeneização da cobertura vegetal e à intensificação da variabilidade espacial dos atributos dos solos.

Para Daryanto et al. (2013), a pecuária tende a aumentar a variabilidade espacial do C orgânico devido ao pastoreio que é conhecido por afetar o padrão espacial dos recursos do solo por meio de processos biológicos como a remoção de biomassa vegetal e deposição de esterco.

A área B foi aquela que apresentou número menor de variáveis com dependência espacial dos atributos (RP, silte, macro e microporosidade), sendo que para elas o GDE foi forte. Esse resultado permite afirmar que as alterações geradas pelo revolvimento da camada arável dos solos nas áreas A e C promovem redução na variabilidade dos atributos físicos do solo, conforme constatação de Santos et al. (2012a) ao analisarem a variabilidade de atributos físicos de um Neossolo Flúvico em Pernambuco.

A RP apresentou dependência espacial forte e baixos valores para SQR nas áreas A e C (Figura 05).

Apesar da RP não ser apresentada como uma forte preocupação no cultivo de arroz inundado, pois até certo ponto a compactação é benéfica, por reduzir perdas de água por percolação, o manejo do solo em condições de elevado teor de umidade resulta na destruição dos macroporos e conseqüentemente no aumento da densidade do solo e resistência do solo à penetração, originando efeitos negativos sobre o desenvolvimento das culturas (Munareto et al., 2010).

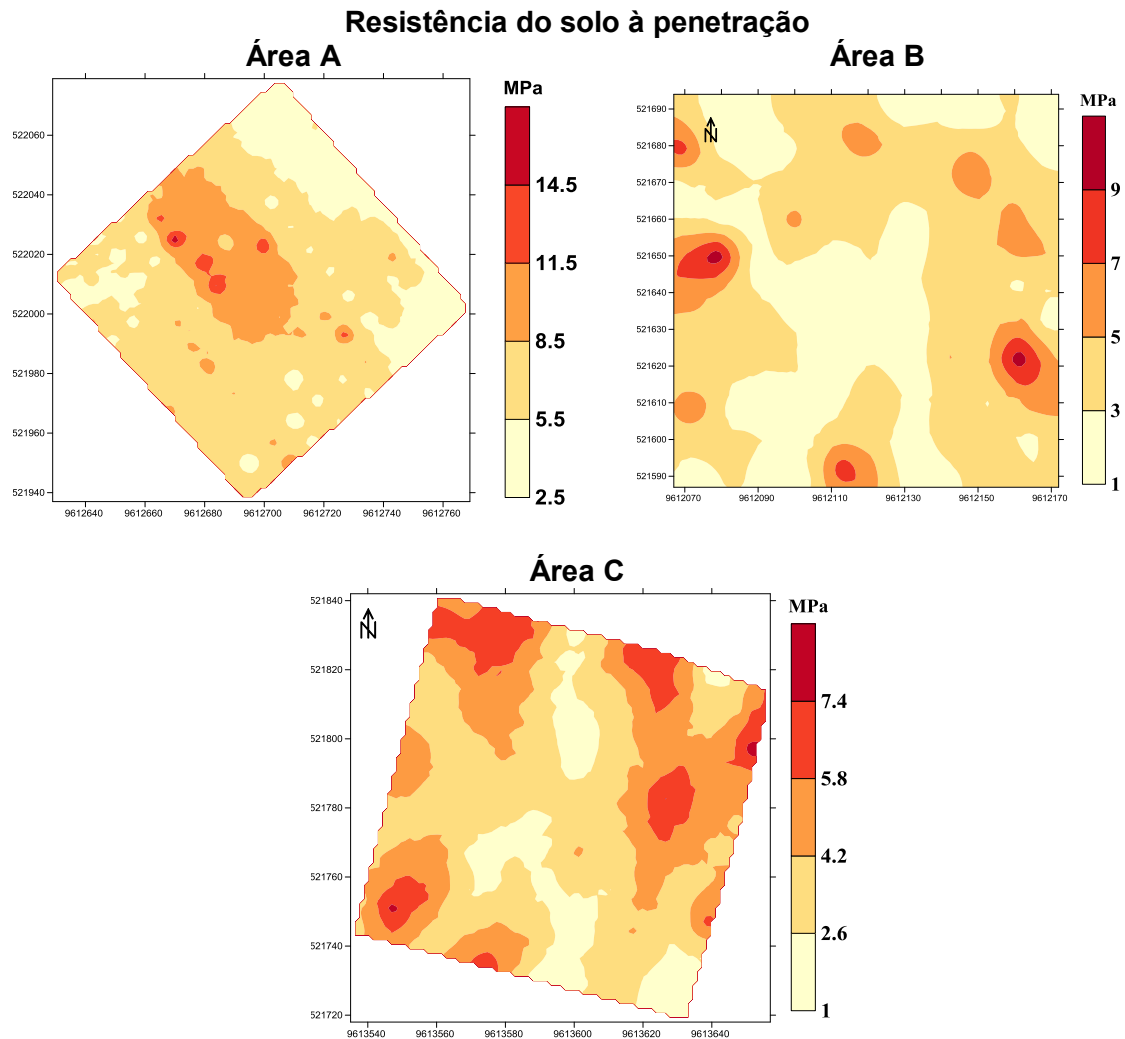
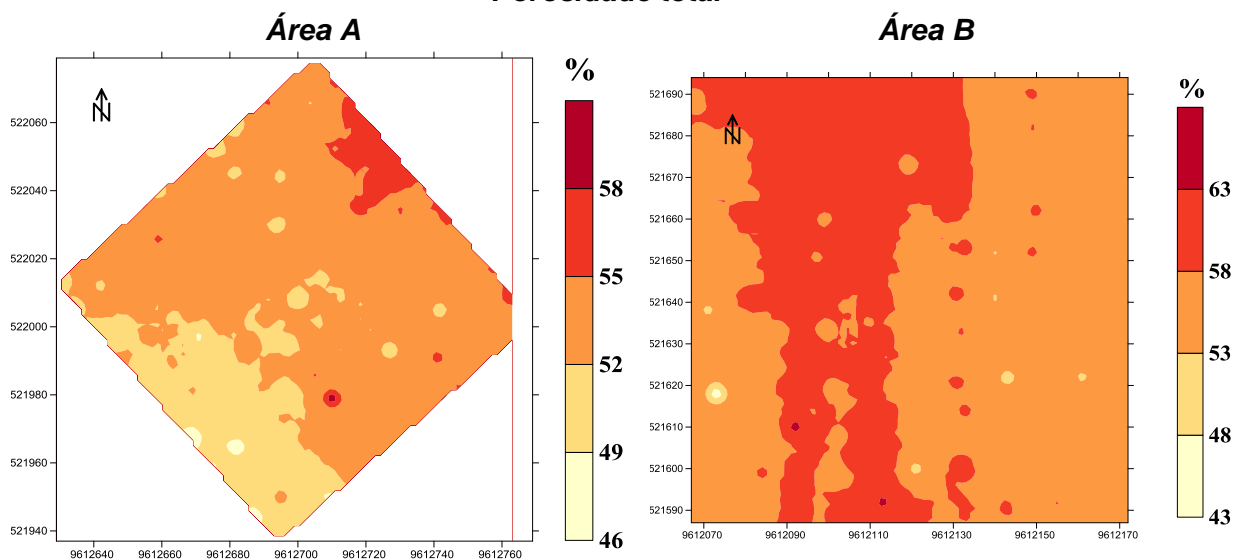


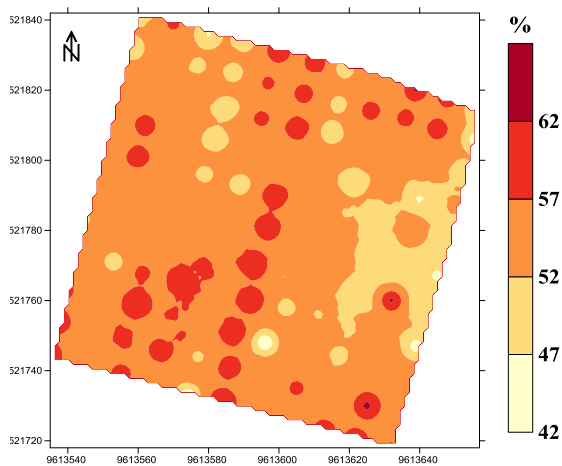
Figura 05: Distribuição espacial da resistência do solo à penetração (RP) nas áreas A, B e C.

Dentre todas as variáveis analisadas, a porosidade total, macro e microporosidade foram aquelas que apresentam dependência espacial maior, menor SQR e maior R^2 nas três áreas (Figura 06).

