

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Variabilidade Espacial de Atributos Físico-Hidrícos
dos Solos da Região Norte Fluminense**

Luismar Nogueira Farias

2008



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**VARIABILIDADE ESPACIAL DE ATRIBUTOS FÍSICO-HIDRÍCOS
DOS SOLOS DA REGIÃO NORTE FLUMINENSE**

LUISMAR NOGUEIRA FARIAS

Sob a Orientação do Professor
Marcos Bacis Ceddia

e Co-orientação do Professor
Sidney Rosa Vieira

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo

Seropédica, RJ
Julho de 2008

631.432

F224v

T

Farias, Luismar Nogueira, 1982-
Variabilidade espacial de
atributos físico-hidricos dos solos
da Região Norte Fluminense /
Luismar Nogueira Farias - 2008.
65f. : il.

Orientador: Marcos Bacis Ceddia.
Dissertação (mestrado) -
Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro, Curso de Pós-Graduação
em Agronomia.

Bibliografia: f. 47-50.

1. Solos - Umidade - Medição -
Teses. 2. Física do solo - Teses.
3. Mapeamento do solo - Teses. 4.
Química do solo - Teses. I. Ceddia,
Marcos Bacis, 1968-. II.
Universidade Federal Rural do Rio
de Janeiro. Curso de Pós-Graduação
em Agronomia. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Dissertação, desde que seja
citada a fonte

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA - CIÊNCIA DO SOLO**

LUISMAR NOGUEIRA FARIAS

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31/07/2008

Marcos Bacis Ceddia. Dr. UFRRJ
(Orientador)

Guilherme Kangussu Donagemma. Dr. EMBRAPA – CNPS

Carlos Alberto Alves Varella. Dr. UFRRJ-IT/DE

AGRADECIMENTOS

A Deus, por cada segundo da minha vida.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, pelas oportunidades, formação profissional e pessoal, momentos de grande aprendizagem.

Ao CNPq, pela bolsa de estudos.

Ao professor e amigo Marcos Bacis Ceddia, pelo grande incentivo, amizade, orientação, profissionalismo e apoio.

À Érika, pela amizade, incentivo e otimismo.

Ao professor e co-orientador Sidney Rosa Vieira, pela orientação e apoio.

A um grande amigo, Lenilson, pela amizade, responsabilidade e pelas muitas horas de dedicação a este trabalho.

Aos coordenadores do curso de pós-graduação, professora Lúcia Helena Cunha dos Anjos e professor Nelson Moura Brasil do Amaral Sobrinho, pela compreensão.

Aos funcionários do Curso de Pós-graduação em Agronomia – Ciência do Solo, Roberto, Marcos e Luciene.

A minha família, meus pais Luiz Nunes Farias e Keila Aparecida Nogueira Farias, e meus irmãos Neviton Leandro e Kellton, pelo amor, dedicação e incentivo em todos os instantes da minha vida.

Ao meu amor Alexandra, pelo incentivo, compreensão e companheirismo.

Aos amigos do curso de pós-graduação, pela amizade.

Aos amigos do M2-224, pela amizade e recepção de sempre.

Aos amigos do Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária – SR-13, pelo incentivo e compreensão.

A todas as pessoas que contribuíram de alguma forma para a execução desse trabalho.

Muito Obrigado.

BIOGRAFIA

Luismar Nogueira Farias, filho de Luiz Nunes Farias e Keila Aparecida Nogueira Farias, nasceu na cidade de Rondonópolis – MT em 19 de maio de 1982. Coursou o segundo grau na Escola Agrotécnica Federal de Cuiabá –MT, sendo concluído no ano de 2000. Iniciou o curso de graduação em Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em 2001, diplomando-se em 2005. Durante a graduação foi bolsista de Iniciação Científica no Departamento de Solos, área de Física do Solo de Julho de 2003 à Julho de 2005 sob a orientação do Dr. Marcos Bacis Ceddia. Em março de 2006 ingressou no Mestrado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia -Ciência do Solo na UFRRJ. Em outubro de 2006 ingressou no Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária para exercer o cargo de Engenheiro Agrônomo.

RESUMO

FARIAS, Luismar Nogueira. **Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos dos solos da Região Norte Fluminense**. 2008. 65f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

O uso de modelos numéricos para a simulação do fluxo de fluidos e de solutos tornou-se bastante popular nas últimas décadas, sendo necessário, para o bom funcionamento, o conhecimento da variabilidade espacial de atributos do solo como a retenção de água e condutividade hidráulica. Estes atributos são freqüentemente difíceis de encontrar e de se determinar em uma determinada área de estudo, pois envolvem muito tempo e investimento. O objetivo desse trabalho foi estudar e mapear a variabilidade espacial de condutividade hidráulica saturada (CHS) e da capacidade de água disponível (CAD) dos solos da região norte fluminense. Os dados utilizados foram obtidos da base de dados gerados durante a execução do Projeto de Irrigação e Drenagem do Norte Fluminense para produção de cana-de-açúcar (PROJIR). Dados e mapas foram digitalizados e georreferenciados, tabulou-se 314 valores de CHS, obtidos no campo através de testes com infiltrômetro de duplo anel, e 187 valores de CAD determinados nos perfis de solo, até a profundidade de 60 cm, a partir dos quais se avaliou a variabilidade espacial através de métodos geoestatísticos. Avaliou-se também a viabilidade do uso de outros atributos do solo, mais fáceis de serem obtidos, para melhorar a estimativa da condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível, tais como: conteúdo de areia, silte e argila, grau de flocculação, relação silte argila, porosidade, densidade do solo e carbono orgânico. Os semivariogramas com os modelos ajustados, evidenciaram a existência de dependência espacial para a condutividade hidráulica saturada, bem como para a capacidade de água disponível. Os cros-semivariogramas demonstraram que o atributo areia pode ser usado para aperfeiçoar a interpolação da condutividade hidráulica saturada e da capacidade de água disponível, gerando mapas de isovalores e de variância de estimativa desses atributos.

Palavras-chave: Geoestatística. Mapeamento digital. Física do solo.

ABSTRACT

FARIAS, Luismar Nogueira. **Spatial variability of physical hydric attributes of soils of the North Fluminense Region**. 2008. 65p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2008.

The usage of numerical models to simulate flux of water and solutes has increased in the last decades. However, to be more useful, it is necessary the knowledge of the spatial variability of the attributes soil water retention and hydraulic conductivity. These attributes, frequently, are difficult to be found and/or determined in a given study area, since they require time and more investment. The purpose of this study was to study and to map the spatial variability of saturated hydraulic conductivity (SHC) and available water capacity (AWC) of soils in the north region of Rio de Janeiro State (Brazil). The dataset used belongs to UFRRJ and was generated by the Project of Irrigation and Drainage of the North Fluminense to evaluate areas for producing sugar cane (PROJIR). Data and maps were digitalized and georeferenced, being recorded 314 values of SHC, determined by the double ring infiltrometer method, and 187 values of AWC, from samples taken at 60 cm soil depth. The spatial variability of SHC and AWC were evaluated by geostatistics methods. In order to improving the SHC and AWC estimative, spatial variability of sand, silt and clay contents; as well as, clay flocculation, silt/clay ratio, porosity, bulk density and organic carbon content were also evaluated. The semivariogram analysis, with the adjusted models, showed the spatial dependence of the SHC and AWC variability. The semivariogram analysis showed that the sand content may be used as an auxiliary attribute to improve the spatial interpolation of SHC and AWC, generating maps of isovalues and estimative variance of these attributes.

Key words: Geostatistic. Digital Mapping. Soil physics.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 Área de Estudo.....	2
2.2 Condutividade Hidráulica	4
2.3 Capacidade de Água Disponível.....	5
2.4 Variabilidade Espacial	7
3. MATERIAL E MÉTODOS	12
3.1 Área de Estudo e Base de Dados	12
3.2 Digitalização de Dados e Georreferenciamento dos Mapas	12
3.3 Banco de Dados Digital com Condutividade Hidráulica e Capacidade de Água Disponível.....	12
3.3.1 Condutividade hidráulica saturada	13
3.3.2 Capacidade de água disponível	13
3.3.3 Outros atributos físicos e químicos do solo.....	13
3.3.4 Análise estatística e de dependência espacial.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	14
4.1 Análise Exploratória da Condutividade Hidráulica Saturada	14
4.2 Variabilidade Espacial da Condutividade Hidráulica Saturada	15
4.2.1 Avaliação dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas de condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo.....	25
4.3 Análise Exploratória da Capacidade de Água Disponível.....	26
4.4 Variabilidade Espacial da Capacidade de Água Disponível.....	27
4.4.1 Avaliação dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas de capacidade de água disponível e atributos físicos do solo.....	34
4.5 Análise Exploratória da Textura e Carbono Orgânico.....	35
4.6 Mapas de Isovalores para Condutividade Hidráulica Saturada e Capacidade de Água Disponível	36
4.7 Mapas de Variância da Estimativa da Krigagem para Condutividade Hidráulica Saturada e Capacidade de Água Disponível.....	41
5. CONCLUSÕES.....	45
6. RECOMENDAÇÕES FINAIS	46
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47
8. ANEXOS	51

1. INTRODUÇÃO

O uso e a busca de técnicas e informações que subsidiem os diagnósticos e planos de manejo na produção agrícola, visando a conservação da água, possui uma grande relevância quando se deseja estabelecer uma atividade agrícola que seja sustentável.

Dados de atributos hídricos dos solos são fundamentais para a determinação da qualidade dos solos, da aptidão agrícola e estudos de modelagem e simulação do fluxo de água e solutos (Nemes et al., 2001). O uso de modelos numéricos para a simulação do fluxo de fluidos e de solutos tornou-se bastante popular nas últimas décadas, sendo necessário, para o bom funcionamento, o conhecimento de atributos como retenção de água e condutividade hidráulica. Estes atributos são freqüentemente difíceis de se encontrar e de se determinar em uma determinada área de estudo, pois envolvem muito tempo e investimento.

Entre 1981 e 1983 o extinto Instituto de Açúcar e Alcool (IAA) coordenou o denominado PROJIR (“Projeto de Irrigação e Drenagem do Norte Fluminense”). O PROJIR cobriu uma área de 250.000 hectares representando aproximadamente 30% da região norte do Estado do Rio de Janeiro. Como resultado, elaborou-se uma estrutura cartográfica completa, organizada de acordo com a articulação do IBGE. Dentre os vários mapas gerados, destaca-se o de solos em escala 1:10.000. Para sua confecção foram analisados 218 perfis completos. Além dos perfis, executaram-se testes de infiltração, bem como de permeabilidade (no laboratório e no campo - pump-in e pump-out). Como consequência do processo de mapeamento, onde se faz inspeção pontual (perfil de solo) e extrapolação para criação de unidades de mapeamento, criaram-se classes discretas do território as quais apresentam atributos físicos, químicos e biológicos iguais aos dos perfis de solo de referência. É comum a ocorrência de grande variabilidade espacial destes atributos dentro das unidades de mapeamento, sobretudo os de condutividade hidráulica e de retenção de água. Desde a década de 80 tem crescido o número de trabalhos que estudam a variabilidade espacial de atributos físico de solos através da geoestatística. A análise geoestatística da heterogeneidade espacial calcula correlações entre observações feitas em diferentes locais vizinhos. Uma vez detectada a estrutura de correlação (através do semivariograma), podem-se fazer interpolações de atributos com variância mínima e sem tendência (krigagem e co-krigagem). Através destes interpoladores, é possível gerar mapas de variabilidade espacial dos atributos hídricos do solo, aperfeiçoando os projetos de modelagem e simulação de fluxo de água e solutos.

O objetivo principal deste trabalho foi de mapear a variabilidade espacial de características hídricas dos solos a partir da base de dados do PROJIR.

E como objetivos específicos:

- a) Digitalização e georreferenciamento da base de dados de solos;
- b) Criação de um banco de dados digital com uma estrutura relacional que permita um alto grau de flexibilidade na extração de dados;
- c) Estudar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada e da Capacidade de água disponível dos solos da área do PROJIR.
- d) Estudar a correlação entre os atributos físico-hídricos dos solos, para que por meio da técnica de co-krigagem, atributos de difícil medição possa ser interpolado por meio de outro de mais fácil determinação.
- e) Avaliar a existência de dependência espacial das características estudadas por meio de geoestatística.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Área de Estudo

A região Norte Fluminense tem como uma de suas principais atividades econômicas a indústria sucroalcooleira. Em 1981, devido às baixas produtividades da cana-de-açúcar na região, as lideranças regionais levantaram uma campanha de pressão sobre o governo federal para introdução da irrigação da cana na região, sob financiamento governamental, face ao grande custo da implantação fora do alcance do poder aquisitivo do empresariado. Na época (1981 a 1983) foi realizado um levantamento edafoclimático e elaborado um macro projeto de irrigação, coordenado pelo Instituto do Açúcar e do Alcool (IAA), através do PLANALSUCAR, e que se denominou “Projeto de Irrigação e Drenagem do Norte Fluminense”, PROJIR. Nesse levantamento foi estudada uma área, com cerca de 250.000 hectares, representando aproximadamente 30% da região norte do Estado do Rio de Janeiro (Figura 1 e Figura 4), onde se quantificou 182.000 hectares aptos a irrigação. Foi elaborada uma estrutura cartográfica completa, em escalas compatíveis com as necessidades dos estudos, sendo que os serviços foram realizados no período de junho de 1981 a julho de 1982 e constaram dos seguintes produtos:

- a- Cobertura fotogramétrica escala média 1/15.000 de uma área de 320.000 ha;
- b- Apoio de campo e implantação de uma vasta malha de pontos topográficos, materializados por marcos de concreto, distribuídos numa densidade de um marco para cada 3 km², ou seja, um marco para cada 300 hectares;
- c- Cartas topográficas na escala de 1/5.000 com curvas de nível a cada metro, 1/10.000 com curvas de nível a cada dois metros e 1/25.000 com curvas de nível a cada cinco metros.

Os materiais acima descritos constituem dados básicos de grande importância para os mais diversos estudos, desde pequenos planejamentos a grandes projetos nas áreas de: planejamento urbano e rural; assentamentos agrícolas; irrigação e drenagem; piscicultura; estudos de preservação, manutenção e distribuição de água e zoneamento agro-ambiental.

Além do acervo da cartografia básica foram também elaborados estudos de Pedologia, Geológicos e Hidrogeológicos, cujos dados quantitativos estão listados na Tabela 1. No que se refere ao estudo pedológico, existe um conjunto de dados bastante detalhado, gerado a partir de 218 perfis com análises químicas e físicas completas, incluindo retenção de umidade (residual, Capacidade de campo, Ponto de Murcha Permanente e saturação), testes de infiltração (com três repetições), condutividade hidráulica saturada e 433 testes de permeabilidade, sendo 333 pump-out e 100 pump-in. Esta base de dados, em que a UFRRJ é a única depositária, encontra-se em formato analógico, sendo necessários sua digitalização e armazenamento em um banco de dados que permita a execução de buscas para a geração de informação adequada aos projetos científicos e a estudos de planejamento e impacto ambiental.



Figura 1. Área do Projir (cor preta) em relação à região Norte Fluminense- Escala 1: 4.000.000.

Tabela 1. Mapas temáticos gerados no PROJIR.

Tema	Escala	Nº de Cartas
Estudos de Pedologia		
Classes de solos e de aptidão das terras para irrigação	1/10.000	125
Levantamento Pedológico	1/25.000	24
Mapa da Profundidade relativa do lençol freático	1/25.000	24
Mapa da Profundidade absoluta do lençol freático	1/25.000	24
Mapa de registro do lençol freático	1/25.000	24
Mapa de condutividade hidráulica	1/25.000	24
Mapa de profundidade máxima e mínima do lençol freático	1/50.000	2
Mapa do lençol freático março/83	1/50.000	2
Mapa do lençol freático maio/83	1/50.000	2
Mapa de qualidade da água do lençol freático p/ fins de irrigação março/83	1/50.000	2
Mapa de qualidade da água do lençol freático p/ fins de irrigação maio/83	1/50.000	2
Subtotal	-	255
Estudos Geológicos e Hidrogeológicos		
Mapa geológico	1/50.000	2
Planta de contorno estruturado topo cristalino	1/50.000	1
Localização de Rede Piezométrica	1/50.000	2
Mapas Piezométricos	-	1
Mapa da superfície litológica profundidade relativa a 1 metro	1/50.000	2
Mapa da superfície litológica profundidade relativa a 2 metros	1/50.000	2
Mapa da superfície litológica profundidade relativa a 3 metros	1/50.000	2
Mapa da superfície litológica profundidade relativa a 4 metros	1/50.000	2
Mapa da superfície litológica profundidade relativa a 5 metros	1/50.000	2
Subtotal		16

Segundo Brito (2005), a região Norte Fluminense (RJ), onde encontra-se o município de Campos dos Goytacazes era, a outrora, ocupado por floresta característica das áreas de tabuleiros que apresenta uma grande variação ecológica desde as áreas mais litorâneas até as encontradas em elevação interiorana, em alguns casos, se distinguindo das demais formas de mata atlântica encontradas na faixa litorânea brasileira, apresentando variações próprias aos tabuleiros costeiros. Atualmente, a vegetação nativa se restringe a pequenos fragmentos de florestas secundárias que concorrem, em grande parte, com o cultivo da cana-de-açúcar e pastagens. Nos anos setenta a agroindústria canavieira estimulada pelo Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL) explorou de forma intensiva os solos da região norte fluminense alcançando uma parcela significativa da produção nacional de Alcool. Atualmente, na região observam-se índices produtivos de cana inferiores aos da média nacional e a área plantada com cana sobre solos de tabuleiros foi reduzida em cerca de 50%, sendo ocupada principalmente pelas pastagens. Os motivos da queda da produtividade parecem estar associados à degradação do solo. A textura arenosa dos horizontes superficiais da maioria desses solos, os baixos níveis de matéria orgânica e a presença de um adensamento natural em profundidade os tornou suscetíveis à erosão, mesmo quando localizados em relevo plano. Além da perda do potencial produtivo desses solos, em consequência da degradação, a erosão vem acarretando o assoreamento dos recursos hídricos, gerando prejuízos a usinas de produção de energia hidroelétrica, ao sistema de drenagem das cidades e rodovias e aos ecossistemas aquíferos (Brito, 2005).

2.2 Condutividade Hidráulica

A condutividade hidráulica é uma das propriedades físicas do solo mais importantes na determinação quantitativa e qualitativa do movimento de água no solo e no dimensionamento de sistemas de drenagem. A condutividade hidráulica é um importante parâmetro no que se refere ao transporte de contaminantes, visto que esta representa a maior ou menor resistência que o meio oferece à percolação da água, conseqüentemente, aos contaminantes dissolvidos nesta (Demuelenaere, 2004). Gomes et al. (2006) estudando a lixiviação do herbicida terbutiuron em um Latossolo Vermelho Amarelo Distrófico e em Neossolo Quartzarênico, concluíram que a movimentação deste herbicida esta relacionada diretamente à condutividade hidráulica do solo e inversamente ao teor de carbono orgânico e teor de argila no solo. No Neossolo Quartzarênico foi encontrado o menor teor de carbono, maior condutividade hidráulica, menor teor de argila e a movimentação do herbicida no solo foi em média 6,7 vezes maior que no Latossolo.

A sua determinação pode ser feita utilizando-se método de laboratório e campo. Os métodos de laboratório apresentam o inconveniente de usarem amostras de tamanho reduzido, sendo assim, representativas de pequeno volume do solo. Já os métodos de campo, apesar de laboriosos, são mais precisos, tendo em vista o maior volume de solo amostrado sem alteração da sua estrutura natural (Pereira, 2001). Segundo Ferreira (1987), os métodos de laboratório que usam amostras destorroadas são úteis somente para estudos de drenagem, envolvendo modelos físicos. Já os que utilizam amostras com estrutura natural são de grande valia no estudo das camadas do perfil do solo e na caracterização de sub-áreas dentro de uma grande área a ser drenada.

Dentre os vários métodos de laboratório existentes, é recomendado o uso do permeâmetro de carga constante na determinação da condutividade hidráulica, quando o propósito é de se estudar a influência da variabilidade do solo e suas características como textura, estrutura, compactação, salinidade, qualidade de água, dentre outros no movimento de água em solo saturado (Millar, 1978, citado por Pereira, 2001).

Os métodos de campo são os mais preferidos, tendo em vista que são mais precisos que os de laboratório, pois o volume de solo amostrado é maior. Dentre esses, destaca-se o método do "Poço Seco", que é indicado quando o lençol freático estiver ausente ou a uma grande profundidade e consiste em abrir um furo no solo, com um trado, até a profundidade desejada e manter uma altura constante de água neste furo, até que o consumo de água, decorrente da infiltração, se torne constante (Ferreira, 1987, citado por Pereira, 2001).

Estudando a distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada, Bosch & West (1998), encontraram grande variabilidade na condutividade hidráulica saturada para dois solos arenosos, concluindo que houve maior correlação nos horizontes mais profundos e que a krigagem foi uma ferramenta eficiente em estimar a condutividade hidráulica saturada para locais não amostrados. Da mesma forma, Rehfeldt et al. (1992) encontraram elevada variabilidade na condutividade hidráulica saturada em solo de várzea, cuja variabilidade foi atribuída a fatores de heterogeneidade do solo e, principalmente, à origem deposicional do solo a partir de sedimentos aluviais distintos ao longo da paisagem.

2.3 Capacidade de Água Disponível

O solo é o armazenador e fornecedor de água e nutrientes às plantas. Por fenômenos de adsorção e capilaridade, ele retém, entre uma chuva e outra, a umidade que as plantas necessitam. Dependendo do conteúdo de água no solo, as plantas terão maior ou menor facilidade em extrair água e, portanto, de atender às suas necessidades. À medida que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorver água. Isso porque vai aumentando a força de retenção, enquanto diminui a disponibilidade hídrica no solo. Por isso, nem toda água que o solo consegue armazenar está disponível às plantas (Rossato, 2001).

Segundo Reichardt (1990) a água é retida no solo, isto é, em seus poros devido a fenômenos de capilaridade e adsorção. A capilaridade está ligada à afinidade entre as partículas sólidas do solo e a água, havendo porém a necessidade de interfaces água-ar. Estas interfaces água-ar, chamadas de meniscos, apresentam uma curvatura que é tanto maior quanto menor o poro. A curvatura determina o estado de energia da água e, por isso, diz-se que tanto menor o poro, tanto mais retida se encontra a água. Assim, para esvaziar um poro grande, precisa-se aplicar menos energia do que para esvaziar um poro pequeno. Como o solo possui uma variedade imensa de poros, em forma e "diâmetro", quando se aplica uma dada energia ao solo (por exemplo através de uma sucção), esvaziam-se inicialmente os poros maiores. Aumentando-se a energia aplicada, esvaziam-se cada vez poros menores.

A capilaridade atua na retenção de água dos solos na faixa úmida, quando os poros se apresentam razoavelmente cheios de água. Quando um solo se seca, os poros vão se esvaziando e filmes de água recobrem as partículas sólidas. Nestas condições, o fenômeno de adsorção passa a dominar a retenção de água. A adsorção pode ser elétrica, pois a água é um dipolo, ou material, correspondendo a uma atração entre os sólidos e a água. A energia de retenção da água nestas condições é muito maior ainda e, por isso, grandes quantidades de energia são requeridas para se retirar esta água do solo (Reichardt, 1990).

Muitos fatores afetam a retenção da água em um solo. O principal deles é a textura, pois ela, diretamente, determina a área de contato entre as partículas sólidas e a água e determina as proporções de poros de diferentes tamanhos. A estrutura também afeta a retenção de água, pois ela determina o arranjo das partículas, que por sua vez vai determinar as proporções de poros de diferentes tamanhos. A textura refere-se apenas a tamanho de partícula e, além de tamanho, também é de grande importância na retenção de água a qualidade do material, principalmente das argilas. Existem argilas que, devido às suas características cristalográficas, têm ótimas propriedades de retenção de água. Alguns exemplos são a montmorilonita, a vermiculita e a illita. Outras argilas como a caulinita e a

gibbsita, já não apresentam boas propriedades de retenção de água. A matéria orgânica, quando coloidal, também apresenta boas propriedades de retenção de água. Por isso, adições repetidas de esterco ou matéria orgânica ao solo, podem aumentar suas propriedades de retenção de água (Reichardt, 1990).

Com todos estes fatores influenciando na retenção de umidade no solo, a capacidade do solo em armazenar água tende a apresentar uma considerável variação em uma determinada área, principalmente se somado a estes fatores diferentes manejos dados ao solo.

Cassel e Nielsen (1986) definem a capacidade de armazenamento como a diferença entre o conteúdo de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha. Tradicionalmente, a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) são considerados como os limites máximo e mínimo, respectivamente, de água disponível, conforme ilustrado na Figura 2. A partir desses limites, pode-se determinar a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, considerando a profundidade do sistema radicular (Bergamaschi et al., 1992).



Figura 2. Capacidade de campo (CC), água disponível total (ADT) e ponto de murcha permanente (PMP). (Fonte: Couto et al., 2002)).

Capacidade de campo (CC) é conceituada como a quantidade de água retida pelo solo após a drenagem ter ocorrido ou cessado em um solo previamente saturado por chuva ou irrigação; é a quantidade de água retida pelo solo quando a condutividade hidráulica não saturada se torna tão pequena que o fluxo de água pode ser considerado como sendo zero; para fins de irrigação, capacidade de campo é o conteúdo volumétrico de água em equilíbrio com o componente matricial do potencial de água de -10 a -30 kPa (-0,1 a -0,3 bar) (Couto et al., 2002).

Ponto de murcha permanente (PMP) é conceituado como o conteúdo de água no solo retido a um componente matricial do potencial de água tão elevado, em valor absoluto, tal que a maioria das plantas não consegue extrair água do solo e entra em murcha permanente; para fins de irrigação, o ponto de murcha permanente é o conteúdo volumétrico de água em equilíbrio com o componente matricial do potencial de água no solo de -1500 kPa (-15 bar) (Couto et al., 2002). O PMP é o teor de água do solo no qual as plantas experimentam perdas de turgescência das folhas e desta murcha não se recuperam quando colocadas em um ambiente escuro e saturado. O PMP representa, portanto, o teor de água mínima disponível no solo para o desenvolvimento das plantas (Briggs & Shantz, 1912). O ponto de murcha permanente geralmente correspondente a um potencial matricial de -1500 KPa (Kern 1995a, 1995b).

Analisando a variabilidade espacial de atributos físicos e hídricos, Campos et al. (2007) verificaram a existência dependência espacial para ponto de murcha permanente, capacidade de campo e água disponível em um Espodossolo. E utilizando técnicas

geoestatísticas modelaram a variabilidade espacial e geraram mapas da distribuição espacial. Gonçalves et al. (1999) comentam que o uso da geoestatística se mostrou adequado ao estudo da distribuição espacial de valores de armazenamento de água no solo.

