

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”  
Centro de Energia Nuclear na Agricultura**

**Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono  
em três ambientes**

Jaime Felipe Medina Sotomayor

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Ecologia Aplicada

**Piracicaba  
2009**

**Jaime Felipe Medina Sotomayor**  
**Engenheiro Agropecuário**

**Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**

**Orientador:**  
**Prof. Dr. HILTON THADEU ZARATE DO COUTO**

**Dissertação apresentada para obtenção do título de**  
**Mestre em Ecologia Aplicada**

**Piracicaba**  
**2009**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Medina Sotomayor, Jaime Felipe

Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes  
/ Jaime Felipe Medina Sotomayor. - - Piracicaba, 2009.  
101 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Centro de  
Energia Nuclear na Agricultura, 2009.

1. Amostragem 2. Carbono 3. Geoestatística 4. Solo Florestal I. Título

CDD 634.9  
M491m

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

*Con gran amor DEDICO.*

*A mi esposa, compañera de todos mis triunfos y conquistas*

*A mis hijos, verdaderos profesores de mi vida y de mis caminos*

*A toda mi familia distante, que me han apoyado para alcanzar las metas propuestas*

*A mis padres, guías perpetuas de mi caminar y maestros humildes que me enseñaron a vivir*



## AGRADECIMENTOS

À minha família, pelo amor, dedicação, incentivo e apoio constante durante o tempo todo, meus pais César e Maria Eugenia, meus irmãos e suas famílias, e a Sara e os meus filhos Jaime Daniel e Felipe David, companheiros inseparáveis na luta pela conquista dos nossos sonhos.

À Universidade de São Paulo, à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura e ao programa de Ecologia Aplicada.

Ao meu orientador Hilton Thadeu Zarate do Couto, pelo ensino, tempo e amizade compartilhados.

Ao Prof. João Luis Ferreira Batista e ao Prof. Luciano Martins Verdade, colaboradores fundamentais no desenvolvimento do trabalho.

Ao Prof. Paulo Ribeiro Junior, pela ajuda nos conhecimentos de Geoestatística e nas partes chaves do trabalho.

Aos Profs. Carlos Clemente e Carlos Eduardo Cerri, pela colaboração no trabalho.

Ao Jefferson, mão direita de todo o CMQ, a Edgar, Eduardo, Francisco, Kátia, Luciana, Mauricio, Melissa, Rodrigo e Ruben, companheiros de Laboratório.

Ao pessoal do LEA, Thiago, Paula M, Carla, Sabrina, Eduardo, Paula, pelas horas de campo e conversas compartilhadas.

À Regina Celis de Freitas, pela ajuda na secretaria do Programa.

Ao Prof. Aleoni e a Luiz Silva, pela colaboração para o uso dos laboratórios do Departamento de Solos.

À Flora e Marina, colaboradoras no trabalho de campo e de laboratório.

À CAPES pela bolsa de estudos e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo financiamento da pesquisa.

Aos meus grandes companheiros extracurriculares que fazem que as horas de estudo sejam divertidas: Contramestre Vandeco e todo o grupo Erês, Cinthia e o Coral e Grupo Vocal Luiz de Queiroz.

Ao Julio César (grande amigo e colaborador), Lauro e Daniela e Luiz Xavier, pelos bate-papos compartilhados.



## SUMARIO

<b>RESUMO</b> .....	11
<b>ABSTRACT</b> .....	13
<b>RESUMEN</b> .....	15
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	17
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	19
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	21
<b>1.1 Objetivos</b> .....	22
<b>1.1.1 Gerais</b> .....	22
<b>1.1.2 Específicos</b> .....	23
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	25
<b>2.1 As Mudanças Climáticas</b> .....	25
<b>2.1.1 As florestas e os reservatórios de carbono</b> .....	27
<b>2.2 Amostragem</b> .....	29
<b>2.2.1 Desenho Amostral</b> .....	30
<b>2.3 Estatística clássica</b> .....	32
<b>2.4 Geoestatística</b> .....	32
<b>2.4.1 O Semivariograma</b> .....	34
<b>2.4.2 Estimação de parâmetros baseado na Máxima Verossimilhança</b> .....	36
<b>2.4.3 Escolha de modelos</b> .....	37
<b>2.4.4 Dependência espacial</b> .....	39
<b>2.4.5 Krigagem</b> .....	39
<b>2.5 As técnicas de laboratório para análise de solos</b> .....	40
<b>2.5.1 Carbono Orgânico do Solo (COS)</b> .....	40
<b>2.5.2 Densidade Aparente</b> .....	41
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	43
<b>3.1 Área de estudo</b> .....	43
<b>3.2 Amostragem</b> .....	43
<b>3.2.1 Estimadores da população</b> .....	46
<b>3.2.2 Tamanho da amostra</b> .....	47
<b>3.3 Densidade Aparente</b> .....	48



<b>3.4 Teor de Carbono Orgânico do Solo</b> .....	48
<b>3.5 Estoque de Carbono Orgânico do Solo</b> .....	49
<b>3.6 Geoestatística</b> .....	49
<b>3.7 Krigagem</b> .....	50
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	51
<b>4.1 Amostragem por tipo de ocupação do solo</b> .....	51
<b>4.1.1 Eucalipto</b> .....	51
<b>4.1.2 Nativa</b> .....	51
<b>4.1.3 Pastagem</b> .....	52
<b>4.2 Estudo da Área por Estratificação</b> .....	53
<b>4.2.1 Densidade Aparente</b> .....	53
<b>4.2.2 Teor de Carbono</b> .....	54
<b>4.2.2.1 Métodos de determinação do Teor de Carbono</b> .....	55
<b>4.2.3 Estoque de Carbono</b> .....	55
<b>4.3 Tamanho da Amostra</b> .....	56
<b>4.4 Geoestatística</b> .....	58
<b>4.4.1 Análise Exploratória</b> .....	58
<b>4.4.1.1 Densidade Aparente</b> .....	58
<b>4.4.1.2 Teor de Carbono</b> .....	59
<b>4.4.1.3 Estoque de Carbono</b> .....	59
<b>4.4.2 Semivariogramas</b> .....	59
<b>4.4.2.1 Densidade Aparente do Solo</b> .....	59
<b>4.4.2.2 Teor de Carbono no Solo</b> .....	61
<b>4.4.2.3 Estoque de Carbono no Solo</b> .....	62
<b>4.4.3 Escolha de modelos</b> .....	63
<b>4.4.3.1 Densidade Aparente do Solo</b> .....	63
<b>4.4.3.2 Teor de Carbono no Solo</b> .....	64
<b>4.4.3.3 Estoque de Carbono no Solo</b> .....	65
<b>4.4.4 Parâmetros dos semivariogramas da Densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono no solo</b> .....	66
<b>4.4.4.1 Dependência Espacial</b> .....	69

	9
<b>4.4.5 Krigagem</b> .....	69
<b>4.4.5.1 Densidade Aparente</b> .....	69
<b>4.4.5.2 Teor de Carbono Orgânico no Solo</b> .....	71
<b>4.4.5.3 Estoque de Carbono Orgânico no Solo</b> .....	72
<b>4.4.6 Validação Cruzada</b> .....	73
<b>4.5. Amostragem clássica e geoestatística</b> .....	74
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	77
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	81
<b>ANEXOS</b> .....	87



## RESUMO

### **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**

Paralelamente à aceitação dos reservatórios de carbono florestais para mitigar o impacto do dióxido de carbono emitido à atmosfera, gera-se uma demanda de técnicas que permitam mensurar e monitorar o carbono das florestas nos projetos de desenvolvimento limpo. Os erros que provêm da amostragem, são muito maiores que os associados ao processo de análise de amostras, assim, é importante desenvolver planos de amostragem adequados que permitam alcançar a precisão desejada e sem viés na informação. Desta maneira, o objetivo do estudo foi conhecer o comportamento do estoque de carbono nos solos, na fazenda Três Lagoas, localizada no Município de Angatuba, São Paulo, Brasil, área com diferente cobertura e uso de solo: Eucalipto, Pastagem e Floresta Nativa, e conhecer como o sistema de amostragem influencia as estimativas assim como o esforço amostral necessário para a determinação do estoque de carbono. Coletaram-se 406 unidades amostrais distribuídas nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm e por meio da estatística clássica determinou-se que o estoque de carbono é de  $39,6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$ . O menor esforço amostral necessário foi determinado na amostragem sistemática estratificada, com uma distância de amostragem na grade de 979 m. A geoestatística foi uma ferramenta que permitiu conhecer o alcance prático da variável (650 m). Pelo valor da diferença do critério de Akaike, os modelos: exponencial, Matérn com  $\kappa$  1,  $\kappa$  2 e esférico foram iguais. Difere entre eles o alcance prático que cada modelo determinou. O modelo esférico apresentou o maior alcance prático e o menor esforço amostral comparado aos outros modelos. Conclui-se que existem diferenças nos sistemas de amostragem empregados, os quais dependem das variáveis de estudo, da profundidade e do uso do solo. Tanto a estatística clássica quanto a geoestatística mostraram ser ferramentas úteis na predição do estoque de carbono em solos.

Palavras - chave: Amostragem; Carbono; Geoestatística; Solo florestal



## ABSTRACT

### **Soil sampling methodologies for carbon stock determination in three environments**

As the forestry carbon pools are accepted to mitigate the impact of carbon dioxide, a technical demand appears looking to measure and monitor the forest carbon inside clean development projects. The errors coming from sampling are bigger than those associated to the sample analysis process; therefore, it's important to develop proper sampling plans that allow reaching accuracy without information bias. This way, the study developed inside Tres Lagoas Farm, in Angatuba, Sao Paulo, Brazil, aims to know the soil carbon stock behavior inside an area with different soil usage and occupation: eucalyptus, pasture and native forest, to know how the sampling system influences the estimative and the sampling efforts needed to carbon stock estimation. Using classical statistics was found that the carbon stock is  $39,6 \text{ MgC}\cdot\text{ha}^{-1}$  coming from 406 sample units in a 0-10 cm and 10-20 cm depth. The less sampling effort needed was established by a stratified systematic sampling, with a sampling distance of 979m. Geostatistics was an important tool that allows knowing the variable practical range, (650 m). The models: exponential, Matérn with kappa 1, kappa 2 and spherical were the same by the Akaike criterion difference value. Among them, the difference is the practical range that each model showed. The spherical model showed the higher practical range and the less sampling effort compared to the other models used in this study. Concluding, there are differences among the used sampling systems, because they depend on the study, depth and soil usage variables. Classical statistics and geostatistics seemed to be useful tools on the prediction of soil carbon stock.

Keywords: Sampling; Carbon; Geostatistics; Forest soil



## RESUMEN

### Métodos de muestreo de suelos para la determinación de carbono en tres ambientes

Paralelo a la aceptación de los sumideros de carbono forestales para mitigar el impacto del dióxido de carbono emitido a la atmósfera, surge una demanda de técnicas que permitan medir y monitorear el carbono de los bosques en los proyectos de desarrollo limpio. Los errores que provienen del muestreo son mucho mayores que los asociados al proceso de análisis de las muestras, de esta forma, es importante desarrollar planos de muestreo adecuados que permitan alcanzar la precisión deseada y sin bias en la información. Así, el objetivo del estudio fue conocer el comportamiento del stock de carbono en los suelos de la hacienda Tres Lagoas, localizada en el Municipio de Angatuba, Sao Paulo, Brasil, área con diferentes usos y ocupación de suelo: Eucalipto, Pasto, y Bosque Nativo. Se buscó conocer también como el sistema de muestreo influencia las estimativas y el esfuerzo de muestreo necesario para la determinación del stock de carbono. Se colectaron 406 unidades de muestreo distribuidas en las profundidades 0-10 y 10-20 cm y por medio de la estadística clásica se determinó que el stock de carbono es de  $39.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$ . El menor esfuerzo de muestreo fue dado por el muestreo sistemático estratificado, con una distancia de muestreo en la malla de 979 m. La geoestadística fue una herramienta que permitió conocer el alcance práctico de la variable (650 m). Por el valor de la diferencia del Criterio de Akaike los modelos: exponencial, Matérn con  $\kappa = 1$  y  $\kappa = 2$  y esféricos fueron iguales. Difiere entre ellos el alcance práctico que cada modelo determinó. El modelo esférico presentó el mayor alcance práctico y el menor esfuerzo de muestreo comparado con los otros modelos de ajuste empleados. Se concluye que hay diferencias entre los sistemas de muestreo empleados, los cuales dependen de las variables de estudio, de la profundidad y del uso del suelo. La estadística clásica así como la geoestadística se mostraron herramientas útiles para la predicción del stock de carbono en el suelo.

Palabras clave: Muestreo; Carbono; Geoestadística; Suelo forestal





## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros do semivariograma.....	35
Figura 2 – Localização da Fazenda Três Lagoas e pontos de amostragem.....	45
Figura 3 - Relação entre o Teor de Carbono determinado por combustão (LECO) e por oxidação (colorimétrico).....	55
Figura 4 - Semivariogramas da Densidade Aparente.....	60
Figura 5 - Semivariogramas do Teor de Carbono.....	61
Figura 6 - Semivariogramas do Estoque de Carbono.....	62
Figura 7 - Predição da Densidade Aparente do Solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) na profundidade 0-10 cm.....	70
Figura 8 - Predição da Densidade Aparente do Solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) na profundidade total 0-20 cm.....	71
Figura 9 - Predição do Teor de Carbono Orgânico do Solo ( $\text{g.Kg}^{-1}$ ) na profundidade 0-10 cm....	72
Figura 10 - Predição do Estoque de Carbono Orgânico do Solo ( $\text{MgC.ha}^{-1}$ ) na Profundidade 0-10 cm.....	73



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos Pontos de Coleta.....	44
Tabela 2 – Estatísticas do solo com ocupação de Eucalipto.....	52
Tabela 3 – Estatísticas do solo com ocupação de Floresta Nativa.....	52
Tabela 4 – Estatísticas do solo com ocupação de Pastagem.....	53
Tabela 5 - Estimativas da Densidade Aparente.....	54
Tabela 6 - Estimativas do Teor de Carbono.....	54
Tabela 7 - Estimativas do Estoque de Carbono.....	56
Tabela 8 – Tamanho da amostra para Densidade Aparente segundo a área total.....	57
Tabela 9 – Tamanho da amostra para Teor de Carbono segundo a área total.....	57
Tabela 10 – Tamanho da amostra para Estoque de Carbono segundo a área total.....	57
Tabela 11 - AIC e MAE para a escolha de modelos da Densidade Aparente.....	63
Tabela 12 - AIC e MAE para a escolha de modelos do Teor de Carbono.....	64
Tabela 13 - AIC e MAE para a escolha de modelos do Estoque de Carbono.....	65
Tabela 14 – Estimativa dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas escolhidos.....	67
Tabela 15 – Intervalos de Amostragem entre as unidades amostrais para estoque de carbono.....	74



## 1 INTRODUÇÃO

O potencial do aumento da mitigação do dióxido de carbono atmosférico através do sequestro de carbono nas florestas e, particularmente, nos solos florestais, tem despertado atenção para a importância da existência de técnicas para mensurar e estratégias para monitorar o carbono do solo das florestas. Esses procedimentos devem ser estabelecidos para que acordos internacionais possam ser implementados, como por exemplo, o Protocolo de Quioto (PALMER, 2002).

Os dados usados no setor de Mudança do Uso da Terra (LULUCF pelas siglas em inglês Land Use Land Use Change and Forestry) geralmente são obtidos através de levantamentos amostrais e são usados tipicamente para determinar as mudanças no uso do solo ou nos estoques de carbono (INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC, 2003). A escolha do método de amostragem depende de muitos fatores, incluindo os objetivos do estudo, a experiência do pessoal de campo, as características do solo a ser amostrado e considerações práticas como o acesso às parcelas ou a presença de espelhos d'água. Assim também, é importante considerar a profundidade da amostragem a ser estudada (PALMER, 2002).

Quando o material é homogêneo, qualquer tipo de amostragem apresenta quase o mesmo resultado. Entretanto, quando o material é heterogêneo, como acontece frequentemente, o processo pelo qual se obtém a amostra se torna crítico e o estudo das técnicas que assegurem amostras dignas de confiança é importante (COCHRAN, 1953).

O objetivo da amostragem e da preparação das amostras para análise é prover uma amostra representativa das propriedades originais do campo. Os processos de amostragem devem minimizar qualquer mudança nas propriedades do solo e prevenir a contaminação das amostras (PALMER, 2002). O último objetivo da amostragem é amostrar com a precisão necessária e sem viés para satisfazer os objetivos dos pesquisadores (CRÉPIN; JOHNSON, 1993).