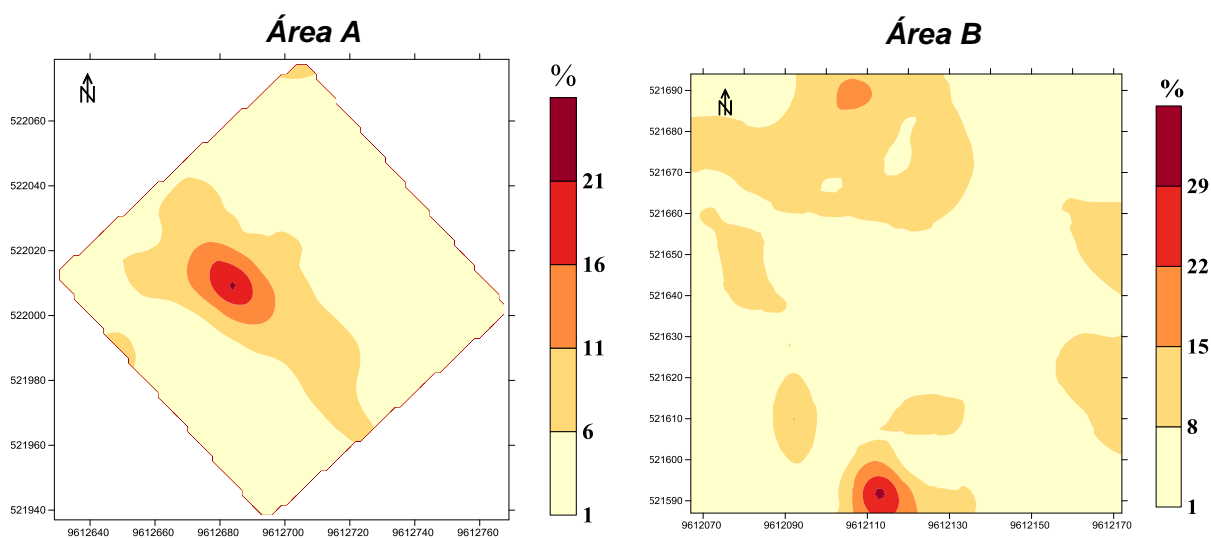
Porosidade total



Área C



Macroporosidade



Continuação: Figura 06

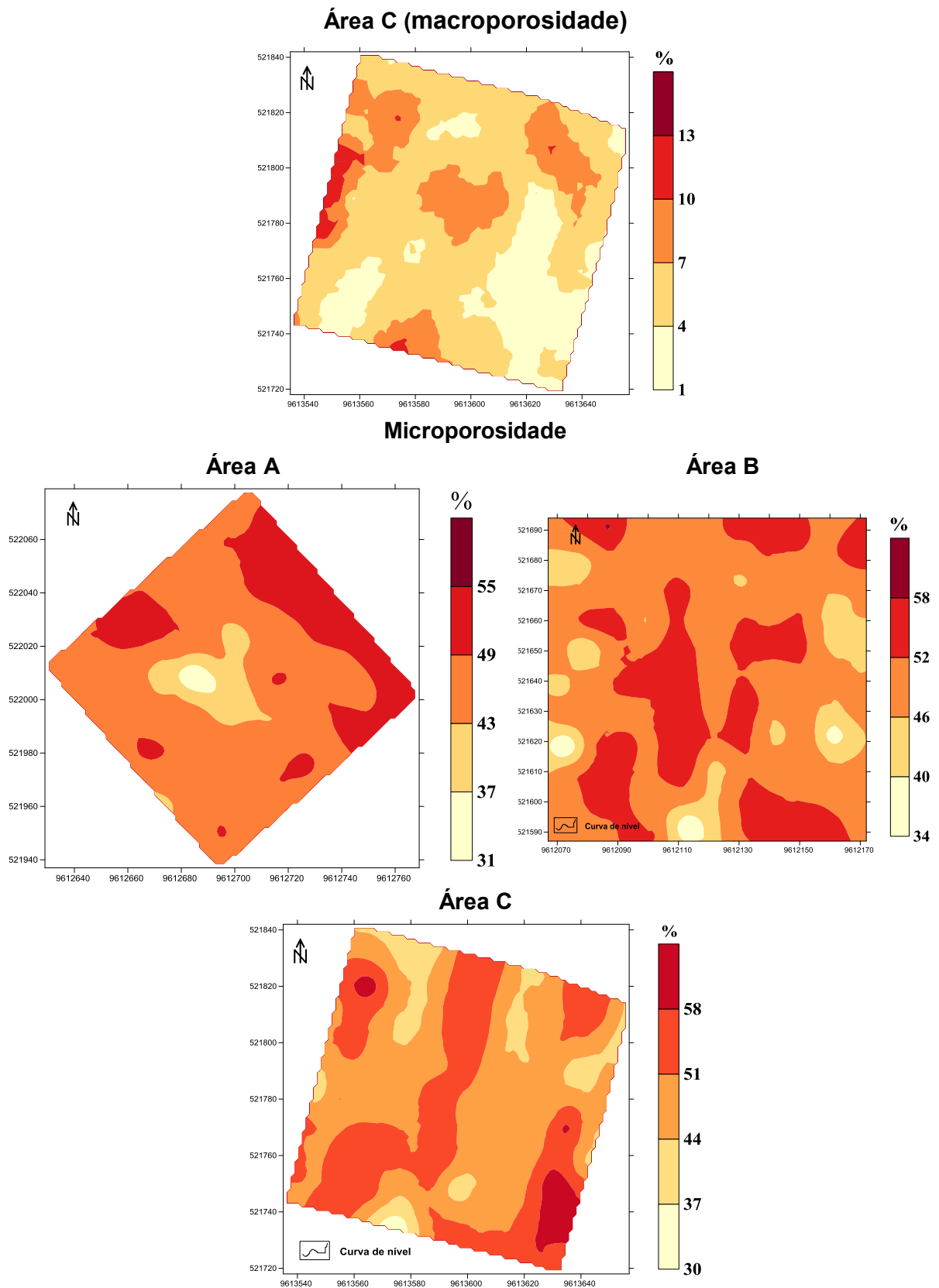


Figura 06: Distribuição espacial da porosidade total, macro e microporosidade nas áreas A, B e C.

Nas áreas A e C em que a mecanização agrícola é desenvolvida, a macroporosidade foi menor, indicando interação negativa com o manejo agrícola. Na área B em que ainda há vegetação nativa, a macroporosidade foi maior e a distribuição espacial dos maiores valores de microporosidade coincidem com as áreas em que há gramíneas (onde o pastoreio é mais intenso), indicando que o pisoteio do gado reduz a quantidade dos macroporos pela desagregação do solo (Hiltburnner et al. 2012).

Para Mion et al. (2012) a porosidade é de grande importância para adoção de um manejo adequado por estar estreitamente ligado à dinâmica do armazenamento e do movimento de solutos e de circulação de gases no interior do solo que são essenciais aos processos bioquímicos desenvolvidos pelas plantas.

CONCLUSÕES

Os atributos do solo apresentaram dependência espacial em todas as áreas estudadas com exceção da areia e carbono orgânico na área B;

Dentre todas as variáveis analisadas, a porosidade total, macro e microporosidade foram aquelas que apresentam maior dependência espacial;

Os teores de argila foram maiores nas regiões de menores cotas altimétricas na área C.

REFERÊNCIAS

ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. *Soil Science Society of America*, Madison, p.123-141, 1996.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; MORAES, A.; MARTÍNEZ, G. B.; ALVARENGA, R. C.; KICHEL, A. N.; FONTANELI, R. S.;

SANTOS, H. P.; FRANCHINI, J. C.; GALENARI, P. R. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.46, n.10, 2011.

BEUTLER, A. N. MUNARETO, J. D.; RAMÃO, C. J.; GALON, L.; DIAS, N. P.; POZZEBON, B. C.; RODRIGUES, L. A. T.; MUNARETO, G. S.; GIACOMELI, R.; RAMOS, P. V. Atributos físicos do solo e produtividade de arroz irrigado em diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.36, p. 1601-1607.

BORGES, J. R.; PAULETO, E. A.; SOUSA, R. O.; PINTO, L. F. S.; LEITZKE, V. W. Resistência do solo à penetração de um Gleissolo submetido a sistemas de cultivo e culturas. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 10, n. 1, p. 83-86, 2004.

CAMARGO, O. A. et al. *Métodos de Análise Química, Mineralógica e Física de Solos do Instituto Agrônomo de Campinas* (Boletim Técnico 106). Campinas, SP: IAC, 2009.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 58, p.1501-1511, 1994.

DARYANTO, S.; ELDRIGDE, D. J.; WANG, L. Ploughing and grazing alter the spatial patterning of surface soils in a shrub-encroached woodland. *Geoderma*, Amsterdam, v. 200-201, p.67-76, 2013. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.006>

CLAESSEN, M. E. C (Org.) *Manual de métodos de análise de solo*. 2^a. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos - EMBRAPA, 1997.

FARIAS FILHO, M. S.; FERRAZ JÚNIOR, A. S. de L. A cultura do arroz em sistema de vazante na Baixada Maranhense, periferia do sudeste da Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v. 39, n. 2, p. 82-91, 2009.

FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A.; SALAH, M.; ELLIS, R. H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. *Soil Use and Management*, Chichester, v. 18, n. 01, p. 01-09, 2002.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. *GS+ Geostatistics for the Environmental Sciences 9.0*. Gamma Design Software, MI, USA, 2008.

GEHRING, C.; MOURA, E. G.; SANTOS, R. R. S.; AGUIAR, A. C. F.; SOUSA, A. M. B.; BODDEY, R. M.. Ecological intensification of rice production in the lowlands of Amazonia. Options for smallholder rice producers. *European Journal Agronomy*, v. 46, p.25-33, 2013.

GOLDEN SOFTWARE INC. *Surfer for windows: release 11.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide*. New York, 2012.

HILTBRUNNER, D.; SCHULZE, S.; HAGEDORN, F.; SCHMIDT, M. W. I.; ZIMMERMANN, S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma*, v. 170, p.369–377, 2012.

ISAAKS, E.H., SRIVASTAVA, M. Spatial continuity measures for probabilistic and deterministic geostatistics. *Mathematical Geology*, Heidelberg, v. 20, p. 313-341, 1988.

KEEN, A.; HALL, N.; SONI, P.; GHOLKAR, M. D.; COOPER, S.; FERDOUS, J. A review of the tractive performance of wheeled tractors and soil management in lowland intensive rice production. *Journal of Terramechanics*, Kidlington, v. 50, p. 45–62, 2013.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2012.08.001>

LIU, L; YAN, Z.; TANG, L.; CAO, W.; WANG, E. ImPacts of climate changes, soil nutrients, variety types and management practices on rice yield in East China: A case study in the Taihu region. *Field Crops Research*, v.149, p. 40–48, 2013a. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.04.022>

LIMA, C. L. R.; PAULETTO, E. A.; GOMES, A. S.; HARTWIG, M. P.; PASSIANOTO, C. C. Compactação de um Planossolo em função de sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Agrociência*, Pelotas, v. 12, n. 2, p. 179-182, 2006.

LORENSI, R. P. *Relações entre atributos do solo e uso de água em arroz irrigado*. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2011. (Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola).

MAPA – Ministério do Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Sistema de Monitoramento Agrometeorológico*. Disponível em: <<http://www.agritempo.gov.br/agroclima/shdescriptor>>. Acesso em: <outubro de 2013>.

MENTGES, M. I.; REICHERT, J. M.; GUBIANI, P. I.; REINERT, D. J.; XAVIER, A. Alterações estruturais e mecânicas de solo de várzea cultivado com arroz irrigado por inundação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, p. 221-231, 2012.

MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. de L.; SILVA, S. F. da; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. de. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012.

MINITAB RELEASE 14.1. *Statistical Software*. US/ Canadá, 2003.

MITCHELL, J.; CHETH, K.; SENG, V.; LOR, B.; OUK, M.; FUKAI, S. Wet cultivation in lowland rice causing excess water problems for the subsequent non-rice crops in the Mekong region. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 152, p. 57–64, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.12.006>

MUNARETO, J. D.; BEUTLER, A. N.; RAMÃO, C. J.; DIAS, N. P.; RAMOS, P. V.; POZZEBON, B. C.; ALBERTO, C. M.; HERNANDES, G. C. Atributos físicos do solo e produtividade de arroz irrigado por inundação no sistema plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.45, n.12, p.1499-1506, 2010.

OLIVEIRA, I. A. de; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E. de; MARQUES JÚNIOR, J.; NASCIMENTO, E. P. do. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, p. 1103-1112, 2013.

RAIJ, B. et al. *Análise química do solo para fins de fertilidade*. Campinas, SP: Fundação Cargill, 1987.

REICHERT, J. M.; DARIVA, T. A.; REINERT, D. J.; SILVA, V. R. Variabilidade espacial de Planossolo e produtividade de soja em várzea sistematizada: análise

geoestatística e análise de regressão. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.38, n.4, jul, 2008.

REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado. In: CARLESSO, R.; PETRY, M. T.; ROSA, G. M.; CERETTA, C. A. (ed.). *Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul*. Santa Maria: UFSM, 2001, 165p.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O. R.; LLANILLO, R. F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. *Semina: Ciências Agrícolas*, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

SANTOS, K. S.; MONTENEGRO, A. A. A.; ALMEIDA, B. G.; MONTENEGRO, S. M. G.; ANDRADE, T. S.; FONTES JÚNIOR, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.8, p.828–835, 2012a.

SANTOS, O. J. GONTIJO, I.; NICOLE, L. R. Variabilidade espacial de cálcio, magnésio, fósforo, potássio no solo e produtividade da pimenta-do-reino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.16, n.10, p.1062–1068, 2012b.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3 ed. revista e ampliada Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande – PB, v.17, n.12, p.1301–1309, 2013.

TORRES, J. L. R.; RODRIGUES JÚNIOR, D. J.; VIEIRA, D. M. DA S. alterações nos atributos físicos do solo em função da irrigação e do pastejo rotacionado. *Irriga*, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 558-571, 2013.

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, Hoboken, v. 38, p. 55-98, 1948.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy*, Maryland Heights, v. 38, p. 45-94, 1985.

VIAL, L. K.; LEFROY, R. D. B.; FUKAI, S. Effects of hardpan disruption on irrigated dry-season maize and on subsequent wet-season lowland rice in Lao PDR. *Field Crops Research*, Amsterdam, v. 152, p. 65-78, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.06.016>

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

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). *Applications of soil physics*. New York: Academic, 1980.

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

CAPÍTULO 3 – Variabilidade espacial dos atributos químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no Município de Arari - MA

RESUMO

Os atributos químicos dos solos possuem variabilidade espacial natural que pode ser alterada pelo manejo. O entendimento do padrão da distribuição espacial desses atributos é questão-chave a ser considerada para o correto uso dos solos. O presente trabalho analisa a variabilidade espacial dos atributos químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no município de Arari, MA. A pesquisa foi desenvolvida em uma propriedade rural no município de Arari, estado do Maranhão. A coleta de amostras foi realizada em três áreas cultivadas com: Área A – arroz irrigado por inundação e pecuária extensiva; Área B - pecuária extensiva em vegetação nativa e; Área C - arroz irrigado por inundação. A amostragem do solo compôs um gride de 121 pontos para cada área em malha regular de 10 x 10 m, totalizando 363 amostras. As variáveis analisadas por estatística descritiva e geoestatística nas três áreas foram: pH (CaCl₂), C orgânico, K⁺, Ca⁺², Mg⁺², P disponível, S, Na⁺, Al³⁺, H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases), T (capacidade de troca catiônica), V% (saturação por bases) e m% (saturação por alumínio). A área B foi a mais heterogênea quimicamente, indicando que a pecuária altera o padrão de distribuição espacial dos atributos do solo. As áreas A e C foram as mais homogêneas, demonstrando que a mecanização, correção e adubação dos solos reduziram a variabilidade espacial dos seus atributos químicos.

PALAVRAS-CHAVE: Rizicultura; Pecuária; Geoestatística; Solos hidromórficos.