2.4 Variabilidade Espacial

Todo trabalho na área de mapeamento está centrado na influência da variabilidade espacial das propriedades do campo. De acordo com Plant (2001) a variabilidade espacial pode ser influenciada no campo por diferenças de: topografia, estrutura do solo, características do lençol freático, microclima e práticas de manejo. A coleta dos dados deve ser planejada para detectar a variabilidade espacial de forma que possa ser entendida e modelada. De acordo com Cressie (1991), são identificados três tipos de dados espaciais, são eles: dados pontuais, contínuos e em grade. Nos estudos “de integração de dados para mapeamento temático e estudos ambientais”, geralmente são envolvidos dados pontuais e contínuos. A integração de dados pontuais em dados contínuos é geralmente feita através de interpolação, sendo que os métodos mais utilizados são: o inverso do quadrado da distância e a Krigagem. Em ambos os métodos, os valores dos dados pontuais apresentam um determinado peso na estimativa dos demais valores. A diferença entre os métodos esta na forma com que estabelece estes pesos. No primeiro caso, os pesos são estabelecidos em função do quadrado da distância, enquanto que no segundo, os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no variograma. Julia et al. (2004) construíram mapas de condutividade hidráulica saturada para a Espanha, utilizando um banco de dados digital de características do solo. Para a interpolação dos dados empregaram os interpoladores krigagem e inverso do quadrado da distância. Como o número de dados medidos era relativamente pequeno para a área mapeada, utilizaram-se funções de pedotransferência para aumentar a densidade de pontos. A krigagem foi considerada o melhor interpolador.

Segundo Berner et al. (2007) é bastante imprecisa a análise dos dados sem se considerar a influência espacial, ou seja, a posição relativa no terreno, mesmo que seja de um atributo com outro. Se analisados somente os coeficientes de variação desses atributos, estar-se-ia detectando maior ou menor variabilidade sem se deter na sua estrutura (comprimento, direção e largura). O fato de as amostras estarem sendo tomadas de maneira regionalizada não impede que se obtenham as estimativas de média e variância e que sejam analisados e comparados os dados classicamente, mas, em adição, pode-se avaliar a estrutura da variância e a dependência entre amostras. Regionalização significa que as amostras possuem coordenadas que identificam suas posições em relação a uma origem arbitrária. Se detectada tal dependência, a análise estatística proposta por Fisher (1956), baseada na média e no desvio padrão, não é aplicável, haja vista exigir a independência entre amostras (Berner et al., 2007).

Nos casos em que se admite a presença de dependência espacial entre as amostras a avaliação dos dados se dá através da geoestatística. Segundo Vieira (2000), a presença de dependência espacial requer o uso de um tipo de estatística chamada geoestatística, que surgiu na África do Sul, quando Krige (1951), trabalhando com dados de concentração de ouro, concluiu que não conseguia encontrar sentido nas variâncias, se não levasse em conta a distância entre as amostras. Matheron (1963, 1971), baseado nessas observações, desenvolveu uma teoria, a qual ele chamou de Teoria das Variáveis Regionalizadas e que contém os fundamentos da geoestatística. Matheron (1963) define Variável Regionalizada como uma função espacial numérica, que varia de um local para outro, com uma continuidade aparente e cuja variação não pode ser representada por uma função matemática simples. Essa continuidade ou dependência espacial pode ser estimada pelo semivariograma. A geoestatística tem um método de interpolação chamado krigagem (nome dado por Matheron (1963), em homenagem ao matemático sul-africano D. G. Krige), que usa a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em qualquer posição dentro do campo, sem

tendência e com variância mínima. A geoestatística objetiva o estudo dos fenômenos que flutuam no tempo e/ou no espaço, oferecendo uma relação de ferramentas determinísticas e estatísticas que possibilitam entender e modelar a variabilidade espacial (Deutsch & Journel, 1998). Com um modelo de dependência espacial de variáveis do solo, a geoestatística possibilita a estimativa em pontos não amostrados, viabilizando o mapeamento da variável. Este procedimento pode auxiliar na melhor distribuição das parcelas e dos blocos experimentais no campo, assim como o manejo mais racional da água (Filho, 2001).

Todos os conceitos de geoestatística têm suas bases teóricas em funções e variáveis aleatórias. Uma função aleatória, pelo fato de ser contínua, pode ser submetida a uma grande gama de hipóteses, sem as quais a dedução de equações é impossível. Segundo Vieira (2000) a hipótese intrínseca requer apenas a estacionariedade do variograma. Esta é a principal hipótese sobre a qual a geoestatística está alicerçada. Uma variável regionalizada é intrínseca quando: - existir a esperança matemática para a variável regionalizada e ela não depende da posição x ; - para todo vetor h , a variância da diferença $[V(x) - V(x + h)]$ é finita e independe da posição x , dependendo apenas do vetor de h . Quando se têm algumas realizações de certa variável aleatória e deseja-se estimar valores para os locais não amostrados, se faz necessário à introdução de uma restrição de que a variável regionalizada seja, estacionária estatisticamente. Segundo Vieira (2000), uma variável regionalizada é estacionária se os momentos estatísticos da variável aleatória $Z(x_i+h)$ forem os mesmos para qualquer vetor h . A existência de estacionariedade dá a oportunidade de repetir um experimento mesmo que as amostras devam ser coletadas em pontos diferentes, porque todas são consideradas pertencentes a populações com os mesmos momentos estatísticos (Vieira, 2000). Segundo (Deutsch & Journel, 1998) a estacionariedade é uma propriedade do modelo e assim torna-se mais uma decisão do que uma hipótese de trabalho. A decisão de estacionariedade pode mudar com a escala do trabalho e com a disponibilidade dos dados.

Para a geoestatística o *variograma* tem papel crucial, pois ele é a chave para descrever e entender a variabilidade espacial de forma quantitativa, bem como para fazer previsões a respeito do fenômeno estudado (McBratney & Webster, 1986). O variograma é uma função matemática (eq-1) definida para representar o nível de dependência espacial entre duas variáveis aleatórias locais. Estas duas variáveis X e Y , podem ser: o mesmo atributo em duas posições diferentes (autovariograma), dois atributos diferentes medidos na mesma posição (covariância das variáveis) e dois atributos diferentes medidos em duas posições (variograma cruzado).

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (\text{eq-1}) \quad \text{onde:}$$

$2\gamma(h)$ – é a variância em função do vetor h ;

E – valor esperado;

$Z(x_i)$ – valor da variável na posição x_i

$Z(x_i+h)$ - valor da variável na posição x_i+h .

O semivariograma (eq-2) é a mesma função anterior acrescida do fator de divisão 2, função $\gamma(h)$. O fator 2 é utilizado com a finalidade de cancelamento e simplificação da equação e porque a quantidade mais freqüentemente utilizada é $\gamma(h)$ e não $2\gamma(h)$.

$$\gamma(h) = (1/2) E\{[Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2\} \quad (\text{eq-2})$$

O semivariograma também pode ser representado como um gráfico da função de dependência espacial em relação à distância (Figura 3).

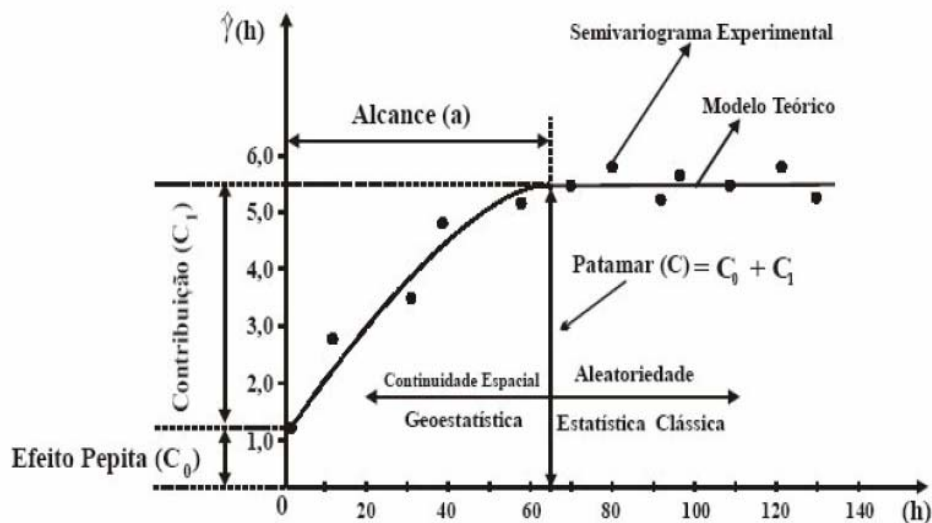


Figura 3. Semivariograma experimental, modelo teórico e seus componentes (Silva, 2007).

Ao semivariograma experimental, calculado a partir das observações, associam-se modelos teóricos de semivariogramas, definidos pelo tipo de modelo (linear, esférico, gaussiano, exponencial, potencia) e pelos parâmetros numéricos efeito pepita, patamar e alcance. Segundo Camargo (1997) o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental pode ser realizado de modo automático ou visual. O modo automático utiliza o algoritmo de Olea et al. (1996), com base no método dos mínimos quadrados. Este algoritmo fornece também uma medida quantitativa, que reporta para qual modelo o ajuste é mais preciso. O modo visual é recomendado a especialistas que possuem afinidade e conhecimento do fenômeno em estudo. Neste modo, todos os parâmetros são definidos por inspeção.

Na Figura 3 acima, o semivariograma experimental está plotado na forma de pontos, enquanto que o modelo teórico (esférico) é a linha contínua. O efeito pepita revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras. Ele é causado por variabilidade em pequena escala, por erro de amostragem, de determinação ou do limite do equipamento. À medida que h aumenta, $\gamma(h)$ também aumenta até um valor máximo onde se estabiliza, denominado patamar. O patamar é aproximadamente igual à variância dos dados, $Var(z)$. Através dele pode-se medir a variabilidade do fenômeno. O alcance refere-se à distância no qual $\gamma(h)$ atinge o patamar e representa a distância limite de dependência espacial. Dentro dos limites do alcance, as medições são correlacionadas umas às outras, o que permite fazer interpolações para espaçamentos menores do que os amostrados. Devido a isto o alcance é utilizado para avaliar o grau de continuidade espacial dos dados. Além do alcance, as medições apresentam distribuição espacial aleatória e podem ser consideradas independentes entre si e a estatística clássica pode ser aplicada sem restrições.

Alguns autores sugerem formas de avaliar e classificar a dependência espacial de uma variável. De acordo com Robertson (1998) o grau de dependência é dado por: $GD = (C_1 / (C_1 + C_0)) * 100$, onde a dependência espacial é considerada fraca se a razão contribuição/patamar for menor ou igual a 25%, moderada quando a razão estiver entre 25% e 75%, e forte se a razão for $> 75\%$. Segundo Cambardella (1994), a dependência espacial de uma variável pode ser avaliada pela proporção do efeito pepita em relação ao patamar, assim quando $(C_0 / (C_0 + C_1)) * 100$ for menor ou igual a 25%, indica uma forte dependência espacial para o atributo, valor entre 25% e 75 %, indica uma moderada dependência espacial, e valor

maior do que 75 % indica uma fraca dependência espacial. Conhecido o semivariograma da variável, e havendo dependência espacial entre as amostras, é possível fazer interpolação nos intervalos entre as amostragens e criar mapas de isolinhas ou de superfície através da krigagem. A krigagem é uma coleção de técnicas de regressão linear generalizada para minimizar uma estimativa da variância definida a partir de um modelo para uma covariância (Deutsch & Journel, 1998). Trata-se de um interpolador que não apresenta tendência e possui variância mínima. Estimativas não tendenciosas significam que, em média, a diferença entre valores estimados e verdadeiros para o mesmo ponto deve ser nula; e variância mínima significa que estes estimadores possuem a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos (Camargo, 1997).

De acordo com Vieira (2000), a krigagem é uma média móvel ponderada, onde os pesos são variáveis de acordo com a variabilidade espacial expressa no semivariograma. O que torna a krigagem um interpolador ótimo é a forma como os pesos são distribuídos (eq-3).

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i z(x_i) \quad (\text{eq-3}) \quad \text{onde:}$$

$z^*(x_0)$ – valor a ser estimado;

N – número de valores medidos, $z(x_i)$, envolvidos na estimativa; e.

λ_i – são os pesos associados a cada valor medido, $z(x_i)$.

A utilização da técnica de krigagem para a inferência de pontos não amostrados (transformação de dados discretos em dados contínuos) em propriedades do solo é inicialmente apresentada nos trabalhos de Burges & Webster (1980a, 1980b), Webster & Burges (1980), Burges et al. (1981), Vieira et al. (1981), Yost et al. (1982) e Braga e Druck (1993). Esses autores mostraram a boa adequação dos interpoladores geoestatísticos aos dados de solos e consideraram que a krigagem apresenta uma estrutura teórica desejável, condições favoráveis de implementação e uma estabilidade às variações amostrais.

Quando atributos do solo apresentam correlação entre si, pode-se calcular um semivariograma cruzado pelo método de co-krigagem. Se for constatada a dependência espacial, com o semivariograma cruzado é possível estimar valores para um atributo com os dados dos atributos correlacionados. Algumas áreas das ciências agrárias, como a ciência do solo, freqüentemente apresentam situações em que existe a correlação espacial entre duas variáveis e, a estimativa de uma delas pode ser feita usando-se informações de ambas expressas no semivariograma cruzado e no método chamado co-krigagem (Vieira, 2000).

De maneira semelhante ao estabelecido para uma única variável, considera-se p variáveis, $\{Z_j(x); j = 1, \dots, p\}$ que foram medidas dentro da mesma região S e nos mesmos pontos amostrais (pares de coordenadas $[x_i, y_i]$). Estabelecendo-se 2 variáveis medidas na região S para os mesmos pontos, temos $\{[Z_1(x)] \text{ e } [Z_2(x)]\}$ de tal forma que a covariância cruzada entre elas seja:

$$\text{Cov}_{12}(h) = E\{Z_1(x+h)Z_2(x)\} - m_1m_2 \text{ e}$$

$$\text{Cov}_{21}(h) = E\{Z_2(x+h)Z_1(x)\} - m_2m_1$$

Conseqüentemente, o semivariograma cruzado entre estas variáveis será:

$$\gamma_{12}^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} \{[z_1(x+h) - z_1(x)][z_2(x+h) - z_2(x)]\} \quad (\text{eq-4})$$

O semivariograma cruzado ideal teria a mesma aparência mostrada na equação 4, porém, com significados diferentes pelo simples fato de envolver o produto das diferenças de duas variáveis distintas. O alcance neste caso representa o final ou a distância máxima de dependência espacial entre as variáveis. O patamar, se existir, deve aproximar-se do valor da

covariância entre as duas variáveis. Assim, quando as duas forem de correlação inversa o semivariograma cruzado será negativo (Genú, 2004).

Vieira (2000) relata que em toda a seqüência para a execução da geoestatística existe um certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou sobre os parâmetros ajustados aos modelos. Essa incerteza é o erro da estimativa, o qual pode ser avaliado usando o procedimento de autovalidação comumente chamado de "jack-knifing". Resumidamente, o procedimento envolve a estimativa de cada ponto medido "fazendo de conta" que ele não existe, durante sua estimativa. Então, quando se executa o "jack-knifing", está se perguntando "se a krigagem for mesmo representativa da variabilidade, e se as hipóteses assumidas forem verdadeiras", então como é seu desempenho para estimar valores conhecidos?

As possíveis respostas a essa pergunta podem ser esclarecidas pela execução de um ou mais dos procedimentos descritos a seguir.

O gráfico 1:1 - Medido vs Estimado

Se, para cada um dos N locais onde se tem um valor medido $Z(x_i)$, se estimar um valor pela krigagem (ou co-krigagem), $Z^*(x_i)$, então poder-se-á fazer um gráfico dos valores pareados de $Z(x_i)$ e $Z^*(x_i)$ e calcular a regressão linear entre eles. A regressão será então:

$$Z^*(x_i) = a + b Z(x_i)$$

onde A é a interseção, B é o coeficiente angular da reta e r^2 é o coeficiente de correlação entre $Z^*(x_i)$ e $Z(x_i)$.

Assim, se a estimativa ($Z^*(x_i)$) fosse idêntica ao valor medido ($Z(x_i)$), então A seria nulo, B e r^2 seriam iguais à unidade (1,0), e o gráfico de $Z(x_i)$ vs $Z^*(x_i)$ seria uma série de pontos na linha 1:1. À medida que os valores de A aumentam de 0 (zero) para valores positivos, isso indica que estimador $Z^*(x_i)$ está superestimando valores pequenos de $Z(x_i)$ e subestimando valores grandes. À medida que A decresce de 0 (zero) para valores negativos, o contrário acontece. Este último caso, porém, não é comum. Desse modo, a qualidade da estimativa pode ser medida pelo julgamento desses parâmetros.

- O erro reduzido

Lembrando que no cálculo dos valores estimados, $Z^*(x_i)$, sempre se tem a variância da estimativa, $\sigma_k^2(x_i)$, então pode-se definir o erro reduzido como:

$$ER(x_i) = (Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_k(x_i)$$

A divisão pela raiz quadrada da variância da estimativa faz com que os $ER(x_i)$ sejam sem dimensão e que, por isso, as condições de não tendência e de variância mínima requeiram que:

$$\overline{ER} = E\{ER(x_i)\} = E\{(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_k(x_i)\} = 0$$

e

$$VAR(\overline{ER}) = E\{(Z^*(x_i) - Z(x_i)) / \sigma_k(x_i)\}^2 = 1$$

Essas propriedades fazem desse tipo de erro uma ferramenta valiosa e de fácil uso nas aplicações de geoestatística. O fato de terem valores ideais fixos em 0 (zero) e 1 (um), e de serem sem dimensão, facilita seu julgamento e estudo, também permite sua comparação com outras situações expressas em unidades diferentes (Vieira, 2000).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo e Base de Dados

A área de estudo compreende cerca de 250.000 hectares, representando aproximadamente 30% da região norte do Estado do Rio de Janeiro, Figura 1 e Figura 4, com perímetro em destaque.

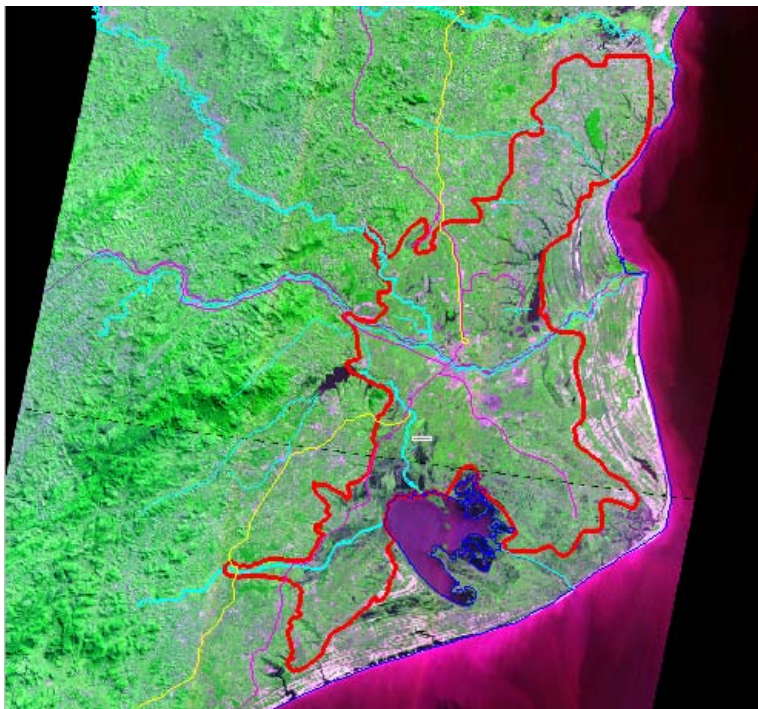


Figura 4. Área do PROJIR com imagem do satélite CBERS-2. (Fonte: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>)

3.2 Digitalização de Dados e Georreferenciamento dos Mapas

Para estudar a variabilidade espacial, foi necessário obter as coordenadas geográficas de cada ponto onde foram feitas medições dos atributos físico-hidricos dos solos. Para a digitalização e georreferenciamento das 125 cartas de classes de solos e de aptidão das terras para irrigação, na escala 1:10.000, foram escaneadas as cartas gerando imagem em formato digital TIFF(Tag Image File Format).

As imagens foram georreferenciadas em software específico, sendo organizadas em um mosaico representando a área do PROJIR (Figura 32). Na Figura 33, em anexo, foram plotadas as cartas de classes de solos e de aptidão das terras para irrigação, na escala 1:10.000, e os respectivos perfis georreferenciados, permitindo a localização de cada ponto na área do Projir, com suas respectivas coordenadas UTM.

3.3 Banco de Dados Digital com Condutividade Hidráulica e Capacidade de Água Disponível

O banco de dados foi gerado considerando os valores dos atributos até a profundidade de 60 cm no perfil do solo. No cálculo do valor do atributo foi considerada a espessura de cada horizonte, calculando a média ponderada.

3.3.1 Condutividade hidráulica saturada

Foram considerados como dados de condutividade hidráulica saturada os valores de Taxa de Infiltração Básica, medidos nos testes de infiltração com infiltrômetro de duplo anel, em 314 pontos, conforme apresentado na Tabela 20, em anexo.

Os dados referentes aos testes de infiltração estão arquivados no anexo B, nos tomos I, II, III, IV e V do relatório técnico setorial. Adotou-se como taxa de infiltração básica o valor estabilizado no final dos testes de infiltração (valores iguais no final do teste, ou média aritmética simples das três últimas leituras).

Considerando a objetivo de avaliar o uso de outros atributos para melhorar a interpolação de condutividade hidráulica saturada, foram criados dois arquivos. O primeiro, denominado Texinfi3.txt, contém 249 pontos georreferenciados com medições de condutividade hidráulica e carbono, e ainda 246 pontos com valores de areia, silte e argila. O segundo, denominado Infiltrk.txt, contém 314 pontos georreferenciados de condutividade hidráulica saturada, porém não apresenta medições de outros atributos físico-hídricos.

3.3.2 Capacidade de água disponível

Os dados de capacidade de água disponível foram extraídos de 187 pontos onde houve a medição de armazenamento de água no solo na área, conforme apresentado na Tabela 20, em anexo. Os dados de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente estão arquivados no relatório técnico setorial, volume I tomo II e anexo A. O arquivo de dados gerado, denominado Fisicaal.txt, foi composto de 187 pontos com valores de capacidade de água disponível, 174 pontos com dados de textura e relação silte/argila, 190 pontos com valores de densidade do solo, densidade das partículas e porosidade, assim como 191 pontos com valores de carbono.

3.3.3 Outros atributos físicos e químicos do solo

A digitalização dos atributos areia, silte, argila, grau de flocculação, relação silte/argila, porosidade e carbono orgânico teve como objetivo avaliar a viabilidade do uso desses atributos, relativamente mais fáceis de se obter e em maior densidade, para aperfeiçoar a interpolação (co-krigagem).

Os dados referentes à textura e carbono orgânico estão arquivados no relatório técnico setorial no anexo B, tomos I, II, III, IV, V, VI, no anexo A e também no tomo II do volume I. Nestes dois últimos relatórios também estão registrados os dados de grau de flocculação, relação silte/argila e porosidade. O arquivo de dados contendo esses atributos, denominado Texturak.txt, possui 671 pontos georreferenciados com informações de areia, silte e argila, bem como 791 pontos com determinação de carbono.

Ao se trabalhar com essas diferentes combinações de atributos existiu a possibilidade de medir qual o conjunto de dados apresenta melhor precisão na interpolação pelos métodos da krigagem e co-krigagem. Assim como, analisar o grau de correlação existente entre os diferentes atributos do solo, pois onde existir correlação, pode-se usar a estrutura espacial de um atributo para interpolar outro de medição mais difícil.

3.3.4 Análise estatística e de dependência espacial

O tratamento estatístico dos dados consistiu de análise descritiva, bem como avaliação da distribuição de frequência (normalidade-teste de Kolmogorov-Smirnov) e de valores extremos. Em seguida procedeu-se a avaliação da dependência espacial (variografia), validação dos modelos de semivariogramas ajustados, bem como a krigagem e cokrigagem ordinária. Para os cálculos estatísticos, foram utilizados os softwares Bioestat 2.0 (Ayres et al., 2000) e Geostat (Vieira et al., 1983). Após a interpolação, os mapas de isovalores foram gerados no software Surfer 7.0 (Golden Software, 2000).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Exploratória da Condutividade Hidráulica Saturada

A análise descritiva dos dados, apresentada nas Tabelas 2, 9, 14 e 18 e os gráficos de histogramas nas Figuras 27 a 31, em anexo, tem a finalidade nos estudos de variabilidade espacial, quando se trabalha com geoestatística de analisar a distribuição dos dados, as variações existentes, a presença de valores anômalos ou incomuns para um determinado atributo em relação ao conjunto de dados a qual pertence. A análise de valores extremos pode ser auxiliada com os dados plotados conforme Figura 25 e 26, em anexo, para condutividade hidráulica e capacidade de água disponível, respectivamente. A partir dessa distribuição das observações pode-se proceder a uma análise preliminar baseada em inspeção visual. Essa análise permite a identificação de alguns problemas, tais como escassez ou excesso de observações em determinado local, ocorrência de valores aberrantes (Camargo, 1997).

Nos cálculos estatísticos, o histograma pode ser interpretado como uma síntese do conjunto de valores. Segundo Costa Neto (1977), características importantes do histograma são organizadas em três grupos: medidas de localização: média, valor mínimo, mediana e valor máximo; medidas de dispersão: variância e desvio padrão; medidas de forma: coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e coeficiente de variação.

Na análise descritiva, foi avaliada a distribuição dos dados em relação à distribuição normal, pois apesar de a existência de distribuição normal não ser uma exigência para os estudos geoestatísticos, esta informação torna-se importante pois quando o conjunto de dados apresenta distribuição de frequência do tipo normal ou log normal o ajuste de um modelo matemático ao semivariograma é facilitado devido a uma melhor visualização gráfica. Segundo S. Bocchi et al.(2000), variáveis com valores de assimetria menores que 1 apresentam distribuição normal de frequência.

Para se conhecer a variabilidade dos atributos em estudo foi calculado o coeficiente de variação, que são apresentados nas análises descritivas. A princípio considera-se que quanto menor o coeficiente de variação (CV), mais homogêneos são os dados. Gomes (1984), estudando os coeficientes de variação obtidos nos ensaios agrícolas, classifica-os da seguinte forma: Baixos: coef. var. inferiores a 10%, Médios: CV varia entre 10 e 20%, Altos: CV entre 20 e 30%, Muito Altos: para valores acima de 30%. Para fins de comparação entre atributos, Warrick & Nielsen (1980), propõem que os limites de coeficiente de variação (CV), para a classificação da variabilidade dos atributos analisados, podem ser: $CV < 12\%$, $12\% < CV < 60\%$ e $CV > 60\%$, considerados de baixa, média e alta variabilidade, respectivamente.

Na Tabela 2 são apresentados os dados da análise descritiva, média, variância, desvio padrão, coeficiente de variação, mínimo, máximo, assimetria, curtose e teste de normalidade, para os atributos físico hídricos do arquivo com 249 pontos georreferenciados.

Segundo a classificação de Gomes (1984), somente para logaritmo da condutividade hidráulica saturada, o coeficiente de variação foi considerado alto. Para os atributos areia, silte, argila, carbono e condutividade hidráulica, o coeficiente de variação foi considerado muito alto. Sendo que o coeficiente de variação para condutividade hidráulica foi de 237.1%, Tabela 2. Isto mostra que estes atributos apresentam uma alta variabilidade na área do Projir.