Em qualquer estudo de natureza científica o processo de amostragem, a saber, a escolha de parte de um conjunto de componentes ou de fração de material constituinte do todo, é quase sempre o problema que demanda soluções mais intrincadas e criativas. Não obstante, essa dificuldade não é única, visto que, o grau de precisão desejado e o custo da amostragem são condicionantes de extrema importância no delineamento do plano de amostragem. Nas ciências do solo, as dificuldades se acentuam desde que, hoje, sabe-se da importância e influência da localização e da conformidade dos pontos selecionados, como também, da distância que os

separa, para o sucesso do plano de amostragem. Pontos amostrais próximos têm uma maior probabilidade de serem espacialmente dependentes (CARVALHO; NICOLLELA, 2002).

Comumente, o erro proveniente da amostragem de campo é muito maior que o associado à preparação de amostras, manuseio, e análise, porém, a maioria dos esforços têm sido gastos na quantificação e controle de erro nos laboratórios (CRÉPIN; JOHNSON, 1993; TAN, 1996). Segundo Mason (1992) a metodologia de laboratório tem atingido um erro analítico que contribui somente em uma pequena proporção ao total da variância observada nos dados. Assim, apontam que 92% da variação total dos resultados de uma análise de variância realizada em solos provêm da localização da amostra, e somente 8% foi introduzido depois que a amostra foi tomada, sendo que menos do 1% do total pode ser atribuído aos processos analíticos, mostrando assim a necessidade de realocar os recursos da amostragem, como custos, capacidade do laboratório e pessoal de campo.

A precisão das afirmações que podem ser feitas a partir das propriedades do solo em qualquer local, dependem amplamente da quantidade de variação dentro da área amostrada. Assim, quanto maior a heterogeneidade dos solos, menor a precisão das afirmações sobre suas propriedades, comportamento e performance do seu uso (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Como apontado, ressalta-se a importância dos estudos de métodos de amostragem que permitam conhecer o comportamento das variáveis de interesse: estoque de Carbono no solo, Densidade Aparente e Teor de Carbono. Esses métodos de amostragem devem ser adequados aos objetivos do estudo, sendo que uma amostragem adequada obtém as estimativas do estudo com um erro previamente determinado, com o menor viés e a maior precisão possível, por meio do menor esforço amostral e o menor custo, tendo o pesquisador que conhecer qual o melhor tipo de amostragem, qual a melhor distância entre unidades amostrais, qual a profundidade que deve ser estudada e outras variáveis do interesse do pesquisador.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Gerais**

- Determinar o plano de amostragem adequado para o estudo do estoque de carbono do solo na profundidade 0-20 cm numa área de diferentes usos e cobertura do solo.

- Comparar o uso da estatística clássica e da geoestatística na variável Estoque de carbono do solo.

### **1.1.2 Específicos**

- Conhecer qual é a amostragem adequada para cada tipo de cobertura (eucalipto, nativa, pastagem) e uso do solo para as variáveis: Densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono do solo na profundidade 0-20 cm.
- Conhecer qual a amostragem adequada numa área de alta variabilidade (presença de três estratos: eucalipto, nativa e pastagem).
- Estudar o comportamento das variáveis analisadas por meio da estatística clássica.
- Conhecer o comportamento da dependência espacial das variáveis: densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono.
- Conhecer se a geoestatística pode ser usada como ferramenta para o estudo e predição do estoque de carbono nesse ambientes.





## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 As Mudanças Climáticas**

O termo “Mudança Climática” denota uma mudança identificável no estado do clima, por exemplo, mediante o uso de análises estatísticas, devido a uma mudança no valor médio e/ou na variabilidade das suas propriedades, e que persiste por um período de tempo prolongado, geralmente cifrado em decênios ou em períodos ainda mais longos. Esta definição difere da usada pela Convenção das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas, que a define como uma mudança de clima atribuída direta ou indiretamente à atividade antropogênica, que altera a composição da atmosfera mundial e que é somada à variabilidade climática natural observada nos períodos de tempo comparáveis (IPCC, 2007).

O assunto “mudança do clima” já faz parte da realidade política e econômica internacional, com repercussão nas diversas áreas do conhecimento, e portanto demanda desenvolvimentos científicos e tecnológicos, bem como a adoção de inovações. A entrada em vigor do Protocolo de Quioto e a possibilidade de utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) atraem cada vez mais a atenção do mundo dos negócios e do setor empresarial. Para além das oportunidades de caráter econômico, as mudanças globais e, em particular, os riscos associados ao crescimento da vulnerabilidade climática, induzem a um aumento do compromisso e da responsabilidade corporativa com medidas de mitigação e adaptação dos processos produtivos e dos padrões de consumo (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2008).

Segundo Szacáks (2003), a mudança climática constitui também uma grande ameaça para o meio ambiente e o desenvolvimento sustentável do mundo. Esta mudança é causada pelo aumento do efeito estufa sobre os níveis desejados de temperatura. Alguns dos gases do efeito estufa (GEE) apontados em 1992 no Protocolo de Quioto são: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorcarbonos (HFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoruro de enxofre (SF<sub>6</sub>) (NACIONES UNIDAS, 1992). As concentrações destes gases na atmosfera mundial têm aumentado consideravelmente pelo efeito das atividades humanas desde 1750, e na atualidade excedem, em muito, os valores pré-industriais determinados pela análise de núcleos de gelo acumulados durante milhares de anos. Em 2005, as concentrações de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> na atmosfera excederam consideravelmente os intervalos naturais dos últimos 650.000 anos (IPCC, 2007).

Segundo esses autores, o CO<sub>2</sub> é o GEE antropogênico mais importante. Suas emissões anuais aumentaram em torno de 80% entre 1970 e 2004. Os aumentos devem-se principalmente à utilização de combustíveis fósseis, e em menor escala, as mudanças no uso da terra. No caso do CH<sub>4</sub>, os aumentos provavelmente sejam causados pela agricultura e pelo uso de combustíveis fósseis. Já o aumento do N<sub>2</sub>O procede principalmente da agricultura. Se continuar com as emissões dos GEE numa taxa superior ou igual à atual, o aquecimento aumentaria e o sistema climático mundial experimentaria durante o século XXI numerosas mudanças, muito provavelmente maiores que as observadas durante o século XX, o que geraria impactos a nível mundial. Como exemplo, na América Latina, até a metade do século, o aumento da temperatura e a diminuição da umidade originariam uma substituição gradual das florestas tropicais por savanas, na Amazônia, a vegetação semi-árida seria substituída por vegetação árida, poderiam experimentar-se perdas de diversidade biológica e a extinção de espécies, a produtividade de cultivos importantes diminuiria, assim como a produtividade pecuária, o que influenciaria diretamente na segurança alimentar, entre outros exemplos (IPCC, 2007).

As sociedades podem responder à mudança climática adaptando-se aos seus impactos e reduzindo as emissões de GEE (mitigação), reduzindo assim a taxa e a magnitude da mudança. Não existe uma única tecnologia que possa proporcionar todo o potencial de mitigação em nenhum dos setores.

O IPCC (1995) indica que um dos objetivos da Convenção Quadro das Nações Unidas para a Mudança Climática, que foi aceito por 189 nações, é “a estabilização das concentrações dos gases estufa na atmosfera, a um nível que possa prevenir a perigosa interferência antropogênica com o sistema climático”. Aponta também, opções tecnológicas para a redução das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera, incluindo:

- Diminuições do uso intensivo dos combustíveis fósseis,
- Incremento de uso das fontes de energia renovável ou energia nuclear, as quais não emitem ou emitem pouco CO<sub>2</sub>,
- Seqüestro de CO<sub>2</sub> mediante a capacidade de absorção biológica em florestas e solos,
- Captura e armazenamento de carbono, química ou fisicamente.

A terceira opção, absorção biológica de CO<sub>2</sub> em florestas e solos, base deste trabalho, é ampliada no Protocolo de Quioto, mediante o Artigo 12, que apresenta alternativas de controle de

emissões: os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), que permitem o uso de reduções certificadas de emissões para os países não participantes (países que não são citados no anexo B do protocolo Quioto), como é o caso do Brasil. (NACIONES UNIDAS, 1992). Aumentar o seqüestro de carbono atmosférico em ecossistemas florestais pode ser uma ferramenta importante para ajudar a mitigar o aumento do carbono atmosférico (PALMER, 2002). As atividades florestais podem reduzir e evitar a acumulação atmosférica dos três principais GEE que são emitidos diretamente por ações humanas (ESTADOS UNIDOS, 2005).

Segundo Lal (2004), existem cinco reservatórios principais do Carbono Global. O maior reservatório é o oceano (38000 Pg), seguido do reservatório geológico, o pedológico, a atmosfera e o reservatório biótico. O reservatório pedológico ou reservatório de carbono do solo é quatro vezes maior que o biótico (florestas, etc.) e ao redor de três vezes maior que o reservatório atmosférico.

### **2.1.1 As florestas e os reservatórios de carbono**

Muito se espera dos recursos florestais do mundo, eles devem fornecer matéria prima renovável e energia, manter a diversidade biológica, proteger a terra e a água, brindar serviços recreativos, melhorar a qualidade do ar, aliviar a pobreza e mitigar as mudanças climáticas. Elas se conservam e ordenam em atenção aos usos e valores múltiplos e desempenham um papel essencial na mitigação das mudanças climáticas (FAO, 2006).

Schlegel, Gayoso e Guerra (2001) apontam que as florestas são vistas como meio para mitigar as emissões de gases do efeito estufa, principalmente CO<sub>2</sub>, por meio do processo de fotossíntese. Segundo FAO (2006) as florestas, assim como outros ecossistemas, se vêem afetados pelas mudanças climáticas, seja pela altura do nível do mar ou pelas mudanças nas temperaturas e nos regimes de chuva, porém, as florestas também influenciam no clima e no processo das mudanças climáticas, absorvem carbono na madeira, nas folhas e no solo, e quando estes sistemas são modificados (mudanças no uso) liberam-no na atmosfera.

Segundo Houghton (2003), com o aumento nas concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, o aquecimento global e as mudanças climáticas, algumas questões foram colocadas em pauta acerca da potencialidade do solo como fonte de C ou agente para o seqüestro do C da atmosfera na forma de CO<sub>2</sub>. Estados Unidos (2005) concorda com essa informação, apontando que as florestas e a agricultura são atividades amplamente reconhecidas como

potenciais para a mitigação dos GEE. Quantificar as funções substanciais das florestas como reservatórios de carbono, como fontes de emissão e como sumidouros é hoje a chave para entender e modificar o ciclo mundial de carbono (FAO, 2006).

As florestas cobrem 30% da área total de terras emergidas, o que representa 0,62 ha per capita, sendo que no mundo todo, mais de um terço da área de florestas é floresta primária. A América do Sul apresenta a região com maior percentagem de cobertura florestal. O Brasil é o segundo país a nível mundial com maior área de florestas (478 milhões de hectares), porém é o primeiro país que apresenta a maior perda líquida anual de área de florestas ( $-3.103.000 \text{ ha.ano}^{-1}$ ) (FAO, 2006).

Calcula-se que as florestas do mundo armazenam 283 Gt de carbono somente na biomassa, e 638 Gt no ecossistema florestal total (até 30 cm de solo) superando a quantidade de carbono da atmosfera. Aproximadamente metade na biomassa florestal encontra-se distribuída na madeira morta e a outra metade nos solos (46%) e serrapilheira (4%) (FAO, 2006). Segundo Lal (2004) as florestas tropicais cobrem uma área de  $1,76 \times 10^9$  ha com um estoque de 213 a 216 bilhões de MgC no solo. Os valores deste reservatório variam amplamente entre regiões, sendo maiores em regiões frias e úmidas que em regiões secas. Comparado com as florestas tropicais, somente as florestas boreais apresentam valores maiores (338 a 471 bilhões de MgC no solo).

O solo é um componente fundamental no processo de emissão e seqüestro de carbono. Globalmente, há duas a três vezes mais carbono nos solos (1500-2000 Pg C) em relação ao estocado na vegetação (470-655 Pg C) e cerca do dobro em comparação com a atmosfera (730 Pg C). Assim, se identifica a potencialidade do solo como agente para o seqüestro do C da atmosfera na forma de  $\text{CO}_2$  constituindo-se numa alternativa para mitigar o aumento nas concentrações dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, contribuindo assim para a redução do aquecimento global e das mudanças climáticas. A intervenção antrópica deve ser direcionada para mitigar as emissões dos gases do efeito estufa já que a natureza e quantidade do carbono orgânico do solo afeta muitas das propriedades biológicas, químicas e físicas dos solos florestais (PALMER, 2002).

É importante ter uma definição clara de qual componente será incluído na estimativa do carbono do solo, como raízes de plantas vivas, material morto de plantas em diferentes níveis de decomposição, microorganismos do solo, fauna do solo, matéria orgânica do solo, e carbono inorgânico (PALMER, 2002). Assim, FAO (2006) define o carbono do solo como o carbono

orgânico presente nos solos minerais e orgânicos (incluindo turfa) numa profundidade determinada pelo país (geralmente 30 cm) e aplicada de maneira coerente em todas as séries cronológicas. As raízes pequenas vivas de diâmetros inferiores a 2 mm (ou outro valor selecionado pelo país como diâmetro limite para biomassa embaixo do solo) estão inclusas junto com a matéria orgânica quando estas não podem distinguir-se, de maneira empírica, da mesma.

Porém, a despeito do grande potencial dos solos como reservatório de carbono, há uma grande lacuna no que diz respeito aos métodos de campo para a determinação do carbono nos solos de florestas, principalmente em relação ao emprego de um adequado esforço amostral. Muitos trabalhos determinam um número de amostras ao acaso, não havendo uma padronização quanto a um número mínimo, tampouco quanto ao tipo de amostragem (ACOSTA et al., 2001; ETCHEVERS et al., 2001; BALBINOT, 2003). A estimativa do carbono armazenado no solo não é de fácil quantificação, e as metodologias para estudar o estoque de carbono no solo, principalmente em condições de agricultura e florestas, são poucas. Há muitas dificuldades para comparar resultados no solo e integrar bases de dados confiáveis devido às diferentes formas como se fazem as medições, sendo necessário o estabelecimento de metodologias padrões para medir os componentes subterrâneos de C orgânico de solo e raízes (ACOSTA et al., 2001).

É claro que muitos países não possuem informações específicas sobre os parâmetros necessários para o cálculo de todos os sumidouros de carbono. No estudo da FAO (2006) de 229 países que apresentaram a informação, somente 44 apresentam inventários de carbono no solo, sendo que o Brasil representa 50.289 milhões de Mg (o segundo maior valor apresentado).

Cientistas têm determinado as mudanças nos reservatórios do carbono orgânico do solo (COS) desde inícios do século 20, e tem que se admitir que existe uma forte necessidade de padronizar estes métodos para que os resultados sejam comparáveis entre laboratórios. Também existe a necessidade de desenvolver procedimentos que se adéquem a escala para que os dados possam ser extrapolados de um ponto para escalas regionais ou de ecossistemas. É importante então reconhecer e reduzir esses problemas mediante a padronização da amostragem, procedimentos analíticos e técnicas de escalas (LAL, 2004).

## **2.2 Amostragem**

A amostragem infere informação a respeito de uma população, observando somente uma parte dela, baseando-se na teoria de amostragem da seleção ao acaso de uma amostra na

população, onde cada unidade da população tem uma mesma probabilidade específica de ser incluída na amostragem (IPCC, 2003).

Segundo Tan (1996) antes de fazer qualquer análise química do solo, é preciso procurar uma amostragem que represente o solo que está sendo pesquisado, pois conseguir uma amostra representativa não é uma tarefa simples e quando a amostra analisada não é representativa, os resultados químicos podem ter valores que não necessariamente descrevem as propriedades do solo como um todo.

Segundo Crépin e Johnson (1993) o objetivo de uma amostragem de solos é obter informação real acerca de um solo particular. A amostra pode ou não ser representativa da população dependendo de como ela é selecionada e coletada. No passado, a amostragem era a característica débil das investigações e dos trabalhos de campo. O processo de amostragem e o trabalho analítico são caros, porém o custo pode ser reduzido coletando somente as amostras necessárias para um determinado nível de precisão. Todos os solos são naturalmente variáveis, suas propriedades mudam horizontalmente na paisagem e verticalmente através dos perfis do solo.

No caso da geoestatística a escolha da configuração e do espaçamento mínimo de amostragem para a análise dos semivariogramas é baseada no conhecimento prévio da variação na área de estudo, dos objetivos do estudo e do custo de amostragem e de mensuração, sendo que o desenho amostral inclui coletas em trajetos, grades equilaterais, grades equilaterais com amostragem em distâncias curtas e amostragem ao acaso (TRANGMAR, YOST, UEHARA, 1985).

### **2.2.1 Desenho Amostral**

O desenvolvimento de um desenho amostral é uma atividade importante no planejamento de uma atividade de monitoramento de carbono. O objetivo é obter amostras representativas que provejam estimadores não enviesados da média e da variância (PALMER, 2002). Ele determina como as unidades de amostragem são selecionadas de uma população e também quais procedimentos de estimadores estatísticos podem ser aplicados para fazer inferências da amostra (IPCC, 2003). O desenho amostral tem como objetivo o compromisso de manter a simplicidade e a eficiência do estudo (IPCC, 2003).