CHAPTER 3: Spatial variability of the chemical attributes of a typical Melanic Gleisol Alitic in three areas in the Municipality of Arari - MA

ABSTRACT

The chemical attributes of soils have natural spatial variability that can be changed by management. Understanding the spatial distribution pattern of these attributes is the key issue to be considered for proper soil use. This study analyzes the spatial variability of chemical attributes of an Gleysoil Melanic Alitic typical in three areas in the municipality of Arari, MA . The research was carried out on a rural property in the municipality of Arari, state of Maranhão. The sample collection was performed in three growing areas: Area A - irrigated rice for flood and extensive livestock; Area B - extensive ranching in native vegetation and; Area C - irrigated rice for flood. Soil sampling composed a gride of 121 points for each area in regular grid of 10 x 10 m, totaling 363 samples. The variables analyzed by descriptive statistics and geostatistics in the three areas were: pH (CaCl₂), organic C, K +, Ca +₂, Mg +₂, available P, S, Na +, Al 3 +, H + Al (potential acidity), SB (sum of bases), T (cation exchange capacity), V% (base saturation) in% (aluminum saturation). The area B was the most chemically heterogeneous, indicating that livestock alter the spatial distribution of soil attributes. The areas A and C were the most homogeneous, demonstrating that mechanization, fertilization and soil correction reduced the spatial variability of its chemical attributes.

KEYWORDS: rice farming; livestock; geostatistics; hidromorfic soil.

INTRODUÇÃO

Os atributos dos solos mantém relação direta com as condições ambientais, apresentando grande variabilidade espacial o que é um requisito a ser considerado

no planejamento do manejo adequado, uso da terra e às medidas de conservação (Tesfahunegn et al. 2011).

A variabilidade das atributos do solo tem um efeito profundo, mas muitas vezes não reconhecido, sobre os aspectos econômicos e ambientais da produção agrícola (Umali et al. 2012). Teores naturais de nutrientes do solo e seus atributos físicos são influenciados por processos e mecanismos pedogenéticos que são controlados pelo clima, material de origem, topografia, tempo e organismos (Dalmolin & Caten 2012).

Além das variáveis ambientais, o uso da terra desempenha um papel dinâmico na regulação dos padrões espaciais dos atributos dos solos, já que o referido uso pode mudar com mais frequência (Liu et al. 2013), alterando aquelas atributos dos solos que são mais instáveis, como as químicas (Araújo et al. 2012).

A agricultura pode afetar a variabilidade dos atributos dos solos, interferindo no acúmulo ou queima de material orgânico (Oliveira et al. 2013), na modificação do pH e teores de macro e micronutrientes. Cavalcante et al. (2007) informam que mesmo quando há incorporação de adubos e corretivos na camada superficial do solo, buscando a homogeneização, isso não ocorre integralmente pois o manejo pode tornar ainda mais heterogêneos os atributos dos solos. Porém, Dalchiavon et al. (2012) afirmam que, dependendo das operações agrícolas, os atributos podem ter sua heterogeneidade diminuída. Motomiya et al. (2011) detectaram alta dependência espacial e baixa heterogeneidade em atributos químicos como pH e CTC em solos manejados com cotonicultura, atribuindo tal característica à correção e adubação dos solos.

Já o pastoreio pode heterogeneizar o padrão espacial dos recursos do solo por meio de processos biológicos mediados pela remoção de biomassa vegetal,

favorecimento da erosão e deposição de esterco (fonte de diversos nutrientes na superfície). Assim, em algumas áreas há a formação de “ilhas férteis” pela concentração de recursos em torno de árvores e arbustos e em outras, o empobrecimento acentuado pelo sobrepastoreio e erosão (Daryanto et al. 2013).

A variabilidade espacial das atributos do solo, muitas vezes ampla e complexa, é analisada a partir de um número limitado de localizações, que são muitas vezes distribuídas escassamente, sendo necessário que qualquer descrição quantitativa das atributos do solo dependa de estimativas (Watt & Palmer 2012). Assim, a análise de correlação simples por si só é insuficiente para análise dos atributos, o que exige uma técnica complementar (Camargo et al. 2012). Neste caso, a geoestatística, que reconhece a natureza contínua dos solos e é capaz de detectar a variação aleatória de uma variável no espaço através de modelagem da correlação espacial, muitas vezes presentes na paisagem (Watt & Palmer 2012), tem se mostrado uma técnica muito útil.

Em solos hidromórficos, como os Gleissolos, cujo manejo já é dificultado pelas suas características físicas, a sua utilização a partir de atividades como a pecuária extensiva e a rizicultura intensiva (ou a combinação delas) em geral provocam alterações em seus atributos físicos e químicos (Silva & Ranno 2005), podendo haver em pequeno espaço grande heterogeneidade. Desse modo, o manejo desses solos é complexo, exigindo que haja o entendimento da variação espacial dos seus atributos químicos.

Neste sentido, este trabalho teve por objetivo analisar a variabilidade dos atributos químicos de um Gleissolo Melânico Alítico típico sob três áreas no município de Arari, Estado do Maranhão.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida em uma propriedade rural situada no oeste do município de Arari, Estado do Maranhão (Figura 01). O município em questão possui clima do tipo B1WA'a' pela classificação de Thornthwaite (1948), sendo úmido com um período de deficiência hídrica entre os meses de julho a novembro, com precipitação pluviométrica média de 1333 mm ano^{-1} e elevada amplitude nos últimos 14 anos, com o máximo das chuvas situado no mês de março. As temperaturas variam entre 24° e 35° C e ocasionam grande perda de água aos solos, com forte influência na pedogênese. O relevo local é plano, com poucas variações e uma altitude média de 6 m, o que submete os solos ao hidromorfismo.

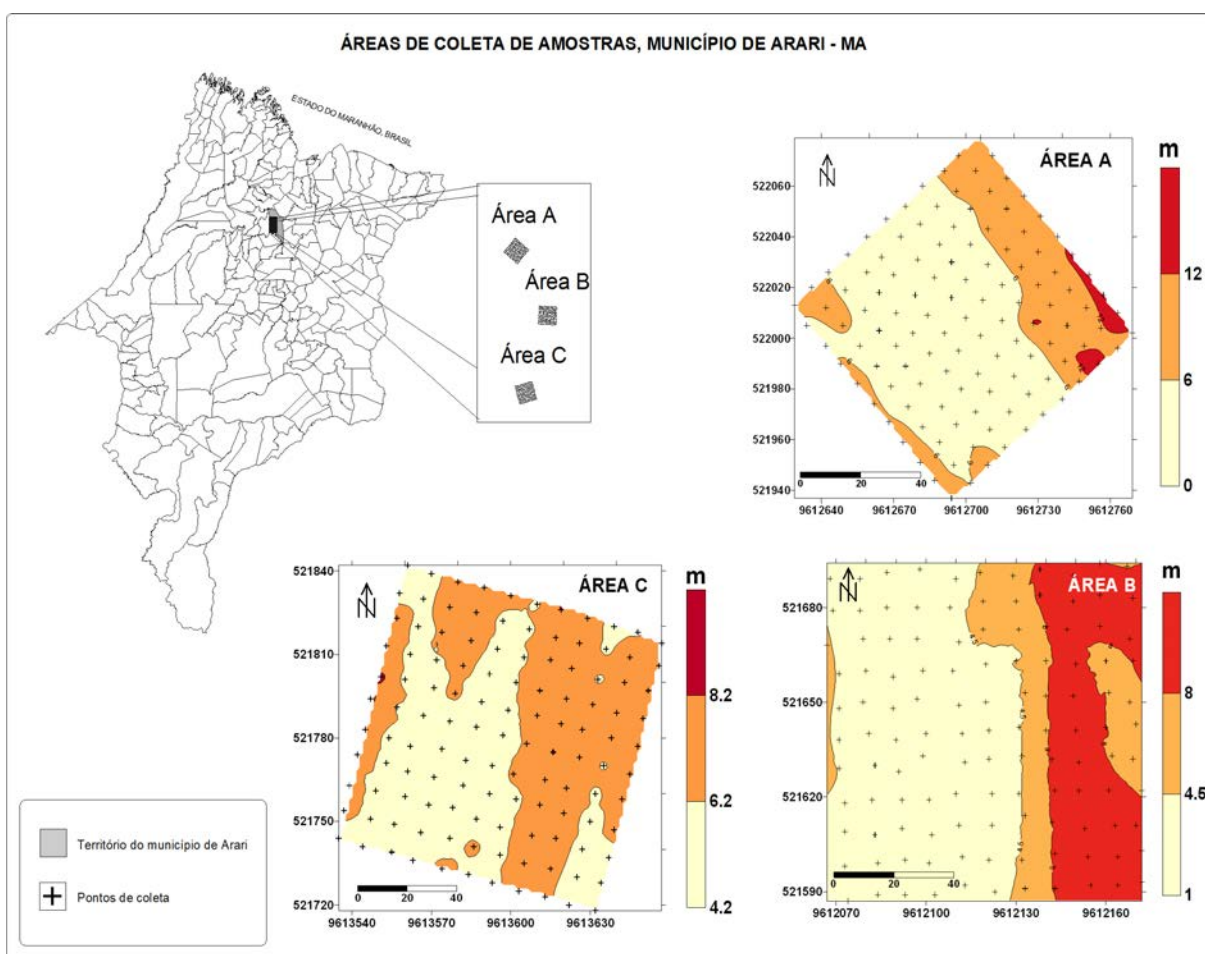


Figura 01: Localização das áreas de estudo, no município de Arari.

O solo das áreas em análise foi classificado como Gleissolo Melânico Alítico típico, textura argilosa, A proeminente (GMal). Para Gering et al. (2013) os solos da área são formados, predominantemente, por silte e argila montmoriloníticos, com valores médios de pH 4.2 (CaCl₂), C orgânico 8.4 g kg⁻¹, P (resina) 7 mg dm⁻³, K⁺ 4.2, Ca²⁺ 30 e Mg²⁺ 41, acidez trocável 142 e CTC de 217 mmol_c.dm⁻³ e saturação por bases de 35%, valores semelhantes aos encontrados por Valladares (2009) em amostras de solos coletadas na mesma região. Os teores médios de argila, silte e areia para os solos locais são de 549, 432 e 19 g kg⁻¹, respectivamente.

Foram coletadas amostras de solos deformadas na camada 0-0,20 m cujos pontos foram georreferenciados com o uso de receptor de GPS (Trimble, modelo Juno) em malha regular de 10 x 10 m em três áreas (A, B e C) equivalentes a um hectare cada uma, totalizando 121 pontos em cada gride e um total de 363.

Cada área possui características pedogenéticas similares e é submetida a manejo diferenciado: a área A (coordenadas 3° 30' 17,24" S e 44° 48' 8,32" O) é cultivada com arroz irrigado por inundação no período de estiagem e em sequeiro no período chuvoso nos últimos seis anos e integra a bovinocultura extensiva no pós-colheita dos dois ciclos produtivos para aproveitamento da palhada da cultura como forragem; a área B (coordenadas 3° 30' 38,41" S e 44° 48' 14,76" O) possui remanescente de vegetação nativa típica de várzea e é utilizada com bovinocultura extensiva e; a área C (coordenadas 3° 29' 46,79" S e 44° 48' 14,76" O) é cultivada com arroz irrigado por inundação (período chuvoso) e em sequeiro (período de estiagem) com histórico de uso de 11 anos.

As amostras deformadas foram coletadas no mês de julho de 2013, antes do preparo do solo para cultivo de arroz irrigado nas áreas A e C e após uso por pecuária extensiva nas áreas A e B.

Os dados foram avaliados por estatística descritiva a partir da média, mediana, mínimo, máximo, coeficiente de variação e desvio padrão, uma vez que estes parâmetros permitem uma análise prévia da heterogeneidade existente nos dados (Frogbrook et al. 2002). Nesta etapa, os dados foram analisados por meio do software Minitab Release 14.1 (Minitab Inc. 2003).

A distribuição espacial dos dados foi analisada por geoestatística, técnica que permite detectar a estrutura espacial dos atributos dos solos, mediante definição do efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (a) e parâmetros derivados (Amirinejad 2011) a partir do cálculo da semivariância dos dados. Para os modelos exponencial e gaussiano, o alcance prático foi calculado por $a/3$ e $a/\sqrt{3}$ (Seidel & Oliveira 2013), respectivamente, sendo a o alcance obtido na modelagem do semivariograma no software GS+. A estimativa ou previsão dos atributos em locais não amostrados foi realizada por krigagem ordinária.

Para determinação do modelo de correlação espacial, fez-se o cálculo experimental dessa correlação (semivariograma), utilizando-se os dados dos pontos amostrados e ajustando-se posteriormente um modelo teórico permissível (Apêndice 02). Isso foi feito, porque não se pode definir inicialmente a covariância ou a semivariância para variáveis regionalizadas que tem a possibilidade infinita de dispersão (Yamamoto & Landim 2013).

Sob a hipótese intrínseca, a dependência espacial entre as amostras foi estimada pelo semivariograma experimental (Vieira et al. 1981), segundo a Equação 1.