Os valores de condutividade hidráulica estão entre $0,10 \text{ mm.h}^{-1}$ e 2327 mm.h^{-1} , já o teor de carbono varia de 0,2 % a 38,9 %, apresentando uma amplitude bastante expressiva, assim como a quantidade de areia que possui valores mínimos de 5 g.kg^{-1} e valor máximo de 940 g.kg^{-1} .

O elevado valor de coeficiente de variação para a condutividade hidráulica pode estar relacionado à variação dos atributos físicos dos solos, que são intimamente relacionados com a dinâmica da água no solo. De acordo com Mesquita et al. (2004), a condutividade hidráulica saturada de um solo é determinada pela geometria e continuidade dos poros preenchidos com água, tornando-se dependente portanto, da forma, quantidade, distribuição e continuidade dos mesmos. Ainda segundo Mesquita et al. (2004) a condutividade hidráulica saturada é mais dependente da estrutura do que da textura do solo. As práticas culturais adotadas alterando a estrutura do solo influenciam diretamente a condutividade hidráulica saturada, influenciam mais até do que os processos de gênese e formação da estrutura dos solos. Inclusive, devido ao importante efeito do diâmetro dos poros, a variabilidade da condutividade hidráulica em sítios próximos pode alcançar várias ordens de grandeza.

Esta alta variabilidade dos atributos físicos, com coeficientes de variação elevados, deve-se também em grande parte a uma considerável variação de solos na região. Sendo encontrados Gleissolos, Planossolos, Neossolos Quartzarênicos, Argissolos, Latossolos, Organossolos, entre outros, que possuem características físicas bastante distintas. O que conseqüentemente contribui para uma maior variação nas características hídricas para a área em estudo.

Tabela 2 – Análise descritiva dos atributos físico-hídricos da área do Projir, com 249 pontos georreferenciados.

Parâmetros	Areia (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila (g.kg ⁻¹)	Ks (mm.h ⁻¹)	Log Ks (mm.dia ⁻¹)	Corg. (%)
Número	246	246	246	249	249	249
Mínimo	5	0	47	0,10	0,38	0,2
Máximo	940	595	852	2327	4,75	38,9
Média Aritmética	304,04	595	427	90,00	2,78	2,86
Variância	68101,5	18240,6	32393,2	45535,8	0,546	23,48
Desvio Padrão	261,0	135,1	180,0	213,4	0,739	4,85
Coefficiente de Variação (%)	85,73	53,34	42,15	237,06	26,54	169,41
Assimetria	0,70	-0,10	0,00	6,80	-0,20	3,85
Curtose	-0,80	-1,00	-0,70	59,40	-0,13	17,93
D	*	*	**	*	*	*
	0,1425	0,0931	0,0339	0,3367	0,0570	0,3327

D - teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov). *Dados não apresenta distribuição normal, a nível de 5 % de significância. **Dados apresentam distribuição normal a 5% significância.

De acordo com os resultados dos testes de normalidade (Kolmogorov-Smirnov), Tabela 2, apenas a argila apresentou distribuição de freqüência do tipo normal, o que também pode ser confirmado, observando a forma do histograma para argila, onde os valores superiores e inferiores à média ocorrem de forma proporcional em torno da média, Figura 30. Esta simetria na ocorrência de valores em torno da média já não foi observado para os atributos areia, silte, argila e carbono, conforme histogramas Figura 30, em anexo.

4.2 Variabilidade Espacial da Condutividade Hidráulica Saturada

O semivariograma calculado para condutividade hidráulica a partir dos dados originais, Figura 5, mostra que para pequenas distâncias já existem grandes diferenças de valores entre pontos vizinhos, assim foi considerado como efeito pepita puro, ou seja, não foi constatada a dependência espacial. Nesta situação, considera-se que a variabilidade do

fenômeno é aleatória, comportamento esse esperado, uma vez que a condutividade hidráulica é altamente dependente de variações nos atributos físicos do solo. Desse modo, a distância entre os pontos de amostragens podem não ter sido suficientes para detectar a dependência espacial, sendo necessário um aumento na densidade de pontos de amostragens, pois a distância entre os pontos de amostragens podem estar superiores à distância em que há correlação entre os valores de condutividade hidráulica saturada.

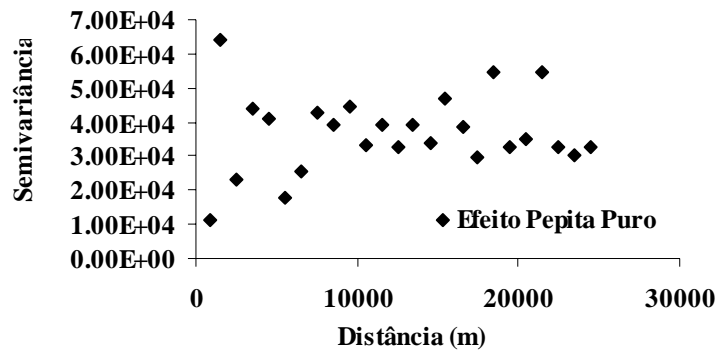


Figura 5. Semivariograma da condutividade hidráulica saturada.

No entanto, quando se realiza a transformação dos dados de condutividade hidráulica saturada em log. normal, o semivariograma Figura 6, passa a apresentar valores baixos de semivariância para pequenas distâncias e um aumento gradativo da semivariância com o aumento da distância, até que a partir de uma determinada distância, neste caso 3.785,9 metros, os valores de semivariância permanecem constantes. Este comportamento espacial demonstra que a variável possui dependência espacial, ou seja, valores de condutividade hidráulica em pontos mais próximos são mais semelhantes do que em pontos mais distantes. Assim, foi possível ajustar um modelo teórico do tipo exponencial ao semivariograma

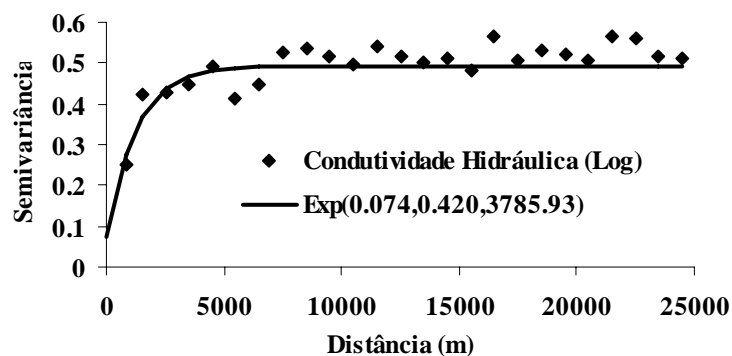


Figura 6. Semivariograma do logaritmo da condutividade hidráulica saturada.

O modelo ajustado apresenta efeito pepita de 0,074 e patamar de 0,494 (Figura 6). Segundo classificação proposta por Cambardella et al. (1994), os parâmetros do semivariograma indicam que a dependência espacial para condutividade hidráulica é forte, pois a proporção do efeito pepita em relação ao patamar foi pequena, com valor de 15 % Tabela 3.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas para os atributos físico-hídricos do solo.

Variável	Modelo	Efeito pepita (Co)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a) (m)	Co/(Co+C ₁) (%)	r ²
Ks	Efeito Pepita Puro	---	---	---	---	---
Log. Ks	Exponencial	0,074	0,420	3.785,93	14,97	88,46 %
Argila	Exponencial	10.000,00	16.812,39	4.995,19	37,29	74,54 %
Argila x Log.Ks	Exponencial	-3,32	-12,13	19.997,04	21,48	54,42 %

Ks= condutividade hidráulica saturada; Log.Ks = logaritmo da condutividade hidráulica saturada; Co+C₁ = patamar; r²= coeficiente de determinação.

Apesar do grau de dependência espacial ter sido classificado como forte e o coeficiente de determinação do ajuste do modelo exponencial ao semivariograma experimental (Figura 6), ter valor alto, 88,5% (Tabela 3), quando foi realizada a validação cruzada (Jack-knifing) (Tabela 4), o coeficiente de correlação entre os dados de condutividade hidráulica medidos e os dados estimados com o uso do modelo exponencial, foi baixo, com valor de 30,4% para um número de vizinhos utilizados na estimativa igual a 12.

Tabela 4. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma da condutividade hidráulica saturada. Arquivo texinf3.txt.

Vizinhos	Regressão			Erro Reduzido	
	a	b	r ²	Média	Variância
4	2,346	0,1716	30,60 %	5,43E-02	1,099
6	2,394	0,147	28,32 %	2,48E-02	1,138
8	2,405	0,1427	28,88 %	2,30E-02	1,142
12	2,413	0,1363	30,37 %	9,68E-03	1,125
16	2,436	0,1288	29,8 %	1,32E-02	1,134
20	2,429	0,1311	31,25 %	1,13E-02	1,123
32	2,461	0,1199	30,64 %	1,36E-02	1,132

a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. Obs: foi escolhido 12 vizinhos.

Isto demonstra que existe a dependência espacial para condutividade hidráulica e que pode-se realizar interpolações por meio da krigagem, para pontos não amostrados, gerando mapa de condutividade hidráulica Figura 19 e de variância da estimativa Figura 22, para a área do Projir. Porém, conforme resultados da validação cruzada, Tabela 4, o uso deste produto gerado, mapa de condutividade hidráulica saturada, deve ser feito com bastante cautela, pois não são resultados exatos. Assim o mapa de variância da estimativa poderá auxiliar o planejamento da localização de novos pontos de amostragens com objetivo de aumentar a confiabilidade na interpolação de valores de condutividade hidráulica saturada.

Quando existe correlação entre dois atributos, pode ser possível o uso de informação de um atributo para prever informações sobre o outro atributo correlacionado. E ainda, se for constatada a existência de dependência espacial para os dois atributos em questão existe a possibilidade de realizar a interpolação, por meio da co-krigagem, de um atributo com o auxílio de um atributo auxiliar. Podendo assim, melhorar confiabilidade na estimativa, reduzindo as diferenças entre os valores medidos e os valores estimados. Com o intuito de conhecer a existência e o grau de correlação da condutividade hidráulica saturada com outros atributos do solo, foi realizado o cálculo de correlação que é apresentado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Matriz de correlação entre os atributos físico-hidráulicos do solo da área do Projir.

	CAD	Areia	Silte	Argila	GF	Siarg	Ds	Dp	Poros.	C.org	Ks
CAD	1										
Areia	-0,5692	1									
Silte	0,6919	-0,759	1								
Argila	0,4021	-0,9129	0,5015	1							
GF	0,3843	-0,2533	0,2817	0,2278	1						
Siarg	0,3007	0,0687	0,4605	-0,3321	0,0876	1					
Ds	-0,6421	0,7424	-0,5371	-0,5762	-0,2565	-0,0273	1				
Dp	-0,3969	0,2698	-0,1372	-0,0705	-0,0814	-0,0483	0,7859	1			
Poros.	0,5897	-0,6764	0,6094	0,6487	0,3218	0,0585	-0,4834	0,0879	1		
C.org	0,5187	-0,2051	0,1896	0,0765	0,203	0,083	-0,6759	-0,7969	0,2363	1	
Ks	-0,2083	0,3284	-0,3013	-0,2744	-0,1035	0,0202	0,2717	0,0963	-0,2673	-0,0779	1

CAD= capacidade de água disponível; GF= grau de floculação de argila; Siarg= relação silte/argila; Ds= densidade do solo; Dp= densidade das partículas; Poros.= porosidade total; C.org.= carbono orgânico; Ks= condutividade hidráulica saturada.

Era esperada uma alta correlação com alguns atributos físicos, como por exemplo porosidade total, o que não ocorreu. A correlação com a porosidade total foi negativa e com valor de -26,7 % (Tabela 5), indicando que os valores de condutividade hidráulica não necessariamente dependem do valor da porosidade total. A porosidade do solo é composta de macroporos e microporos. Segundo Mesquita (2004) a macroporosidade se correlaciona com a condutividade hidráulica saturada. No entanto, a presença de um poro com diâmetro extremo a mais numa amostra de solo afetará pouco a macroporosidade, mais muito a sua condutividade hidráulica saturada. A densidade de fluxo que passa por um poro é proporcional ao quadrado de seu diâmetro, e por estas razões é fácil obter valores discrepantes (altos) para condutividade hidráulica saturada devido a um poro com grande diâmetro, enquanto a macroporosidade, não apresentará a mesma tendência.

A presença de rachaduras no perfil do solo, devido aos ciclos de umedecimento e secagem das argilas expansivas, também podem contribuir para uma maior variação nos valores de condutividade hidráulica saturada.

A condutividade pode descrever o sistema poroso de um solo, mas não a porosidade total, e nem a mesmo a macro e a microporosidade do solo, consideradas separadamente. Portanto a, correlação entre a condutividade hidráulica saturada e a porosidade dependerá de outros fatores e uma simples análise de correlação não poderá descrever a relação entre estas variáveis (Mesquita et al., 2004).

O atributo que mais se correlacionou com a condutividade hidráulica saturada foi a areia, com coeficiente de correlação de 29,7 % (Tabela 6). Para silte, argila e carbono orgânico a correlação foi negativa, com valores de -26,4%, -23,9% e -1,1%, respectivamente.

Tabela 6. Matriz de correlação entre os atributos físico-hidráulicos do solo da área do Projir.

	Areia	Silte	Argila	C.org	Ks	Log.Ks
Areia	1					
Silte	-0,7605	1				
Argila	-0,8433	0,4083	1			
C.org.	-0,0805	0,0649	-0,1055	1		
Ks	0,2973	-0,2643	-0,2389	-0,0111	1	
Log.Ks	0,1611	-0,2401	-0,0682	0,0177	0,5905	1

Ks= condutividade hidráulica saturada; C.org.= carbono orgânico; Log.Ks= logaritmo da condutividade hidráulica saturada.

Apesar do coeficiente de correlação entre argila e condutividade hidráulica ter sido baixo, foi realizado o cálculo do semivariograma cruzado (Figura 8), utilizando a argila, pois

a argila apresentou dependência espacial e foi possível o ajuste de um modelo matemático, conforme Figura 7.

O semivariograma calculado para argila (Figura 7) demonstra a existência de dependência espacial, com grau moderado de dependência espacial, pois o valor calculado da relação efeito pepita / patamar, proposto por Cambardella et al. (1994), apresentou o valor de 37,3 %, e o alcance medido foi de 4.995,2 metros, conforme Tabela 3. Segundo Vieira (2000) a baixa relação efeito pepita / patamar ($C_0 / C_0 + C_1$) de uma variável indica se tratar de fenômeno com grande continuidade espacial, o que resulta em menor variância da estimativa e maior confiança na interpolação. Este grau de dependência espacial permite uso deste modelo matemático do tipo exponencial, para a interpolação, por meio da krigagem, de valores de argila para pontos não amostrados na área do Projir, possibilitando a geração de mapas de isovalores com considerável grau de confiabilidade e bom nível de detalhamento.

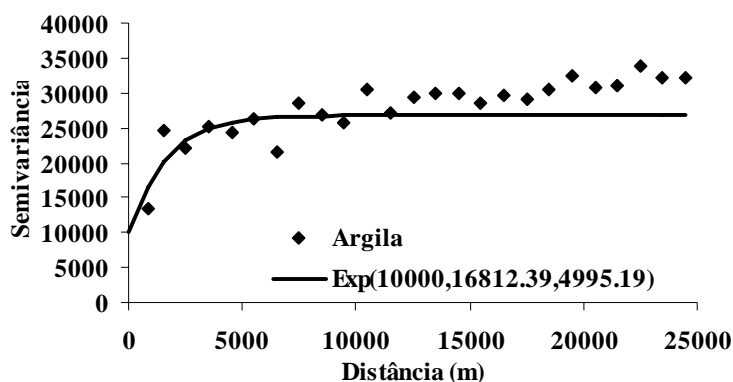


Figura 7. Semivariograma com modelo ajustado para argila.

De acordo com Isaak & Srivastava (1989), dentre os modelos de semivariograma ajustados, o exponencial é que descreve uma função aleatória mais errática às pequenas distâncias, enquanto que o modelo esférico descreve uma função aleatória mais contínua.

Os resultados da validação cruzada para o modelo exponencial (Figura 7) revelaram que houve uma correlação de 49,95% (Tabela 7) quando o foi estimado valores para pontos onde já se conheciam os teores de argila. Demonstrando que a modelagem para a argila obteve uma precisão maior do que a modelagem realizada para o log. da condutividade hidráulica saturada, que apresentou uma correlação de 30,40 % (Tabela 4).

Tabela 7. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma da argila. Arquivo texinfi3.txt.

Vizinhos	Regressão			Erro Reduzido	
	a	b	r ²	Média	Variância
4	293.2	0.3312	0.4844	4.31E-02	0.9947
6	300.2	0.313	0.4952	3.81E-02	0.9914
8	300.7	0.3088	0.4995	3.04E-02	0.9955
12	307.4	0.297	0.4968	4.11E-02	1.009
16	307.1	0.2976	0.5077	4.14E-02	0.9957
20	311	0.288	0.5043	4.07E-02	1.003
32	323.2	0.2599	0.4988	4.18E-02	1.01

a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. Obs: foi escolhido 8 vizinhos

Como verificado nos semivariogramas apresentados nas Figuras 6 e 7, houve dependência espacial para os atributos condutividade hidráulica saturada e argila, assim foi

realizado o cálculo do semivariograma cruzado (Figura 8). O semivariograma cruzado, com modelo teórico exponencial ajustado, apresentado na Figura 8, demonstra que foi possível modelar a dependência espacial cruzada para logaritmo da condutividade hidráulica saturada e argila, sendo argila a variável auxiliar, ou seja, irá contribuir para a interpolação da condutividade hidráulica saturada. Ambas as variáveis fazem parte do mesmo arquivo de dados, texinf3.txt. Conforme Tabela 3, o coeficiente de determinação do ajuste do modelo exponencial ao semivariograma experimental (Figura 8) foi baixo, com valor de 54,4%, porém a proporção do efeito pepita em relação ao patamar foi de 21,5 %, sendo considerado de forte dependência espacial, segundo Cambardella (1994).

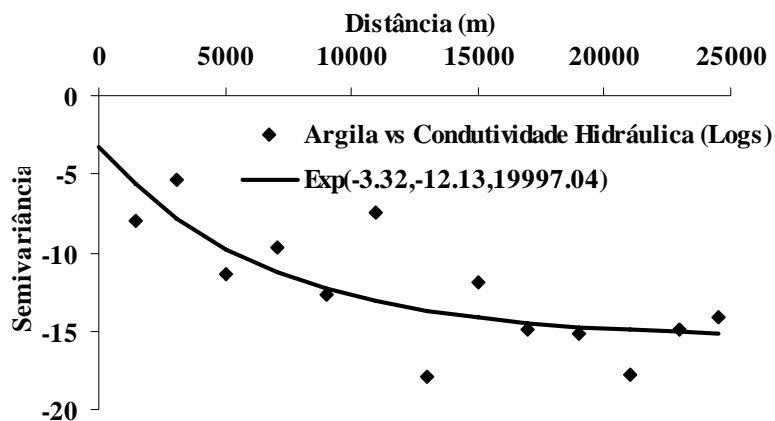


Figura 8. Semivariograma cruzado do logaritmo da condutividade hidráulica saturada e argila.

O resultado da validação cruzada (Jack-knifing) (Tabela 8), indica que houve baixa correlação, 28,7 %, entre os valores medidos no campo e os valores estimados pelo modelo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado de argila com condutividade hidráulica saturada (Figura 8). De acordo com os resultados do Jack-knifing (Tabela 8), o melhor número de vizinhos para cálculo da co-krigagem foi 6 vizinhos para argila e 8 vizinhos para logaritmo da condutividade hidráulica saturada. Este resultado da validação cruzada mostrou que o modelo exponencial ajustado para condutividade hidráulica (Figura 6), apresentou melhor desempenho, quando comparado com o modelo ajustado ao semivariograma cruzado, com um coeficiente de correlação maior, 30,4% (Tabela 4), ao interpolar valores de condutividade hidráulica saturada em pontos medidos.

Na Tabela 9, foi apresentado o resultado da análise descritiva da condutividade hidráulica saturada para o arquivo infiltrk.txt, este arquivo está composto por 314 pontos georreferenciados onde foram realizados testes de infiltração e determinada a condutividade hidráulica saturada. Os valores de condutividade hidráulica saturada apresentaram uma considerável amplitude, variando de 0,1 mm.h⁻¹ até 2.327 mm.h⁻¹. Assim, para os dados originais, foi constatada uma alta variabilidade dos dados com valor muito alto do coeficiente variação (224,8 %), de acordo com a classificação de Gomes (1984). Quando os dados foram transformados para lognormal, passaram a apresentar um coeficiente variação menor em comparação aos dados sem transformação, porém de acordo com Gomes (1984), o valor de 26,6% ainda é considerado alto. Comparando os coeficientes de variação deste arquivo com 314 pontos com o arquivo texinf3.txt, que possui 249 pontos de condutividade hidráulica saturada, contata-se que existe bastante semelhança e o aumento no número de pontos, 65 pontos, não contribuiu para a redução da variabilidade.

Tabela 8. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado do log. da condutividade hidráulica saturada e argila. Arquivo texinfi3.txt.

Vizinhos		Regressão			Erro Reduzido	
VIZ_1	VIZ_2	a	b	r ²	Média	Variância
2	2	1.755	0.3638	0.2761	-9.32E-02	0.2995
2	4	1.758	0.3627	0.2738	-1.11E-02	7.612
2	6	1.761	0.3615	0.2728	-0.1605	9.297
2	8	1.763	0.3609	0.2722	-8.04E-02	18.57
2	10	1.761	0.3614	0.2725	0.3388	12.09
2	12	1.763	0.3608	0.2719	0.3823	9.705
2	16	1.761	0.3616	0.2724	3.99E-02	7.784
4	2	1.225	0.5513	0.3105	-0.3273	0.3257
4	4	1.226	0.551	0.3084	0.9726	6.78
4	6	1.249	0.5428	0.3035	0.1906	9.759
4	8	1.251	0.5422	0.3029	2.38E-02	9.112
4	10	1.253	0.5411	0.3025	9.08E-02	6.882
4	12	1.252	0.5414	0.3024	0.1024	10.14
4	16	1.25	0.5422	0.303	4.49E-02	5.165
6	2	1.232	0.5527	0.2881	-0.4551	0.2298
6	4	1.235	0.5519	0.2858	6.09E-02	0.8784
6	6	1.257	0.544	0.2815	-0.8716	94.63
6	8	1.269	0.5398	0.2795	-0.5895	16.03
6	10	1.274	0.5377	0.2787	0.4637	25.92
6	12	1.273	0.538	0.2786	0.2981	10.07
6	16	1.268	0.5399	0.2798	-0.2796	9.234
8	2	1.125	0.5913	0.2937	-0.2146	2.74E-02
8	4	1.122	0.5922	0.2918	6.26E-02	1.994
8	6	1.152	0.5817	0.2869	0.3168	1.252
8	8	1.168	0.5757	0.2844	0.3557	19.53
8	10	1.192	0.5674	0.2807	-0.3151	12.11
8	12	1.19	0.568	0.2809	-0.2339	12.82
8	16	1.182	0.5708	0.2824	0.1398	16.5
10	2	1.005	0.6364	0.3016	-0.34	3.32E-03
10	4	1.007	0.6359	0.2992	0.7003	3.123
10	6	1.037	0.6249	0.2940	0.2758	3.744
10	8	1.056	0.6182	0.2912	-6.86E-02	4.684
10	10	1.099	0.6027	0.2849	0.1679	14.03
10	12	1.097	0.6035	0.2852	1.42E-03	18.89
10	16	1.089	0.6062	0.2868	-0.3568	13.35
12	2	0.8631	0.6869	0.3095	-0.6316	0.1787
12	4	0.8633	0.6868	0.3071	-0.392	6.28E-03
12	6	0.8975	0.6745	0.3016	0.1981	0.6379
12	8	0.9203	0.6663	0.2986	0.3807	6.233
12	10	0.9663	0.65	0.2921	-0.4548	13.56
12	12	0.9614	0.6514	0.2929	-0.3411	18
12	16	0.9547	0.6538	0.2943	1.43E-02	14.75

a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. Obs: foram escolhidos 8 vizinhos para log. da condutividade hidráulica (VZ1) e 6 vizinhos para argila (VZ2).

O teste de normalidade (Tabela 9) indicou que tanto os dados originais de condutividade hidráulica saturada, como os transformados não apresentam distribuição normal de frequência, o mesmo ocorreu com o arquivo de dados texinfi3.txt, com 249 pontos medidos de condutividade hidráulica (Tabela 2).

Tabela 9 – Análise descritiva dos atributos físico-hídricos da área do Projir, com 314 pontos georreferenciados.

Parâmetros	Ks (mm.h ⁻¹)	Log Ks (mm.dia ⁻¹)
Número	314	314
Mínimo	0,1	0,38
Máximo	2327	4,75
Média Aritmética	86,70	2,79
Variância	37973,3	0,547
Desvio Padrão	194,90	0,74
Coefficiente de Variação (%)	224,76	26,55
Assimetria	7,1	-0,2
Curtose	68,3	-0,3
	*	*
D	0,3284	0,06

D - teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov). *Dados não apresenta distribuição normal, a nível de 5 % de significância.

Com o cálculo do semivariograma (Figura 9), foi constatada a dependência espacial para o logaritmo da condutividade hidráulica saturada, com modelo teórico exponencial ajustado ao semivariograma experimental. O modelo ajustado apresenta alcance de 24,19 km, com efeito pepita de 0,30 e patamar de 0,58. Segundo classificação proposta por Cambardella et al. (1994), os parâmetros do semivariograma indicaram que a dependência espacial para condutividade hidráulica saturada é moderada, pois a proporção do efeito pepita em relação ao patamar foi média, com valor de 51,7 % (Tabela 11).

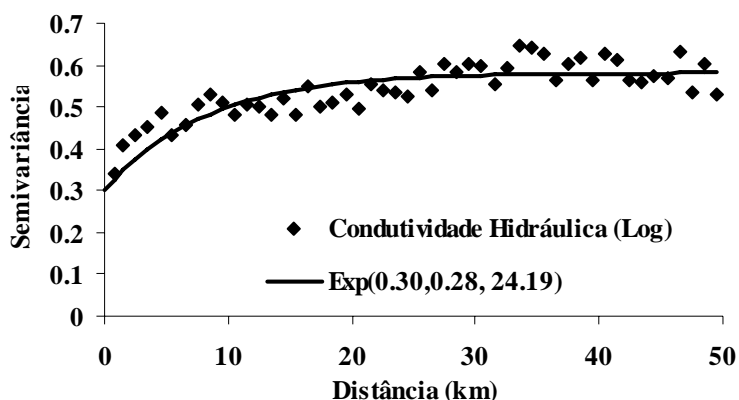


Figura 9. Semivariograma do logaritmo da condutividade hidráulica.

Apesar do grau de dependência ter sido moderado e o coeficiente de determinação do ajuste do modelo exponencial ao semivariograma experimental (Figura 9), ter apresentado valor de 67,9 % (Tabela 11), quando foi realizada a validação cruzada (Jack-knifing) (Tabela 10), o coeficiente de correlação entre os dados de condutividade hidráulica medidos e os dados estimados com o uso do modelo exponencial, foi baixo, com valor de 29,1 % para um número de vizinhos utilizados na estimativa igual a 6.