Os desenhos amostrais de solos podem incluir diferentes tipos de amostragem como: Amostragem ao Acaso, Estratificado, Sistemático (TAN, 1996; CRÉPIN; JOHNSON, 1993; MASON, 1992) assim como estudos geoestatísticos (CRÉPIN; JOHNSON, 1993, MASON, 1992).

Segundo Tan (1996) de todos os métodos usados, a amostragem ao acaso pode ser o método mais simples. A amostragem ao acaso permite todas as possíveis combinações das unidades de amostragem a ser amostradas, sendo limitadas unicamente ao tamanho da amostra (CRÉPIN; JOHNSON, 1993).

A idéia fundamental na amostragem ao acaso é que ao escolher uma amostra de  $n$  unidades, cada possível combinação de  $n$  unidades tem igual possibilidade de ser selecionadas. A seleção de qualquer unidade não pode ser influenciada de nenhuma forma por outra unidade que tenha sido selecionada (FREESE, 1962)

Levantamentos estratificados são geralmente mais eficientes em termos de precisão que pode ser alcançada com certo custo, porém, podem ser um pouco mais complexos, o que pode aumentar o risco de erros não amostrais devido ao uso de coleta de dados incorreto. (IPCC, 2003). Segundo Cochran (1953) na amostragem estratificada, a população de  $N$  unidades é primeiramente dividida em subpopulações de  $N_1, N_2, \dots, N_L$  unidades respectivamente e sem se sobrepor para juntas abranger a totalidade da população. Essa é uma técnica comum, e pode proporcionar um aumento de precisão nas estimativas das características da totalidade da população. Este tipo é comumente usado em áreas heterogêneas (TAN, 1996). Crépin e Johnson (1993) apontam que na amostragem estratificada a área total é separada em um número de estratos ou subpopulações, das quais são tomadas unidades amostrais.

Como indica o nome, a amostragem sistemática é feita mantendo uma sistematização da coleta mediante um critério, por exemplo, distância entre unidades amostrais. Pode prover maior precisão nos resultados, pois os pontos de coleta neste método podem ser distribuídos de forma mais equitativa sobre toda a população (TAN, 1996). Os pontos de amostragem seguem um padrão simples e são separados por distâncias fixas, lembrando que o primeiro ponto da grade deve ser selecionado ao acaso (CRÉPIN; JOHNSON, 1993).



### 2.3 Estatística clássica

Segundo Carvalho, Silveira e Vieira (2002) a estatística clássica assume que a variação das características do solo dentro das unidades amostrais não tem correlação e que a média das amostras é o melhor estimador das características do solo em qualquer local na unidade amostral, com um erro estimado expresso pela variância. Esta abordagem assume que a variabilidade da média é ao acaso e não contém referências à distribuição espacial das unidades amostrais (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Segundo esses autores, a estatística clássica assume que o valor esperado de uma propriedade do solo  $z$  em qualquer lugar  $x$  em uma área amostrada pode ser expresso segundo a fórmula 1:

$$z(x) = \mu + \varepsilon(x) \quad (1)$$

Onde  $\mu$  é a média esperada da população ou o valor esperado de  $z$ ,  $\varepsilon(x)$  representa uma dispersão não correlacionada espacialmente e ao acaso dos valores da média. Como os valores da média são usados para estimar as propriedades em locais não amostrados, as estatísticas de dispersão (Coeficiente de Variação, desvio padrão, Intervalos de confiança) são usadas para indicar a precisão da média como estimador.

Normalmente, o uso da Estatística clássica requer maior número de unidades amostrais do que a Geoestatística, para estimar o parâmetro em estudo com determinada precisão (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002).

### 2.4 Geoestatística

As propriedades do solo apresentam dependência espacial dentro de algumas regiões, assim, o modelo clássico é inadequado para interpolar variáveis com dependência espacial, devido a que ele assume uma variação ao acaso e não leva em conta a correlação espacial nem a localização relativa das amostras (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Muitas propriedades dos solos variam continuamente no espaço, ou seja, os valores localizados próximos entre eles apresentam maior similaridade do que aqueles que estão mais distantes, apresentando uma dependência espacial, sendo a geoestatística uma ferramenta que

aplica métodos para analisar, avaliar ou caracterizar os dados espacialmente relacionados (CRÉPIN; JOHNSON, 1993).

Segundo McBratney e Webster (1986) os cientistas têm se mostrado preocupados com a variação espacial do solo por muitos anos, porém, mas apenas recentemente meios satisfatórios foram disponibilizados para descrever as variações quantitativamente, sendo estes meios a teoria e a prática da geoestatística.

Segundo Goovaerts (1998, 1999) a geoestatística dispõe de um conjunto de ferramentas estatísticas para incorporar coordenadas espaciais e temporais de observações no processamento de dados e para detectar e quantificar as escalas de variabilidade espacial. Até fins da década de 1980, a geoestatística era essencialmente observada como uma forma de descrever padrões espaciais mediante o uso de semivariogramas e de prever o valor de atributos do solo em locais não amostrados usando a krigagem. Agora, novas ferramentas têm sido desenvolvidas para enfrentar problemas mais avançados, como a determinação das incertezas sobre a qualidade do solo ou concentração de poluentes no solo, simulação estocástica da distribuição espacial dos valores dos atributos e a modelagem de processos espaço-temporais.

Semelhante ao que acontece na aplicação dos procedimentos da estatística clássica, os resultados produzidos por intermédio das técnicas geoestatísticas, basicamente o ajuste dos dados pelo semivariograma e a interpolação de pontos no interior da grade ou malha de amostragem, dependem intrinsecamente do plano da amostragem delineado, ou seja, do número de pontos amostrados e de sua disposição ou formato no campo. Daí a importância do esboço do plano de amostragem, de tal maneira, a ser representativo da região sob estudo. Aqui também, o custo da amostragem e a precisão desejada são fatores limitantes (CARVALHO; NICOLLELA, 2002).

Os objetivos de uma análise geoestatística são geralmente de dois tipos, Estimação (inferência sobre os parâmetros de um modelo estocástico de dados) e Predição (inferência sobre a realização de sinais não observados) (DIGGLE; RIBEIRO JUNIOR, 2000). O valor real de uma análise geoestatística é a estimação de propriedades do solo nas áreas onde não foram amostradas, assim como permitir a estimação da precisão associada à krigagem (CRÉPIN; JOHNSON, 1993).

A variabilidade espacial de algumas características do solo vem sendo uma das preocupações dos pesquisadores, praticamente desde o início do século, como mostra Camargo, (1998). Os procedimentos usados baseavam-se na estatística clássica e utilizavam grandes

quantidades de dados amostrais, visando caracterizar ou descrever a distribuição espacial da característica em estudo.

Desde as primeiras publicações do uso da geoestatística aplicada no solo, na década de 1980, estes métodos têm-se tornado populares na ciência de solos (GOOVAERTS, 1998), fazendo-se uso dos conceitos pertinentes à teoria das variáveis regionalizadas, a saber, semivariograma, auto-correlação, krigagem, cokrigagem, entre outras, (CARVALHO; NICOLLELA, 2002). Novas ferramentas têm sido desenvolvidas para abordar problemas mais avançados como a determinação de incertezas, simulações estocásticas das distribuições espaciais e a modelagem dos processos espaço – tempo, sendo que todas essas técnicas são pouco conhecidas pelos pesquisadores de solos (GOOVAERTS, 1998, 1999).

A caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo é essencial para conseguir um melhor entendimento das complexas relações entre as propriedades do solo e os fatores do meio ambiente, além disso, um modelo de dependência espacial dos dados de solo pode ser usado para estimar atributos de lugares não amostrados (GOOVAERTS, 1998).

#### 2.4.1 O Semivariograma

A parte central da geoestatística é o semivariograma, que é a chave para descrever variações, quantificar, entender e prever (McBRATNEY; WEBSTER, 1986). Os variogramas são amplamente usados em análises geoestatísticas com propósitos exploratórios, para estimar os parâmetros de covariância e/ou para comparar modelos teóricos e ajustados (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001). A análise de um semivariograma tem a vantagem de definir parâmetros que são necessários para estimações locais feitas por krigagem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

Segundo Goovaerts (1998), os padrões espaciais usualmente são descritos em termos da dissimilaridade entre as observações como uma função das distâncias. A média de dissimilaridade entre dados separados por um vetor  $h$  é medido pelo semivariograma  $\hat{\gamma}(h)$ , computado como a metade da média da diferença entre os componentes de cada par de dados ao quadrado, como na fórmula 2:

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

Onde  $N(h)$  é o número de pares de dados para certa distância  $h$ ,  $z$  representa uma variável como, por exemplo, uma propriedade do solo, como teor de carbono, localizada nas coordenadas  $u$  (em uma, duas ou três dimensões). Ela geralmente é expressa num gráfico entre  $\hat{\gamma}(h)$  e a distâncias  $h$  (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

A análise do semivariograma pode ser feita da seguinte maneira: O alcance é interpretado como a distância de dependência dos dados, o efeito pepita (a descontinuidade na origem do variograma) surge dos erros da mensuração ou de fontes de variação de distâncias menores que a menor distância do intervalo analisado ou por ambas.

Graficamente (figura 1) o semivariograma e os seus componentes são (adaptado de CAMARGO, 1998):

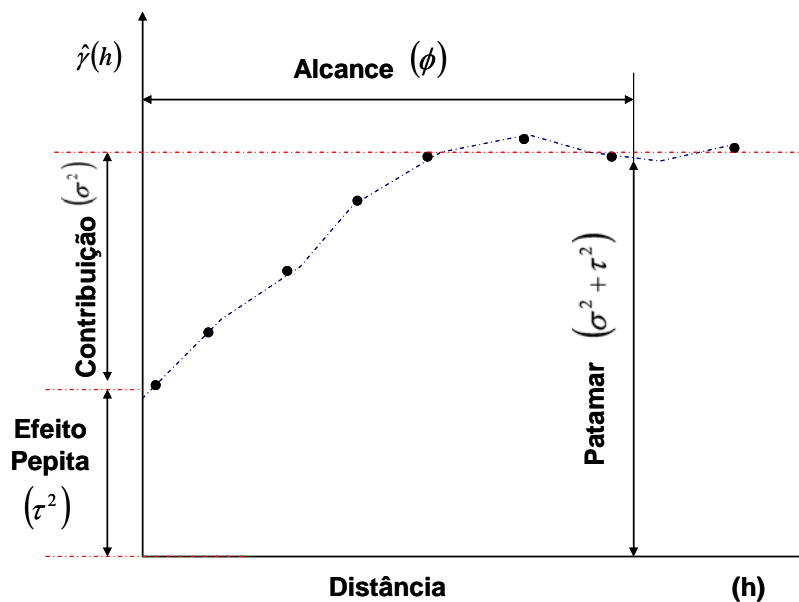


Figura 1 - Parâmetros do semivariograma

O semivariograma pode ser representado de maneiras distintas, dependendo dos dados e dos intervalos de amostragem usados. Idealmente a semivariância incrementa com a distância entre as amostras chegando até um valor constante (o patamar) em uma dada distância (alcance) (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

O alcance prático é definido como a distância na qual o valor do modelo está a 95% do patamar, definindo a independência das amostras (GOOVAERTS, 1998)

### 2.4.2 Estimação de parâmetros baseado na Máxima Verossimilhança

Escolher um semivariograma apropriado em qualquer situação apresenta ainda algo de mistério, não é automático, mas requer um bom julgamento, baseado na experiência e no entendimento das limitações matemáticas das funções (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986). Muitos métodos têm sido propostos, variando desde uma caixa preta cheia de procedimentos com modelos básicos na qual a escolha e seus ajustes são automáticos e por visualização e outros intermediários com estimadores de mínimos quadrados (GOOVAERTS, 1997, 1998), sendo estes últimos os geralmente usados (McBRATNEY; WEBSTER, 1986; GOOVAERTS, 1997). Desde uma perspectiva clássica, a melhor função é a base na qual métodos sólidos de inferência são construídos. Estimar parâmetros de modelos maximizando a função de verossimilhança segundo um modelo, fornece, em quase todas as condições, estimadores eficientes e não enviesados quando aplicados a grandes amostras. Assim, se o objetivo é obter modelos paramétricos, é comum usar essa função como a base de estimação de parâmetros (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001). Segundo McBratnet e Webster (1986) o método de máxima verossimilhança é considerado o de máxima eficiência de estimação, porém ele precisa ter um tamanho grande de amostras, no mínimo 100.

Segundo Ribeiro Junior e Diggle (2001) a função de máxima verossimilhança estima os parâmetros de um modelo gaussiano (fórmula 3):

$$Y(x) = \mu(x) + S(x) + e \quad . \quad (3)$$

Onde  $x$  define a localização espacial (geralmente distâncias euclidianas),  $Y$  é a variável observada,  $\mu(x)$  é a média dos componentes do modelo,  $S(x)$  é um processo gaussiano com variância  $\sigma^2$  (sigma) e com uma função de correlação parametrizada em uma simples forma como  $\phi$  (phi), com possibilidades de outros parâmetros extras como  $\kappa$  (kappa),  $e$  é o termo usado para o erro com um parâmetro de variância  $\tau^2$  (nugget). No caso de transformações de dados mediante Box-Cox, adiciona-se o parâmetro  $\lambda$  (lambda), o que substitui  $Y(x)$  pela fórmula 4:

$$g(Y(x)) = ((Y^{\lambda(x)}) - 1) / \lambda \quad (4)$$

Assim, para o caso de uma função  $Z(x)$  os estimadores de  $\mu$ , a média, e  $\nu$  os  $p$  parâmetros do covariograma, podem ser obtidos maximizando a função (fórmula 5) (McBRATNEY; WEBSTER, 1986):

$$L_N(\beta; z_N) = -0.5 \ln |\Xi_N| - 0.5 (z_N - 1\mu)^T \Xi_N^{-1} (z_N - 1\mu) \quad (5)$$

Onde  $\beta$  é o vetor combinado dos parâmetros  $1 + p \times 1$ , por exemplo,  $\beta = [\mu, \nu]$ . O vetor  $N \times 1$  de observações nos sítios de amostragem  $N$  é representado por  $z_N = [z(x_1), z(x_2), \dots, z(x_N)]^T$ ,  $\Xi_N$  é a matriz variância-covariância entre os sítios, e  $1$  é o vetor  $N \times 1$ . O valor máximo de  $L_N$  é encontrado pela interação no qual  $\Xi_N$  é atualizada e invertida em cada interação.

### 2.4.3 Escolha de modelos

É importante escolher o modelo apropriado do semivariograma porque cada modelo terá valores que podem ser diferentes para: efeito pepita, contribuição e alcance; os quais são parâmetros críticos na krigagem (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Sempre há incertezas acompanhando os parâmetros dos modelos dos semivariogramas, e muitos desses modelos podem representar igualmente bem a informação da amostra, por isso existe a tendência de justificar a escolha de um modelo em particular de acordo com critérios estatísticos (GOOVAERTS, 1997) e que permita manter o balanço entre o melhor ajuste e a parcimônia do modelo (McBRATNEY; WEBSTER, 1986).

Esse compromisso entre melhor ajuste e parcimônia pode ser expresso em termos do Critério de Informação de Akaike (AIC) (GOOVAERTS, 1998; McBRATNEY; WEBSTER, 1986).

Segundo Ribeiro Junior e Diggle (2001) o AIC pode ser usado como forma de escolher um modelo, calculado segundo a fórmula 6:

$$AIC = -2 \ln(L) + 2p \quad (6)$$

Onde  $L$  é a máxima verossimilhança e  $p$  é o número de parâmetros no modelo. O modelo que apresenta o menor AIC é o melhor (McBRATNEY; WEBSTER, 1986). Porém, segundo Burnham e Anderson (2002), um valor individual de AIC por si só não pode ser interpretado, pois AIC é somente comparativo, relativo a outros valores AIC no grupo de modelos, portanto tais diferenças AIC são muito importantes e úteis. Os valores relativos, e, particularmente as diferenças do AIC são importantes, e não o tamanho absoluto do valor do AIC. Essa diferença pode ser calculada segundo a fórmula 7:

$$\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min} \quad (7)$$

Onde  $\Delta_i$  representa a diferença entre os valores do AIC, e  $AIC_{\min}$  representa o valor do menor AIC. Esses valores são de fácil interpretação e permitem uma rápida comparação e um ranking dos modelos candidatos, sendo o melhor modelo estimado  $\Delta_i \equiv \Delta_{\min} \equiv 0$ . Algumas regras aproximadas estão disponíveis e são particularmente úteis para modelos, assim:  $\Delta_i = 0 - 2$  nível substancial de suporte empírico do modelo,  $\Delta_i = 4 - 7$  nível consideravelmente menor de suporte empírico do modelo e  $\Delta_i > 10$  nenhum nível de suporte empírico do modelo.