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

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 gráfico de $\gamma(h)$ com os valores correspondentes de h (semivariograma) é uma função do vetor h .

Os modelos teóricos para ajuste do semivariograma adotados foram o esférico (Equação 2), exponencial (Equação 3), gaussiano (Equação 4) e linear (Equação 5). Quando houve o extremo da aleatoriedade, chamado efeito pepita puro – EPP (Yamamoto & Landim 2013), os dados não foram espacializados em mapas.

$$\hat{\gamma}(h) = \begin{cases} C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & 0 < h \leq a \\ C_0 + C_1, & 0 \geq a \end{cases} \quad (2)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right) \right] \quad (3)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp \left(-\frac{h}{a} \right)^2 \right] \quad (4)$$

$$\hat{\gamma}(h) = C_0 \left[h \left(\frac{C_1}{a} \right) \right] \quad (5)$$

Em que: C_0 é o efeito pepita, C_1 é a contribuição, $C_0 + C_1$ é o patamar, h é a distância de separação e a é o alcance do semivariograma.

A decisão pelo melhor modelo baseou-se na menor soma do quadrado dos resíduos (SQR), maior coeficiente de determinação (R^2) e grau de dependência espacial – GDE e nos valores dos coeficientes da validação cruzada.

O grau de dependência espacial (GDE) das variáveis em estudo foi avaliado segundo a classificação de Cambardella et al. (1994), calculado por $C_0/(C_0+C)$ e dado em percentual.

Os semivariogramas, ajustes aos modelos e validação cruzada foram feitos no GS+ 9.0 (Gamma Design Software 2008), sendo a espacialização das variáveis realizada no Surfer 11 (Golden Software Inc. 2012).

As variáveis analisadas por estatística descritiva e geoestatística nas três áreas foram pH (CaCl_2), C orgânico, K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , P disponível, S, Na^+ , Al^{3+} , H+Al (acidez potencial), SB (soma de bases), T (capacidade de troca catiônica em pH igual a 7,0), V% (saturação por bases) e m% (saturação por alumínio). O pH foi determinado em solução de CaCl_2 ; Ca^{+2} , Mg^{+2} e Al^{3+} foram extraídos com solução de KCl 1 mol L^{-1} . O Al^{3+} foi quantificado com base padronizada, enquanto que Ca^{2+} e Mg^{2+} foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. K^+ e Na foram extraídos pelo método Mehlich-1 (HCl 0,05 mol L^{-1} + H_2SO_4) e P extraído por resina trocadora de íons e determinado por colorimetria. Na determinação do Na^+ e K^+ utilizou-se fotometria de chama. A acidez potencial (H + Al) foi extraída em solução de acetato de Ca 1 mol L^{-1} , a pH 7.0, e quantificada com base padronizada (Claessen 1997). A partir dos resultados obtidos pela análise do complexo sortivo, foram calculados valores para SB, T, V% e m%.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados obtidos demonstraram variabilidade média em função da análise do CV (Tabela 01), parâmetro que permite compreender parcialmente a variabilidade espacial dos dados (Camargo et al. 2012).

Tabela 01: Estatística descritiva e teste de média para os atributos de um Gleissolo Melânico Alítico típico (profundidade 0-0,20 m) sob três áreas em Arari, MA

Variável	Unidade	Média	Mediana	DP	CV	Mínimo	Máximo	IC ⁽¹⁾	
Área A									
pH	-	4,2	4,1	0,2	4,1	3,9	4,7	4,1-4,2	
C orgânico	g dm ⁻³	10,7	10,9	2,8	26,3	3,8	19,0	10,2-11,2	
P	mg dm ⁻³	6,7	6,5	2,0	29,9	2,2	13,7	6,4-7,1	
S	mg dm ⁻³	179,3	158,8	99,7	55,6	31,2	610,2	161,4-197,2	
Na	-----mmol _c dm ⁻³ -----	15,3	14,3	6,3	40,8	5,1	30,7	14,2-16,5	
Ca		45,3	43,2	17,1	37,9	15,8	90,2	42,2-48,3	
Mg		20,8	21,4	3,2	15,4	10,6	25,7	20,2-21,3	
K		2,4	2,4	0,9	38,5	0,5	6,5	2,2-2,5	
Al		22,9	19,4	14,1	61,7	6,8	88,2	20,4-25,5	
H+Al		160,0	146,3	60,6	37,8	50,0	318,9	149,1-170,9	
SB		83,8	82,1	23,8	28,4	40,6	145,9	79,5-88,1	
T		243,7	238,0	49,3	20,2	152,6	388,5	234,9-252,6	
V%		%	36,6	35,1	13,8	37,9	13,1	73,1	34,1-39,1
m%		%	21,9	18,9	12,3	55,8	5,1	60,0	19,7-24,2
Área B									
pH	-	3,9	3,9	0,2	4,5	3,48	4,6	3,9-4,0	
C orgânico	g dm ⁻³	6,7	6,7	0,3	4,5	5,9	7,7	6,6-6,7	
P	mg dm ⁻³	8,8	8,6	2,5	28,2	5,00	26,0	8,3-9,2	
S	mg dm ⁻³	160,2	136,0	109,7	68,5	25,97	535,3	140,4-179,9	
Na	-----mmol _c dm ⁻³ -----	7,4	6,9	2,4	32,0	3,51	17,1	7,0-7,8	
Ca		30,7	30,2	12,1	39,3	12,00	117,1	28,5-33,0	
Mg		17,1	18,1	4,0	23,6	4,88	24,7	16,4-17,8	
K		2,4	2,5	0,7	29,9	0,88	4,0	2,2-2,5	
Al		27,4	25,9	12,9	46,9	3,90	79,5	25,1-29,7	
H+Al		195,2	199,0	75,8	38,9	53,80	358,0	181,5-208,9	
SB		57,6	58,6	16,6	28,8	24,57	160,5	54,7-60,6	
T		252,8	257,1	68,8	27,2	139,41	420,0	240,5-265,2	
V%		%	25,8	25,3	11,5	44,5	7,79	64,7	23,7-27,8
m%		%	32,2	29,9	13,1	40,5	3,90	66,2	29,9-34,6
Área C									
pH	-	4,1	4,0	0,2	3,9	3,76	5,0	4,0-4,1	
C orgânico	g dm ⁻³	14,3	14,4	3,8	26,3	6,12	22,9	13,6-15,0	
P	mg dm ⁻³	9,7	9,1	1,9	19,9	5,00	19,9	9,3-10,0	
S	mg dm ⁻³	116,9	80,0	99,2	84,9	20,17	563,2	99,1-134,8	
Na	-----mmol _c dm ⁻³ -----	8,1	7,4	3,0	36,5	3,90	22,3	7,6-8,6	
Ca		35,0	33,8	7,3	20,9	19,66	59,7	33,7-36,3	
Mg		19,8	19,8	1,9	9,5	13,22	24,7	19,4-20,1	
K		2,9	2,9	0,4	15,5	1,13	4,0	2,8-2,9	
Al		18,4	16,8	9,3	50,5	3,90	90,2	16,7-20,1	
H+Al		138,6	135,9	47,9	34,5	28,60	339,7	130-147,2	
SB		65,8	63,8	10,6	16,2	47,54	103,8	63,9-67,7	
T		204,4	200,9	44,2	21,6	124,07	409,8	196,5-252,6	
V%		%	34,1	32,1	10,5	30,9	17,11	76,9	32,2-36,0
m%		%	21,6	20,9	6,7	30,9	3,91	47,7	20,4-22,8

IC – intervalo de confiança a 95%. DP - desvio padrão. CV - coeficiente de variação. m% - saturação por alumínio. V% - saturação por bases. T - capacidade de troca catiônica.

A heterogeneidade dos dados, com base nos valores de CV, segundo critérios estabelecidos por Warrick & Nielsen (1980), foi considerada média

(CV<12%) para a maioria das variáveis. O pH e Mg foram os atributos menos variáveis, apresentando menores valores do CV devido aos efeitos das operações de correção do solo. Estes resultados são coincidentes com os obtidos por Dalchiavon et al. (2012) que afirmam que em áreas cultivadas mecanicamente, o pH apresenta baixa variabilidade. A baixa variação de valores para o pH, também deve-se ao fato que os valores desse atributo possuem uma tendência à distribuição lognormal (Dalchiavon et al. 2012).

O S nas áreas B e C foi o atributo com CV considerado alto, indicando grande variação em torno da média e que há uma amplitude muito elevada entre os valores mínimos e máximos. Porém, atributos como o Al, Na e m% tiveram valores próximos do limite (62%) apontado por Warrick & Nielsen (1980) para classificá-los como de alta variabilidade, indicando também grandes amplitudes entre valores mínimos e máximos.

A análise de médias indicou que os valores da maior parte dos atributos dos solos se diferenciaram estatisticamente de uma área para outra, o que pode estar indicando a influência do manejo na referida variação. Os teores de S (áreas A e B), K (áreas A e B), Na e valores de V%, m%) e T nas áreas A e C não apresentaram diferença estatística significativa entre as áreas pela análise do intervalo de confiança.

Os valores de médias e medianas (Tabela 01) obtidos foram próximos indicando que os dados possuem uma distribuição normal, fato também constatado por Oliveira et al. (2013). É válido ressaltar que a normalidade dos dados não é exigência da geoestatística, mas permite maior precisão na estimativa de valores que é feita com base em valores médios (Cressie 1991).

A área que mostrou valores mais heterogêneos foi a B, o que pode ter relação com o pisoteio do gado bovino durante grande parte do ano que ocasiona alterações pedológicas severas (Hiltbrunner et al. 2012). A área C teve valores mais homogêneos, indicando que as operações agrícolas de correção e adubação desenvolvidas nos solos locais tornaram alguns atributos químicos mais homogêneos e incrementaram os teores de alguns nutrientes nos solos (K, P, Ca e Mg) e valores de SB e pH quando comparados àqueles encontrados na área B, resultado semelhante obtido por Dalchiavon et al. (2012), que ao analisarem a variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. Esse resultado contraria os resultados de autores como Santos et al. (2010) e Watt & Palmer (2012) que afirmam que o manejo torna a distribuição espacial dos atributos químicos mais heterogêneos.

O comportamento mais homogêneo, detectado pela menor amplitude de valores na área C, tem relação com o efeito combinado das operações de preparo com a topografia relativamente plana e da água na solubilização, dissolução e distribuição de fertilizantes na área.

Do ponto de vista da análise geoestatística (Tabela 02), a pequena dependência espacial dos atributos químicos da área B se confirmou, não sendo possível mapear os teores ou valores dos atributos analisados, a exceção dos teores de S e Na.

A variabilidade espacial da maioria dos atributos do solo na área B (pH, C, P, Ca, Mg, Al, T e V%) se manifesta num raio inferior a 10 m, distância estabelecida entre um ponto e outro de amostragem, não sendo possível mapeá-los. Esta constatação revela que o alcance da semivariância para os atributos que apresentaram EPP é menor que a distância entre os pontos amostrados (Vieira et al.