Para os modelos ajustados ao semivariograma de condutividade hidráulica saturada, tanto no arquivo com 249 pontos (Figura 6), como no arquivo com 314 pontos (Figura 9), nota-se que o resultado do Jack-knifing revelou baixo coeficiente de correlação entre os dados

medidos e os dados estimados pelos respectivos modelos teóricos exponenciais, sendo coeficiente de correlação de 30,4 % e 29,1 %, respectivamente (Tabela 4 e 10). No entanto, o arquivo com 249 pontos apresentou maior dependência espacial com relação efeito pepita patamar de 15 % (Tabela 3), comparando com o valor de 51,7 % do arquivo com 314 pontos (Tabela 11). Foi verificado também um maior coeficiente de determinação no ajuste do modelo exponencial ao semivariograma experimental no arquivo de dados com 249 pontos, com 88,5% (Tabela 3), comparando com o arquivo com 314 pontos, apresentando 67,9 % de coeficiente de determinação (Tabela 11). Porém o alcance para o modelo exponencial ajustado, foi maior no arquivo com 314 pontos, com 24,19 km, em relação aos 3,8 km do arquivo com 249 pontos. Com estes resultados, foi constatado que o modelo exponencial ajustado ao semivariograma experimental (Figura 6), do arquivo com 249 pontos, poderá apresentar melhor desempenho e confiabilidade na interpolação de condutividade hidráulica saturada para pontos não amostrados, apesar da diferença no coeficiente de correlação, resultado da validação cruzada (Tabela 4), ter apresentado valor muito próximo em relação ao valor encontrado na validação cruzada para o modelo ajustado ao semivariograma do arquivo com 314 pontos (Tabela 10), com 30,4 % e 29,1 %, respectivamente.

Tabela 10. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma da condutividade hidráulica saturada. Arquivo infiltrk.txt.

Vizinhos	Regressão			Erro Reduzido	
	a	b	r ²	Média	Variância
4	2.339	0.1659	0.2878	2.13E-02	1.213
6	2.391	0.1472	0.291	2.17E-02	1.226
8	2.439	0.1314	0.2777	2.72E-02	1.254
12	2.448	0.1257	0.2849	1.71E-02	1.253
16	2.448	0.1242	0.2973	9.79E-03	1.236
20	2.462	0.1178	0.2901	3.86E-03	1.242

a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. Obs: foi escolhido 16 vizinhos para areia.

Na análise de correlação entre os atributos físico-hídricos, foi verificado que a areia apresentou os maiores coeficientes de correlação com a condutividade hidráulica saturada, sendo 32,8 % em um arquivo de dados com 120 pontos de areia e condutividade hidráulica saturada (Tabela 5) e 29,7 % no cálculo de correlação no arquivo contendo 249 pontos (Tabela 6).

Com o objetivo de verificar a possibilidade do uso da areia como variável auxiliar na interpolação de valores de condutividade hidráulica saturada, foi calculado o semivariograma para areia do arquivo texturak.txt, contendo 791 pontos com valores de areia. Sendo este arquivo o que contém o maior número de pontos com medições de areia, silte, argila e carbono, conforme Tabela 18. Segundo classificação proposta por Cambardella et al. (1994), os parâmetros do semivariograma indicaram que a dependência espacial para areia é moderada, pois a proporção do efeito pepita em relação ao patamar foi de 37,2 %, Tabela 11. O alcance foi de 35 Km e o coeficiente de determinação do ajuste do modelo exponencial ao semivariograma experimental (Figura 10) foi de 95,5%.

Tabela 11. Parâmetros dos Semivariogramas para os atributos físico-hídricos do solo.

Variável	Modelo	Efeito pepita (C ₀)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a) (m)	Co/(Co+C ₁) (%)	r ²
Log.Ks	Exponencial	0,30	0,28	24,19 (km)	51,70	67,89 %
Areia x Log.Ks	Exponencial	0	-15,34	22,82 (km)	0	51,49 %
Areia ¹	Exponencial	34.419,63	58.063,34	34,96 (km)	37,22	95,45 %

Log.Ks= logaritmo da condutividade hidráulica saturada; Co+C₁ = patamar; r² = coeficiente de determinação. 1= arquivo com 791 pontos.

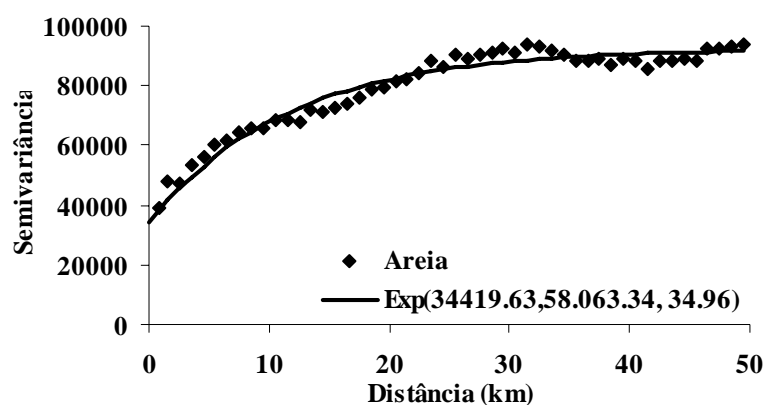


Figura 10. Semivariograma com modelo ajustado para areia.

O modelo exponencial ajustado ao semivariograma de areia (Figura 10), se mostrou o modelo teórico com os melhores ajustes ao semivariograma experimental, comparando com os outros ajustes de modelo matemático nos semivariogramas experimentais dos demais atributos físico hídricos da área do Projir, submetidos à variografia. Esta afirmação é comprovada quando analisamos o resultado da validação cruzada (Jack-knifing), onde o modelo foi testado (Tabela 12), apresentando coeficiente de correlação calculado quando o modelo interpolou valores de areia para pontos onde já se conhecia o valor deste atributo, de 64,4%, utilizando 16 vizinhos para a interpolação.

Tabela 12. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma da areia. Arquivo texturak.txt.

Vizinhos	Regressão			Erro Reduzido	
	a	b	r ²	Média	Variância
4	177,1	0,4593	0,612	-3,43E-02	1,044
6	183,8	0,4411	0,6161	-3,35E-02	1,078
8	185	0,4404	0,6311	-2,85E-02	1,06
12	189,5	0,431	0,6399	-2,20E-02	1,053
16	193	0,4252	0,6435	-1,49E-02	1,049
20	195,6	0,4227	0,646	-6,64E-03	1,045

a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. Obs. Foi escolhido 16 vizinhos para areia.

O semivariograma apresentado na Figura 10, evidenciou a existência de dependência espacial para o atributo areia. Assim, foi possível, como verificado na Figura 11, calcular o semivariograma cruzado para condutividade hidráulica saturada do arquivo contendo 314 pontos e areia como variável auxiliar, do arquivo contendo 671 pontos. Sendo que para um

atributo ser usado como variável auxiliar na interpolação de um outro atributo, os dois atributos devem possuir dependência espacial na área em estudo.

O semivariograma cruzado com modelo exponencial ajustado (Figura 11) demonstra a existência de correlação na dependência espacial da areia e condutividade hidráulica saturada. A baixa razão entre efeito pepita e patamar de 0 % (Tabela 11), classificou a dependência espacial como forte, de acordo com a classificação proposta por Cambardella (1994). O alcance medido foi de 22,8 km e o coeficiente de correlação do ajuste do modelo ao semivariograma experimental foi de 51,5 % (Tabela 11). O modelo exponencial ajustado ao semivariograma, quando submetido à validação cruzada, obteve um coeficiente de correlação de 29,0 %, utilizando 6 vizinhos para logaritmo da condutividade hidráulica e 8 vizinhos para areia, Tabela 13. Este resultado da validação cruzada foi semelhante aos resultados calculados para o modelo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado de condutividade hidráulica saturada e argila (Figura 8), onde o coeficiente de correlação da validação cruzada foi 54,4 %.

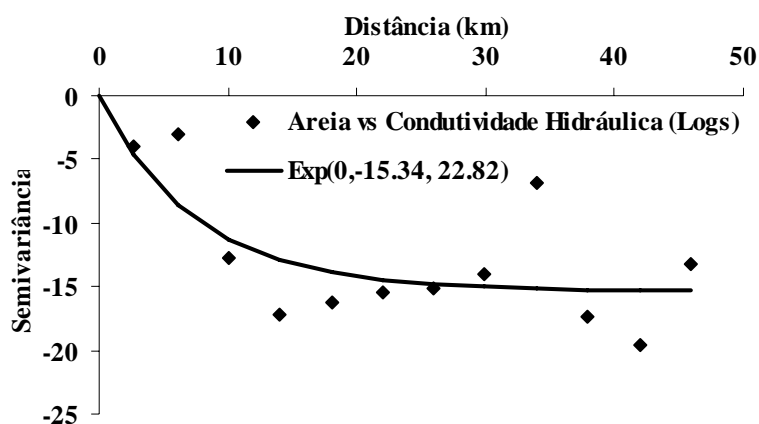


Figura 11. Semivariograma cruzado do logaritmo da condutividade hidráulica saturada e areia.

4.2.1 Avaliação dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas de condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo.

Os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas foram submetidos à validação cruzada ou Jack-knifing, que calcula alguns parâmetros que medem a precisão do modelo na interpolação de valores de uma variável em um ponto onde já se conhece este valor. O parâmetro (a) é a interseção da reta do gráfico dos valores medidos versus valores interpolados pelo modelo, o (b) é o coeficiente angular da reta, o (r^2) é o coeficiente de correlação entre os pontos medidos e estimados. E ainda é calculado a média do erro reduzido da estimativa e a variância do erro reduzido. De acordo com Vieira (2000), o julgamento desses resultados deve ser feito de uma maneira global, examinando-se todos os parâmetros. Os valores ideais procurados são: $a=0$, $b=1$, $r^2=1$, média do erro reduzido=0, variância do erro reduzido=1.

Desse modo pode-se notar que para a condutividade hidráulica saturada, o modelo matemático que proporcionou os melhores parâmetros foi o exponencial ajustado ao semivariograma experimental do logaritmo da condutividade hidráulica saturada do arquivo texinf3.txt, que contém 191 pontos georreferenciados. Podemos notar na Tabela 13 que os melhores parâmetros foram obtidos com 12 vizinhos, sendo, $a= 2.413$, $b=0,136$, $r^2= 30,37 \%$, média do erro reduzido= 0,0096 e variância do erro reduzido= 1,125. Assim, apesar dos valores dos parâmetros não serem tão diferentes, este modelo foi superior aos modelos ajustados ao semivariograma cruzado do log da condutividade hidráulica com areia e com argila, bem como foi superior ao modelo exponencial ajustado ao semivariograma do log da condutividade hidráulica do arquivo infiltrk.txt com 314 pontos georreferenciados.

Tabela 13. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para os modelos ajustado aos semivariogramas para interpolação de condutividade hidráulica saturada.

Atributo	Modelo	Vizinhos		Regressão			Erro Reduzido	
		Vz.1	Vz.2	a	b	r ² (%)	Média	Variância
Log. Ks ¹	Exponencial	6		2,391	0,1472	29,10	2,17E-02	1,226
Log. Ks ¹ x Areia ²	Exponencial	6	8	1,186	0,5716	29,03	0,2303	9,064
Areia ²	Exponencial	16		193	0,4252	64,35	-1,49E-02	1,049
Log. Ks ³	Exponencial	12		2,413	0,1363	30,37	9,68E-03	1,125
Argila ³	Exponencial	8		301	0,3088	49,95	3,04E-02	0,9955
Log. Ks ³ x Argila ³	Exponencial	8	6	1,152	0,5817	28,69	0,3168	1,252

1= arquivo infiltrk.txt (314 pontos); 2= arquivo texturak.txt (791 pontos); 3= arquivo texinfi3.txt (191 pontos); a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos.

Já os modelos exponenciais ajustados ao semivariogramas cruzados do log da condutividade hidráulica com areia e argila, foram bastante semelhantes, com coeficiente de correlação próximos, diferenciando-se mais na média do erro reduzido, onde o modelo para semivariograma cruzado com areia do arquivo texturak.txt com 791 pontos, foi melhor, apresentando valor de 0,23 Tabela 13 e coeficiente de correlação de 29,03%.

Dentre os atributos que tiveram modelos ajustados apresentados na Tabela 13, a areia do arquivo texturak.txt com 791 pontos, apresentou um coeficiente de correlação de 64,35 %, valor consideravelmente superior aos modelos ajustados para os demais atributos.

4.3 Análise Exploratória da Capacidade de Água Disponível

Os resultados da análise descritiva, apresentados na Tabela 14, revelaram que a densidade das partículas apresentou a menor variabilidade, com menor coeficiente de variação, 12 %, sendo este valor considerado de média variação, conforme classificação de Gomes (1984). Também teve valor médio de coeficiente de variação a densidade do solo e porosidade. Os demais atributos, capacidade de água disponível, areia, silte, argila, relação silte argila, grau de floculação e carbono, apresentaram coeficiente de variação muito altos, de acordo com a classificação de Gomes (1984). O carbono orgânico, apresentou a maior variabilidade dentre os atributos, com coeficiente de variação de 133,7 %, sendo esta variabilidade confirmada com a amplitude dos valores de carbono orgânico, com valores mínimos de 0,30 % e máximos de 23,60 %.

A capacidade de água disponível, também apresentou uma considerável amplitude nos valores, variando de 2,7 mm a 187 mm, com um número de 187 pontos georreferenciados. Esta variação pode ser resultado das diferentes classes de solo encontradas na extensa área do Projir, que vão desde Neossolos Quartzarênicos a Organossolos. A grande variação do carbono e da capacidade de água disponível também pode estar relacionada aos diferentes usos e manejos dispensados aos solos da região.

Tabela 14 – Análise descritiva dos atributos físico-hídricos da área do Projir, com até 191 pontos georreferenciados.

Parâmetros	CAD (mm)	Areia (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila (g.kg ⁻¹)	Densidade do Solo (g.cm ⁻³)	Densidade das Partículas (g.cm ⁻³)	Silte/Argila	Grau de Flocculação (%)	Porosidade (%)	C%
Número	187	174	174	174	190	190	174	174	190	191
Mínimo	2,7	4,17	0	28	0,45	1,03	0,01	14,8	19,75	0,30
Máximo	271,8	947,5	492,5	869,17	1,55	2,68	3,62	100	68,30	23,60
Média Aritmética	59,71	357,89	210,07	432,03	1,15	2,49	0,57	69,53	52,95	2,41
Variância	1532,5	93358,6	14316,4	47460,9	0,04	0,09	0,17	460,3	51,6	10,4
Desvio Padrão	39,14	305,54	119,65	217,86	0,20	0,30	0,42	21,45	7,18	3,22
Coefficiente de Variação (%)	65,56	85,37	56,96	50,43	17,31	12,00	72,97	30,68	13,56	133,68
Assimetria	1,858	0,4512	-0,0955	-0,1364	-0,8260	-3,1770	3,4752	-0,4415	-1,7810	3,8530
Curtose	7,039	-1,1722	-1,2216	-0,9448	1,5250	10,2720	19,0784	-0,5240	5,5620	17,0880
D	*	*	*	***	*	*	*	*	*	*
	0,1149	0,1399	0,0967	0,0739	0,1079	0,3121	0,1797	0,0805	0,1154	0,2706

D - teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov). *Dados não apresenta distribuição normal, a nível de 5 % de significância. ***Dados apresentam distribuição normal a 1% de significância

O teste de normalidade (Tabela 14), indicou que apenas a argila apresentou distribuição de frequência do tipo normal. Uma melhor visualização da distribuição de frequência dos atributos físico-hídricos, pode ser observada nas Figuras 27 e 28 em anexo. O histograma para capacidade de água disponível, demonstrou que a maior parte dos pontos medidos, apresentam valores de 3 mm a 93 mm de lâmina de água, sendo valores superiores a 93 mm ocorrendo em menor frequência (Figura 28 em anexo).

4.4 Variabilidade Espacial da Capacidade de Água Disponível

Para os dados de capacidade de água disponível foi calculado o semivariograma experimental e a esse semivariograma ajustado um modelo matemático do tipo exponencial (Figura 12), que revelou dependência espacial para este atributo nos solos da área do Projir. O ajuste do modelo demonstrou uma dependência espacial moderada, segundo Cambardella (1994), para capacidade de água disponível, com relação efeito pepita patamar de 49,28 % (Tabela 15). O coeficiente de determinação do ajuste do modelo ao semivariograma experimental foi de 61,82 % e o alcance da dependência espacial de 47,16 km.

Também foi testado o ajuste de um modelo matemático ao semivariograma do log. da capacidade de água disponível, conforme observado na Figura 13. Foi ajustado um modelo teórico gaussiano ao semivariograma experimental, para a capacidade de água disponível com 187 pontos georreferenciados. O modelo gaussiano demonstra uma dependência espacial com perda de semelhança entre pontos vizinhos, menos intensa com o aumento da distância entre os pontos, quando comparada com os modelos tipo exponencial, ajustado para o semivariograma experimental da capacidade de água disponível na Figura 12.

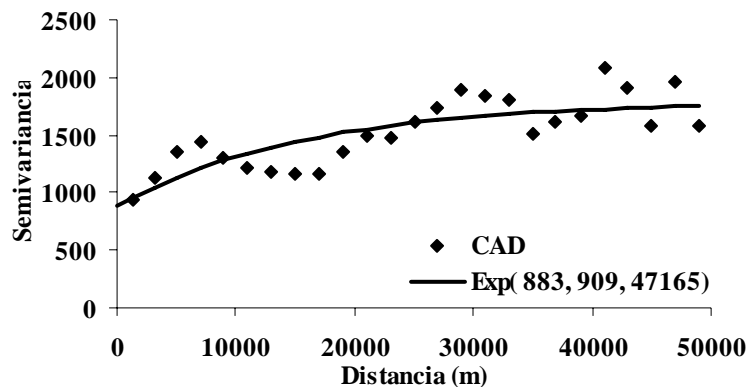


Figura 12. Semivariograma da capacidade de água disponível.

De acordo com a classificação de Cambardella (1994), o logaritmo da capacidade de água disponível apresenta moderada dependência espacial com a razão efeito pepita/patamar de 57,5 % (Tabela 15). A distância limite de correlação espacial para log. capacidade de água disponível foi de 8.545,6 metros (alcance). O coeficiente de determinação do ajuste do modelo gaussiano ao semivariograma experimental foi de 73,2 % (Tabela 15), valor superior ao calculado para o ajuste do modelo aos dados sem cálculo do logaritmo (Figura 12).

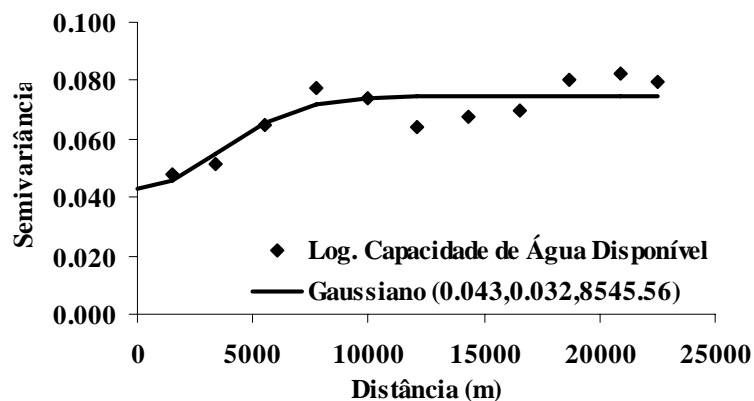


Figura 13. Semivariograma do log. da capacidade de água disponível.

O resultado da validação cruzada (Jack-knifing), Tabela 17, indica que houve uma moderada correlação 60,2 % entre os valores medidos no campo e os valores estimados pelo modelo gaussiano ajustado ao semivariograma experimental de capacidade de água disponível (Figura 13). Apesar do coeficiente de correlação do ajuste do modelo ao semivariograma ter apresentado um coeficiente de determinação de 73,2 % (Tabela 15). De acordo com os resultados do Jack-knifing (Tabela 17), o melhor número de vizinhos para o cálculo da krigagem foi de 4 vizinhos.

De acordo com dados da Tabela 17, o modelo gaussiano ajustado ao semivariograma (Figura 13) demonstrou melhor desempenho ao interpolar valores de capacidade de água disponível para pontos onde já se conhecem estes valores, quando comparado com o modelo exponencial ajustado ao semivariograma experimental de CAD (Figura 12). Pois apresentou um coeficiente de correlação de 60,16 %, valor superior aos 52,86 % do modelo exponencial, Tabela 17.

Tabela 15. Parâmetros dos Semivariogramas para os atributos físico-hídricos do solo. Arquivo fisicaal.txt

Variável	Modelo	Efeito Pepita (Co)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a) (m)	Co/(Co+C ₁) (%)	r ²
Areia	Esferico	46264,29	62686.69	34153.37	42,46	84,35%
Silte	Esferico	6563,593	10678.81	35000	38,10	81,41%
Argila	Esferico	27845,73	24260.43	29499.02	53,44	64,79%
Grau de Floculação		Efeito Pepita Puro				
Silte/Argila	Exponencial	0,086564	0.108608	35.000,00	44,35	38,68%
Ds	Exponencial	0,019328	0.027326	35.000,00	41,43	50,60%
Dp	Exponencial	0,049554	0.059473	35.000,00	45,45	39,34%
Porosidade	Esferico	40.65836	13.85435	30.033,09	74,58	45,55%
CAD	Exponencial	882,8336	908,5808	47.164,91	49,28	61,82%
Log. CAD	Gaussiano	0,0428	0,0317	8.545,56	57,45	73,18 %
CAD x Argila	Esférico	46.264,29	62.686,69	34.153,37	13,11	84,34%
CAD x Areia	Exponencial	213,5349	913.9412	20.000,00	18,93	47,63 %

CAD= capacidade de água disponível; Log.CAD= logaritmo da capacidade de água disponível; Ds= densidade do solo; Dp= densidade das partículas; Co+C₁ = patamar; r²= coeficiente de determinação.

Com o intuito de utilizar atributos físico-hídricos como variável secundária para a interpolação da capacidade de água disponível, co-krigagem, foi realizado o cálculo de correlação que é apresentado na Tabela 16, para verificar a existência e medir o grau de correlação da capacidade de água disponível com outros atributos físicos do solo.

Tabela 16. Matriz de correlação entre os atributos físico-hídricos do solo da área do Projir.

	CAD	Areia	Silte	Argila	GF	Siarg	Ds	Dp	Poros.	C.org
CAD	1									
Areia	-0,6443	1								
Silte	0,6969	-0,8235	1							
Argila	0,5207	-0,9502	0,6058	1						
GF	0,394	-0,2617	0,2521	0,2285	1					
Siarg.	0,1984	0,0501	0,341	-0,2576	0,0709	1				
Ds	-0,5015	0,8226	-0,718	-0,7609	-0,3658	-0,0764	1			
Dp	-0,0961	0,3963	-0,4003	-0,3369	-0,3181	-0,1136	0,7973	1		
Poros.	0,6097	-0,8406	0,7182	0,786	0,3346	0,0561	-0,1412	0,427	1	
C.org	0,3461	-0,1873	0,2096	0,1475	0,2503	0,0237	-0,5856	-0,6155	0,138	1

CAD= capacidade de água disponível; GF= grau de floculação de argila; Siarg= relação silte/argila; Ds= densidade do solo; Dp= densidade das partículas; Poros.= porosidade total; C.org.= carbono orgânico; Ks= condutividade hidráulica saturada.

O atributo que mais se correlacionou com a condutividade hidráulica saturada foi o silte, com coeficiente de correlação de 69,7 %, em seguida foi a areia com correlação negativa de -64,4 %, porosidade com 61 %, argila com 52 % e densidade do solo com correlação negativa de -50,2 %. O atributo que apresentou menor correlação com a capacidade de água disponível foi a densidade das partículas, com 9,6% (Tabela 16).

A partir dos resultados do grau de correlação dos atributos com a capacidade de água disponível, foi selecionado a areia e a argila para cálculo do semivariograma cruzado (Figuras 14 e 15) com a intenção de utilizar a areia como variável auxiliar para interpolar valores de capacidade de água disponível por meio da co-krigagem. Porém, antes de realizar o cálculo do

semivariograma cruzado, foi realizado o cálculo do semivariograma para areia, com objetivo de verificar se neste conjunto de dados a areia apresentava dependência espacial, onde foi constatado a existência da dependência espacial e ajustado um modelo matemático do tipo esférico ao semivariograma experimental (Figura 17). De acordo com a classificação de Cambardella (1994), a areia foi considerada de moderada dependência espacial, com percentual da relação efeito pepita patamar de 42,46 %, com alcance de 34,15 km.

Os resultados da validação cruzada (Tabela 16) à qual foi submetido o modelo esférico ajustado para areia (Figura 17), demonstram que com um número de vizinhos usados na interpolação igual a 12, foi possível estimar valores de areia para pontos onde já se conhecia o teor de areia, com um coeficiente de correlação de 67,57 %. Valor este um pouco superior ao do modelo matemático exponencial ajustado ao semivariograma experimental de areia do arquivo texturak.txt com 671 pontos georreferenciados, que apresentou coeficiente de correlação de 64,4 % (Tabela 12), quando submetido à validação cruzada.

Para argila, assim como ocorreu com a areia, foi constatada a existência de dependência espacial e ajustado um modelo matemático do tipo esférico ao semivariograma experimental (Figura 17). A dependência espacial para areia foi moderada, segundo classificação de Cambardella (1994), com valor da relação efeito pepita patamar de 53,44 %.

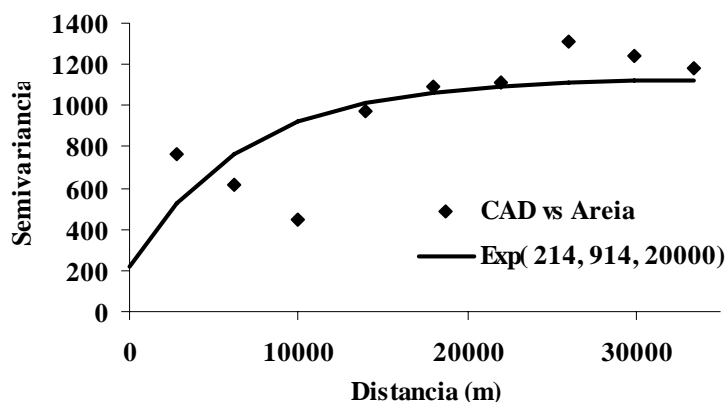


Figura 14- Semivariograma cruzado de capacidade de água disponível e areia, com modelo ajustado.

Para o semivariograma cruzado (Figura 14), foi possível perceber um aumento da semivariância com o aumento da distância, até uma determinada distância, onde atinge o patamar, o que demonstra uma existência de dependência espacial, ou seja, pontos mais próximos são mais semelhantes. Desse modo, foi ajustado um modelo matemático do tipo exponencial ao semivariograma cruzado experimental de capacidade de água disponível e areia. O modelo matemático ajustado revelou uma forte dependência espacial cruzada para capacidade de água disponível e areia, com relação efeito pepita patamar de 18,93 % (Tabela 15), de acordo com a classificação de Cambardella (1994). O alcance encontrado, como pode ser observado na Figura 14, foi de 20 km. Para o ajuste do modelo matemático ao semivariograma foi calculado um coeficiente de determinação alto, com valor de 84,35 %. Porém, apesar do coeficiente de determinação do ajuste do modelo ter apresentado um valor considerável, o coeficiente de correlação da validação cruzada (Jack-knifing), foi de 52,43 %.