Outra forma de escolher modelos é o uso da validação cruzada, que permite escolher o modelo que minimiza o erro de predição (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986).

Segundo Goovaerts (1998) a validação consiste em tirar um dado do grupo de dados, num momento específico e re-estimar este valor a partir dos dados remanescentes usando os diferentes modelos de semivariograma. Os valores interpolados e os atuais são comparados e o modelo que apresenta a maior exatidão nas predições é retido. Esta mensuração pode ser expressa usando a média absoluta do erro de predição (MAE pelas siglas em inglês, mean absolute error of prediction), calculado segundo a fórmula 8:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{\alpha=1}^n |z(u_{\alpha}) - z^*(u_{\alpha})| \quad (8)$$

O MAE mede o viés ou a precisão da predição e deve ser o menor possível para modelos de predição não enviesados e precisos (QIU et al., 2007).

#### 2.4.4 Dependência espacial

Segundo Trangmar, Yost e Uehara (1985) a soma do efeito pepita e da covariância espacial (contribuição) equivale ao patamar ou a variância da amostra. O efeito pepita pode ser expresso como percentagem da semivariância total do semivariograma o que possibilita comparações entre o tamanho relativo do efeito pepita e as propriedades em estudo. Esta dependência pode ser calculada segundo a fórmula 9 (CAMBARDELLA et al., 1994):

$$\tau^2 \% = \frac{\tau^2}{\sigma^2 + \tau^2} * 100 \quad (9)$$

Essa percentagem pode ser usada para definir distintas classes de dependência espacial para as variáveis do solo, segundo: forte dependência espacial apresenta um valor  $\leq 25\%$ , uma dependência moderada apresenta valores entre 25-75% e uma dependência débil apresenta valores maiores que 75% (CAMBARDELLA et al., 1994). Uma relação de 0% do patamar significa que não existe nenhum erro de mensuração e também que não estariam presentes variações de curto alcance, enquanto que uma relação de 100% surge de grandes variações entre pontos separados por curtas distâncias e indica ausência total de correlação espacial na escala de amostragem usada (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985).

#### 2.4.5 Krigagem

Segundo Trangmar, Yost e Uehara (1985) a krigagem é uma técnica para calcular estimativas ótimas e não enviesadas em locais não amostrados, usando as propriedades estruturais do semivariograma e o grupo inicial dos dados coletados, com uma característica útil: o termo de erro (a estimação da variância) é calculado para cada valor estimado, provendo uma medida de confiança da interpolação.

Segundo Goovaerts (1998), modelar semivariogramas é um objetivo raro por si só, o objetivo final de um trabalho é usualmente estimar valores em um lugar não amostrado. Segundo Goovaerts (1999), a krigagem é um nome genérico adotado pelos geostatísticos para um grupo



de algoritmos de regressão de mínimos quadrados. Muitos dos estudos geoestatísticos na ciência dos solos têm como objetivo estimar propriedades do solo em lugares não amostrados e mapeá-los. Uma forma de fazê-lo é a krigagem ordinária, que estima os valores por meio de uma combinação linear das observações vizinhas, segundo a fórmula 10:

$$z_{OK}^*(u) = \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_{\alpha}(u) z(u_{\alpha}) \quad (10)$$

Onde  $z_{OK}^*(u)$  é o valor predito num ponto não amostrado por meio da krigagem ordinária,  $\lambda_{\alpha}(u)$  é a chave da determinação, já que é o peso que se assina para cada observação e  $z(u_{\alpha})$  é o valor dado num ponto localizado em  $(u)$ .

## 2.5 As técnicas de laboratório para análise de solos

Há diferentes métodos disponíveis para a análise de carbono nos solos florestais. A seleção do método mais apropriado para qualquer projeto de carbono deve considerar vários fatores, incluindo a natureza dos solos examinados, a exatidão do método e os custos da análise (PALMER, 2002; LAL, 2004).

### 2.5.1 Carbono Orgânico do Solo (COS)

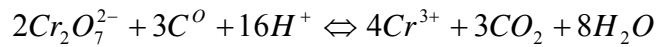
As concentrações do COS têm sido mensuradas pelos cientistas do solo desde meados do século XIX (LAL, 2006).

Segundo Tiessen e Moir (1993), existem numerosos métodos disponíveis para a determinação de Carbono Orgânico. Segundo Quaggio e Rajj (1979), Tedesco et al. (1995), os métodos empregados na determinação da matéria orgânica em solos podem ser classificados em dois grupos:

- a) Os baseados em procedimentos de combustão quantitativos, com a determinação de carbono como  $CO_2$ . Chamado de combustão seca.
- b) Os baseados na redução do íon dicromato ( $Cr_2O_7^{2-}$ ) pela matéria orgânica. Chamado de combustão úmida. Tiessen e Moir (1993) classificam estes métodos de combustão úmida em: (i) Oxidação úmida do carbono orgânico em uma solução de ácido de dicromato seguido da titulação do dicromato remanescente

com sulfato ferroso de amônio é um indicador apropriado, ou por determinação fotométrica de  $Cr^{III}$  e (ii) Oxidação úmida do carbono orgânico em uma solução de ácido de dicromato e coleta e determinação do  $CO_2$  envolvido. Se o solo não teve um pré-tratamento de calcários, os carbonatos dissolvidos no meio ácido podem estar inclusos na determinação de  $CO_2$  para entregar o valor do Carbono Total.

Segundo Tedesco et al. (1995), Cantarella, Quaggio e Raij (2001) a oxidação dos compostos orgânicos do solo por dicromato ocorre pela seguinte reação:



Quaggio e Raij (1979) apontam que o método colorimétrico substitui a titulação usada no Método Walkley-Black por colorimetria, medindo a coloração azul do íon  $Cr^{3+}$  proveniente da redução do íon  $Cr_2O_7^{2-}$  como medida quantitativa do carbono oxidado. Esses métodos colorimétricos apresentam comportamentos semelhantes e resultados próximos aos obtidos pelo método Walkley-Black.

### 2.5.2 Densidade Aparente

Segundo Lal (2006) a densidade aparente do solo é definida como a razão entre a massa do sólido do solo e o volume total. Ela é uma propriedade altamente dinâmica que varia fortemente através do tempo e do espaço. É uma importante propriedade física e uma forte determinadora da qualidade do solo, pois ambientalmente afeta os fluxos dos GEE entre a atmosfera e o solo. Existem algumas metodologias para determinação de densidade aparente do solo, como o método do anel volumétrico, método da proveta, método do torrão, método da escavação que se encontram descritos pela EMBRAPA (1979).

O conhecimento da densidade aparente é importante para entender o impacto da mudança do uso do solo na determinação dos reservatórios elementares no solo. Ainda pequenas mudanças na densidade, devido a fatores naturais ou induzidos, podem causar mudanças drásticas nos reservatórios. Portanto a falta de conhecimento sobre a densidade aparente pode freqüentemente

levar a interpretações erradas do manejo e das mudanças induzidas nos reservatórios do COS (LAL, 2006).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em Angatuba, município localizado no centro-sul do estado de São Paulo, Brasil, na fazenda Três Lagoas, entre as coordenadas 7418000N-756000E e 7640000N-7408000E, com uma extensão de 3247,47 ha (figura 2). Até o ano 2006, 541 ha da fazenda eram consideradas cerradão e aproximadamente 2590 ha tinham como uso do solo pastagem exótica (*Brachiaria sp*), área que foi substituída por plantações de eucaliptos pela empresa Ripasa S/A Celulose e Papel.

A área de estudo esta distribuída por uso do solo em: 582,41 ha de Reserva Legal e 272,71 ha de Área de Proteção Permanente que no trabalho foram consideradas Floresta Nativa com um total de 855,12 ha, e 2225,87 ha de eucalipto plantado. A pastagem ocupa uma área de aproximadamente 30 ha, e o restante da área de estudo são áreas de infra-estrutura como carreadores e estradas.

O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cfa mesotérmico úmido, sem estação seca bem definida, e com regime de chuva de 1.250 mm.ano<sup>-1</sup> (MODLER; MATTOS; ROSSI, 2007; DUFRANC et al., 2004).

Segundo o Mapa Pedológico do Estado de São Paulo (OLIVEIRA et al., 1999) os solos da região são do tipo Latossolos. Prado (1997) aponta que não existe levantamento pedológico que forneça informações pedológicas num nível detalhado ou semidetalhado no Município de Angatuba, nem na Região Agrícola de Itapetininga onde se insere a Fazenda. Estudos realizados na Estação Ecológica de Angatuba apontam que o tipo de solo predominante é o Latossolo Vermelho – Amarelo de textura média (MODLER; MATTOS; ROSSI, 2007). Dufranc et al. (2004) em estudos feitos na região de Angatuba, também apontam como tipo de solo o Latossolo Vermelho distrófico típico álico de textura argilosa.

#### 3.2 Amostragem

Para a amostragem do solo estabeleceram-se diferentes tamanhos de grades na área de estudo. A grade geral é de 5 x 5 km, com pontos de coleta a cada quilometro, formando uma grade com 36 pontos de coleta. Posteriormente estratificou-se a área de estudo de acordo com o uso do solo em: Floresta Nativa de mais de 30 anos, Área de Regeneração de um ano (plantações de eucalipto) e Pastagem. Cada quadrante de 1 x 1 km de cada estrato subdividiu-se em outros

pontos de coleta, a cada 500 x 500 m (9 pontos), 250 x 250 m (25 pontos) e uma grade de 50 x 50 m com pontos a cada 10 m (36 pontos) (Tabela 1).

Tabela 1 - Distribuição dos Pontos de Coleta

<b>Estrato</b>	<b>Grade</b>	<b>Distância entre pontos</b>	<b>Numero de pontos coletados</b>
Geral	5 km x 5 km	1 km	35
Área em Regeneração	1 km x 1 km	500 m	8
Área em Regeneração	1 km x 1 km	250 m	21
Área em Regeneração	50 m x 50 m	10 m	36
Pastagem	1 km x 1 km	500 m	4
Pastagem	1 km x 1 km	250 m	11
Pastagem	50 m x 50 m	10 m	36
Nativa	1 km x 1 km	500 m	4
Nativa	1 km x 1 km	250 m	12
Nativa	50 m x 50 m	10 m	36
<b>TOTAL</b>			<b>203</b>

As amostras foram coletadas a 0-10 cm e 10-20 cm de profundidade, formando as Profundidades 1 e 2 respectivamente, assim como uma Profundidade Total na qual foi considerada a coleta 0-20 cm. Pela distribuição das áreas no campo e a impossibilidade de realocar os pontos mantendo as grades desejadas, existe divergência no número de unidades amostrais dentro de cada estrato. As amostras foram coletadas entre Agosto de 2007 e Janeiro de 2008.

Com exceção das grades de 50 x 50 m, a marcação e a localização dos pontos nas grades foi feita com o uso do software Arc-view Gis, localizando os pontos de Norte a Sul, e marcados no campo mediante o GPS Trimble de alta precisão. No caso das grades de 50 x 50 m, o ponto inicial foi o mesmo da grade geral correspondente, localizando as parcelas de Norte a Sul, e mensuradas com o uso de uma trena e balizas para marcar os pontos de coleta.

O estudo foi realizado considerando três formas de análise dos dados: geoestatística e amostragem sistemática simples e estratificada. No caso da amostragem sistemática estratificada

e na geoestatística foi considerada a área de estudo total, enquanto que na amostragem sistemática simples foi considerado o uso do solo para eucalipto, pastagem e floresta nativa.

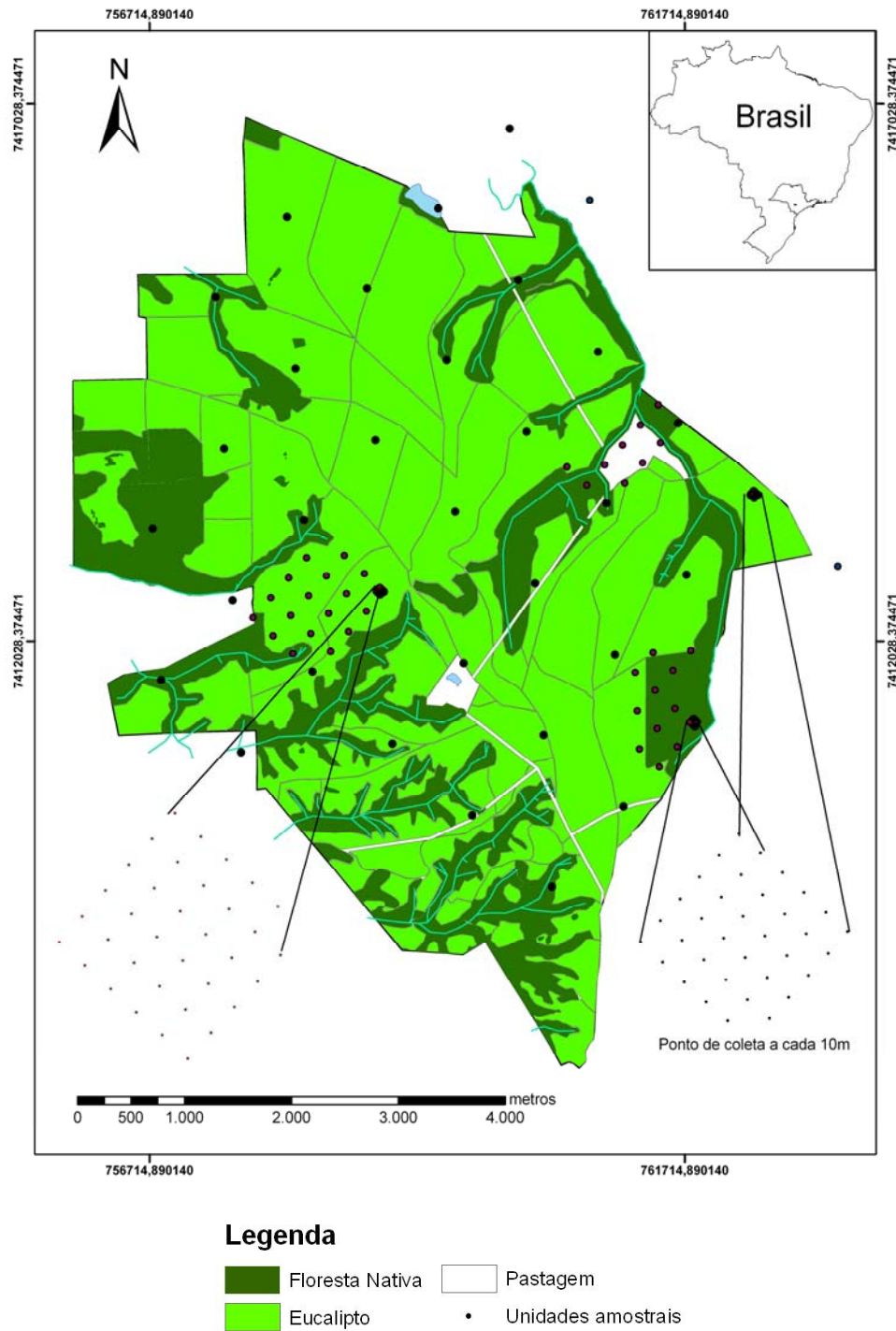


Figura 2 – Localização da Fazenda Três Lagoas e pontos de amostragem

### 3.2.1 Estimadores da população

Os valores para cada estrato são calculados com as fórmulas da Teoria de amostragem (fórmulas 11,12) segundo Cochran (1953), usadas na amostragem estratificada e sistemática. A diferença entre elas foi que a amostragem estratificada foi usada no cálculo das estimativas na área total, enquanto que na sistemática foi usada para cada estrato independentemente.

$$\bar{y}_h = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} y_{hi}}{n_h} \quad (11)$$

$$s_h^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_h} (y_{hi} - \bar{y}_h)^2}{n_h - 1} \quad (12)$$

Onde  $\bar{y}_h$  representa a média do estrato  $h$ ,  $n_h$  representa o número de pontos amostrais no estrato,  $s_h^2$  representa a variância de cada estrato.

Para o cálculo dos pesos dos estratos foi usada a fórmula 13:

$$w_h = \frac{n_h}{n} \quad (13)$$

Onde  $w_h$  representa a proporção de cada estrato  $h$  na área, e  $n$  representa o número total de pontos.

O valor médio amostral  $\bar{y}_{est}$  para a área total foi calculado segundo a fórmula 14:

$$\bar{y}_{est} = \sum w_h * \bar{y}_h \quad (14)$$

A variância da média  $(s_{y_{est}}^2)$  foi calculada segundo a fórmula 15:

$$s_{y_{est}}^2 = \sum_h \frac{W_h^2 * s_h^2}{n_h} \quad (15)$$

Os intervalos de confiança foram calculados segundo a fórmula 16:

$$I.C. = \bar{y}_{est} \pm t s_{y_{est}} \quad (16)$$

Onde *I.C.* representa o intervalo de confiança, e *t* representa o valor tabulado com probabilidade de 95%.