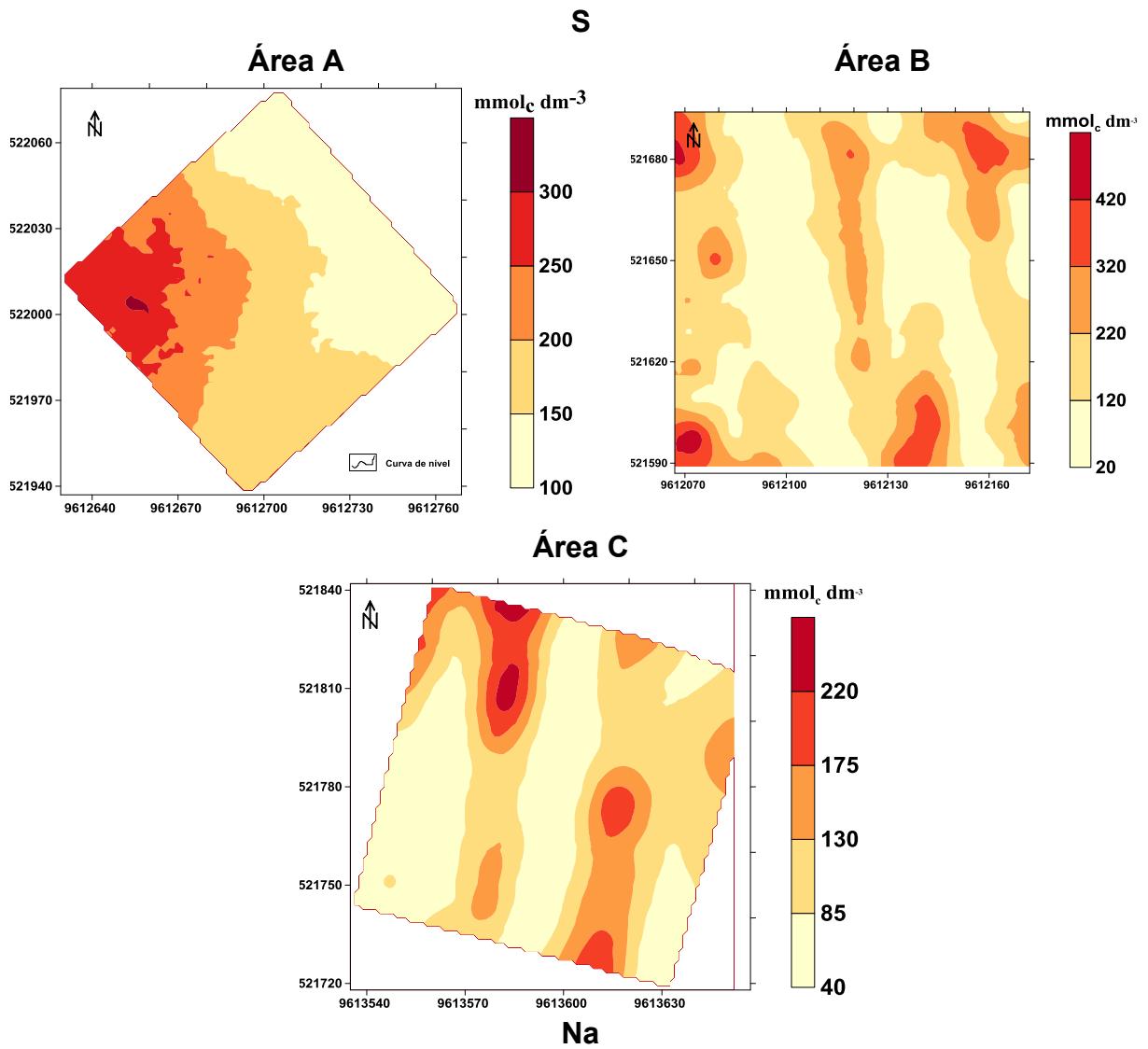
1981). Desse modo, para detecção da variabilidade dos atributos químicos do solo na área B, será necessário fazer levantamento com amostragem em pontos distanciados entre si por menos de 10 m.

Tabela 02: Modelos e parâmetros ajustados aos semivariogramas experimentais dos atributos físicos do solo analisado nas áreas A, B e C (profundidade 0-0,20 m)

Atributo	Área	Modelo	C ₀	C ₀ +C	A	R ²	SQR	GDE	Classe	b	a
pH	A*	Gaussiano	0	0,03	12,5	0,86	6,61E-5	0,00	Forte	0,94	0,26
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C*	Esférico	0	0,03	26,50	0,97	5,70E-6	0,00	Forte	0,72	1,33
C orgânico	A*	Exponencial	0,01	19,16	18,40	0,73	70,80	0,10	Forte	0,95	1,09
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Exponencial	0,10	38,22	11,30	0,95	16,20	0,30	Forte	0,98	0,66
P	A*	Esférico	0,01	3,47	31,00	0,82	1,88	0,30	Forte	1,01	-0,07
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C*	Esférico	0	3,26	22,50	0,85	0,45	0,00	Forte	0,68	3,15
S	A*	Linear	7270,80	10532,8	67,54	0,51	7,42E+3	69,00	Moderada	0,91	16,53
	B*	Esférico	10,00	102E+4	19,90	0,87	3,51E+6	0,10	Forte	0,90	16,88
	C*	Esférico	2610,00	5907,00	22,00	0,62	1,21E+6	44,20	Moderada	1,18	-17,70
Na	A*	Exponencial	14,13	44,18	55,20	0,91	28,10	32,00	Moderada	0,86	1,92
	B	Esférico	0,01	3,72	22,30	0,79	1,53	0,30	Forte	0,44	4,07
	C	Esférico	0	8,36	15,50	0,84	0,75	0,00	Forte	1,05	-0,36
Ca	A*	Esférico	55,30	271,50	23,30	0,86	1733,00	20,40	Forte	1,13	1,32
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C*	Esférico	0,10	48,90	20,00	0,81	111,00	0,20	Forte	0,81	6,67
Mg	A	Exponencial	3,18	13,22	64,40	0,96	1,09	24,10	Forte	1,07	1,45
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Exponencial	0,12	3,43	12,30	0,86	0,44	3,50	Forte	0,98	0,30
K	A	Exponencial	0,05	0,74	21,80	0,89	0,02	6,80	Forte	0,94	0,15
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Al	A	Exponencial	103,20	271,80	208,90	0,68	795,00	38,00	Moderada	0,93	1,83
	B	Esférico	0,10	150,00	11,40	0,18	150,40	0,10	Forte	0,62	10,68
	C	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H+Al	A*	Exponencial	10,00	3290,00	10,93	0,80	1,81E+03	0,30	Forte	1,02	-2,47
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Esférico	1470,00	3450,00	185,10	0,85	1,26E+4	42,60	Moderada	0,97	4,24
SB	A*	Exponencial	1,00	517,00	15,70	0,86	14,24E+3	0,20	Forte	1,06	-5,58
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Esférico	0,10	106,80	20,20	0,85	458,00	0,10	Forte	0,86	9,31
T	A*	Esférico	1,00	2090,00	27,70	0,80	2,87E+5	0,00	Forte	0,95	12,09
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Esférico	1133,00	2930,00	176,20	0,91	6,71E+4	38,70	Moderada	0,94	10,96
V%	A*	Esférico	0,10	160,40	28,80	0,78	3694,00	0,10	Forte	1,04	-1,76
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	Esférico	8,40	114,60	22,30	0,92	196,00	7,30	Forte	1,00	-0,11
m%	A*	Exponencial	65,40	191,90	64,30	0,82	1025,00	34,10	Moderada	1,07	0,06
	B	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	EPP	-	-	-	-	-	-	-	-	-

C₀ - Efeito pepita; C₀+ C₁- Patamar; GDE – grau de dependência espacial [$100 * C_0 / (C_0 + C)$], sendo forte ($\leq 25\%$), moderada ($25\% \leq GDE \leq 75\%$) e; fraca dependência ($GDE \geq 75\%$). R² - coeficiente de determinação; SQR – soma de quadrado dos resíduos; A – alcance; a e b – coeficientes de regressão da validação cruzada. *Retirada de tendência.

Nas áreas A e C houve dependência espacial de S e Na (Figura 02), apresentando na área C tendência anisotrópica orientada provavelmente manejo ou pela topografia. Mesmo assim, a dependência espacial do S foi moderada na área A.



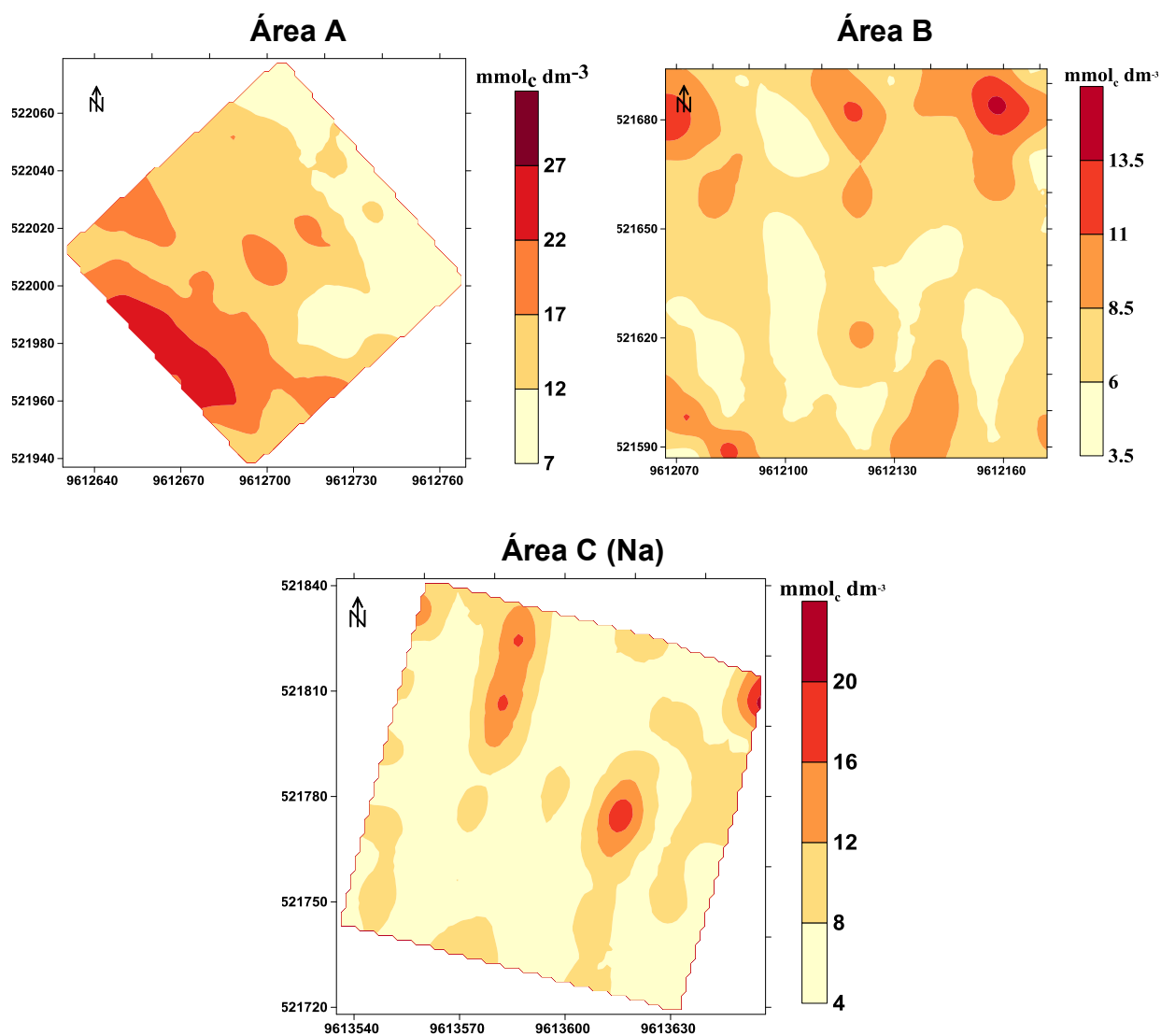


Figura 02: Distribuição espacial de teores de enxofre (S) e sódio (Na) nas áreas A, B e C.

É válido ressaltar que, nas áreas manejadas por agricultura, a detecção de dependência espacial e mapeamento dos atributos mostram-se de grande importância, pois, o uso de mapas de variabilidade permite localizar geograficamente as áreas problemáticas, sendo possível intervenção localizada nas zonas que apresentam teores ou valores de determinado atributo não desejáveis (Silva 2012). Porém, o estudo da distribuição espacial dos atributos dos solos em áreas de várzeas utilizadas pela pecuária é muito complexo, tendo em vista que os

processos deposicionais e a criação de animais podem incrementar essa variabilidade.

A pecuária é responsável pela heterogeneização dos atributos químicos do solo, porque a criação de animais de grande porte modifica o padrão espacial dos atributos, especialmente quando ocorre extensivamente (situação da área A), pois quando há árvores ou arbustos na pastagem não utilizados como forragem há a formação de “ilhas de fertilidade” decorrente da sobrepastoreio em alguns pontos e da não visitação no espaço ocupado por vegetação de maior porte (Daryanto et al. 2013). Em áreas úmidas, como aquelas aqui analisadas, a pecuária conduz a um processo de degradação do solo, pela retirada da vegetação e modificação nos atributos dos solos (Dias & Thomaz 2011).

Nas áreas A e C, os atributos pH, C orgânico, P, Ca, Mg, H+Al e V% apresentaram dependência espacial forte, demonstrando que as operações agrícolas desenvolvidas no Gleissolo Melânico Alítico típico tornaram os seus atributos químicos mais homogêneos, o que representa um ganho aos produtores que buscam a uniformização desses teores por meio da correção dos solos e aplicação de fertilizantes para uniformidade na produção (Dalchiavon et al. 2012).

Na área C, os teores de Ca Mg apresentaram distribuição mais regular (Figura 03) e tiveram pequenas concentrações nas áreas mais altas decorrentes da aplicação irregular de corretivos.