O modelo matemático do tipo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado experimental de capacidade de água disponível e argila, revelou uma forte dependência espacial cruzada, de acordo com a classificação de Cambardella (1994), com relação efeito pepita patamar de 13,11 % (Tabela 15). A dependência espacial constatada pelo modelo exponencial foi de 20 km, valor igual ao constatado para o semivariograma cruzado de capacidade de água disponível e areia (Figura 14). Essa semelhança no comportamento da

dependência espacial cruzada da capacidade de água disponível com areia e argila, esta concordando com o resultado da forte correlação entre areia e argila, com valor de -95,02%, (Tabela 16).

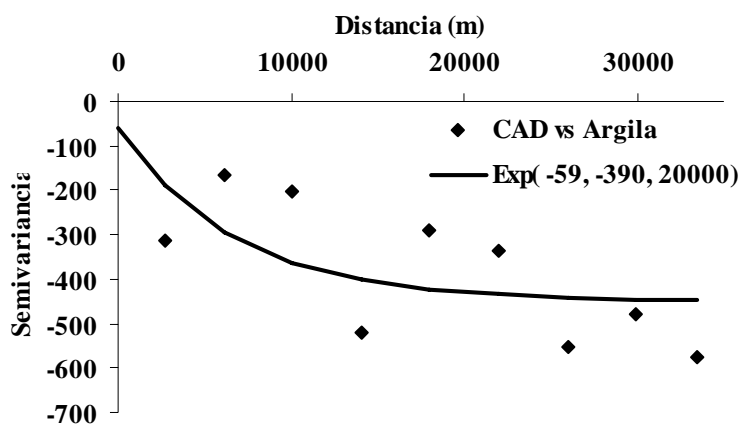


Figura 15- Semivariograma cruzado de capacidade de água disponível e argila, com modelo ajustado.

Com relação à validação cruzada, o modelo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado de capacidade de água disponível e argila, apresentou um coeficiente de correlação de 50,10% ao estimar valores de capacidade de água disponível em pontos onde o valor era conhecido (Tabela 17), valor este inferior ao do modelo exponencial ajustado ao semivariograma de capacidade de água disponível e areia (Figura 14). Porém, apesar de semelhantes na análise dos parâmetros do Jack-knifing, apresentou menor erro reduzido e coeficiente angular mais próximo de 1, com valor de 0,93 (Tabela 17).

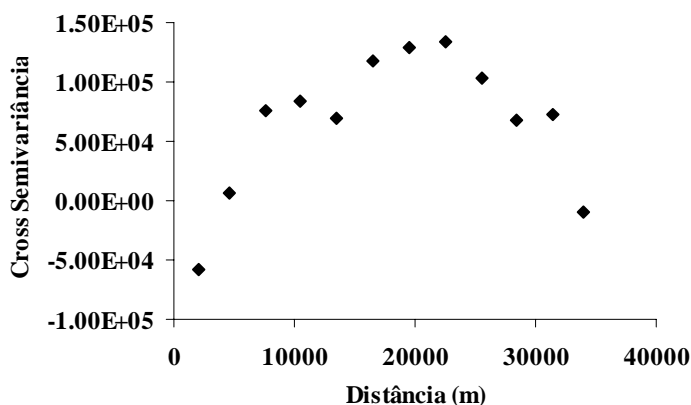


Figura 16. Semivariograma cruzado da capacidade de água disponível e areia

Com a finalidade de testar a dependência espacial cruzada entre a capacidade de água disponível e a areia do arquivo que contém 671 pontos de areia, foi realizado o cálculo do semivariograma cruzado (Figura 16). O semivariograma experimental, demonstra que a semivariância inicia com valores baixos e segue aumentando com o aumento da distância até atingir o valor máximo, quando então inicia a redução gradual da semivariância com o aumento da distância, a partir de aproximadamente 20 km. Como não foi detectado visualmente (Figura 16) um padrão de dependência espacial, que ocorreria se a semivariância atingisse um patamar e mantivesse este valor aproximadamente constante com o aumento da distância, não foi possível realizar o ajuste de modelo matemático teórico ao semivariograma

cruzado experimental de capacidade de água disponível e areia do arquivo com 671 pontos de areia apresentado na Tabela 18.

Na Figura 17 estão apresentados os semivariogramas experimentais com os modelos matemáticos ajustados para os atributos físicos do arquivo fisicaal.txt, neste arquivo para cada ponto georreferenciado existe informação destes atributos e da capacidade de água disponível, perfazendo um total de 187 pontos com dados deste conjunto de atributos com as mesmas coordenadas geográficas.

Com exceção do grau de floculação, onde ocorreu o efeito pepita puro, todos os outros atributos apresentaram dependência espacial. O semivariograma para o grau de floculação demonstra que a distribuição deste parâmetro na área é aleatória, não existe uma continuidade, pontos próximos não tem semelhança maior do que pontos mais distantes.

Já o silte apresentou a menor relação efeito pepita patamar, 38,10 %, sendo classificado como um atributo de moderada dependência espacial, de acordo com a classificação de Cambardella (1994). Também a areia, argila, relação silte argila, densidade do solo, densidade das partículas e porosidade foram classificados como atributos de moderada dependência espacial. A porosidade apresentou a relação efeito pepita patamar maior entre os demais atributos, com valor de 74,58% (Tabela 15), estando no limite da classificação para fraca dependência espacial, que é a relação efeito pepita patamar superior a 75% , segundo classificação de Cambardella (1994).

Foi ajustado modelo matemático do tipo esférico para areia, silte, argila e porosidade. Destes o maior coeficiente de determinação do ajuste do modelo esférico ao semivariograma experimental, foi para os dados de areia, com 84,35%. O menor valor de ajuste foi para o modelo ajustado para os dados da relação silte argila, o que pode ser observado na dispersão dos pontos envolta do modelo ajustado, na Figura 17.

Quanto ao alcance da dependência espacial ou a máxima distância na qual os pontos têm correlação, o silte, densidade do solo, densidade das partículas e relação silte argila apresentaram o maior alcance, com valor de 35 km. Já a argila apresentou o menor alcance com 29,5 km (Tabela 15).

Deste conjunto de atributos foi calculado semivariograma cruzado entre capacidade de água disponível e areia, Figura 14 e capacidade de água disponível e argila (Figura 15).

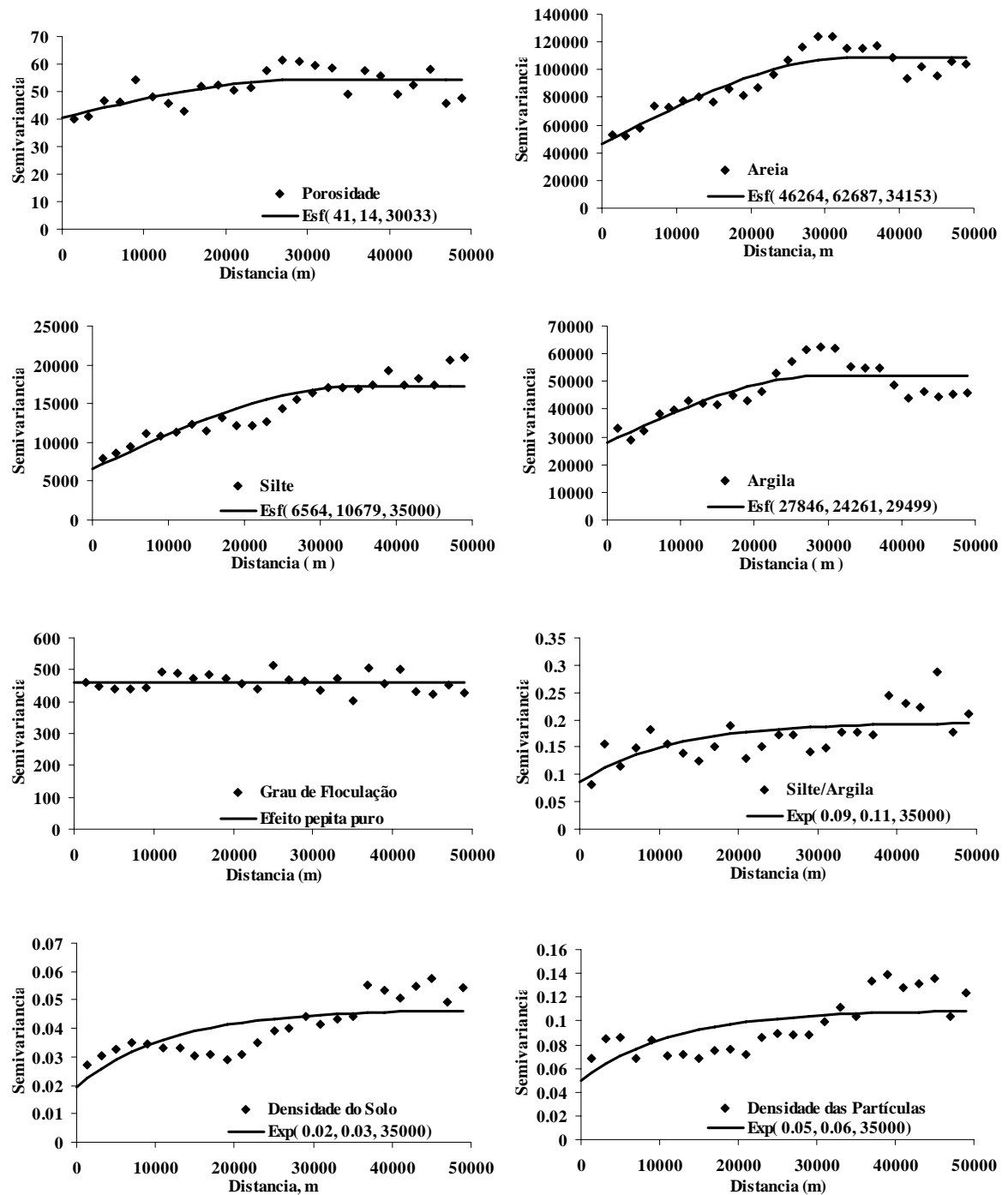


Figura 17- Semivariogramas com modelo ajustado para atributos físicos do solo. Arquivo Fisicaal.

4.4.1 Avaliação dos modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas de capacidade de água disponível e atributos físicos do solo.

Tabela 17. Parâmetros da validação cruzada (Jack-knifing), para os modelos ajustados aos semivariogramas para interpolação de capacidade de água disponível.

Atributo	Modelo	Vizinhos		Regressão			Erro Reduzido	
		Vz.1	Vz.2	a	b	r ²	Média	Variância
CAD ¹ x Areia ¹	Exponencial	6	2	10,76	0,8066	52,43 %	2,95E-02	1,001
CAD ¹ x Argila ¹	Exponencial	16	2	3.256	0,9335	50,10 %	2,35E-02	1,268
CAD ¹	Exponencial	6		40,08	0,3442	52,86 %	2,64E-02	0,9433
Log. CAD ¹	Gaussiano	4		1,025	0,412	60,16 %	6,38E-02	0,7156
Areia ¹	Esférico	16		196,5	0,4395	67,57 %	-1,51E-02	0,858
Silte ¹	Esférico	12		132,9	0,381	60,50 %	2,79E-02	1,035
Argila ¹	Esférico	8		263,7	0,4029	59,88 %	2,99E-02	0,8705
Grauf ¹	Efeito Pepita Puro							
Siarg ¹	Exponencial	20		0,5441	5,09E-02	14,53 %	4,07E-03	1,41
Ds ¹	Exponencial	16		1	0,124	28,34 %	-1,79E-02	1,318
Dp ¹	Exponencial	16		2.316	6,84E-02	17,93 %	-1,26E-02	1,3
Porosidade ¹	Esférico	16		42,65	0,1964	43,15 %	1,33E-02	0,9042

l= arquivo fisicaal.txt (191pontos); a= interseção; b= coeficiente angular da reta; r²= coeficiente de correlação entre valores estimados e valores medidos. CAD= capacidade de água disponível; Log.CAD= logaritmo da capacidade de água disponível; Ds= densidade do solo; Dp= densidade das partículas.

Pode-se notar na Tabela 17 que para a capacidade de água disponível, o modelo matemático que proporcionou o melhor coeficiente de correlação foi o gaussiano ajustado ao semivariograma experimental do logaritmo da capacidade de água disponível. Apresentando coeficiente de correlação de 60,16 % ao interpolar valores de capacidade de água disponível em pontos cujos valores eram conhecidos, utilizando 4 vizinhos. Porém o modelo exponencial ajustado ao semivariograma cruzado de capacidade de água disponível e areia, apresentou menor média do erro reduzido, variância do erro reduzido mais próxima de 1 e coeficiente angular da reta de 0,80, valores mais próximos dos ideais, do que o modelo gaussiano. Segundo Vieira (2000), os valores ideais procurados são: A=0, B=1, r²=1, média do erro reduzido=0, variância do erro reduzido=1. Desse modo, podemos dizer que apesar do coeficiente de correlação ser menor, com valor de 52,43 %, o semivariograma cruzado da capacidade de água disponível e areia pode contribuir para o mapeamento da capacidade de água disponível.

O modelo matemático exponencial ajustado ao semivariograma cruzado da capacidade de água disponível e argila, apesar de ser o modelo que obteve o menor coeficiente de correlação ao interpolar valores de capacidade de água disponível, 50,10% (Tabela 17), comparando com o gaussiano do semivariograma cruzado com areia, exponencial do log da capacidade de água disponível e exponencial da capacidade de água disponível, foi o modelo que apresentou menor média do erro reduzido e coeficiente angular da reta maior, condições estas mais próximas das ideais.

O modelo exponencial ajustado ao semivariograma da capacidade de água disponível, apresentou o segundo melhor coeficiente de correlação ao interpolar valores de capacidade de água disponível. Porém, comparando com o modelo gaussiano do log da capacidade de água disponível, apresentou melhor média do erro reduzido e variância do erro reduzido.

Ao comparar os quatro modelos quanto à interpolação da capacidade de água disponível, podemos observar que as diferenças não são tão expressivas, podendo estes quatro modelos fazer interpolação para capacidade de água disponível com precisão semelhante. Porém foi escolhido o modelo gaussiano ajustado ao log. da capacidade de água disponível, devido maior coeficiente de correlação 60,16%, para interpolar valores de capacidade de água disponível e a partir dos resultados gerar mapa de isovalores de capacidade de água disponível para o Projir.

Dentre os atributos físicos, o modelo esférico para areia apresentou o maior coeficiente de correlação 67,57%, seguido pelo modelo esférico do silte 60,50% e esférico ajustado ao semivariograma experimental da argila com 59,88 % Tabela 17.

4.5 Análise Exploratória da Textura e Carbono Orgânico

Na Tabela 18 é apresentado o arquivo com textura e carbono, do arquivo texturak.txt, com o maior número de pontos georreferenciados para textura e carbono, sendo 671 pontos com valores areia, silte e argila e 791 pontos com valores de carbono. Para os três atributos, o coeficiente variação foi considerado muito alto, segundo a classificação de Gomes (1984). Foi constatado, pelo teste de normalidade que apenas o atributo argila, apresentou distribuição normal de frequência. Os histogramas na Figura 29 em anexo, demonstraram claramente a maior uniformidade da distribuição de valores abaixo e acima da média para a argila.

Este arquivo de dados, texturak.txt, foi testado no cálculo do semivariograma cruzado entre condutividade hidráulica e areia (Figura 11), obtendo na validação cruzada do modelo exponencial ajustado, um coeficiente de correlação de 29,0 %. Porém para a capacidade de água disponível e areia não foi possível o ajuste de modelo matemático, devido ao padrão de distribuição espacial, Figura 16, aparentemente não permitir o ajuste de um modelo matemático que represente a dependência espacial e forneça os parâmetros necessários para a co-krigagem (efeito pepita, alcance e patamar).

Para o atributo areia, foi ajustado um modelo matemático do tipo exponencial, Figura 10, onde se constatou moderada dependência espacial e coeficiente de correlação de 64,4%, Tabela 12, quando o modelo interpolou valores de areia para pontos onde já se conhecia o valor deste atributo, na validação cruzada (Jack-knifing).

Tabela 18. Análise descritiva dos atributos físicos da área do Projir, com 791 pontos georreferenciados.

Parâmetros	Areia (g.kg ⁻¹)	Silte (g.kg ⁻¹)	Argila (g.kg ⁻¹)	C%
Número	671	671	671	791
Mínimo	4	0	0	0,1
Máximo	1000	764	869	43,9
Média Aritmética	342	251	408	4,55
Variância	81028,7	23088,3	34200,4	64,93
Desvio Padrão	284,7	151,9	184,9	8,06
Coeficiente de Variação (%)	83,24	60,61	45,33	177,28
Assimetria	0,60	0	0	2,76
Curtose	-1,0	-0,8	-0,6	7,13
D	*	*	***	*
	0,1443	0,0882	0,0297	0,3488

D - teste de normalidade (Kolmogorov-Smirnov). *Dados não apresenta distribuição normal, a nível de 5 % de significância. ***Dados apresentam distribuição normal a 1% de significância

Para o semivariograma experimental de carbono não foi ajustado o modelo matemático, por apresentar, conforme Figura 18, mais de uma estrutura de semivariância. Isto talvez seja resultado da extensa área do Projir, em que os pontos estão espaçados em algumas partes da área em vários quilômetros, passando pelos mais variados tipos de solos.

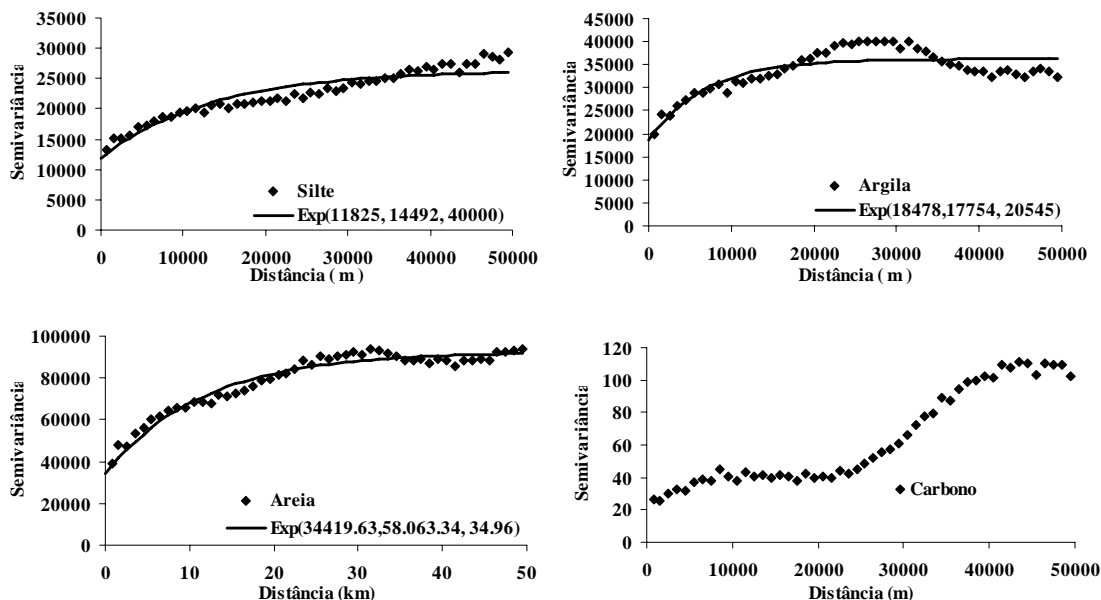


Figura 18. Semivariogramas com modelos ajustados para silte, argila, areia e semivariograma experimental para carbono.

De acordo com os dados da Tabela 19, a areia foi o atributo com maior dependência espacial, comparando com silte e argila. No entanto, os três atributos apresentam relação efeito pepita patamar entre 25% e 75%, o que de acordo com Cambardella (1994), classifica estes atributos como de moderada dependência espacial. O maior coeficiente de determinação no ajuste dos modelos aos semivariogramas experimentais, foi do modelo exponencial ajustado ao semivariograma de areia (Figura 18), com 95,45 % (Tabela 19).

Tabela 19. Parâmetros dos Semivariogramas para os atributos físico-hídricos do solo. Arquivo texturak.txt.

Variável	Modelo	Efeito Pepita (C ₀)	Contribuição (C ₁)	Alcance (a) (m)	Co/(Co+C ₁) (%)	r ²
Areia	Exponencial	34.419,63	58.063,34	34,96 (km)	37,22	95,45 %
Silte	Exponencial	11.825,41	14.492,21	40.000,00	44,93	86,78 %
Argila	Exponencial	18.477,82	17.754,45	20.545,88	51,00	71,06 %

CAD= capacidade de água disponível; Log.CAD= logaritmo da capacidade de água disponível; Ds= densidade do solo; Dp= densidade das partículas; Co+C₁ = patamar; r²= coeficiente de determinação.

4.6 Mapas de Isovalores para Condutividade Hidráulica Saturada e Capacidade de Água Disponível

Nas Figuras 19, 20 e 21 foram plotados os mapas de isovalores que representam a distribuição espacial da condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível e areia para a área do Projir, com 250.000 ha. Estes mapas foram gerados com interpolação de valores em um grid regular de 500 m x 500 m, assim podemos dizer que foi estimado por meio da krigagem um valor para cada 25 hectares.

Os mapas gerados passam a ser uma fonte de informação que poderá ser utilizada em conjunto com mapas de outros atributos, para prever sobre movimentação de água, poluentes, armazenamento de água, nos diversos pontos dos solos que compõem a área do Projir.

O mapa de condutividade hidráulica saturada e variância da estimativa da condutividade hidráulica saturada, Figura 19 e 22, respectivamente foram gerados a partir do arquivo de dados textinf3.txt. Neste arquivo, foi calculado o semivariograma experimental para log. da condutividade hidráulica saturada e ajustado o modelo matemático exponencial. Este modelo, quando submetido à validação cruzada (Jack-knifing), apresentou melhor coeficiente de correlação, 30,37 % e menor média do erro reduzido, 0,00969, quando comparado com os modelos ajustados para condutividade hidráulica saturada e para o semivariograma cruzado de condutividade hidráulica com areia ou argila. Estes dados são apresentados na Tabela 13.

O mapa de condutividade hidráulica saturada (Figura 19) deve ser considerado como uma fonte de informação não muito precisa, pois como pode ser observado o modelo exponencial apresentou baixo valor de coeficiente de correlação entre os dados medidos e estimados calculados no Jack-knifing, 30,37 %, apresentado na Tabela 13.

O mapa de capacidade de água disponível, Figura 20, foi gerado a partir do modelo gaussiano ajustado ao semivariograma experimental do log. da capacidade de água disponível. Este modelo quando submetido à validação cruzada, apresentou melhor coeficiente de correlação, dentre os modelos ajustados para capacidade de água disponível, 60,16 % (Tabela 17). Comparando com o mapa de areia, Figura 21, pode-se observar claramente que nas regiões onde os teores de areia são menores os valores de capacidade de água disponível são maiores, evidenciando a correlação negativa existente entre estes dois atributos, coeficiente de correlação de -64,4 % (Tabela 16).

No entanto para o atributo areia, o mapa foi gerado a partir do modelo exponencial ajustado ao semivariograma experimental da areia do arquivo texturak.txt. Este modelo, quando submetido à validação cruzada, apresentou melhor coeficiente de correlação, dentre os modelos ajustados para areia, 64,35% (Tabela 13).

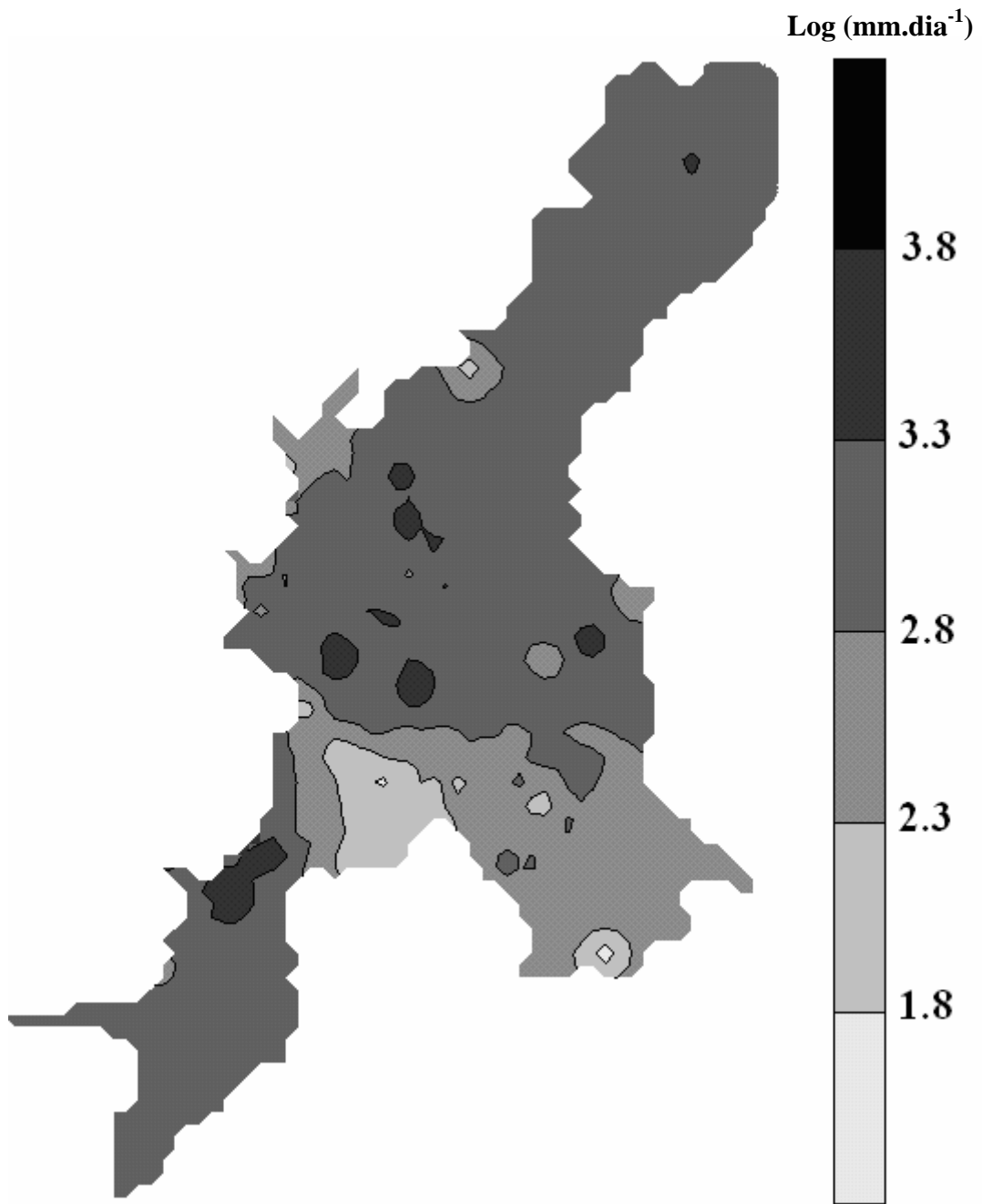


Figura 19. Mapa de logaritmo da condutividade hidráulica saturada (mm.dia⁻¹) dos solos da área do Projir.