### 3.2.2 Tamanho da amostra

Para o cálculo do tamanho de amostra usaram-se duas abordagens, a primeira estudando a área total estratificada em Pastagem, Nativas e Eucalipto segundo as fórmulas da Amostragem Estratificada e outra estudando cada área. Usaram-se as fórmulas descritas por Cochran (1953).

No cálculo do tamanho da amostra para cada uso do solo, usou-se a fórmula 17:

$$n^* = \frac{t^2 CV^2}{d^2} \quad (17)$$

Onde  $CV = s/\bar{y}$  e *d* é o erro desejado (neste caso 10% com 95% de probabilidade).

Para a amostragem por área total usaram-se as fórmulas da amostragem estratificada, como apontado na fórmula 18:

$$n^* = \frac{\sum_{h=1}^L \frac{N_h^2 s_{y_h}^2}{w_h}}{\frac{N^2 \bar{y}_{est}^2 (d)^2}{(100)^2 t^2}} \quad (18)$$



A repartição para cada estrato foi feita calculando primeiro o novo peso do estrato segundo a fórmula 19 de alocação de Neyman. O  $n_h$  foi calculado segundo a fórmula 13 baseado no cálculo da Partilha de Neyman com o novo cálculo do peso dos estratos.

$$w_h = n^* \frac{N_h s_{y_h}}{\sum_{h=1}^L N_h s_{y_h}} \quad (19)$$

### 3.3 Densidade Aparente

Foram coletadas amostras indeformes de solo nos pontos de coleta, para isso, limpou-se todo o material vegetal depositado na superfície do solo, e fazendo uso de um trado para amostras indeformes coletou-se o material. O método usado para a determinação da densidade aparente foi da EMBRAPA (1979):

- Determinar ou anotar o volume do anel ou do cilindro que contém a amostra;
- Pesquisar o conjunto e anotar o peso; ou transferir a amostra para lata de alumínio numerada e de peso conhecido, e pesar;
- Colocar na estufa e, após 48 horas, retirar, deixar esfriar e pesar;
- Calcular a densidade aparente da amostra pela seguinte expressão (fórmula 20):

$$Densidade\ aparente\ (g/cm^3) = \frac{peso\ amostra\ seca\ a\ 105^\circ C}{volume\ do\ anel\ ou\ cilindro} \quad (20)$$

Para coletar estas amostras foi usado um trado para amostras indeformes Sondaterra com anéis definidos de 100 cm<sup>3</sup>. Depois, também foram descontados fragmentos de rocha ou vegetais com diâmetro superior a 2 mm, mediante o uso de uma peneira, para fazer a correção de densidade.

### 3.4 Teor de Carbono Orgânico do Solo

Para a determinação do COS foram coletadas amostras simples de 500 gr. de solo do lado das amostras indeformes, mantendo uma distância mínima entre elas. As amostras foram transportadas ao laboratório, secas ao ar, peneiradas a 2 mm e enviadas ao Laboratório de Solos

da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, onde o COS foi determinado usando o Método Colorimétrico, descrito por Cantarella, Quaggio e Raij (2001).

Do total de amostras, 10% foram peneiradas a 100 mesh e enviadas novamente para análise mediante combustão seca num analisador elementar com infravermelho LECO CN 2000 no Laboratório de Biogeoquímica do Centro de Energia Nuclear na Agricultura.

### 3.5 Estoque de Carbono Orgânico do Solo

O estoque de carbono foi determinado segundo a metodologia da UNFCCC (2006) expresso na fórmula 21:

$$E_{hki} = C_{COhki} * D_{hki} * P_{hki} * FC_{hki} * M \quad (21)$$

Onde  $E_{hki}$  é o estoque de carbono orgânico no solo no estrato  $h$ , profundidade  $k$ , ponto de amostragem  $i$ ,  $C_{COhki}$  representa o teor de carbono orgânico determinado em laboratório,  $D_{hki}$  representa a densidade aparente,  $P_{hki}$  representa a profundidade de estudo,  $FC_{hki}$  ajusta a fração da amostra ocupada por fragmentos grossos  $> 2$  mm ( $1 - (\% \text{ volume } \textit{particulas grossas} / 100)$ ) e  $M$  é o Fator de conversão de unidades para  $\text{MgC} \cdot \text{ha}^{-1}$

### 3.6 Geoestatística

O estudo geoestatístico foi realizado com o uso do pacote geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001) no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

As variáveis de estudo foram densidade aparente do solo, teor de carbono no solo e estoque de carbono no solo. Os dados foram analisados por meio de transformações Box-Cox para obter a normalidade. Foi analisada a tendência dos dados em relação às coordenadas  $x$  e  $y$ , média constante e média não constante com influência de outras covariáveis, neste caso, o estrato definido pelo uso do solo.

Nestas variáveis foi calculado o semivariograma empírico e posteriormente a Máxima Verossimilhança para determinação do AIC o que permitiu escolher o modelo que apresenta o menor valor AIC, assim como conhecer se o uso da geoestatística poderia ser usado comparado

com uma estatística não espacial. Os parâmetros que foram determinados também por este método foram:  $\tau^2$  (efeito pepita),  $\sigma^2$  (contribuição) e  $\phi$  (alcance).

Os modelos empregados para ajuste foram exponencial, Matérn com kappa 1 e 2 e esféricos. O modelo Matérn é expresso na fórmula 22:

$$\rho(\mu) = \{2^{\kappa-1} \Gamma(\kappa)\}^{-1} (\mu/\phi)^\kappa K_\kappa(\mu/\phi) \quad (22)$$

Onde  $K_\kappa(\cdot)$  representa a função modificada de Bessel na ordem  $\kappa$ . Testaram-se  $\kappa = 0,5$  que representa o modelo exponencial,  $\kappa = 1$  e  $\kappa = 2$ .

No caso do modelo esférico, a fórmula empregada é (23):

$$\rho(\mu) = \begin{cases} \{1 - 1,5(\mu/\phi) + 0,5(\mu/\phi)^3\} & \text{para } 0 \leq \mu \leq \phi \\ 0 & \text{para } \mu > \phi \end{cases} \quad (23)$$

Para conhecer a diferença dos AIC foi usada a fórmula 7. Para conhecer a capacidade dos modelos para prever valores foi realizada a validação cruzada e calculado o erro absoluto da média de predição segundo a fórmula 8. Foi calculada a percentagem do efeito pepita comparada à semivariância total, para conhecer a dependência espacial do semivariograma, segundo a fórmula 9.

### 3.7 Krigagem

O método de krigagem foi realizado com o uso do pacote geoR (RIBEIRO JUNIOR; DIGGLE, 2001) no software R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2008).

Foi montada uma grade de 100 x 100 m entre pontos para predição de pontos não amostrados e realizados mapas de predição, assim como calculada a média das variáveis em estudo para fazer comparações com a estatística clássica.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Amostragem por tipo de ocupação do solo**

A seguir, apresentam-se as estatísticas dos dados da densidade aparente, teor de carbono e estoque de carbono. No anexo A apresenta-se a comparação da distribuição da amostra por quantis contra a distribuição teórica. Segundo Cambardella et al. (1994) as razões evidentes para distribuições normais e não normais das variáveis do solo como Carbono Orgânico, densidade aparente, entre outras, são desconhecidas, porém o manejo e efeitos temporais poderiam ser as causas destas.

A densidade aparente geralmente apresenta valores na ordem floresta < pastagem < cultivos (LAL, 2006), padrão que pode ser apreciado nas tabelas seguintes, onde a floresta nativa apresenta valores inferiores na densidade comparada com os outros usos do solo. Pode-se apreciar que a densidade aparente do estrato de eucalipto mantém um comportamento similar à pastagem, devido principalmente ao histórico de uso dos solos, os eucaliptos ocupam as áreas que historicamente pertenciam às pastagens, e que só durante o último ano foram substituídas.

No uso dos solos é apresentada uma ordem inversa ao comparar o teor de estoque de carbono, onde a floresta nativa é superior em todas as profundidades estudadas, seguido do eucalipto e finalmente da pastagem.

A densidade aparente apresenta uma variação mínima comparada ao teor e ao estoque de carbono em todas as profundidades e usos do solo.

#### **4.1.1 Eucalipto**

Apresentam-se na tabela 2 os valores médios das variáveis: Densidade Aparente, Teor e Estoque de Carbono nas profundidades 0-10, 10-20 e 0-20 cm, assim como os intervalos de confiança da média.

Pode-se apreciar que nas três variáveis, o I.C. foi menor na profundidade 10-20 cm e maior na profundidade superficial 0-10 cm.

#### **4.1.2 Nativa**

A tabela 3 apresenta os valores médios das três variáveis em estudo nas profundidades estudadas, assim como seus respectivos intervalos de confiança.

Assim como no Eucalipto, verifica-se que nas três variáveis, o I.C. foi menor na profundidade 10-20 cm e maior na profundidade superficial 0-10 cm.

Tabela 2 – Estatísticas do solo com ocupação de Eucalipto

Prof. (cm)	Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )			Teor de Carbono (g.Kg <sup>-1</sup> )			Estoque de Carbono (MgC.ha <sup>-1</sup> )		
	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*
0-10	1,56	2,00	3	12,15	12,71	115	18,27	9,58	66
10-20	1,55	1,7	2	10,86	9,86	70	16,55	8,07	47
0-20	1,56	1,76	3	11,51	10,79	83	34,82	8,28	49

$\bar{y}$  = Média da variável.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

Tabela 3 – Estatísticas do solo com ocupação de Floresta Nativa

Prof. (cm)	Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )			Teor de Carbono (g.Kg <sup>-1</sup> )			Estoque de Carbono (MgC.ha <sup>-1</sup> )		
	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*
0-10	1,33	2,72	4	21,52	12,19	79	27,84	9,97	53
10-20	1,41	2,11	2	18,16	8,94	43	25,21	8,19	36
0-20	1,37	2,15	3	19,84	9,37	47	53,05	8,11	35

$\bar{y}$  = Média da variável.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

#### 4.1.3 Pastagem

Apresentam-se na tabela 4 os valores médios das variáveis em estudo nas profundidades estudadas: 0-10, 10-20 e 0-20 cm, assim como os intervalos de confiança correspondentes.

Assim como nos estratos anteriores, o valor do I.C. foi menor na profundidade 10-20 cm e maior na profundidade superficial 0-10 cm nas três variáveis estudadas.

Tabela 4 – Estatísticas do solo com ocupação de Pastagem

Prof. (cm)	Densidade Aparente (g.cm <sup>-3</sup> )			Teor de Carbono (g.Kg <sup>-1</sup> )			Estoque de Carbono (MgC.ha <sup>-1</sup> )		
	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*	$\bar{y}$	I.C.%	n*
0-10	1,59	2,21	3	11,13	13,05	87	17,14	9,30	45
10-20	1,57	1,22	1	9,69	7,74	31	15,21	7,59	30
0-20	1,58	1,49	2	10,42	9,79	48	32,36	7,81	32

$\bar{y}$  = Média da variável.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

Aproximadamente 53% do total do carbono orgânico esteve presente na profundidade superficial 0-10 cm. Esses dados apresentam similaridade com os apresentados por Cerri et al. (2004) onde a maior parte do carbono orgânico (48%) esteve presente nos 10 primeiros cm num estudo realizado na Amazônia Brasileira .

## 4.2 Estudo da Área por Estratificação

Seguem os resultados analisados de forma geral, considerando que a área de estudo apresenta uma alta variabilidade com presença de usos de solo diferentes, definidas por cultivos de eucalipto, pastagem e florestas nativas.

### 4.2.1 Densidade Aparente

As estimativas da densidade aparente são apresentadas na tabela 5.

Como aponta Fonseca et al. (1993a) a densidade geralmente aumenta com a profundidade, pois as pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as subjacentes favorecem a compactação natural (SZAKACS, 2003) o que acontece também com a média estimada na tabela 5. Como apresentado anteriormente, o I.C.% é mínimo para a densidade aparente.

Tabela 5 - Estimativas da Densidade Aparente

<b>Profundidade</b> <b>cm.</b>	$\bar{y}_{est}$ <b>g.cm<sup>-3</sup></b>	<b>I.C.</b> <b>%</b>	<b>n*</b>
0 – 10	1,50	1,31	3
10 – 20	1,52	1,00	2
0 – 20	1,51	1,05	2

$\bar{y}_{est}$  = Média da variável por área total.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

#### 4.2.2 Teor de Carbono

Na tabela 6 apresentam-se as estimativas do teor de carbono.

Tabela 6 - Estimativas do Teor de Carbono

<b>Profundidade</b> <b>cm.</b>	$\bar{y}_{est}$ <b>g.cm<sup>-3</sup></b>	<b>I.C.</b> <b>%</b>	<b>n*</b>
0 – 10	14,691	7,468	64
10 – 20	12,729	5,436	41
0 – 20	13,711	5,922	47

$\bar{y}_{est}$  = Média da variável por área total.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

Fonseca et al. (1993b) apontam que o carbono orgânico varia segundo o tipo de cobertura vegetal e decresce exponencialmente com a profundidade do perfil do solo. Pode se verificar que a profundidade 0-10 cm apresenta uma maior variabilidade e por isso um I.C.% maior, comparado às outras profundidades.

#### 4.2.2.1 Métodos de determinação do Teor de Carbono

Percebe-se na figura 3 que existe uma alta relação entre a determinação do teor de carbono mediante o determinador LECO e a determinação usando o método colorimétrico. O valor de  $R^2_{adj}$  foi de 0,9178, com normalidade e homogeneidade da variância dos resíduos.

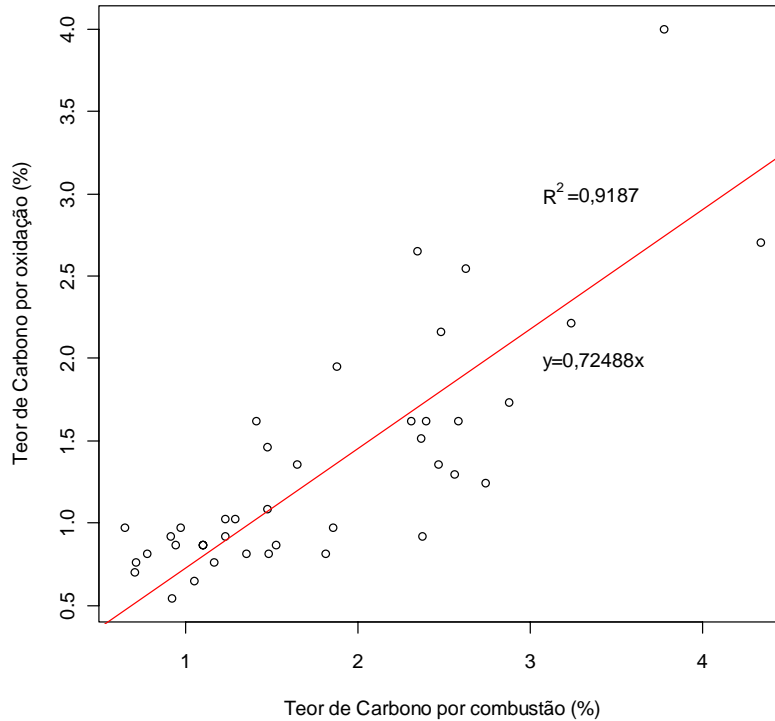


Figura 3 - Relação entre o Teor de Carbono determinado por combustão (LECO) e por oxidação (colorimétrico)

Esses resultados mostram que o método empregado na determinação de carbono mantém uma alta relação com métodos modernos como a combustão e determinação por infravermelho.

#### 4.2.3 Estoque de Carbono

As estimativas do estoque de carbono são apresentadas na tabela 7.

Como apontado por Szakacs (2003) existe uma tendência decrescente do estoque de carbono em função da profundidade.



Tabela 7 - Estimativas do Estoque de Carbono

<b>Profundidade</b> <b>cm.</b>	$\bar{y}_{est}$ <b>g.cm<sup>-3</sup></b>	<b>I.C.</b> <b>%</b>	<b>n*</b>
0 – 10	20,841	5,732	45
10 – 20	18,782	4,759	33
0 - 20	39,623	4,796	34

$\bar{y}_{est}$  = Média da variável por área total.

I.C.% = Intervalo de Confiança com 95% de Probabilidade.

n\* = Número de amostras.

### 4.3 Tamanho da Amostra

O tamanho da amostra que deve ser usado no campo foi calculado segundo os dois critérios do estudo: Amostragem para áreas de alta variabilidade (estudo de toda a área com estratificação), e amostragem por uso do solo, neste caso pastagem, eucalipto e floresta nativa.