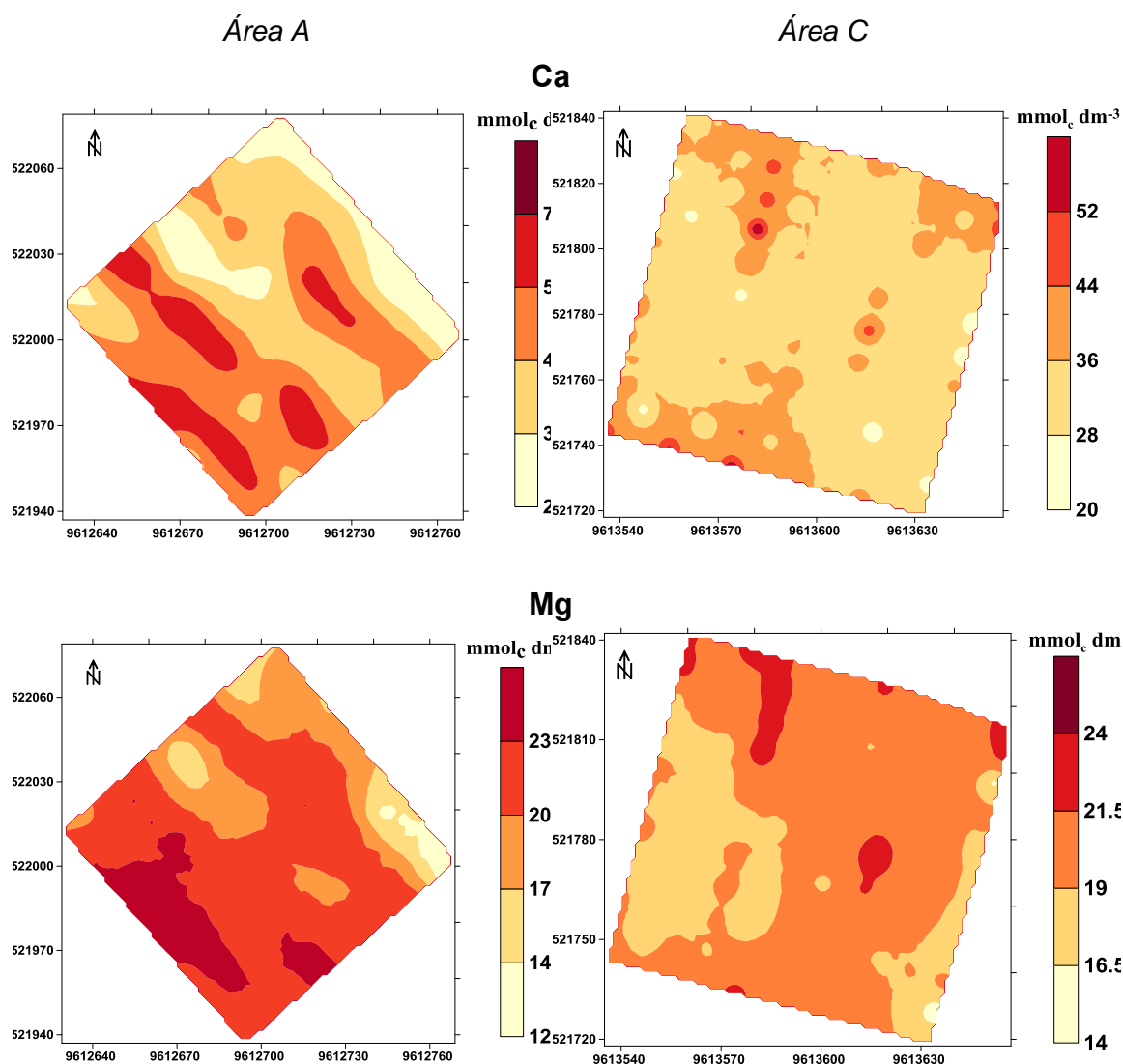


Figura 03: Distribuição espacial de teores de cálcio (Ca) nas áreas A e C.

Na área A, a distribuição dos teores de Ca e Mg formou zonas orientadas por pequenos desníveis da superfície e pelo sentido de mecanização, com acúmulo nas áreas mais baixas. Tal resultado, coincidente com os obtidos por Burak et al. (2012), e indica que variações no relevo, ainda que pequenas, podem influenciar consideravelmente a distribuição dos teores de nutrientes no solo, sendo uma variável que deve ser observada no manejo do solo.

Santos et al. (2012) encontraram resultados diferenciados para os teores dos dois nutrientes acima mencionados, detectando teores menores em regiões mais

baixas. Porém, os autores relacionaram o comportamento destes dois elementos a duas variáveis: aplicação desigual de corretivos no solo, com concentração nas áreas mais altas, ou erosão na área mais baixa que ocasionou a retirada do Ca e Mg da superfície, fato não observado nas áreas em análise.

Nas duas áreas mais homogêneas (A e C), o pH apresentou baixa variabilidade e foi mais elevado na área A em comparação à área B (Figura 04), mas ainda se encontra baixo nas duas áreas, fato que leva ao enquadramento dos solos como fortemente ácidos, segundo critérios do Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Santos et al. 2013). Essa constatação permite afirmar que as operações de calagem não estão sendo eficazes devido ao tamponamento do solo e a produtividade do arroz pode estar sendo comprometida pela baixa disponibilidade de macronutrientes às plantas devido à acidez, resultado condizente com aqueles obtidos por Motomiya et al. (2011).

Nos solos da região, há a necessidade de aplicação de grande quantidade de calcário para correção do pH devido ao elevado poder tampão dos solos em função dos elevados teores de matéria orgânica e à mineralogia (Silva & Moura 2006). A correção do pH é importante porque essa variável é um indicador da qualidade química do solo, por possuir capacidade de interferir na disponibilização de vários elementos químicos essenciais ao desenvolvimento vegetal, favorecendo ou não suas liberações (Barreto et al. 2012).

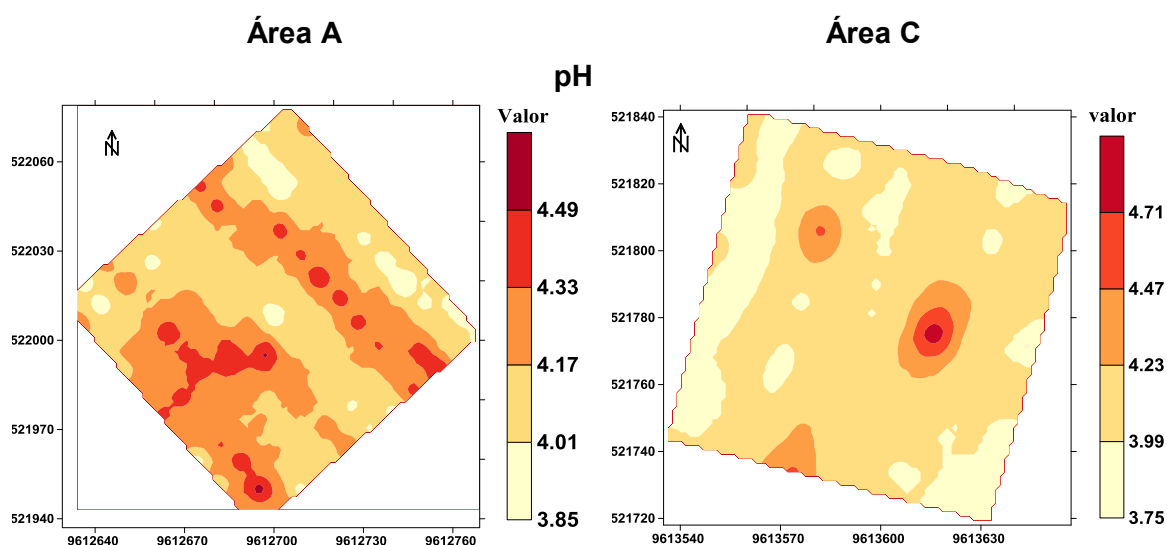


Figura 04: Distribuição de valores do potencial hidrogeniônico (pH), nas áreas A e C.

Os atributos com distribuição espacial mais heterogênea foram K e m%, pois não apresentaram dependência espacial nas áreas A e C, o que se assemelha com aqueles encontrados por Dalchiavon et al. (2012) ao analisarem Latossolos em Selvíria (MS). A heterogeneidade na distribuição do K no solo deve estar relacionada ao seu fácil transporte pela água (Cavalcante et al. 2007), o que não ocorre na área B que não é irrigada e possui obstáculos naturais ao escoamento superficial. Este aspecto é preocupante, porque K é um nutriente muito demandado na cultura do arroz irrigado, com dinâmica pouco conhecida nos sistemas de cultivo.

Para todas as variáveis que apresentaram dependência espacial, considerando-se as três áreas, o alcance variou entre 10,93 e 208,90 m, demonstrando que a malha amostral conseguiu captar a variabilidade espacial dos atributos e que as estimativas de valores realizadas por meio de krigagem geraram valores confiáveis. Isso ocorre porque o alcance indica a distância até onde os pontos amostrais estão correlacionados entre si (Vieira et al. 1981). Porém, para os atributos em que a dependência espacial não foi captada, há a necessidade de realização de amostragem com distâncias menores.

CONCLUSÕES

- A área B foi aquela que apresentou menor dependência espacial dos atributos químicos;
- Nas áreas A e C, os atributos pH, C orgânico, P, Ca, Mg, H+Al e V% apresentaram dependência espacial forte;
- O Potássio (K) apresentou distribuição espacial mais heterogênea, o que pode estar associado à sua mobilidade quando em contato com a água.

REFERÊNCIAS

- MIRINEJAD, A. A.; KAMBLE, K.; AGGARWAL, P.; CHAKRABORTY, D.; PRADHAN, S.; MITTAL, R. B. Assessment and mapping of spatial variation of soil physical health in a farm. *Geoderma*, Amsterdam, v. 160, p. 292–303, 2011. doi:10.1016/j.geoderma.2010.09.021
- ARAÚJO, E. A.; KER, J. C.; NEVES, J. C. L.; LANI, J. L. Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias*, Guarapuava – PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012. doi: 10.5777/PAeT.V5.N1.12
- BARRETO, H. B. F. Distribuição espacial do pH e condutividade elétrica em um solo aluvial no Rio Grande do Norte. *Agropecuária Científica no Semiárido*, Campina Grande – PB. v. 8, n. 1, p. 28-33, 2012.
- BURAK, D. L. et al. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob cafeeiro Conilon: relação com textura, matéria orgânica e relevo. *Bragantia*, Campinas - SP, v. 71, n. 4, p.538-547, 2012.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. *Catena*, Amsterdam, v. 100, p. 100–106, 2012.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society American Journal*, Madison, v. 58, p.1501-1511, 1994.

CAVALCANTE, E. G. S.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M. de; PEREIRA, G. T.. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. *Revista Brasileira de Ciência Solo*, Viçosa – MG, v. 31, p. 1329-1339, 2007.

CRESSIE, N. *Statistics for spatial data*. New York, John Wiley, 1991.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. de P. e; ANDREOTTI, M.; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférico sob Sistema Plantio Direto. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza – CE, v. 43, n. 3, p. 453-461, 2012.

DALMOLIN, R. S. D.; CATEN, A. ten. Uso da terra dos biomas brasileiros e o imPacto sobre a qualidade do solo. *Entre-Lugar*, Dourados – MS, n.6, v. 2, p. 181-193, 2012.

DARYANTO, S.; ELDRIDSE, D. J.; WANG, L. Ploughing and grazing alter the spatial Patterning of surface soils in a shrub-encroached woodland. *Geoderma*, Amsterdam, v. 200-201, P. 67–76, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.02.006>

DIAS, W. A.; THOMAZ, E. L. Avaliação dos efeitos do pastoreio sobre a erosão em margens de canal fluvial em sistema de faxinal. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia – MG, v. 23, n. 1, p. 23-35, 2011.

CLAESSEN, M. E. C (Org.) *Manual de métodos de análise de solo*. 2^a. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos - EMBRAPA, 1997.

FROGBROOK, Z. L.; OLIVER, M. A.; SALAHI, M.; ELLIS, R. H. Exploring the spatial relations between cereal yield and soil chemical properties and the implications for sampling. *Soil Use and Management*, Harpenden, v. 18, n. 01, p. 01-09, 2002.

GEHRING, C.; MOURA, E. G.; SANTOS, R. R. S.; AGUIAR, A. C. F.; SOUSA, A. M. B.; BODDEY, R. M.. Ecological intensification of rice production in the lowlands of

Amazonia. Options for smallholder rice producers. *European Journal Agronomy*, v. 46, p.25-33, 2013.

GOLDEN SOFTWARE INC. *Surfer for windows: release 11.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide*. New York, 2012.