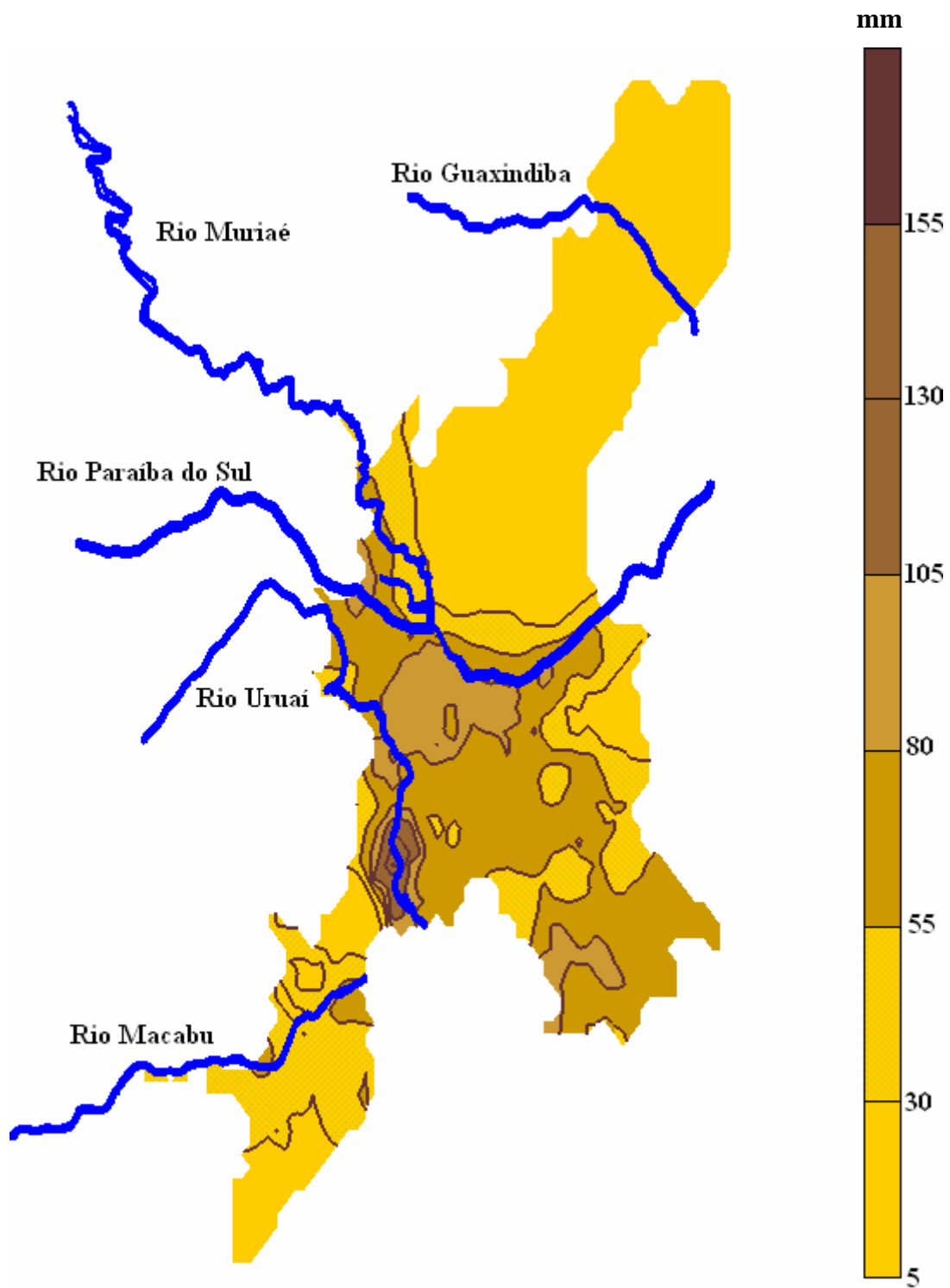


Figura 20. Mapa de capacidade de água disponível dos solos da área do Projir, com a hidrografia principal da região.

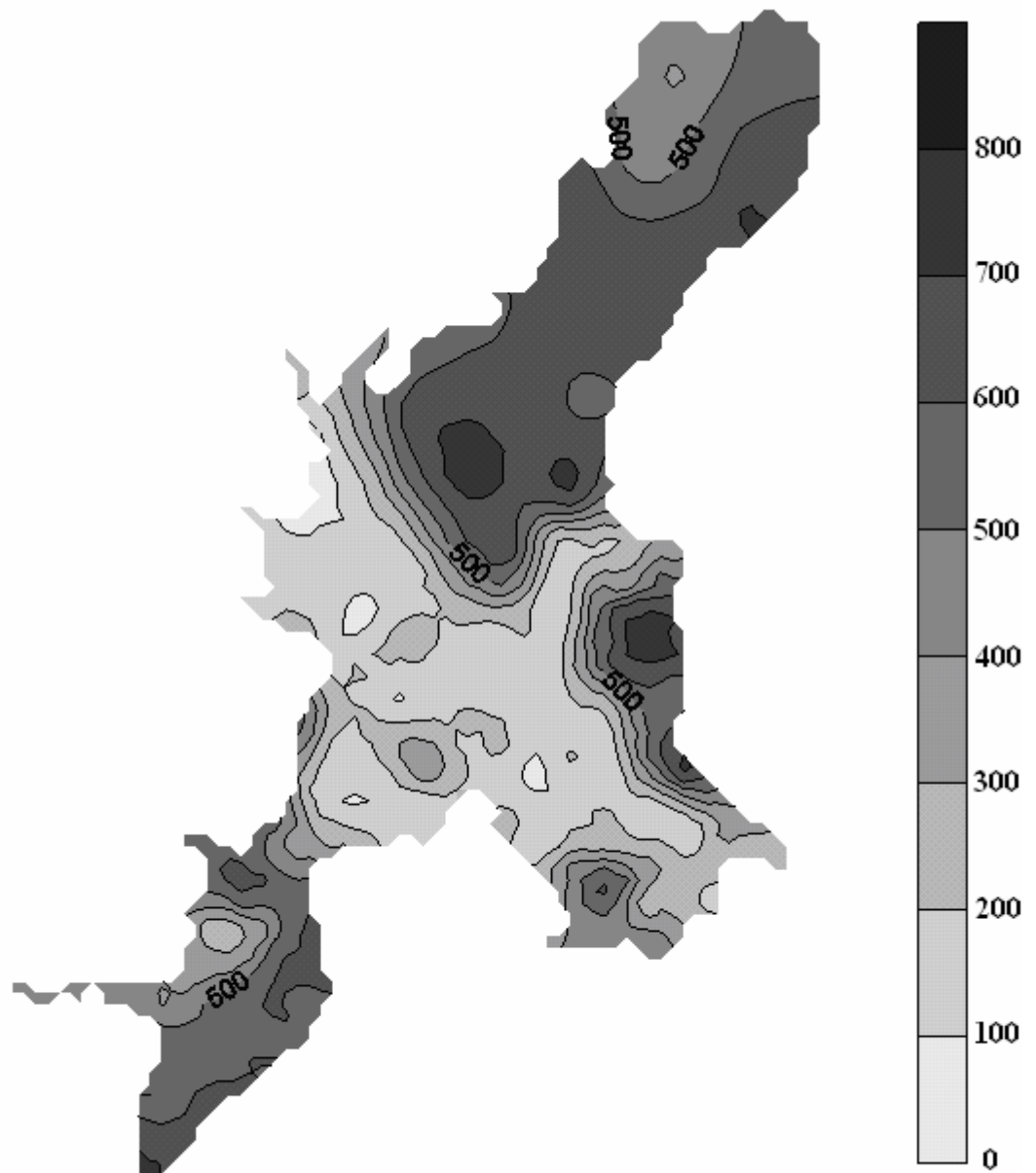


Figura 21. Mapa de valores de areia (g.kg^{-1}) dos solos da área do Projir.

4.7 Mapas de Variância da Estimativa da Krigagem para Condutividade Hidráulica Saturada e Capacidade de Água Disponível.

Para cada mapa de krigagem, foi gerado um mapa que representa a distribuição espacial da variância da estimativa da krigagem, ou seja, do erro ao interpolar os valores para os pontos não amostrados para condutividade hidráulica saturada (Figura 22), capacidade de água disponível (Figura 23) e areia (Figura 24). Segundo Vieira (2000), quanto menor for a proporção do efeito pepita em relação ao patamar do semivariograma, maior a continuidade do fenômeno, menor a variância da estimativa ou maior a confiança que se pode ter na estimativa. Assim, se a variável estudada varia grandemente entre locais medidos, então não é de se esperar grande confiança na estimativa, como também poderia acontecer se esse valor fosse medido, pois a variabilidade é grande.

Porém, uma vez que se conhece o semivariograma de uma propriedade, qualquer tipo de esquema de amostragem pode ser desenhado para variâncias das estimativas pré-especificadas. Obviamente, sendo a variância da estimativa uma função da distância ou distribuição espacial das amostras, será máxima nos locais mais distantes de valores medidos. Assim, com base em semivariogramas de variáveis medidas em caráter de reconhecimento, amostragens definitivas podem ser desenhadas para satisfazer condições pré-especificadas (Vieira, 2000). Assim pode-se precisamente, com base nos mapas de variância da estimativa, definir densidades de amostragem bem diferentes para a área do Projir, de acordo com o grau de dependência espacial encontrado e principalmente em locais onde foram constatadas as maiores variâncias de estimativa. Com isso, espera-se conseguir uma melhor representação da área e um aumento na correlação entre pontos interpolados e medidos para condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível, reduzindo assim a variância da estimativa.

Foram comparados os mapas de variância da estimativa da condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível, com as Figuras 25 e 26 em anexo, onde estão plotados os pontos de amostragens. Assim pode-se observar que nas áreas onde ocorre a menor densidade de amostragem, ocorreram as maiores variâncias de estimativa.

O mapa de variância da estimativa para condutividade hidráulica saturada, revela uma alta variância da estimativa para a maior parte da área do Projir, concordando com o baixo valor de correlação entre os dados medidos e estimados calculados no Jack-kniffing, 30,37 %, (Tabela 13). Desse modo, o mapa de condutividade hidráulica saturada (Figura 19), não representa com precisão a realidade, não sendo recomendado seu uso como fonte de informação para tomada de decisões a respeito do manejo do solo da área. Podendo ser considerado apenas como uma primeira informação gerada, para que se possa comparar com resultados de mapeamentos futuros utilizando técnicas como as funções de pedotransferência, aumentando a densidade de pontos com valores de condutividade hidráulica saturada, como utilizada por Julià (2004), e assim podendo avaliar o ganho de precisão no mapeamento.

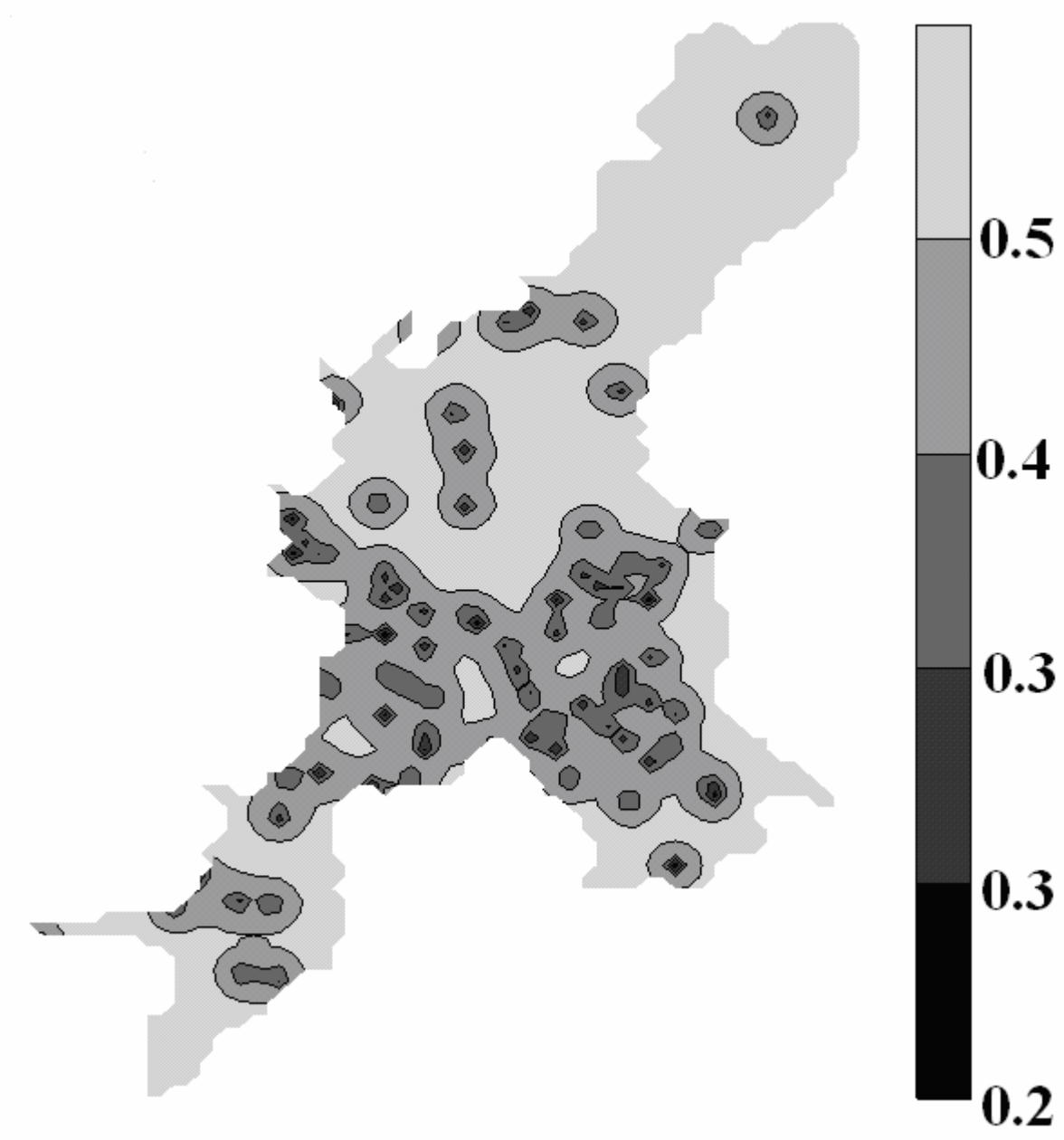


Figura 22. Mapa de variância da estimativa de condutividade hidráulica saturada dos solos da área do Projir.

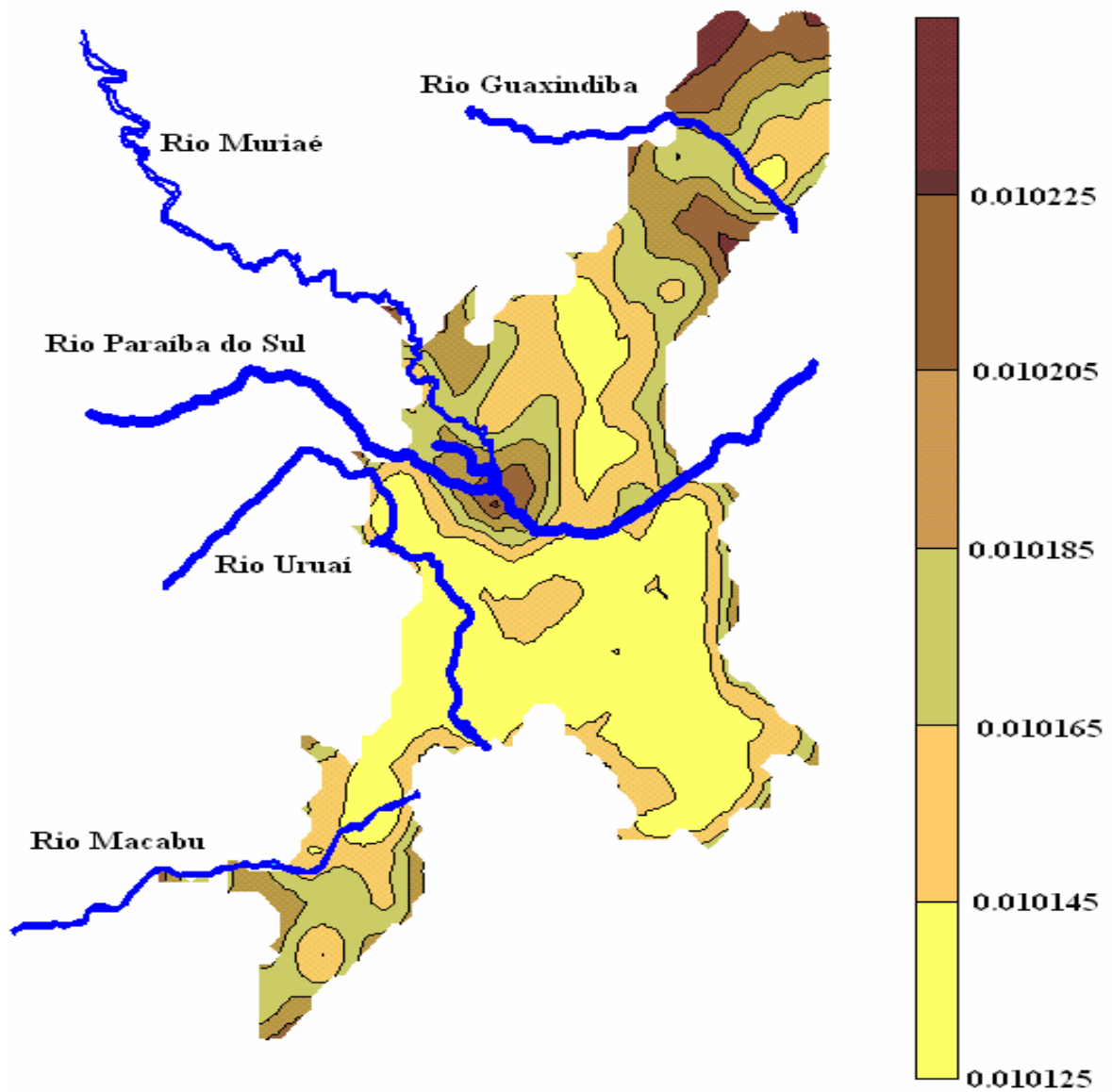


Figura 23. Mapa de variância da estimativa de capacidade de água disponível dos solos da área do Projir, com a hidrografia principal da região.

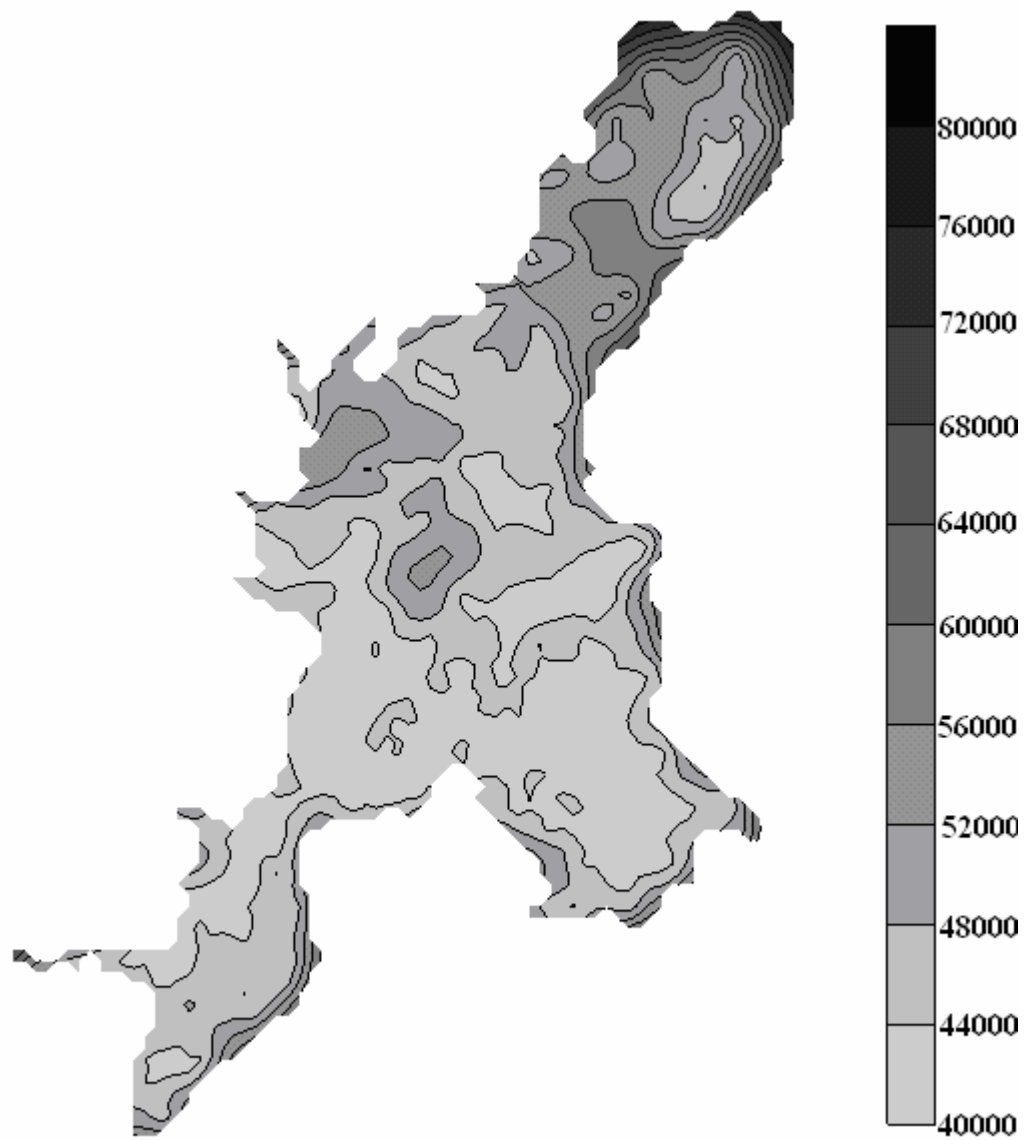


Figura 24. Mapa de variância da estimativa dos valores de areia dos solos da área do Projir.

5. CONCLUSÕES

Os semivariogramas com os modelos ajustados evidenciaram a existência de dependência espacial para a condutividade hidráulica saturada nos solos na área do Projir.

A ferramenta de geoestatística utilizada é sensível para mostrar a variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível.

Os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas de condutividade hidráulica saturada e semivariograma cruzado com areia e argila apresentaram baixos coeficientes de correlação ao interpolar valores de condutividade hidráulica saturada.

A existência de dependência espacial também foi verificada para a capacidade de água disponível, argila, areia, silte, relação silte argila, densidade do solo, densidade das partículas e porosidade.

Para capacidade de água disponível foi possível realizar bons ajustes de modelos matemáticos aos semivariogramas cruzados com areia e argila.

Não foi constatada dependência espacial para o atributo grau de flocculação.

O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais da condutividade hidráulica saturada, areia e argila.

Os valores de areia e argila demonstraram correlação, apesar de baixa, com a condutividade hidráulica saturada.

Na área em estudo a condutividade hidráulica saturada não foi influenciada por um atributo isolado, mas pela soma da influência dos atributos físico-hídricos.

Foi possível realizar o mapeamento utilizando a geoestatística, gerando mapas de isovalores para condutividade hidráulica saturada, capacidade de água disponível e areia, bem como mapa de variância da estimativa para esses mesmos parâmetros.

Os mapas gerados permitem fazer inferências sobre a condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível para os solos da região, que podem nortear projetos ou sistemas de manejo para conservação do solo e da água.

6. RECOMENDAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados com os dados da área do Projeto de Irrigação e Drenagem do Norte Fluminense demonstraram a importância de um trabalho detalhado a fim de extrair toda a informação medida e levantada deste projeto. As informações do acervo do Projir, sejam em cartas ou relatórios, são importantes para a região norte Fluminense e também para o desenvolvimento da pesquisa na área de modelagem, uma vez que se trata de uma base de dados rica em informações e de boa qualidade.

Como não houve uma correlação forte entre a condutividade hidráulica saturada e os atributos físicos e foi constatado, que a condutividade hidráulica saturada não é função de um atributo físico do solo unicamente, como porosidade e textura, mas sim o resultado da influência de um conjunto de atributos somados ao manejo dado ao solo, não foi possível usar um atributo unicamente, com confiabilidade e ou alto grau de correlação para interpolar a condutividade hidráulica saturada. No entanto podemos mapear estes atributos físico hídricos separadamente e cruzar informações de cada mapa para fazer inferências sobre o que pode estar afetando a condutividade hidráulica saturada e a capacidade de água disponível. E assim para cada uso específico do solo da área do Projir, propor um manejo que venha a contribuir positivamente para a conservação do solo e da água na região.