Apresenta-se nas tabelas 2, 3 e 4 o tamanho da amostra (n\*) do eucalipto, floresta nativa e pastagem quando analisados de forma independente. Pode-se verificar que o tamanho da amostra foi sempre maior para a profundidade 0-10 cm, intermediário quando estudado na profundidade 0-20 cm e menor quando estudadas na profundidade 10-20 cm. No caso da variável densidade aparente, o número de unidades amostrais é mínimo, de 1 a 4 amostras segundo o tipo de uso do solo e a profundidade estudada. O Teor de Carbono foi a variável que precisou maior número de unidades amostrais, com um máximo de 115 unidades amostrais no caso do eucalipto e mínimo de 41 na pastagem. Já no estoque de carbono, o número de unidades amostrais diminuiu comparado com o teor, para um máximo de 66 unidades amostrais no eucalipto e mínimo 30 na pastagem. O tamanho da amostra é influenciado pela variável estudada e pela profundidade desejada. No caso do estoque de carbono na profundidade 0-20 cm, o tamanho da amostra corresponde a 49, 35 e 32 amostras para eucalipto, floresta nativa e pastagem respectivamente.

Nas tabelas 5, 6 e 7 apresenta-se o tamanho da amostra quando analisado por área total estratificada. As tabelas 8, 9 e 10, apresentam os resultados da densidade aparente, teor de carbono e estoque de carbono quando analisados por área total, distribuindo os pontos de coleta para cada estrato e profundidade.

Segundo a tabela 8, na densidade aparente seria preciso um mínimo de 2 unidades amostrais e máximo de 3 unidades amostrais para o cálculo dessa variável com 10% de erro e 95% de probabilidade, dados com os quais não seria possível calcular a variância, fato pelo qual se recomenda usar um mínimo de 3 unidades amostrais por estrato em cada profundidade.

Tabela 8 – Tamanho da amostra para Densidade Aparente segundo a área total

<b>Estrato</b>	<b>0-10 cm</b>	<b>10-20 cm</b>	<b>0-20 cm</b>
Eucalipto	1	1	1
Nativa	1	1	1
Pastagem	1	0	0
<b>TOTAL (n*)</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>

Pode-se apreciar na tabela 9 que a profundidade 0-10 cm precisa de um número maior de unidades amostrais para o cálculo do teor de carbono com 10% de erro e 95% de probabilidade, valor que diminui quando analisada a profundidade total 0-20 cm (47 unidades amostrais).

Tabela 9 – Tamanho da amostra para Teor de Carbono segundo a área total

<b>Estrato</b>	<b>0-10 cm</b>	<b>10-20 cm</b>	<b>0-20 cm</b>
Eucalipto	24	17	19
Nativa	26	17	18
Pastagem	14	7	9
<b>TOTAL (n*)</b>	<b>64</b>	<b>41</b>	<b>47</b>

Tabela 10 – Tamanho da amostra para Estoque de Carbono segundo a área total

<b>Estrato</b>	<b>0-10 cm</b>	<b>10-20 cm</b>	<b>0-20 cm</b>
Eucalipto	17	13	14
Nativa	18	13	13
Pastagem	10	7	7
<b>TOTAL (n*)</b>	<b>45</b>	<b>33</b>	<b>34</b>

Segundo a tabela 10, o estoque de carbono precisa de um mínimo de 33 unidades amostrais na profundidade 10-20 cm e um máximo de 45 unidades amostrais na profundidade 0-10 cm, com um valor intermédio de 34 unidades amostrais quando estudado na profundidade total 0-20 cm.

Pode-se apreciar nas tabelas 8, 9 e 10 que o estrato pastagem precisou de menos unidades amostrais, comparado aos outros, isso influenciado pelo tamanho do estrato ser menor comparado aos outros estratos.

Quando comparados os dois sistemas de amostragem, pode-se apreciar que a estratificação diminuiu o tamanho da amostra significativamente. No caso da densidade aparente teve uma diminuição de 70%, 60% e 75% de unidades amostrais nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm e 0-20 cm respectivamente. O estoque de carbono teve uma diminuição de 77%, 72% e 74% assim como o estoque de carbono que teve uma diminuição de 73%, 70% e 71% de unidades amostrais nas profundidades 0-10 cm, 10-20 cm e 0-20 cm respectivamente.

Também, a densidade aparente precisa de um número mínimo de unidades amostrais, tanto na amostragem individual por área como na amostragem estratificada que representam bem as áreas de estudo e as profundidades de interesse. Assim, sugere-se manter um número menor de coleta de unidades amostrais indeformes o que permitiria diminuir os custos de coleta. Assim também o esforço empregado na coleta de amostras indeformes pode ser empregado em uma maior coleta de pontos para teor de carbono.

Ao ter usado a amostragem sistemática na distribuição de pontos, é preciso conhecer qual distância deve ser usada entre os pontos de coleta, assim segundo o tamanho da amostra calculado, a distância que a grade deve ter na área de estudo para o estoque de carbono na profundidade 0- 20 cm deve ser de 977 metros, valor similar à grade maior usada no estudo (1 km entre pontos).

## **4.4 Geoestatística**

### **4.4.1 Análise Exploratória**

#### **4.4.1.1 Densidade Aparente**

A variável densidade aparente não apresentou normalidade dos dados, razão pela qual foi realizada uma análise de transformação Box-Cox e determinado o uso de  $\lambda=4$ . Foi considerada também tendência com uma média não constante influenciada pelos estratos Nativa, Pastagem e

Eucalipto, obtendo-se assim normalidade dos dados sem tendências nos eixos x e y. As figuras das análises gráficas para a distribuição da densidade aparente para a profundidade 0-10 cm estão no anexo B, de 10-20 cm no anexo C e 0-20 cm no anexo D.

#### **4.4.1.2 Teor de Carbono**

A variável teor de carbono não apresentou normalidade dos dados, razão pela qual foi realizada uma análise de transformação Box-Cox e determinado o uso de  $\lambda=-0,5$ . Foi considerada também tendência com uma média não constante influenciada pelos estratos Nativa, Pastagem e Eucalipto, obtendo-se assim normalidade dos dados sem tendências nos eixos x e y. As figuras das análises gráficas para a distribuição da densidade aparente para a profundidade 0-10 cm estão no anexo E, de 10-20 cm no anexo F e 0-20 cm no anexo G.

#### **4.4.1.3 Estoque de Carbono**

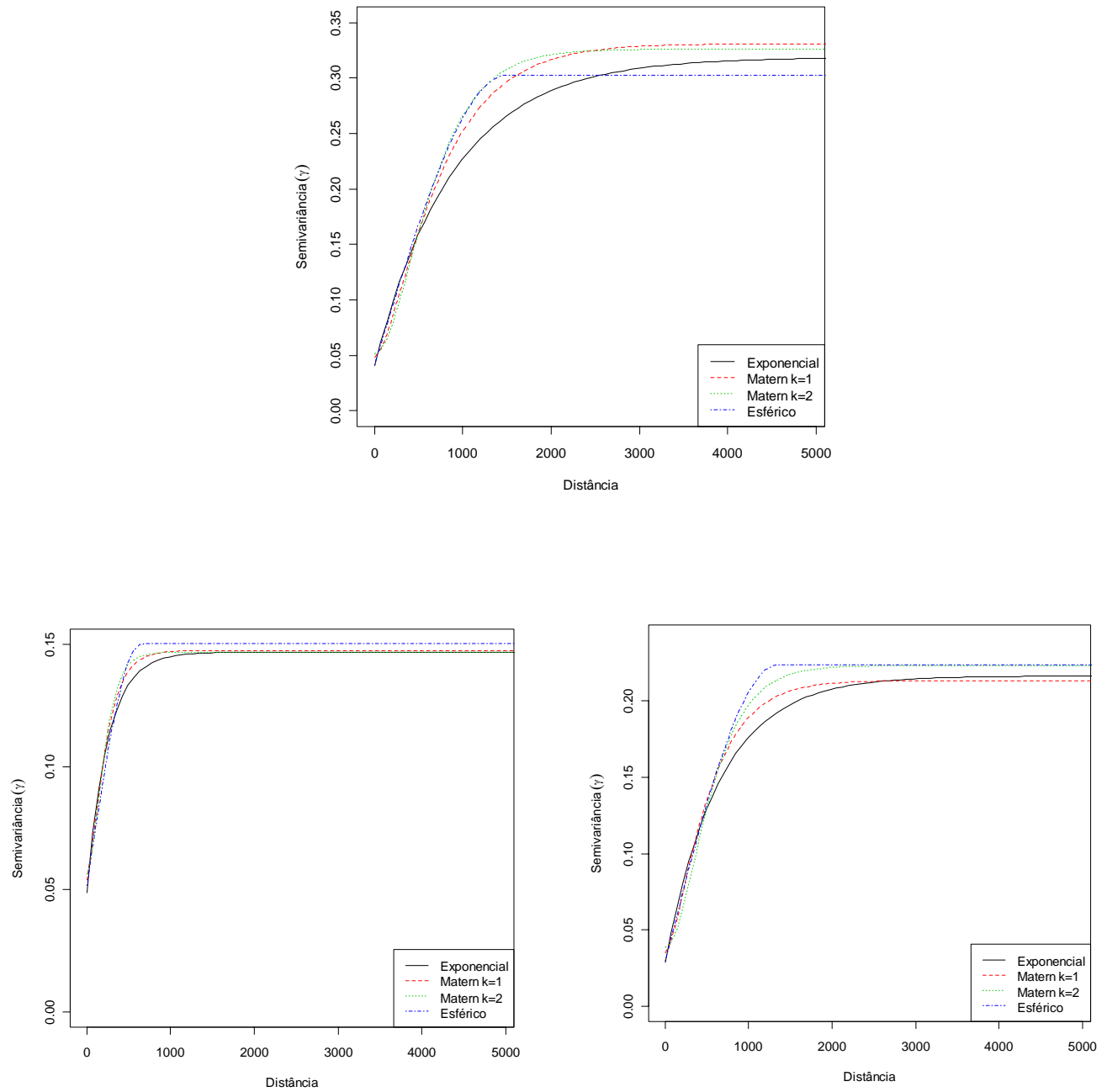
A variável estoque de carbono não apresentou normalidade dos dados, razão pela qual foi realizada uma análise de transformação Box-Cox e determinado o uso de  $\lambda=-0,5$ . Foi considerada também tendência com uma média não constante influenciada pelos estratos Nativa, Pastagem e Eucalipto, obtendo-se assim normalidade dos dados sem tendências nos eixos x e y. As figuras das análises gráficas para a distribuição da densidade aparente para a profundidade 0-10 cm estão no anexo H, de 10-20 cm no anexo I e 0-20 cm no anexo J.

### **4.4.2 Semivariogramas**

Os semivariogramas das variáveis estudadas apresentaram comportamentos similares, com um alcance maior na profundidade 0-10 cm, intermédio na profundidade total 0-20 cm e menor na profundidade 10-20 cm e. A distância máxima dos pontos foi de 7067 m, sendo que para o cálculo dos semivariogramas utilizou-se 70% da distância máxima, correspondente a 5100 m.

#### **4.4.2.1 Densidade Aparente do Solo**

Na figura 4 apresentam-se os semivariogramas ajustados pela máxima verossimilhança, obtidos para as profundidades 0-20 cm, 0-10 cm e 10 – 20 cm.

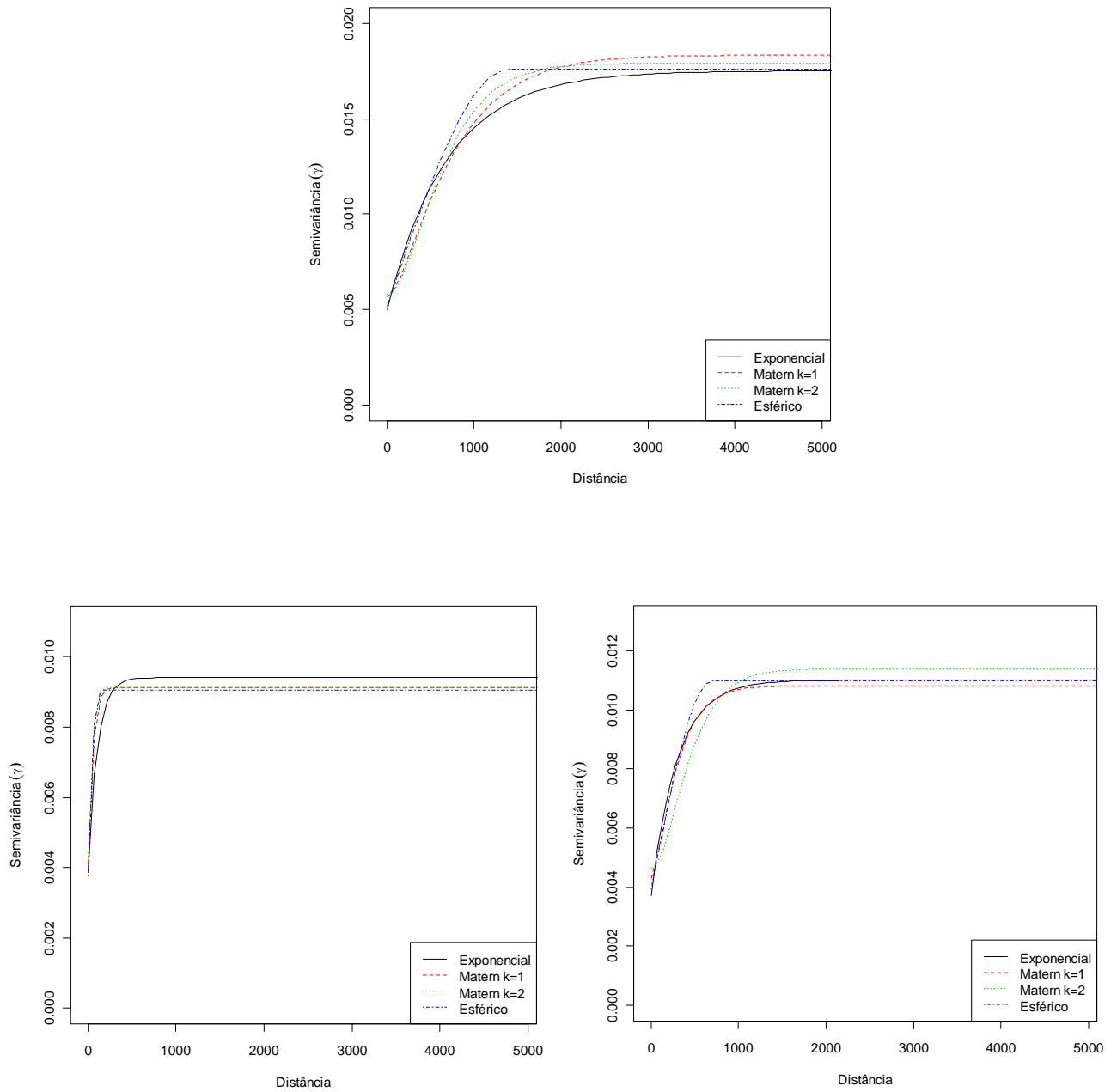


Superior: Profundidade 0-10 cm, Inferior esquerda: Profundidade 10-20 cm, inferior direita: Profundidade 0-20cm.

Figura 4 - Semivariogramas da Densidade Aparente do Solo

#### 4.4.2.2 Teor de Carbono no Solo

Na figura 5 observam-se os semivariogramas ajustados pela máxima verossimilhança, obtidos para as profundidades 0-20 cm, 0-10 cm e 10 – 20 cm.