HILTBRUNNER, D.; SCHULZE, S.; HAGEDORN, F.; SCHMIDT, M. W. I.; ZIMMERMANN, S. Cattle trampling alters soil properties and changes soil microbial communities in a Swiss sub-alpine pasture. *Geoderma*, Amsterdam, v. 170, p.369–377, 2012.

LIU, Y.; LV, J.; ZHANG, B.; BI, J. Spatial multi-scale variability of soil nutrients in relation to environmental factors in a typical agricultural region, Eastern China. *Science of the Total Environment*, Amsterdam, v. 450, n.451, p. 108–119, 2013b. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.083>

MOTOMIYA, A. V. de A.; MOTOMIYA, W. R.; MOLIN, J. P.; LIRA, A.; OLIVEIRA, L. R. G. DI; BISCARO, G. A. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade do algodoeiro. *Revista Agrarian*, Dourados – MS, v.4, n.11, p.01-09, 2011.

MINITAB RELEASE 14.1. *Statistical Software*. US/ Canadá, 2003.

OLIVEIRA, I. A. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 37, p. 1103-1112, 2013.

SANTOS, A. C. dos; SALCEDO, I. H.; CANDEIAS, A. L. B. Variabilidade espacial da fertilidade do solo sob vegetação nativa e uso agropecuário: estudo de caso na microbacia Vaca Brava - PB. *Revista Brasileira de Cartografia*, Rio de Janeiro, n.62, v.02, p. 119-224, 2010.

SANTOS, E. O. de J.; GONTIJO, I.; NICOLE, L. R. Variabilidade espacial de cálcio, magnésio, fósforo, potássio no solo e produtividade da pimenta-do-reino. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande – PB, v.16, n.10, p.1062–1068, 2012.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. Á. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. *Sistema Brasileiro de Classificação de Solos*. 3 ed. revista e ampliada Brasília, DF: EMBRAPA, 2013.

SIEDEL, E. J.; OLIVEIRA, M. S. de. Proposta de uma generalização para os modelos de semivariogramas Exponencial e Gaussiano. *Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas*, Londrina, v. 34, n. 1, p. 125-132, jan./jul. 2013. DOI: 10.5433/1679-0375.2013v34n1p125

SILVA, J. M. Variabilidade Espacial do pH, P, K e MO cultivado com soja sob preparo convencional. *Engenharia Ambiental*, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 4, p.095-107, 2012.

SILVA, A. C. da; MOURA, E. G. de. Atributos e especificidades de solos de Baixada no trópico úmido. IN: MOURA, E. G. de M. (org.) *Agroambientes de transição no trópico úmido*. 2 ed. São Luís, MA: UEMA, 2006. (Série Agroecologia - UEMA).

SILVA, L. S.; RANNO, S. K. Liming in lowland soils and nutrient availability in soil solution after flooding. *Ciência Rural*, Santa Maria – SC, v.35 n. 5, 2005.

TESFAHUNEGN, G. B.; TAMENE, L.; VLEK, P. L. G. Catchment-scale spatial variability of soil properties and implications on site-specific soil management in northern Ethiopia. *Soil & Tillage Research*, v. 117, p. 124–139, 2011. doi: 10.1016/j.still.2011.09.005

THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, v. 38, p. 55-98, 1948

UMALI, B. P.; OLIVER, D. P.; FORRESTER, S.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; HUTSON, J. L.; KOOKANA, R. S.; OSTENDORF, B. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. *Catena*, Amsterdam, v. 93, p. 38–48, 2012. doi:10.1016/j.catena.2012.01.010

VALLADARES, G. S. Caracterização química e granulométrica de solos do Golfão Maranhense. *Acta Amazônica*, Manaus, v. 39, n. 4, p. 923-934, 2009.

VIEIRA, S. R. et al. Spatial variability of field-measured infiltration rate. *Soil Science Society of America Journal*, Washington, v.45, p. 1040-1048, 1981.

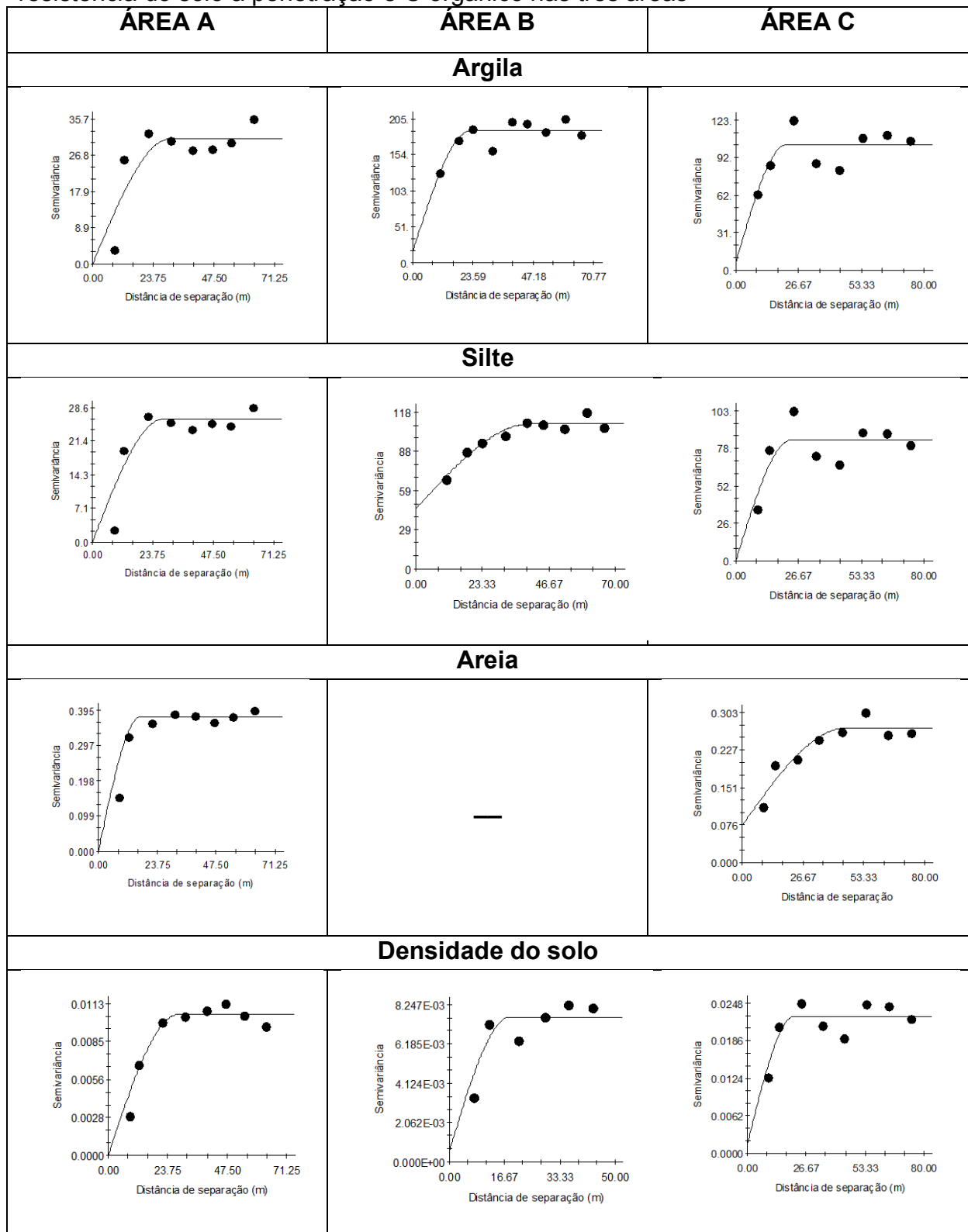
WATT, M. S.; PALMER, D. J. Use of regression kriging to develop a Carbon:Nitrogen ratio surface for New Zealand. *Geoderma*, Amsterdam, v. 183–184, p.49–57, 2012.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. p.319-344.

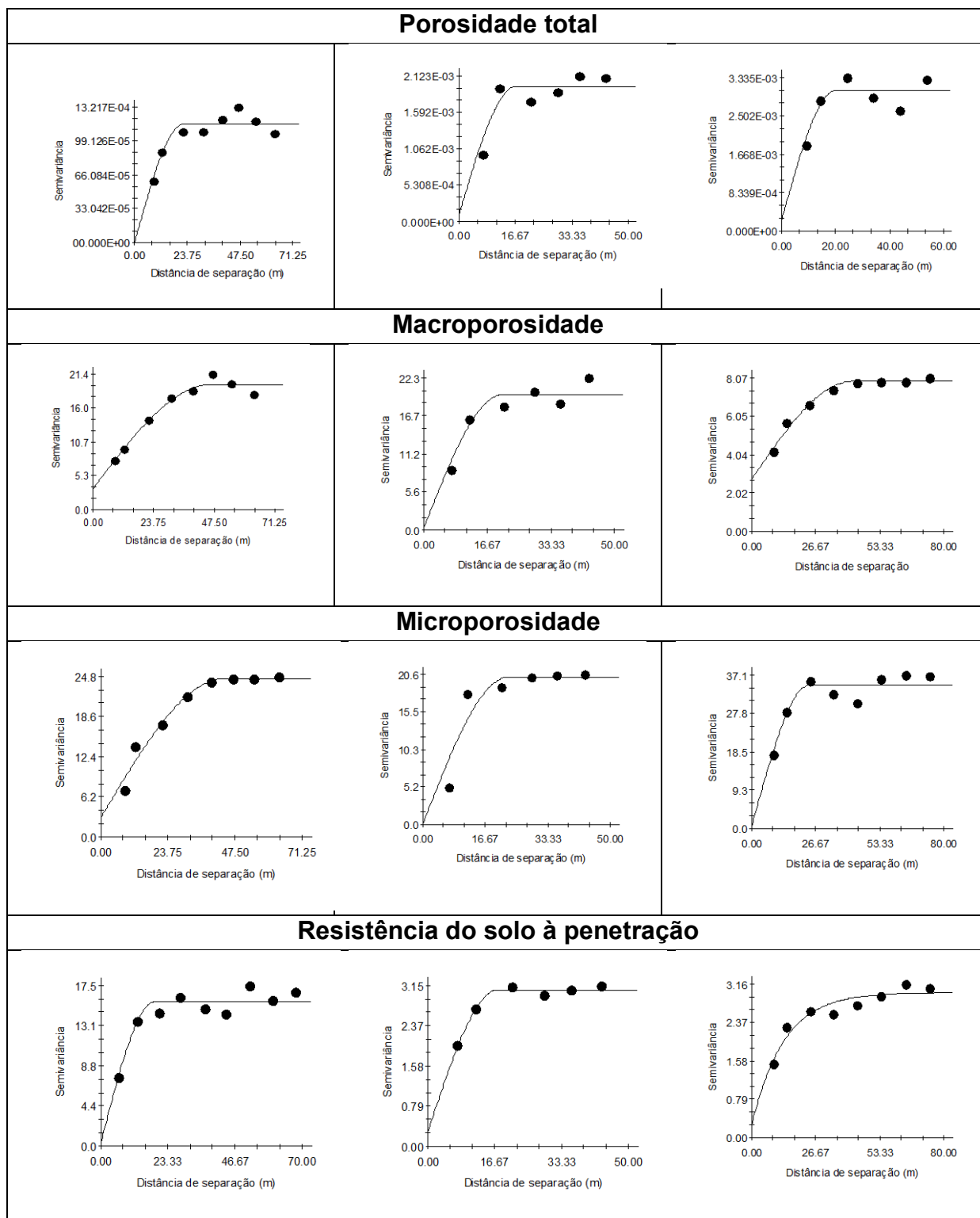
YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

APÊNDICES

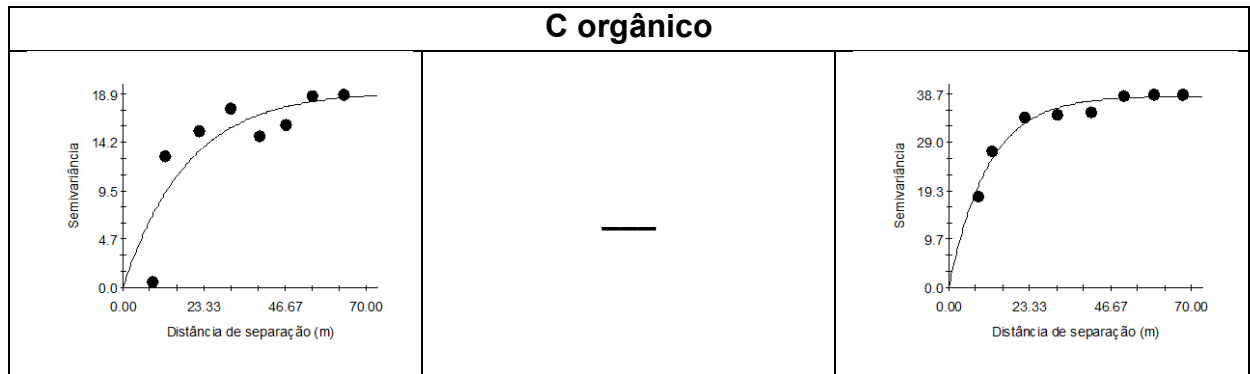
Apêndice 01: Semivariogramas ajustados aos modelos para as variáveis argila, silte, areia, densidade do solo, porosidade total, microporosidade, macroporosidade, resistência do solo à penetração e C orgânico nas três áreas