A continuidade deste trabalho, com os dados do Projir, poderá ser realizada com a elaboração de funções de pedotransferência, para estimar valores de condutividade hidráulica saturada e capacidade de água disponível, a partir de atributos de mais fácil medição, de forma isolada ou em conjunto, por exemplo textura, porosidade, densidade do solo, desta forma podendo construir uma base de dados com maior densidade de valores para estes dois atributos do solo, principalmente por serem difíceis de medir em campo e por consequência difíceis de se encontrar nos levantamentos de solo.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARRUDA, F.B.; ZULLO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. **Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo.** R. Bras. Ci. Solo, v.11:11-15, 1987.
- AYRES, M.; AYRES Jr., M; AYRES, D.L.; SANTOS, A.S. **BioEstat 2.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas.** Sociedade Civil de Mamirauá, Belém-PA. CNPq, Brasília-DF, p.25-30, 2000.
- BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D. C.; CUNHA, G. R.; SANTOS, M. L. V.; FARIAS, J. R. B.; BARNI, N. A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Editora da Universidade. 1992. 125p.
- BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C. **Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.31, p.837-844, 2007.
- CAMARGO, E.C.G. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (krigeagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (spring).**Dissertação de Mestrado. São José dos Campos. INPE, 1997. 123p.
- BOSCH, D.D.; WEST, L.T. **Hydraulic conductivity variability for two sandy soils.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v.62:90-98, 1998.
- BOCCHI, S.; CASTRIGNANO, A.; FORNARO, F. & MAGGIORE, T. **Application of factorial kriging for mapping soil variation at field scale.** Europ. J. Agronomy 13 (2000) 295-308.
- BRAGA, L., DRUCK, S. **Analysis of soil properties by geostatistical methods. Geoestatistical for nest century.** In: AN INTERNATIONAL FORUM IN HONOR OF MICHEL DAVID'S CONTRIBUTION TO GEOESTATISTICS. 1993, Montreal, Quebec, Canada. Proceedings... (S.I.: s.n.), 1993.
- BRITO, R.J. **Indicadores de qualidade do solo em ambientes de tabuleiros costeiros na região norte fluminense, RJ.** Dissertação de Mestrado. Seropédica. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2005. 75p.
- BRIGGS, L. J.; SHANTZ, H. L. **The wilting coefficient for different plants and its indirect determination.** Washington DC: Department of Agriculture, Bureau of Plant Industries, Bulletin nº 30. 1912. 83p.
- BURGES, T.M, WEBSTER, R. **Optimal interpolation and isarithmic mapping. I. The semivariogram and punctual kriging.** Journal of Soil Science, v.31, p.315-332, 1980a.
- BURGES, T.M, WEBSTER, R. **Optimal interpolation and isarithmic mapping. II. Block kriging.** Journal of Soil Science, v.31, p.333-342, 1980b.
- BURGES, T.M., WEBSTER, R, McBRATNEY, A.B. **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. IV. Sampling strategy.** Journal of Soil Science, v.32, p.643-659, 1981.
- 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 soils.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M.C.C.; FERRAZ, F.B.; FREITAS, E.V.; SOUZA, Z.M. **Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um espodosolo da zona da mata de Pernambuco.** Revista de Biologia e Ciências da Terra, Campina Grande, v.7,nº1, p. 84-91, 2007.
- CASSEL, D.K.; NIELSEN, D.R.. **Field capacity and available water capacity.** In: A.L.Page (ed) Methods on soil analysis. Part 2. Agron. Monog. 9. ASA and SSSA. Madison, WI. p. 901-926, 1986.
- COSTA NETO, P.L.O. **Estatística.** São Paulo, Edgard Blücher, 1997. 468p
- COUTO,L.; SANS,L.M.A.**Características físico-hídricas e disponibilidade de água no solo.** Embrapa Milho e Sorgo.Circular Técnica 21.Sete Lagoas,MG. 8p.2002.
- CRESSIE, N.A.C. **Statistics for spatial data.** Wiley, New York. 1991. 900p.
- DEMUELENAERE, R.G.A. **Caracterização de propriedades de transporte de metais pasados em solos residuais do Rio de Janeiro.** Dissertação de Mestrado. Rio de Janeiro. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil, 2002. 120p.
- DEUTSCH, C.V.; JOURNAL, A.G. **GSLIB: geostatistical software library and user's guide.** New York: Oxford University Press, 369 p. 1998.
- FERREIRA, P.A. **Curso de engenharia de irrigação, módulo II: drenagem.** ABEAS: Brasília, 1987. 86p. (modulo, 2).
- FISHER, R.A. **Statistical methods and scientific influence.** Edinburg, Oliver & Boyd, 1956. 175p.
- FILHO,M.A.C.; Coelho, R.D.;Gonçalvez, A.C.A.**Variabilidade espacial de variáveis físico-hídricas do solo em um pomar de lima ácida Tahiti, irrigado por microaspersão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.5, n.2, p.239-246, 2001.
- GENÚ, A.M. **Geoestatística multivariada.** Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Departamento de Ciências Exatas, Texto Didático, 17p.2004. Disponível em <http://ce.esalq.usp.br/tadeu/aline.pdf>. Acessado em 10 de junho de 2008.
- GOLDEN SOFTWARE, **Surfer V 7.02. Surface Mapping System, 2000.** Colorado USA.
- GOMES, F.P. **A estatística moderna na pesquisa agropecuária.** Piracicaba, Potafós, 1984. 160p.
- GOMES, M.A.F.; SPADOTTO,C.A.; PEREIRA,MATALLO,M.B.; LUCHINI, L.C. **Monitoramento do herbicida tebutiuron em dois solos representativos das áreas de recarga do aquífero Guarani.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.10, n.2, p.479-483, 2006.
- GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V.; VIEIRA, S.R. **Padrões de amostragem e intensidade de krigagem em caracterização do armazenamento de água no solo, em área irrigada por pivô central.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.23, n.3, p.485-495, 1999.
- ISAAC, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **Applied Geostatistics.** Oxford University Press. New York, EUA. 1989. 561p.

- JULIÀ, M. F.; MONREAL, T. E.; JIMÉNEZ, A.S.C.; MELÉNDEZ, E. G. **Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction.** *Geoderma*, v.123, n. 3-4, p. 257-277, 2004.
- KERN, J.S. **Geographic patterns of soil water-holding capacity in the contiguous United States.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 1126-1133. 1995a.
- KERN, J.S. **Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties.** *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59: 1134-1141. 1995b.
- KRIGE, D.G. **A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand.** *Journal of South African Institution of Mining and Metallurgy, Johannesburg*, 52: 119-139, 1951.
- McBRATNEY, A.B & WEBSTER, R. **Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sample estimates.** *Journal of Soil Science*, 1986, 37, 617-639.
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Lancaster, 58: 1246-1266, 1963.
- MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v.34, n.3, p.963-969, mai-jun, 2004.
- MILLAR, A.A. **Drenagem de terras agrícolas: bases agronômicas.** São Paulo: Mc Graw-Hill do Brasil, 1978, 276p.
- NEMES, A., SCHAAP, M.G., LEIJ, F.J., WÖSTEN, J.H.M. **Description of unsaturated soil hydraulic database UNSODA version 2.0,** *Journal of Hydrology* 251 (2001) 151-162.
- OLEA, R. A.; JIAN, X.; YU, Y. **Semivariogram modeling by weighted least squares.** *Computers & Geosciences*, 22 (4): 387-397, 1996.
- OLIVEIRA, J.B. de. **As séries e o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Tem-se condições de gerenciar o seu estabelecimento oficial?** Disponível em: www.cnps.embrapa.br/sibcs/atas/ata03.html. Acessado em Set. 2004.
- PEREIRA, F.A.C.; FONSECA, A.A.O.; ALMEIDA, E.C.; MOREIRA, S.C.; MACEDO, D.J.B.; CRUZ, J.D. **Comparação entre condutividade hidráulica saturada determinada em campo e laboratório.** *Magistra*, Cruz das Almas-BA, v.13, n.1, p.1-4, jan/jun, 2001.
- PLANT, R. E. **Site specific management: the application of information technology to crop production.** *Computers and electronics in agriculture*. Elsevier Science B.V., Volume 30, 9-29 pp. 2001.
- REHFELDT, K.R.; BOGGS, J.M.; GELHAR, L.W. **Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer 3. Geostatistics analysis of hydraulic conductivity.** *Water Resource Research*, Washington, v.28, n.12, p.3309-3324, 1992.
- REICHARDT, K. **A Água em Sistemas Agrícolas.** São Paulo: Manole, 1990. 188p.
- ROBERTSON, G.P. **GS++: Geostatistics for the environmental sciences – GS++ User's Guide.** Plainwell, Gamma Design Software, 1998. 152p.
- ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil.** São José dos Campos: INPE-(INPE-8915-TDI/809). 2001. 145p.
- SILVA, C.R.S. **Estudo das características físico-químicas do solo em plantio de erva-mate (*Ilex paraguayensis* St. Hil) através da geoestatística e do geoprocessamento.** Dissertação de Mestrado. Santa Maria. Universidade Federal de Santa Maria, 2007. 113p.

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

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties.** Hilgardia, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: NOVAIS, P.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo V.1. p.1-54. 2000.

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. 350p.

WEBSTER, R.; BURGESS, T.M. **Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. III. Changing drift and universal kriging.** Journal of Soil Science, v.31, p.505-524, 1980.

YOST, R.S.; UEHARA, G.; FOX, R.L. **Geoestatistical analysis of soil chemical properties of large land areas. I. Semi-variograms.** Soil Science Society of America Journal, v.46, p. 1028-1032, 1982.

8. ANEXOS

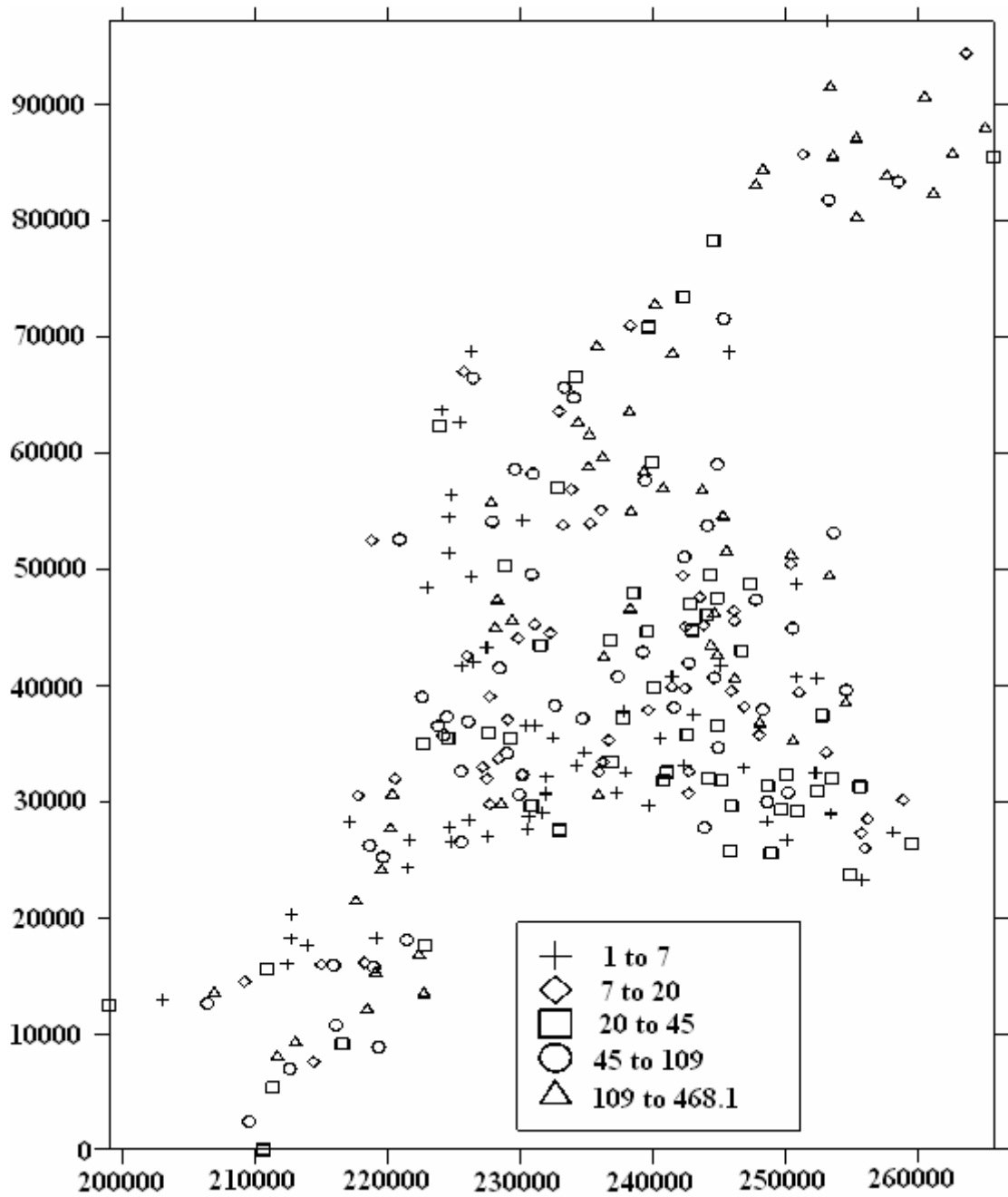


Figura 25. Plotagem dos dados de condutividade hidráulica saturada em classes para análise de valores extremos.

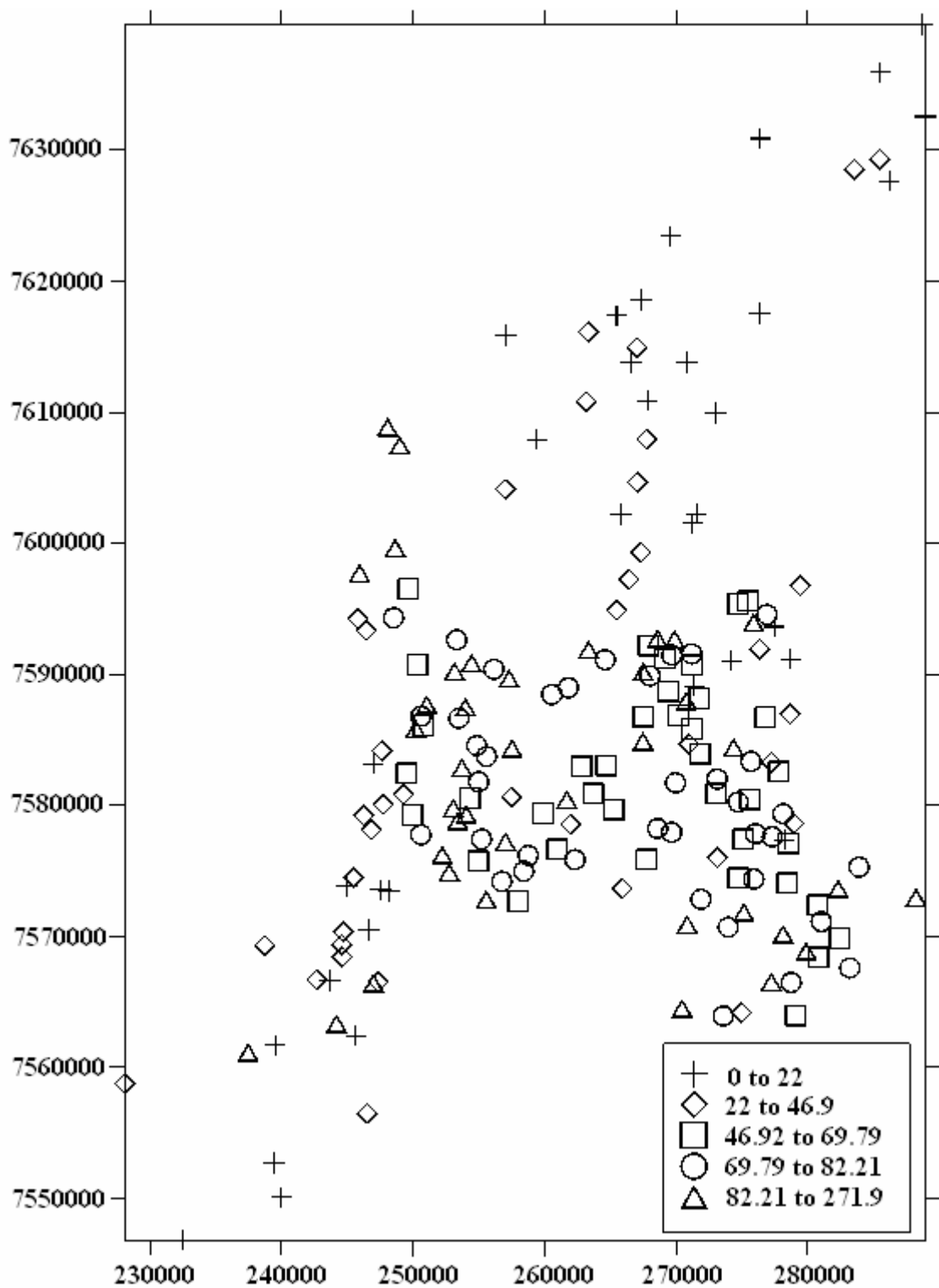


Figura 26. Plotagem dos dados de capacidade de água disponível em classes para análise de valores extremos.

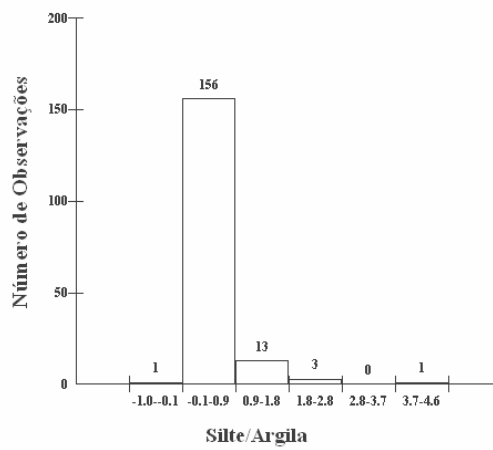
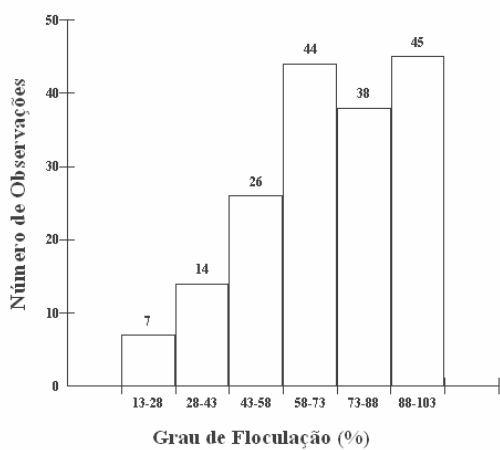
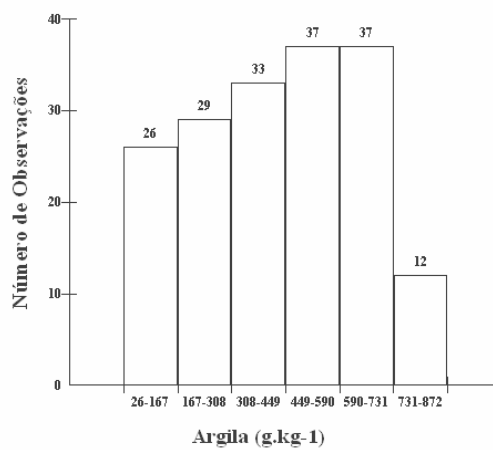
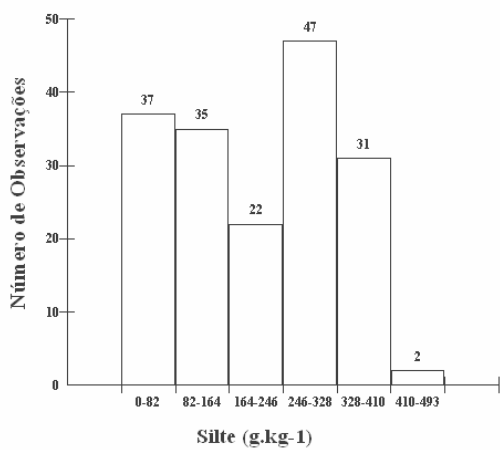
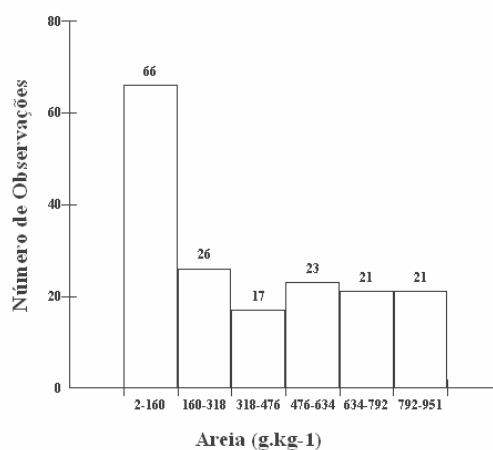
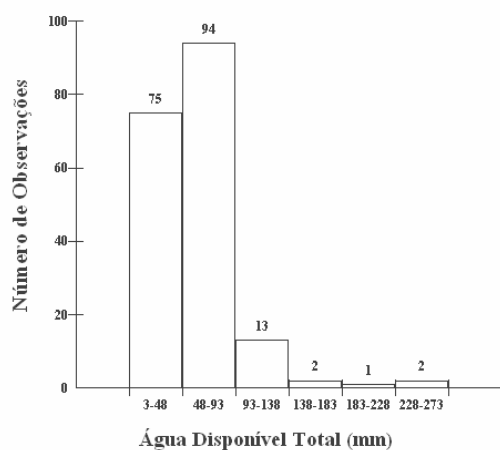


Figura 27. Histogramas dos atributos físico-hídricos do arquivo físicaal.txt.

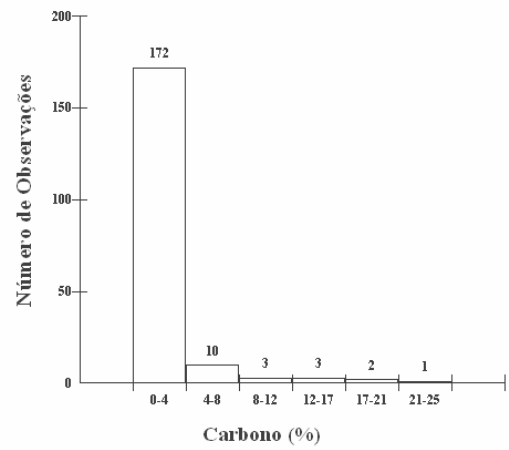
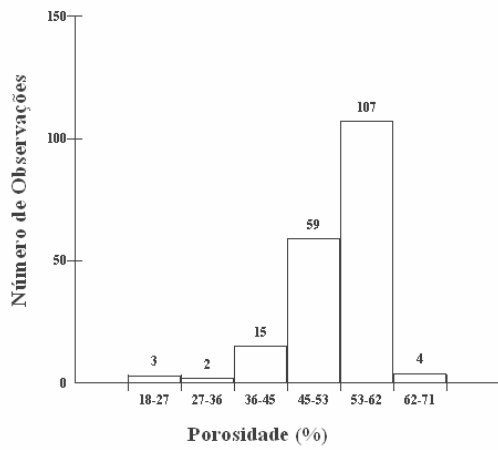
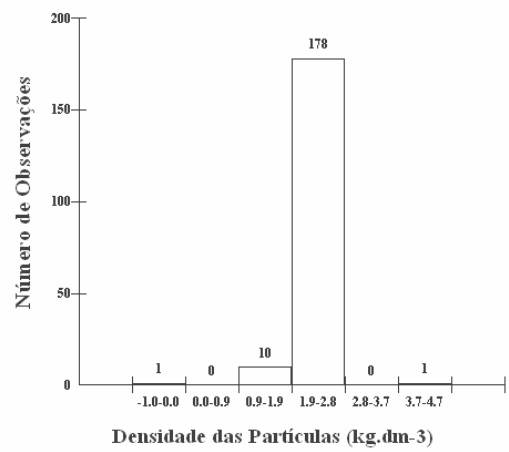
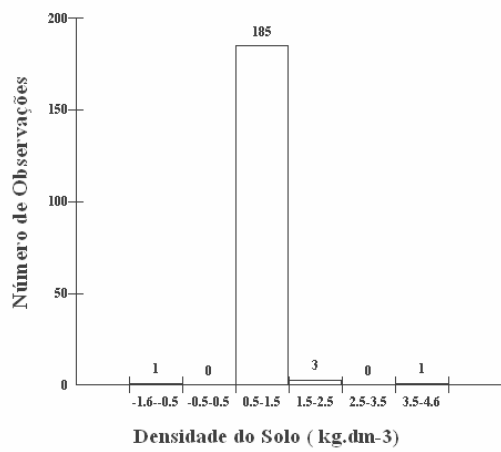


Figura 28. Continuação dos histogramas dos atributos físico-hídricos do arquivo fisicaal.txt.

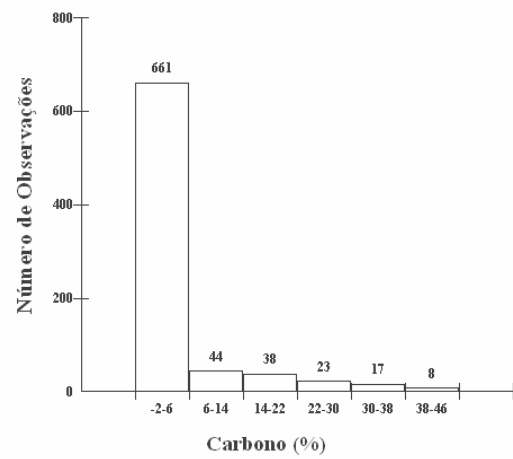
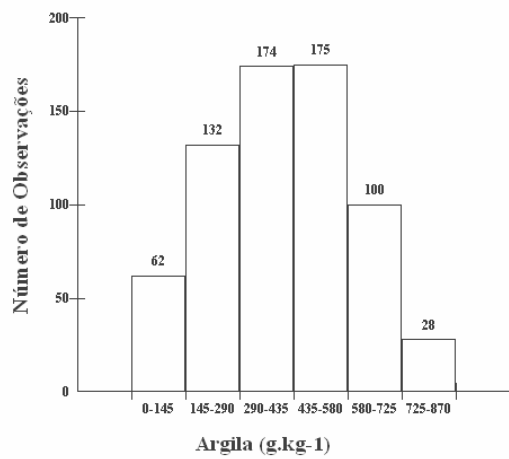
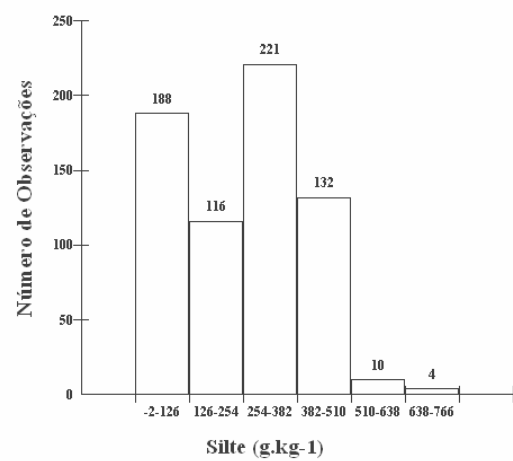
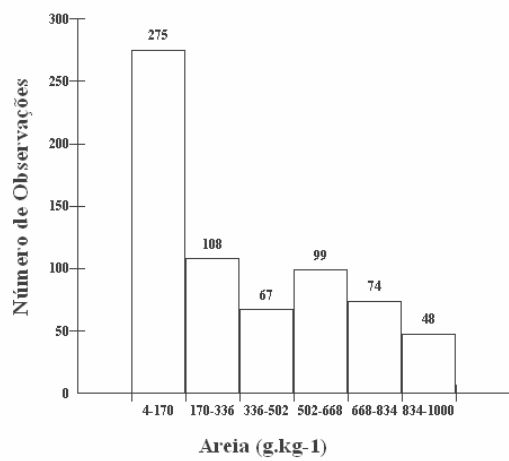


Figura 29. Histogramas de textura e carbono do arquivo texturak.txt.