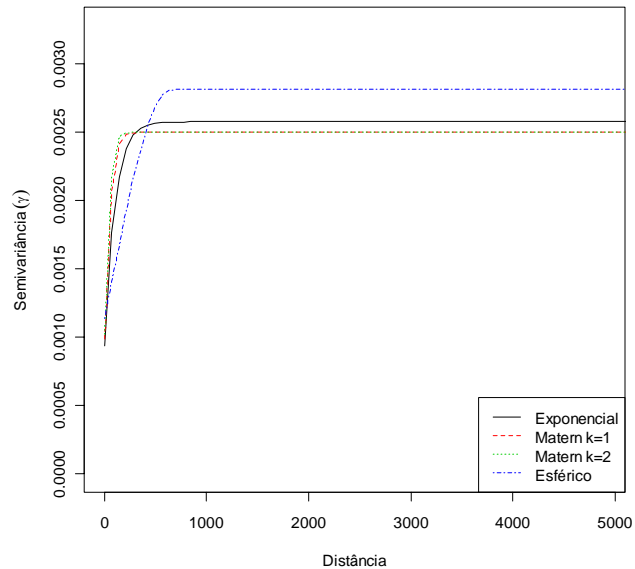
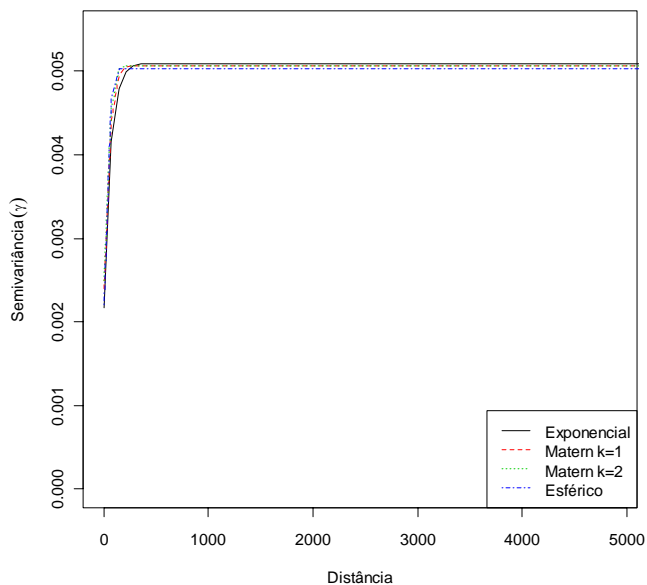
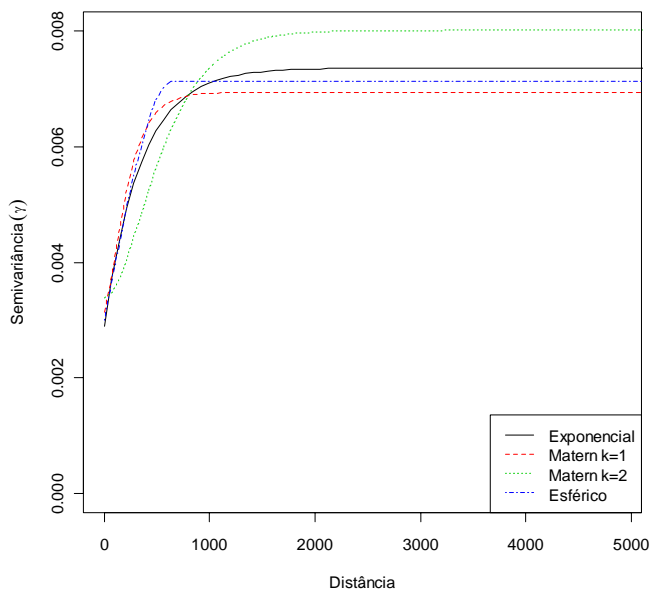


Superior: Profundidade 0-10 cm, Inferior esquerda: Profundidade 10-20 cm, inferior direita: Profundidade 0-20cm.

Figura 5 - Semivariogramas do Teor de Carbono no Solo

#### 4.4.2.3 Estoque de Carbono no Solo

Na figura 6 apresentam-se os semivariogramas ajustados pela máxima verossimilhança, obtidos para as profundidades 0-20 cm, 0-10 cm e 10 – 20 cm.



Superior: Profundidade 0-10 cm, Inferior esquerda: Profundidade 10-20 cm, inferior direita: Profundidade 0-20cm.

Figura 6 - Semivariogramas do Estoque de Carbono no Solo

#### 4.4.3 Escolha de modelos

##### 4.4.3.1 Densidade Aparente do Solo

A tabela 11 apresenta os resultados para a escolha de modelos para a densidade aparente.

Tabela 11 - AIC e MAE para a escolha de modelos da Densidade Aparente do Solo

<b>Profundidade</b>	<b>Modelo</b>	<b>AIC</b>	$\Delta_i$	<b>MAE</b>	$\tau^2$ %
0-10 cm	<b>Exponencial</b>	<b>-332,4467</b>	<b>0,000*</b>	<b>0,079</b>	<b>13</b>
	Matérn $\kappa = 1$	-330,3863	2,060	0,081	14
	Matérn $\kappa = 2$	-328,8762	3,570	0,082	15
	<b>Esférico</b>	<b>-331,8935</b>	<b>0,553*</b>	<b>0,082</b>	<b>14</b>
	Não espacial	-245,4297			
10-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>-355,3709</b>	<b>0,128*</b>	<b>0,071</b>	<b>33</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 1</math></b>	<b>-354,1708</b>	<b>1,328*</b>	<b>0,071</b>	<b>37</b>
	Matérn $\kappa = 2$	-352,8202	2,679	0,071	38
	<b>Esférico</b>	<b>-355,4990</b>	<b>0,000*</b>	<b>0,071</b>	<b>34</b>
	Não espacial	-323,9943			
0-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>-392,9382</b>	<b>0,000*</b>	<b>0,067</b>	<b>13</b>
	Matérn $\kappa = 1$	-389,1399	3,798	0,068	16
	Matérn $\kappa = 2$	-386,7317	6,206	0,069	17
	<b>Esférico</b>	<b>-392,5620</b>	<b>0,376*</b>	<b>0,068</b>	<b>13</b>
	Não espacial	-311,9881			

\* Modelos que podem ser escolhidos.

AIC = Critério de Informação de Akaike.

$\Delta_i = 0-2$  suporte substancial, 4-7 consideravelmente menor, > 10 sem suporte.

MAE = Media absoluta do erro de predição.

$\tau^2$  %  $\leq 25\%$  forte dependência, 26-75% moderada, >75% sem dependência espacial.

Constata-se que para a variável densidade aparente, os modelos exponenciais e esféricos se ajustam a todas as profundidades estudadas. O modelo Matérn com  $\kappa = 1$  se ajusta também na profundidade 10-20 cm. Segundo Lal (2006) a densidade aparente varia fortemente no espaço. Pode-se verificar que na profundidade 0-10 cm e 0-20 cm a variável é fortemente dependente enquanto que na profundidade 10-20 cm a dependência fica moderada.



#### 4.4.3.2 Teor de Carbono no Solo

A tabela 12 apresenta os resultados dos cálculos dos diferentes modelos aplicados para o teor de carbono.

Tabela 12 - AIC e MAE para a escolha de modelos do Teor de Carbono no Solo

Profundidade	Modelo	AIC	$\Delta_i$	MAE	$\tau^2$ %
0-10 cm	<b>Exponencial</b>	<b>1030,779</b>	<b>0,000*</b>	<b>4,361</b>	<b>29</b>
	Matérn $\kappa = 1$	1032,885	2,106	4,337	31
	Matérn $\kappa = 2$	1033,245	2,466	4,375	32
	<b>Esférico</b>	<b>1031,689</b>	<b>0,909*</b>	<b>4,472</b>	<b>29</b>
	Não espacial	1085,012			
10-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>932,108</b>	<b>0,016*</b>	<b>2,901</b>	<b>42</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 1</math></b>	<b>932,265</b>	<b>0,172*</b>	<b>2,936</b>	<b>45</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 2</math></b>	<b>932,092</b>	<b>0,000*</b>	<b>2,941</b>	<b>46</b>
	<b>Esférico</b>	<b>932,429</b>	<b>0,336*</b>	<b>2,937</b>	<b>42</b>
	Não espacial	976,053			
0-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>964,534</b>	<b>0,000*</b>	<b>3,584</b>	<b>34</b>
	Matérn $\kappa = 1$	967,845	3,331	3,659	40
	Matérn $\kappa = 2$	969,073	4,539	3,619	41
	<b>Esférico</b>	<b>965,380</b>	<b>0,846*</b>	<b>3,658</b>	<b>36</b>
	Não espacial	1022,402			

\* Modelos que podem ser escolhidos.

AIC = Critério de Informação de Akaike.

$\Delta_i = 0-2$  suporte substancial, 4-7 consideravelmente menor, > 10 sem suporte.

MAE = Media absoluta do erro de predição.

$\tau^2$  %  $\leq 25\%$  forte dependência, 26-75% moderada, >75% sem dependência espacial.

Constata-se que para a variável teor de carbono, os modelos exponenciais e esféricos se ajustam a todas as profundidades estudadas. Os modelos Matérn se ajustam também na profundidade 10-20 cm. A variável apresenta uma dependência espacial moderada em todas as profundidades.

A escolha de modelos coincide com os selecionados por Cerri et al. (2004) que para o caso das profundidades 0 – 10 e 10 – 20 cm escolheram os modelos esféricos numa área de pastagem. Os autores citados usaram 2955 amostras de solo coletadas numa área de 63 ha onde estudaram propriedades do solo para seleção de áreas experimentais.

#### 4.4.3.3 Estoque de Carbono no Solo

Na tabela 13, os resultados dos cálculos dos diferentes modelos aplicados para o estoque de carbono.

Tabela 13 - AIC e MAE para a escolha de modelos do Estoque de Carbono

<b>Profundidade</b>	<b>Modelo</b>	<b>AIC</b>	$\Delta_i$	<b>MAE</b>	$\tau^2$ %
0-10 cm	<b>Exponencial</b>	<b>1135,275</b>	<b>0,000*</b>	<b>5,224</b>	<b>39</b>
	Matérn $\kappa = 1$	1137,346	2,071	5,279	45
	Matérn $\kappa = 2$	1137,882	2,607	5,192	42
	<b>Esférico</b>	<b>1135,687</b>	<b>0,412*</b>	<b>5,260</b>	<b>42</b>
	Não espacial	1174,864			
10-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>1053,054</b>	<b>0,546*</b>	<b>3,948</b>	<b>43</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 1</math></b>	<b>1052,799</b>	<b>0,291*</b>	<b>3,959</b>	<b>47</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 2</math></b>	<b>1052,507</b>	<b>0,000*</b>	<b>3,963</b>	<b>49</b>
	<b>Esférico</b>	<b>1052,707</b>	<b>0,199*</b>	<b>3,954</b>	<b>44</b>
	Não espacial	1093,877			
0-20 cm	<b>Exponencial</b>	<b>1314,312</b>	<b>0,459*</b>	<b>8,493</b>	<b>36</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 1</math></b>	<b>1314,261</b>	<b>0,408*</b>	<b>8,589</b>	<b>39</b>
	<b>Matérn <math>\kappa = 2</math></b>	<b>1313,853</b>	<b>0,000*</b>	<b>8,580</b>	<b>41</b>
	<b>Esférico</b>	<b>1315,118</b>	<b>1,265*</b>	<b>8,367</b>	<b>41</b>
	Não espacial	1364,819			

\* Modelos que podem ser escolhidos.

AIC = Critério de Informação de Akaike.

$\Delta_i = 0-2$  suporte substancial, 4-7 consideravelmente menor, > 10 sem suporte.

MAE = Media absoluta do erro de predição.

$\tau^2$  %  $\leq 25\%$  forte dependência, 26-75% moderada, >75% sem dependência espacial.

Nas profundidades 10-20 cm e 0-20 cm todos os modelos são iguais, na profundidade 0-10 cm o modelo exponencial e esférico apresentam os menores valores, considerados modelos iguais. A existência de um modelo com dependência espacial permite resolver o problema de estimação dos atributos do solo em locais não amostrados (GOOVAERTS, 1998).

#### **4.4.4 Parâmetros dos semivariogramas da Densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono no solo**

A tabela 14 apresenta as estimativas dos parâmetros dos modelos selecionados, apontando que o alcance prático foi maior na profundidade 0-10 cm e baixo nas profundidades 10–20 cm e a profundidade total 0-20 cm.

Devido à distância máxima obtida entre os pares de pontos, pode-se ter uma visão global do que acontece com o comportamento espacial do carbono em distâncias maiores. Cerri et al. (2004) determinaram um alcance prático maior a 500 m na variável teor de carbono, nas profundidades 0–10 cm e 10-20 cm apontando que a distância entre os pares empregada no estudo dos semivariogramas foi de máximo 500 m.

Em todas as variáveis e nas profundidades estudadas o maior alcance prático foi para os modelos exponenciais, com exceção do estoque de carbono na profundidade 0-20 cm onde o alcance prático maior foi do modelo esférico.

Cabe recalcar que mesmo sendo os modelos selecionados iguais pela diferença de AIC, na prática o alcance prático é completamente diferente, o que influenciará numa posterior decisão de distância de amostragem para coletas de amostras, krigagem e dependência espacial dos pontos.

Como apontado por Carvalho, Silveira e Vieira (2002) a profundidade espacial varia conforme a profundidade de coleta da amostra do solo.

Tabela 14 – Estimativa dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas escolhidos das variáveis Densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono no Solo

(continua)

Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\tau^2$	$c^2$	$\phi$	Alcance prático (m)
<b>DENSIDADE</b>									
<b>0-10 cm</b>	Exponencial	1,1581	-0,5968	-0,1374	-0,6245	0,0406	0,2781	900,00	2696,16
	Esférico	1,1918	-0,5385	-0,1113	-0,7179	0,0414	0,2614	1500,00	1500,00
<b>10-20 cm</b>	Exponencial	1,1241	-0,3736	0,1657	0,3617	0,0486	0,0980	250,00	748,93
	Esférico	1,1230	-0,3668	0,1604	0,3614	0,0515	0,0986	650,00	650,00
	Matérn $\kappa = 1$	1,1232	-0,3806	0,1622	0,3614	0,0539	0,0934	150,00	599,00
<b>0-20 cm</b>	Exponencial	1,1403	-0,4753	-0,0070	-0,2196	0,0286	0,1877	650,00	1947,23
	Esférico	1,1588	-0,4259	0,0000	-0,2771	0,0300	0,1936	1350,00	1350,00
<b>TEOR DE CARBONO</b>									
<b>0-10 cm</b>	Exponencial	1,4370	0,0814	0,0623	0,2073	0,0050	0,0125	700,00	2097,01
	Esférico	1,4360	0,0694	0,0545	0,2147	0,0052	0,0124	1400,00	1400,00
<b>10-20 cm</b>	Exponencial	1,4205	0,0663	-0,0196	-0,0573	0,0039	0,0055	104,19	312,57
	Esférico	1,4171	0,0672	-0,0214	-0,0538	0,0038	0,0053	114,18	114,18
	Matérn $\kappa = 1$	1,4174	0,0676	-0,0206	-0,0542	0,0041	0,0050	36,28	145,05
	Matérn $\kappa = 2$	1,4172	0,0667	-0,0218	-0,0539	0,0042	0,0049	21,06	113,03

Tabela 14 – Estimativa dos parâmetros dos modelos dos semivariogramas escolhidos das variáveis Densidade Aparente, Teor de Carbono e Estoque de Carbono no Solo

(conclusão)

Variável	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	$\beta_3$	$\tau^2$	$c^2$	$\phi$	Alcance prático (m)
0-20 cm	Exponencial	1,4409	0,0640	0,0059	0,2519	0,0037	0,0073	299,99	898,72
	Esférico	1,4408	0,0619	0,0057	0,2518	0,0039	0,0070	700,00	700,00
<b>ESTOQUE DE CARBONO</b>									
0-10 cm	Exponencial	1,5451	0,0302	0,0247	0,1437	0,0029	0,0045	350,00	1048,51
	Esférico	1,5457	0,0267	0,0177	0,1432	0,0030	0,0041	650,00	650,00
10-20 cm	Exponencial	1,5273	0,0348	-0,0099	-0,0272	0,0022	0,0029	62,15	186,20
	Esférico	1,5266	0,0344	-0,0117	-0,0265	0,0022	0,0028	103,18	103,18
	Matérn $\kappa = 1$	1,5269	0,0346	-0,0107	-0,0267	0,0024	0,0027	33,47	133,83
	Matérn $\kappa = 2$	1,5269	0,0340	-0,0116	-0,0267	0,0025	0,0026	20,45	109,74
0-20 cm	Exponencial	1,6761	0,0206	0,0003	0,0690	0,0009	0,0016	100,48	301,00
	Esférico	1,6787	0,0209	0,0037	0,0664	0,0011	0,0017	649,99	649,99
	Matérn $\kappa = 1$	1,6750	0,0207	-0,0010	0,0700	0,0010	0,0015	36,4691	145,82
	Matérn $\kappa = 2$	1,6751	0,0202	-0,0017	0,0700	0,0010	0,0015	21,1882	113,75

 $\tau^2$  Efeito pepita $c^2$  Contribuição $\phi$  Alcance

Alcance prático=Distância na qual o valor do modelo alcançou 95% do patamar,

#### 4.4.4.1 Dependência Espacial

Apresenta-se na tabela 14 o alcance e o alcance prático dos modelos escolhidos que se ajustam ao semivariograma. Segundo Souza, Cogo e Vieira (1997), o conhecimento do alcance da dependência espacial permite a definição do intervalo de amostragem (distância entre as amostras), que segundo os autores deve ser no mínimo duas vezes o alcance. Pelo uso do pacote geoR, o intervalo seria definido pelo alcance prático, o que garante a independência entre os pontos amostrais, minimizando o erro padrão da média e o esforço de amostragem.

Quando o objetivo é a krigagem, precisa-se manter dependência espacial entre os pontos para poder realizar um mapa da área total.

#### 4.4.5 Krigagem

A krigagem das variáveis foi feita segundo o alcance prático obtido, sendo que nas profundidades onde o alcance prático foi menor a 1 km (grade geral) a krigagem não pode ser realizada por não ter pontos amostrados para realizar a predição. Por ser de uso comum, a seguir apresenta-se a krigagem das variáveis segundo o modelo exponencial.