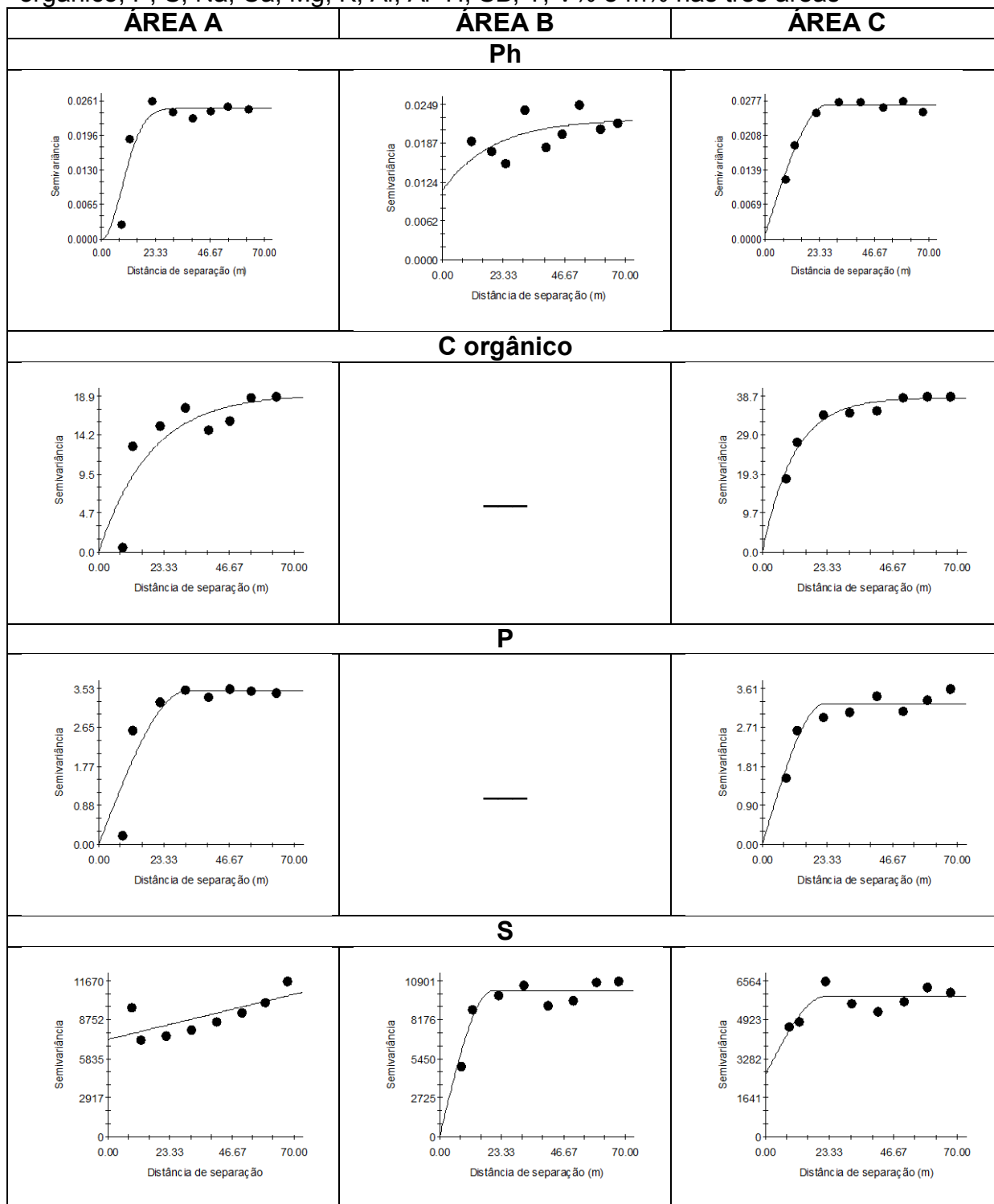
Cont.: Apêndice 01



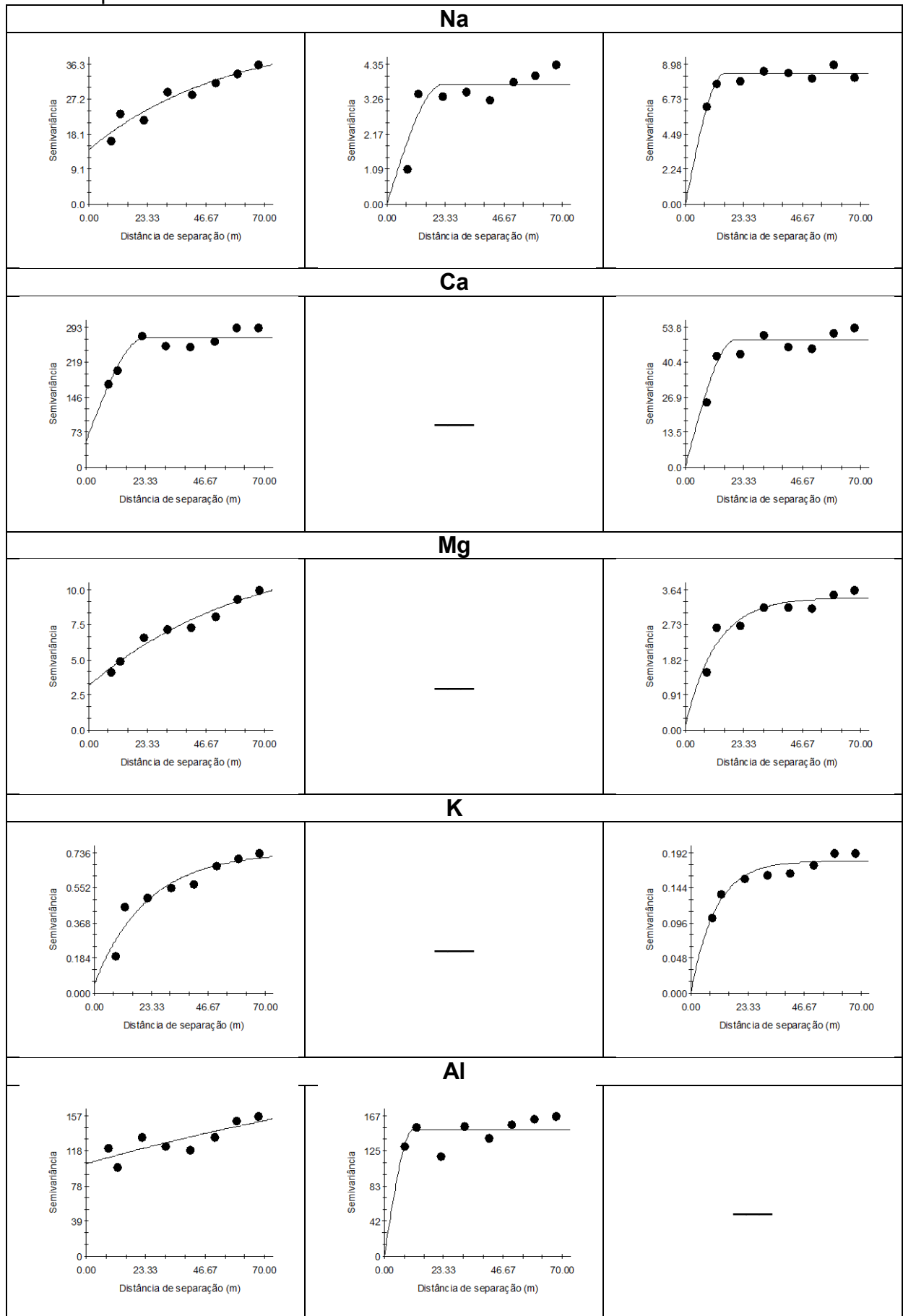
Cont.: Apêndice 01



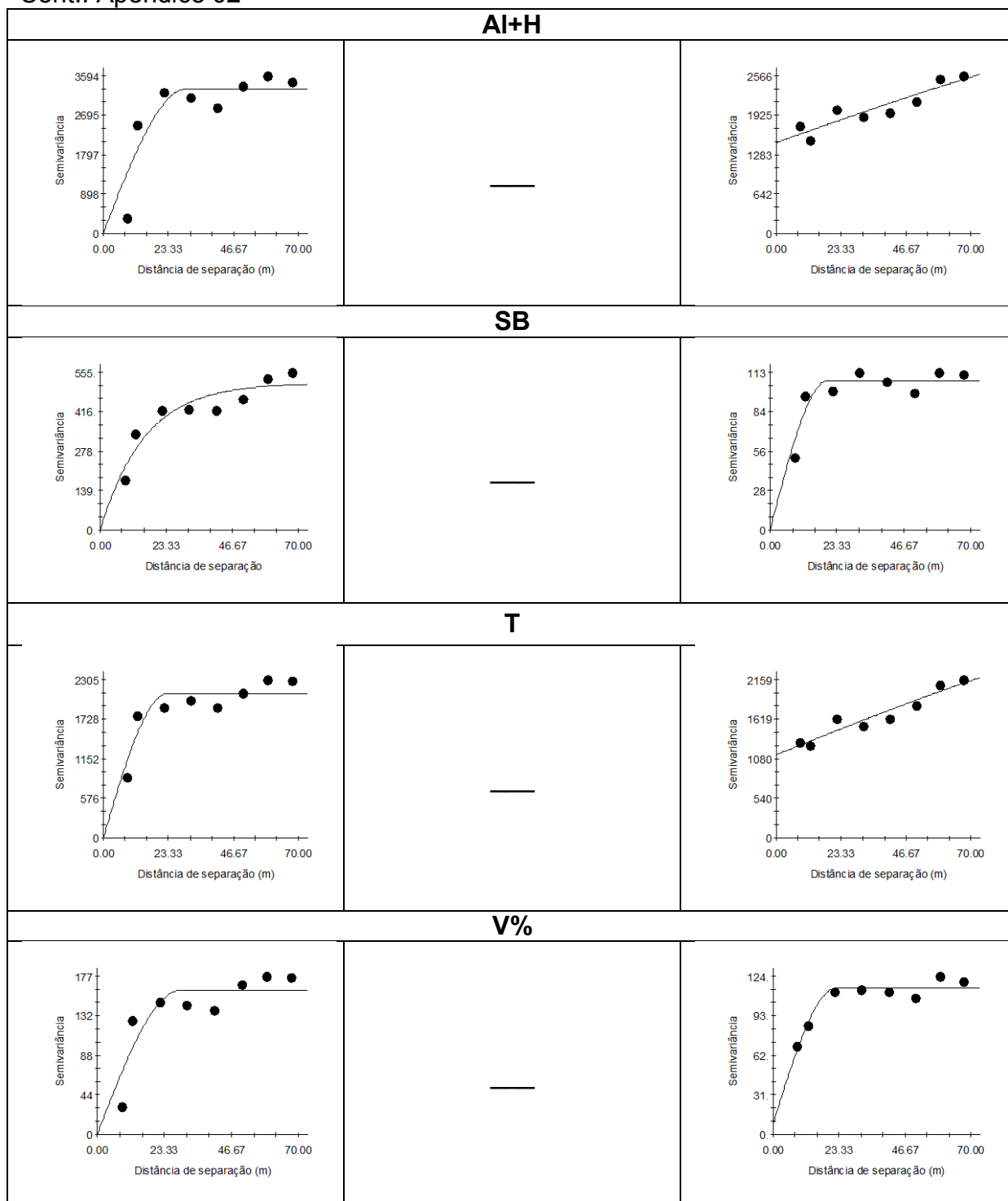
Apêndice 02: Semivariogramas ajustados aos modelos para as variáveis pH, C orgânico, P, S, Na, Ca, Mg, K, Al, Al+H, SB, T, V% e m% nas três áreas



Cont.: Apêndice 2



Cont.: Apêndice 02



Cont.: Apêndice 2