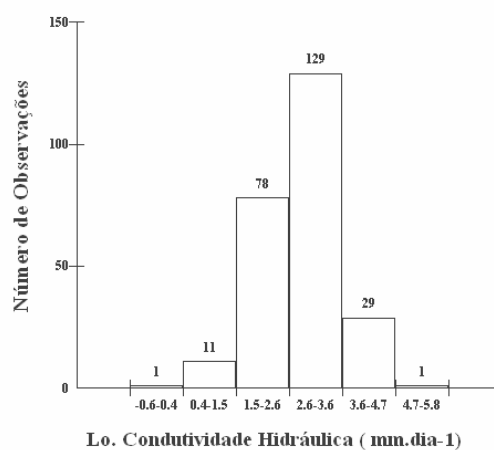
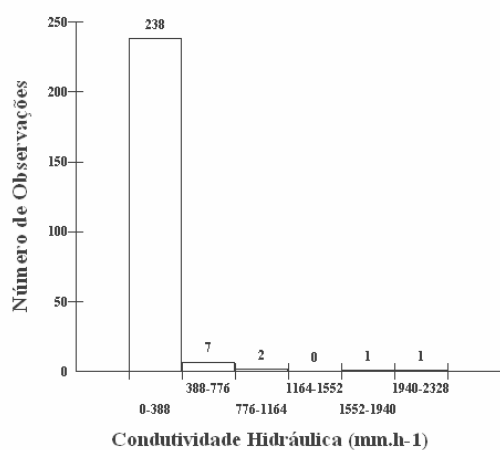
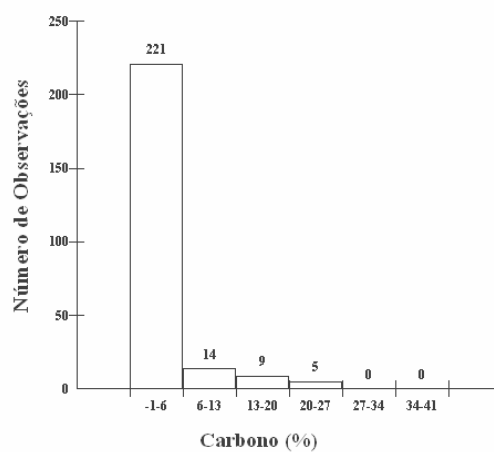
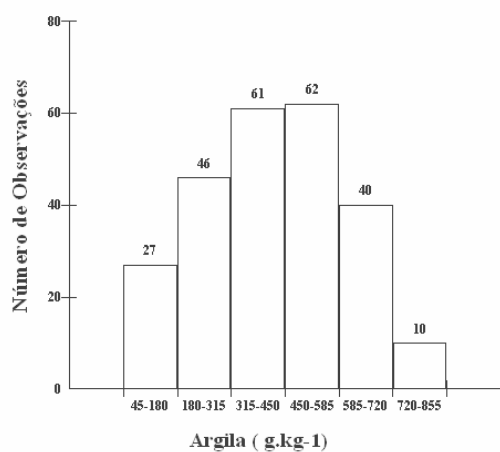
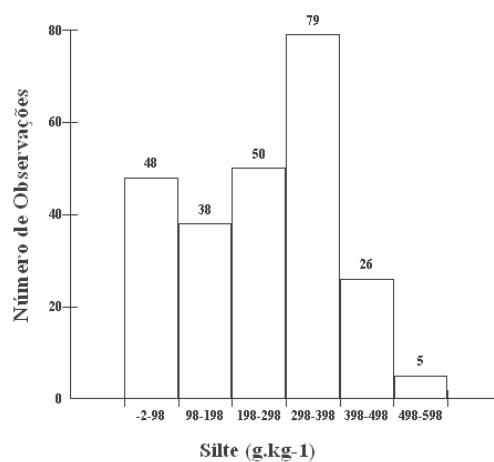
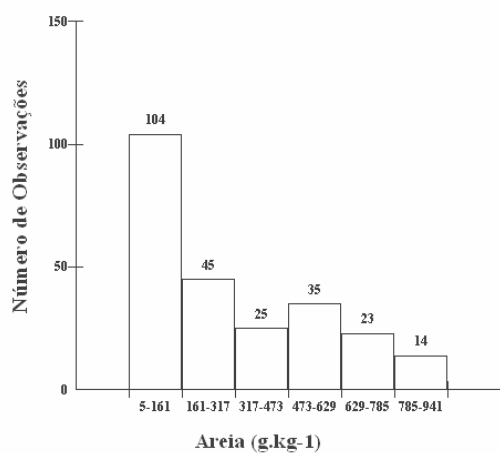


Figura 30. Histogramas dos atributos físico-hídricos do arquivo texinf3.txt.

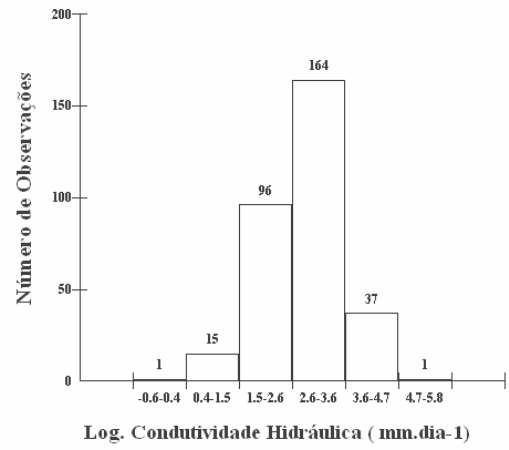
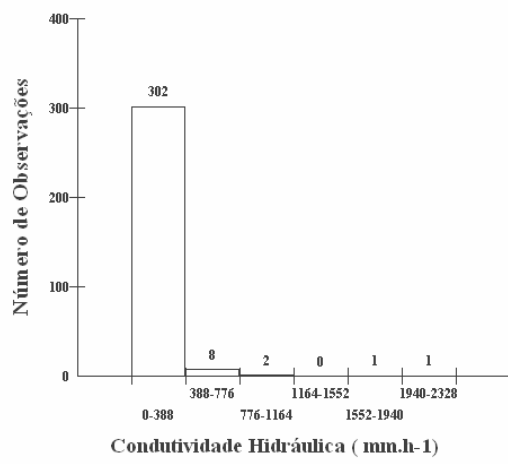


Figura 31. Histogramas de condutividade hidráulica saturada do arquivo Infiltrk.txt..



Figura 32. Mosaico com as cartas georreferenciadas do Projir.

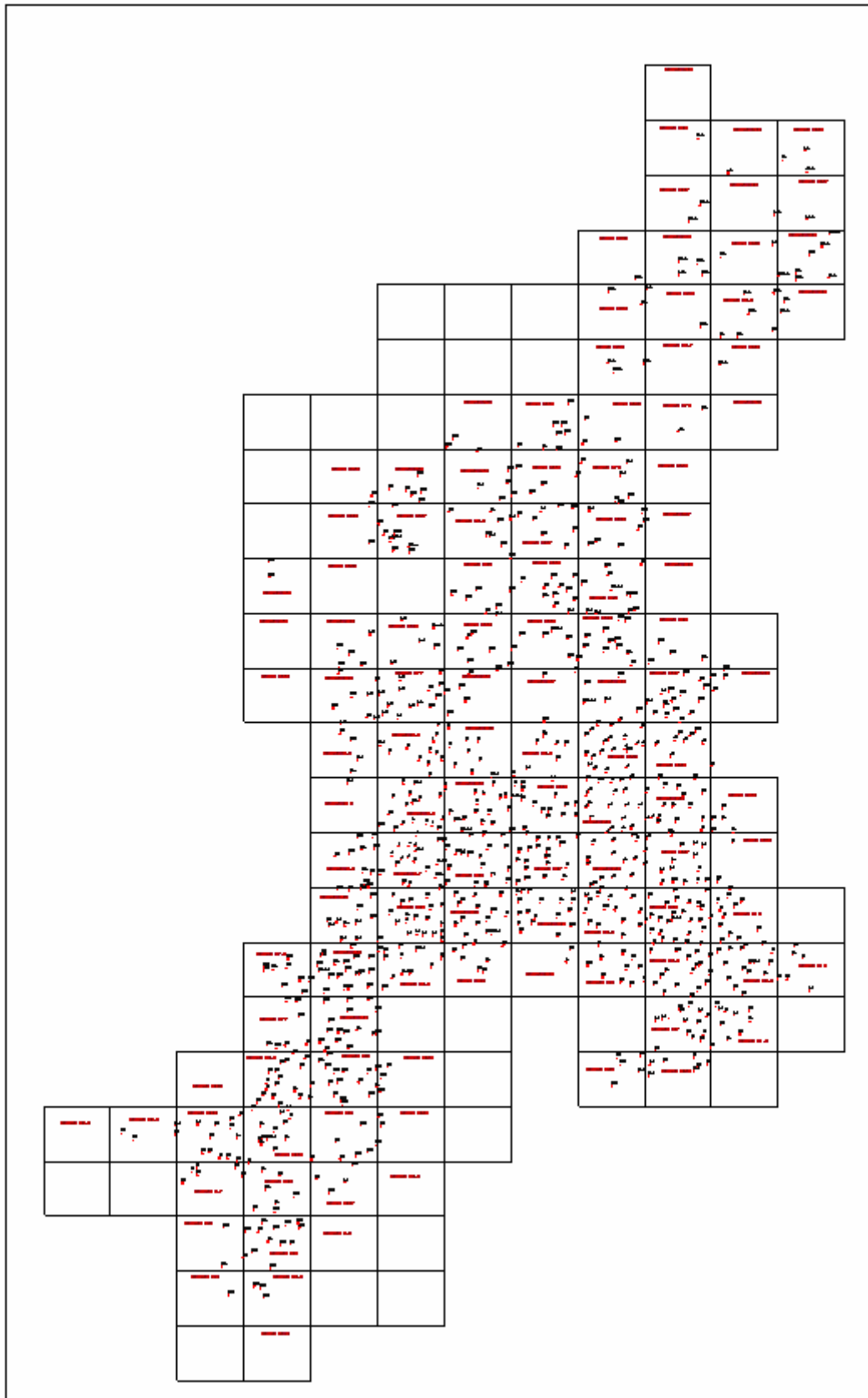


Figura 33. Mosaico da área do Projir (cartas e respectivos perfis georreferenciados).

Tabela 20. Perfis georreferenciados e dados de condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}).

X	Y	Ks	X	Y	Ks
252513,624	7588419,389	2,0	262760,774	7582288,206	20,0
251033,142	7587684,316	8,0	265588,102	7580643,804	6,0
251551,872	7587140,601	2,0	261697,142	7580424,430	12,0
250602,804	7586794,234	1,0	249267,682	7580830,963	48,0
250204,648	7585820,535	2,0	249591,721	7580576,620	20,0
252732,942	7584172,106	14,0	249956,546	7579264,242	285,0
249517,428	7582440,122	60,0	253396,915	7578818,864	9,0
251119,834	7582009,290	58,0	252209,350	7578099,378	17,0
248836,100	7581625,421	46,0	250589,935	7577752,065	76,0
253319,078	7592620,708	162,0	252545,510	7577086,572	19,0
255970,757	7591363,770	62,0	252752,494	7574888,723	10,0
254452,977	7590847,437	294,0	253627,527	7575034,153	126,0
253150,937	7590223,622	213,0	249700,556	7572978,127	2,0
256143,848	7590369,192	15,0	251170,745	7573580,129	1,0
257304,382	7589651,776	10,0	252585,063	7572190,694	6,0
254879,758	7589206,629	7,0	250598,385	7571633,874	61,0
260563,981	7588446,466	814,0	249844,834	7571626,374	1,0
256555,646	7588610,301	20,0	254092,862	7582205,338	11,0
258548,918	7587647,948	20,0	259734,756	7582284,386	59,0
258375,557	7588286,135	10,0	256155,954	7581690,351	3,0
260388,757	7586548,367	39,0	255488,530	7581701,315	3,0
253490,795	7586638,367	74,0	260859,161	7581141,723	12,0
254396,234	7585201,792	12,0	254315,557	7580534,013	25,0
256890,656	7585272,447	57,0	257475,855	7580634,254	1,0
259987,317	7585477,095	147,0	254044,933	7579290,883	92,0
257527,370	7584335,079	72,0	259901,104	7579367,245	6,0
253723,013	7582857,911	2,0	254865,577	7578236,720	57,0
257670,014	7583397,650	65,0	259302,567	7578273,139	2,0
263346,713	7591867,596	440,0	255202,543	7577408,347	8,0
264636,843	7589761,059	41,0	257031,971	7577214,247	2,0
267490,615	7590172,792	16,0	254962,682	7575727,990	62,0
261812,078	7588977,218	32,0	256966,128	7575803,030	5,0
264275,878	7588010,178	45,0	255874,044	7574764,016	38,0
261350,835	7587668,445	165,0	255711,597	7573853,828	5,0
262396,134	7585884,822	65,0	256741,212	7574181,595	1,0
266491,007	7585938,582	6,0	255566,345	7572794,731	2,0
263878,419	7585340,101	25,0	257987,306	7572667,126	41,0
266494,149	7584984,269	17,0	261287,111	7578539,557	17,0
261531,934	7583869,376	8,0	261961,430	7578556,467	38,0
266635,759	7583237,892	71,0	267423,997	7578188,988	6,0
262818,538	7582966,954	2,0	260955,116	7577686,077	16,0
264971,372	7582496,567	13,3	263034,423	7577665,841	2,0
264699,205	7583011,996	14,0	266099,150	7577669,046	44,0

Ks = condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}); X e Y= coordenadas UTM.

Tabela 20. Continuação

X	Y	Ks	X	Y	Ks
265856,779	7576932,780	40,0	276086,668	7584527,196	14,0
260936,968	7575774,400	120,0	279584,061	7583732,475	198,0
262303,938	7575847,669	2,0	277820,523	7582550,660	44,0
267746,896	7575837,551	11,0	274721,484	7580237,410	100,0
264747,469	7574767,032	2,0	275615,707	7580445,552	191,0
265925,577	7573638,107	125,0	278127,234	7579354,532	7,0
272808,951	7592518,037	79,0	268235,756	7579155,357	23,0
268589,303	7592722,018	10,0	271858,446	7578023,171	1,0
269881,079	7592669,544	37,0	267773,856	7577708,811	8,0
267887,383	7592206,245	30,0	270248,167	7576994,464	38,0
271176,293	7591557,795	16,0	273699,164	7576438,633	34,0
269681,750	7591459,615	118,0	273668,434	7575096,503	50,0
269151,563	7591182,595	28,0	270963,554	7574744,000	44,0
272930,233	7590995,487	4,0	273622,063	7573432,752	3,0
271208,842	7590690,039	10,0	268926,957	7572877,394	84,0
268894,724	7590324,752	7,0	270840,606	7570899,886	27,0
268022,519	7589881,528	36,0	273964,503	7570693,275	35,0
269413,271	7588703,585	237,0	275094,018	7577394,973	25,0
269914,330	7587859,594	288,0	277310,202	7577596,281	2,0
270775,703	7587966,619	2,0	278547,937	7577105,874	29,0
271756,922	7588135,021	43,0	280683,491	7576404,997	33,0
267768,743	7587046,383	54,0	275248,347	7575893,867	80,0
270177,745	7586858,842	3,0	277467,212	7576064,838	26,0
269687,995	7585798,104	54,0	275908,853	7574372,617	20,0
271226,159	7585826,362	204,0	274751,294	7574420,174	33,0
270971,308	7584674,576	12,0	278447,931	7574069,179	2,0
271937,015	7583294,775	14,0	281242,331	7573621,527	10,0
268124,490	7582613,513	3,0	275151,305	7571824,670	3,0
272326,685	7582898,636	324,0	280782,215	7572400,491	15,0
273350,241	7583062,570	45,0	281051,585	7571109,712	10,0
269951,730	7581717,078	38,0	279900,724	7568861,698	42,0
273121,512	7582003,562	188,0	280828,970	7568392,038	1,0
267634,695	7580898,641	30,0	279066,187	7568004,326	1,0
272113,353	7581322,938	124,0	277801,044	7564524,579	0,4
273066,137	7580874,445	8,0	283915,483	7575282,289	15,0
269978,922	7579768,207	48,0	283211,156	7572499,984	1,0
271832,791	7579906,064	286,0	284582,079	7571527,945	43,0
275998,088	7591423,139	69,0	222943,228	7558090,422	1612,0
275592,133	7590048,530	96,0	234055,086	7557725,027	-1,0
278669,833	7586932,143	884,0	228072,569	7557990,285	6,0
275831,248	7585811,649	3,0	224022,038	7557533,227	21,0
277439,627	7585743,928	2,0	235929,624	7560706,386	37,0

Ks = condutividade hidráulica saturada (mm.h^{-1}); X e Y= coordenadas UTM.

Tabela 20. Continuação

X	Y	Ks	X	Y	Ks
234258,785	7559617,723	11,0	263347,257	7616135,598	16,0
231962,528	7558777,235	285,0	263935,124	7616361,891	26,0
231417,687	7557716,567	100,0	260824,206	7614454,668	151,0
237733,802	7563316,785	5,0	266550,780	7613837,454	150,0
243275,167	7561243,821	18,0	257078,243	7615877,803	29,0
240036,170	7561089,128	12,0	262380,300	7610076,575	35,0
240959,101	7561016,114	84,0	263283,022	7608781,507	420,0
237461,901	7561124,164	1,0	243644,637	7599206,077	7,0
243493,064	7557325,881	453,0	243831,629	7597632,186	7,0
241140,488	7555855,843	80,0	245937,827	7597719,576	60,0
241627,055	7554238,787	23,0	245820,187	7594242,887	111,0
238085,400	7554492,683	130,0	249829,899	7601569,324	2,0
234584,452	7547551,251	54,0	248645,660	7599640,378	2,0
235666,150	7545126,971	34,0	248860,667	7597877,588	4,0
236724,311	7553291,234	294,0	249652,072	7596522,436	2,0
239461,165	7552694,211	10,0	246503,246	7595196,692	13,0
237664,834	7552092,784	78,0	251367,407	7594453,240	4,0
236393,630	7550463,116	20,0	248514,995	7594302,605	31,0
244185,804	7563316,865	6,0	246463,431	7593344,573	56,0
246484,288	7563202,218	77,0	260256,997	7606846,879	127,0
247835,027	7562777,260	22,0	254639,395	7603757,498	54,0
247398,375	7562043,560	258,0	257007,283	7604124,166	8,0
243983,783	7560857,234	47,0	256001,454	7603364,553	83,0
244134,728	7560511,807	317,0	257888,588	7602197,160	38,0
247782,929	7558675,047	208,0	252862,354	7600951,868	113,0
244367,617	7553959,398	75,0	258918,607	7602016,955	16,0
251348,228	7613838,596	1,0	252931,835	7599240,022	79,0
246936,579	7612134,445	59,0	255215,542	7599344,243	3,0
250793,095	7612173,121	13,0	258261,013	7598940,844	7,0
251488,756	7611610,595	50,0	253890,908	7595415,526	41,0
249104,790	7608869,881	2,0	255918,300	7594702,395	76,0
248995,155	7607477,097	44,0	261263,483	7604883,780	118,0
250478,111	7607830,608	2,0	264935,618	7604402,159	31,0
254640,558	7615860,005	486,0	260192,619	7604074,539	305,0
258236,668	7608685,405	22,0	264376,020	7603654,952	237,0
258360,731	7610803,295	106,0	264460,273	7602783,650	46,0
259082,572	7609922,581	60,0	265826,700	7602225,167	167,0
257981,848	7608744,406	10,0	261154,473	7600266,977	8,0
259417,954	7607914,076	328,0	263380,197	7600208,427	315,0
265792,952	7619936,636	4,0	260312,772	7599076,556	9,0
267360,806	7618592,798	22,0	267407,405	7596188,107	75,0
265204,224	7618085,795	221,0	265481,257	7514907,452	2,0
265487,680	7617387,363	1,0	267319,310	7594598,253	19,0

Ks = condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹); X e Y= coordenadas UTM.

Tabela 20. Continuação

X	Y	Ks	X	Y	Ks
263563,405	7593096,736	31,0	280409,898	7625591,953	300,0
270386,135	7616717,330	82,0	272821,758	7628377,395	110,0
270807,127	7613838,849	2,0	273356,655	7629661,928	156,0
273039,725	7609931,753	25,0	278631,942	7630833,144	279,0
269916,746	7604173,786	66,0	282702,643	7629210,240	354,0
270339,886	7599833,961	138,0	287662,529	7631018,980	154,0
269158,887	7598910,628	78,0	280406,968	7632376,959	109,0
270619,865	7596793,527	153,0	278223,750	7642434,999	3,0
269342,152	7594701,843	36,0	276329,336	7617571,425	32,0
272386,001	7593868,447	31,0	269591,522	7623420,410	25,0
273957,993	7593656,727	62,0	276380,864	7630892,981	16,0
278703,446	7598282,678	45,0	248167,673	7573422,702	311,0
280782,878	7597351,789	2,0	285547,876	7635948,107	147,0
276914,644	7594555,216	165,0	288690,493	7639599,535	16,0
280696,461	7596706,339	3,0	269948,136	7590508,805	21,0
275461,447	7595576,381	17,0			
278374,670	7594680,569	179,0			
275890,806	7593934,454	5,0			
276512,524	7592954,353	600,0			
240263,992	7569954,366	18,0			
237757,905	7565330,921	6,0			
242816,038	7575630,670	17,0			
245391,572	7575866,938	110,0			
245474,275	7574482,275	456,0			
242157,473	7573322,270	4,0			
244984,232	7573845,287	618,0			
245254,992	7572929,324	141,0			
243687,872	7571343,788	49,0			
246692,073	7571761,433	1,0			
244699,827	7570345,490	64,0			
244577,522	7569361,078	468,0			
246594,851	7569387,605	5,0			
242658,472	7566674,979	109,0			
246992,790	7566406,122	0,1			
246975,275	7583179,405	48,0			
243424,929	7581597,506	173,0			
246805,347	7580090,244	137,0			
247729,267	7580066,245	25,0			
246252,993	7579220,350	2327,0			
246834,250	7578137,209	8,0			
245610,587	7577086,732	9,0			
237030,679	7606517,970	0,5			
288537,514	7641416,153	107,0			

Ks = condutividade hidráulica saturada (mm.h⁻¹); X e Y= coordenadas UTM.

Tabela 21. Perfis georreferenciados e capacidade de água disponível (0 - 60 cm de profundidade)

X	Y	CAD (mm)	X	Y	CAD (mm)
278127,234	7579354,532	155,05	251033,142	7587684,316	120,30
271208,842	7590690,039	63,08	267033,073	7614952,577	23,31
263346,713	7591867,596	145,90	274721,484	7580237,41	109,44
253490,795	7586638,367	103,60	238724,576	7569301,355	40,80
260059,622	7580362,912	89,90	243687,872	7571343,788	-1
282462,403	7569848,485	56,63	239544,468	7561669,858	143,75
271226,159	7585826,362	69,21	253396,915	7578818,864	202,60
247336,311	7566520,853	39,24	250802,071	7586093,096	90,60
250602,804	7586794,234	99,79	250204,648	7585820,535	146,70
277243,922	7566517,302	105,75	249517,428	7582440,122	59,68
274751,294	7574420,174	72,55	253319,078	7592620,708	138,45
249267,682	7580830,963	45,79	256143,848	7590369,192	115,75
246252,993	7579220,35	26,10	257304,382	7589651,776	159,40
246834,25	7578137,209	38,40	260563,981	7588446,466	93,48
274212,074	7591035,53	15,80	253989,86	7587476,54	106,50
245667,799	7562422,855	49,55	259987,317	7585477,095	-1
261812,078	7588977,218	137,86	257527,37	7584335,079	186,85
283217,049	7567582,26	70,14	253723,013	7582857,911	111,55
254452,977	7590847,437	205,25	255586,2	7583724,858	123,50
269681,75	7591459,615	89,75	264618,141	7591098,671	85,94
265277,737	7579654,377	105,75	267501,108	7586752,8	55,03
263693,75	7580864,919	100,70	261531,934	7583869,376	165,90
267490,615	7590172,792	169,45	262818,538	7582966,954	67,70
254842,192	7584561,753	111,40	264699,205	7583011,996	81,40
273121,512	7582003,562	122,84	253062,227	7579786,132	218,15
281051,585	7571109,712	82,33	252752,494	7574888,723	141,35
271879,971	7572831,216	107,25	254986,176	7581784,353	91,35
276786,551	7586716,126	53,88	254315,557	7580534,013	132,54
270840,606	7570899,886	91,80	257475,855	7580634,254	37,50
240036,17	7561089,128	96,40	259901,104	7579367,245	77,25
253150,937	7590223,622	136,80	255202,543	7577408,347	73,40
273964,503	7570693,275	73,40	257031,971	7577214,247	115,98
252224,246	7576209,121	-1,0	254962,682	7575727,99	64,05
249956,546	7579264,242	67,05	258420,015	7574958,491	74,10
267334,477	7599312,569	34,76	256741,212	7574181,595	125,20
278547,937	7577105,874	74,13	257137,638	7571874,186	91,00
273139,092	7576016,874	73,38	257987,306	7572667,126	94,16
262303,938	7575847,669	101,60	261961,43	7578556,467	59,30
270453,063	7564478,354	216,90	260946,148	7576627,214	75,85
250589,935	7577752,065	78,85	267746,896	7575837,551	60,69
269951,73	7581717,078	108,30	265925,577	7573638,107	23,53
271176,293	7591557,795	101,80	268589,303	7592722,018	98,20
275890,806	7593934,454	140,66	269881,079	7592669,544	114,87

CAD= capacidade de água disponível; X e Y= coordenadas UTM.

Tabela 21. Continuação

X	Y	CAD (mm)	X	Y	CAD (mm)
267887,383	7592206,245	80,20	259417,954	7607914,076	11,76
269151,563	7591182,595	104,61	267360,806	7618592,798	-1
268022,519	7589881,528	124,13	266550,78	7613837,454	11,99
271371,97	7589102,313	11,42	263164,801	7610817,806	74,80
269413,271	7588703,585	57,47	267812,888	7610860,375	25,37
270775,703	7587966,619	231,11	245937,827	7597719,576	132,05
271756,922	7588135,021	59,94	249652,072	7596522,436	122,42
270971,308	7584674,576	109,26	248514,995	7594302,605	84,40
270971,308	7584674,576	48,11	246463,431	7593344,573	44,20
271820,666	7583934,778	47,54	267072,896	7604648,042	33,54
273066,137	7580874,445	51,00	266416,295	7597226,659	71,23
269665,109	7577930,759	112,06	270807,127	7613838,849	26,98
278727,817	7591137,622	8,22	273039,725	7609931,753	17,85
278669,833	7586932,143	32,81	271556,351	7602244,052	24,96
274381,263	7584399,523	128,60	271272,852	7601525,652	31,86
275692,262	7583341,514	123,10	274734,719	7595370,23	57,95
281493,69	7582742,875	39,00	279443,775	7596771,947	36,24
277820,523	7582550,66	72,61	275461,447	7595576,381	90,38
275615,707	7580445,552	90,12	277473,785	7593628,599	11,82
278967,486	7578619,825	46,27	276512,524	7592954,353	-1
278246,151	7577368,191	51,33	276362,52	7591916,23	37,71
268605,623	7578225,368	82,12	247555,136	7573538,642	2,70
271327,298	7571978,196	11,42	245254,992	7572929,324	15,45
275094,018	7577394,973	70,38	244249,245	7570303,28	25,54
276039,574	7577826,92	72,45	244699,827	7570345,49	62,14
277310,202	7577596,281	99,63	244577,522	7569361,078	26,42
275908,853	7574372,617	145,75	244629,858	7568414,742	57,44
278447,931	7574069,179	95,00	242658,472	7566674,979	34,41
282328,094	7573631,149	164,09	243718,667	7566625,262	21,54
275151,305	7571824,67	99,55	246992,79	7566406,122	-1,0
280782,215	7572400,491	74,06	246975,275	7583179,405	22,33
281709,962	7570340,592	100,95	247729,267	7580066,245	47,18
279900,724	7568861,698	97,70	288958,787	7632564,677	28,60
280828,97	7568392,038	81,69	285501,268	7629325,439	29,10
278744,592	7566457,081	94,80	276380,864	7630892,981	20,65
274987,319	7564179,677	35,35	285547,876	7635948,107	25,70
279089,671	7563957,603	84,70	288690,493	7639599,535	22,32
288243,474	7572954,323	93,91			
235929,624	7560706,386	-1			
237461,901	7561124,164	175,53			
240009,863	7550055,366	29,95			
273598,427	7563917,706	76,20			
248995,155	7607477,097	114,21			

CAD= capacidade de água disponível; X e Y= coordenadas UTM.