##### 4.4.5.1 Densidade Aparente

Foi realizada a predição da densidade aparente nas profundidade 0-10 cm (figura 7) e profundidade total 0-20 cm (figura 8). No caso da profundidade 10-20 cm seria necessário aumentar a grade de amostragem na área de estudo, já que com a grade original a krigagem não obteria bons resultados, deixando áreas que não podem ser preditas. Assim, é preciso ter pontos distanciados com no máximo o alcance prático obtido para esta profundidade.

A krigagem na profundidade 0-20 cm apresentou uma média de  $1,48 \text{ g.cm}^{-3}$ , valor menor à média da estatística clássica e que não esta inclusa nos Intervalos de Confiança ( $1,52 - 1,49 \text{ g.cm}^{-3}$ )

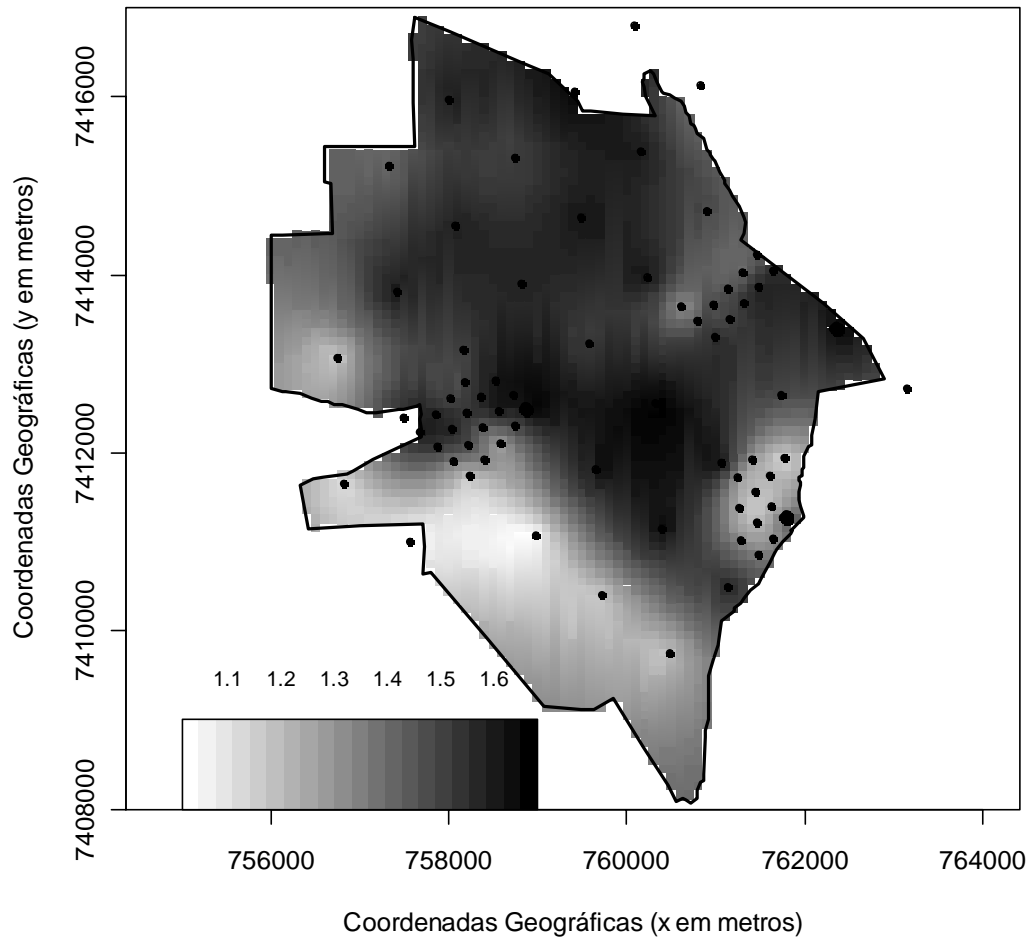


Figura 7 - Predição da Densidade Aparente do Solo ( $\text{g.cm}^{-3}$ ) na profundidade 0-10 cm

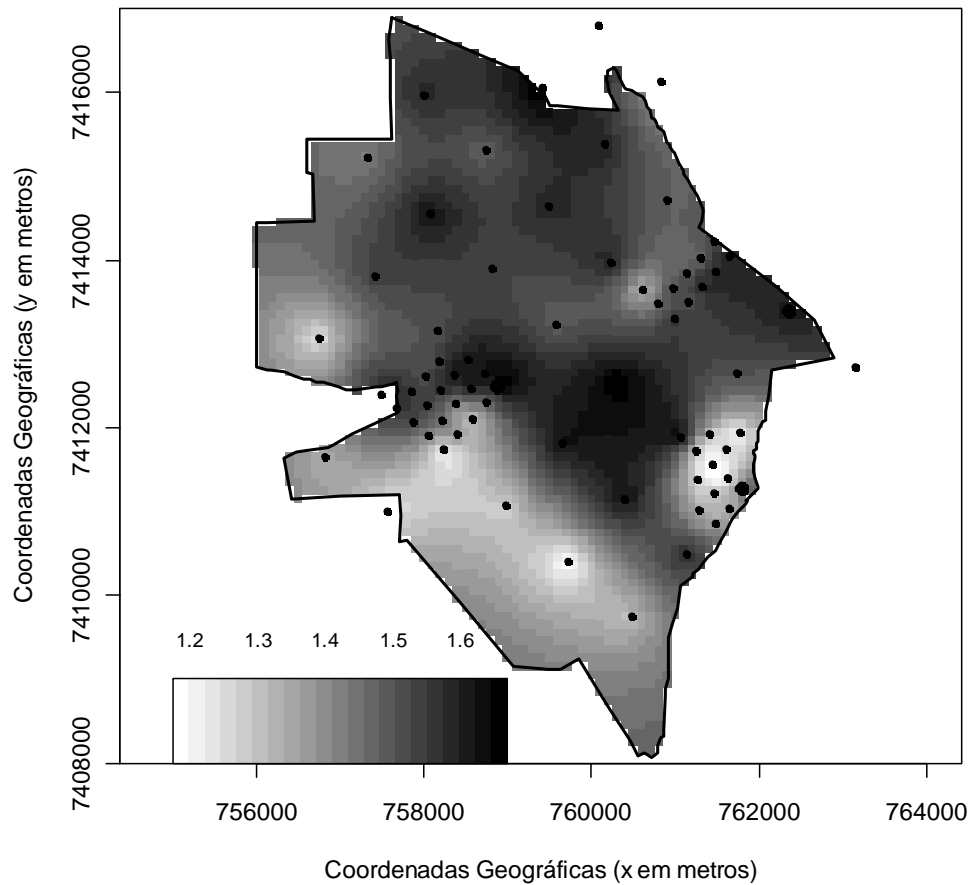


Figura 8 - Predição da Densidade Aparente do Solo ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) na profundidade total 0-20 cm

#### 4.4.5.2 Teor de Carbono Orgânico no Solo

A predição do COS foi feita para a profundidade 0-10 cm e apresentada na figura 9. No caso da profundidade 10-20 cm e 0-20 cm seria necessário aumentar a grade de amostragem na área de estudo com pontos distânciados de acordo com o alcance prático obtido.



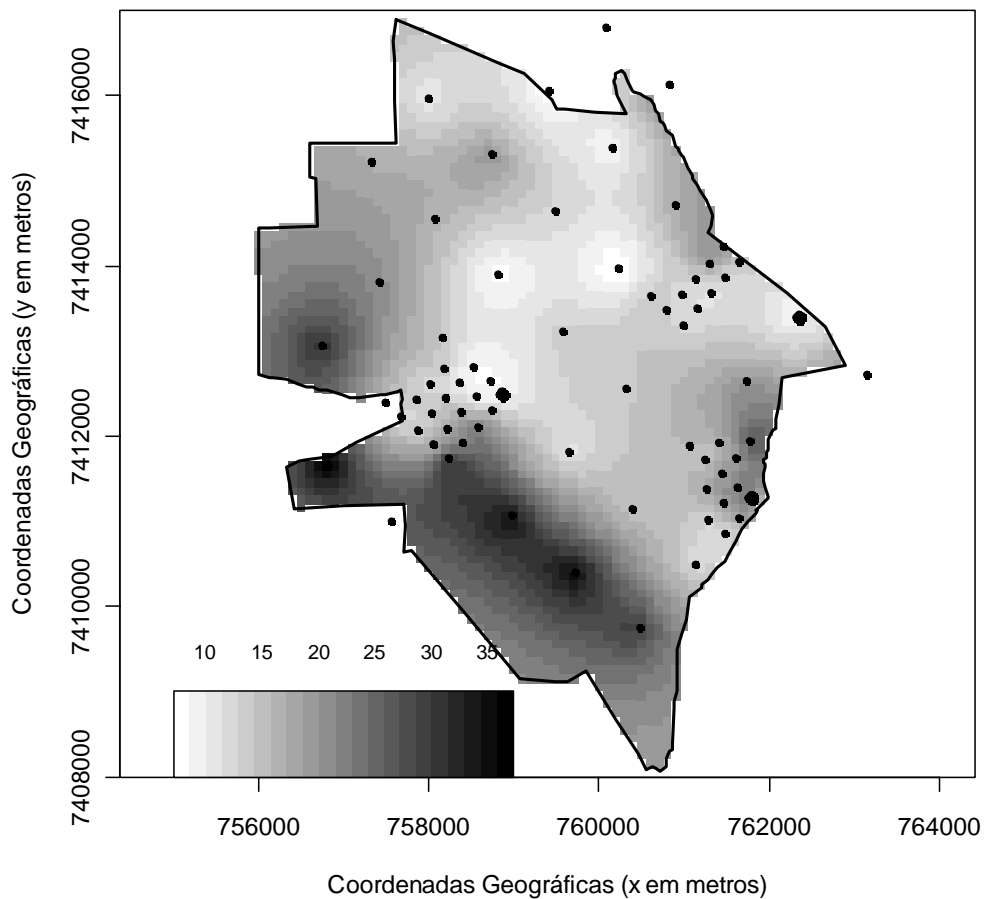


Figura 9 - Predição do Teor de Carbono Orgânico do Solo ( $\text{g.Kg}^{-1}$ ) na profundidade 0-10 cm

A krigagem na profundidade estudada apresentou uma média de  $17,93 \text{ g.Kg}^{-1}$ , valor maior e que não está incluso nos Intervalos de Confiança da estatística clássica ( $15,79 - 13,59 \text{ g.Kg}^{-1}$ )

#### 4.4.5.3 Estoque de Carbono Orgânico no Solo

A predição do estoque de carbono foi feito para a profundidade 0-10 cm e apresentada na figura 10. No caso das profundidades 10-20 cm e 0-20 cm seria necessário aumentar a grade de amostragem na área de estudo com pontos distânciados de acordo com o alcance prático obtido.

A krigagem na profundidade estudada apresentou uma média de  $23,49 \text{ MgC.ha}^{-1}$ , valor maior e que não está incluso nos Intervalos de Confiança da estatística clássica ( $22,04 - 19,65 \text{ MgC.ha}^{-1}$ ).

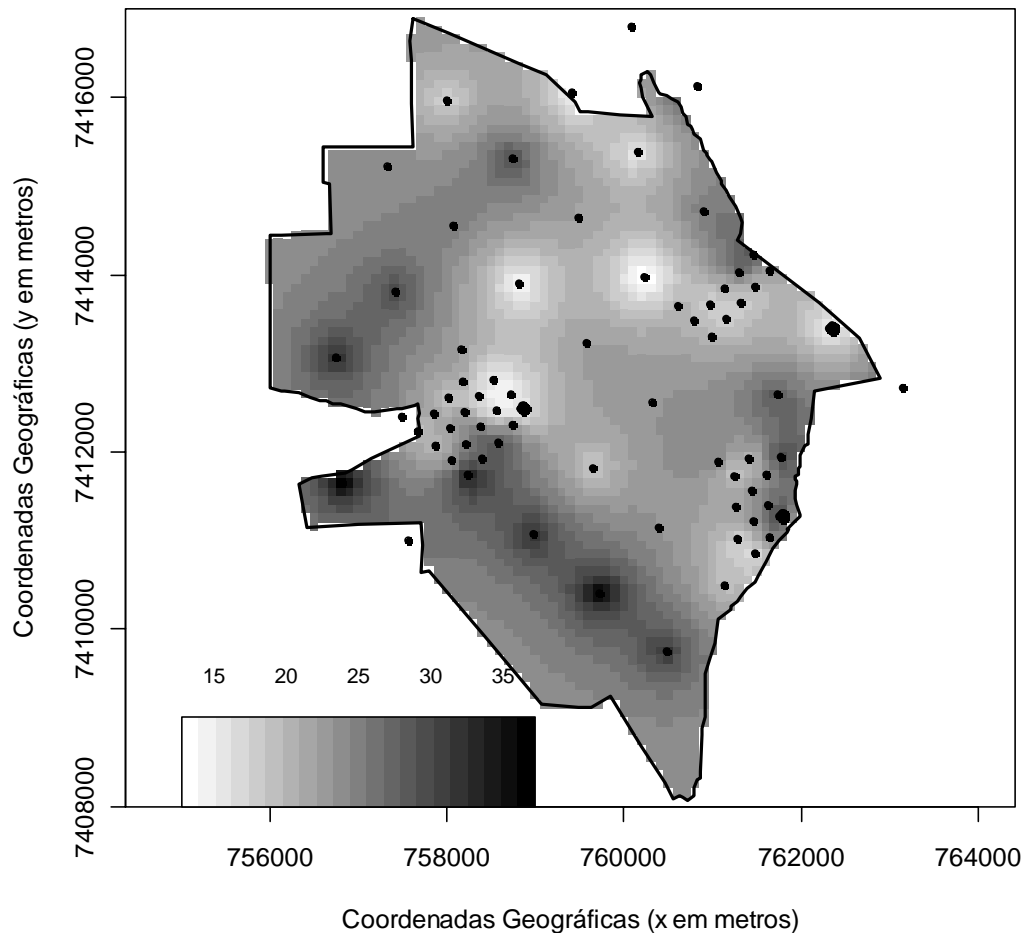


Figura 10 - Predição do Estoque de Carbono Orgânico do Solo (MgC.ha<sup>-1</sup>) na Profundidade 0-10 cm

#### 4.4.6 Validação Cruzada

Usando o critério MAE, a validação cruzada obteve bons resultados em todas as variáveis em estudo, segundo mostram as tabelas 8, 9 e 10, para densidade aparente, teor de carbono e estoque de carbono, respectivamente, sendo que os valores mais baixos estiveram presentes na densidade. Isso mostra que os modelos podem ser usados na krigagem, já que o erro de predição não foi elevado. Nos anexos K, L e M apresentam-se a distribuição dos erros para as variáveis: densidade aparente, teor de carbono e estoque de carbono, respectivamente, nas profundidades estudadas, que apresentaram uma distribuição normal e homogênea dos resíduos.

#### 4.5. Amostragem clássica e geoestatística

Tanto a amostragem clássica quanto a geoestatística mostraram-se ferramentas aptas para determinar o estoque de carbono no solo. Apresenta-se na tabela 15 a distância de amostragem das unidades amostrais segundo as metodologias empregadas para o estoque de carbono nas profundidades estudadas.

Tabela 15 – Intervalos de Amostragem entre as unidades amostrais para estoque de carbono

Prof. (cm)	Amostragem por uso de solo		Amostragem por Área		Geoestatística	
	Tamanho da amostra	Distância de Amostragem (m)	Tamanho da amostra	Distância de Amostragem (m)	Tamanho da amostra	Alcance Prático
0-10	164	445	45	850	37	1048
10-20	113	537	33	993	1159	186
0-20	116	530	34	979	95	650

Como apontado anteriormente, para fazer a interpolação de dados, é preciso manter a dependência espacial entre os pontos amostrais, sendo assim, a distância de amostragem na geoestatística deve ser menor ao alcance prático da variável. Assim, pode-se verificar com o novo tamanho da amostra calculado, que quando usamos a amostragem sistemática de acordo ao uso do solo, o intervalo de amostragem apresenta dependência espacial na profundidade 0-10 cm e 0-20 cm, com o qual pode se realizar a krigagem. No caso da amostragem sistemática estratificada por área total, a distância de amostragem da profundidade 0-10 cm é a única inclusa na dependência espacial, sendo que, usando o raio de amostragem recomendado pela amostragem nas outras profundidades não seria possível realizar a krigagem dos dados.

No caso da geoestatística pode-se verificar que a menor dependência espacial da profundidade 10-20 cm fez o tamanho da amostra ser maior comparada às outras profundidades. Quando o objetivo é a krigagem da área, o esforço amostral que precisa ser realizado, seria inviável.

Quando a amostragem realizada na área de estudo pode ser usada tanto na geoestatística como na estatística clássica, a geoestatística mostrou ser mais efetiva segundo os valores de AIC.

Neste estudo pode-se verificar que todas as variáveis em todos os modelos testados nas três profundidades tiveram valores menores de AIC comparados à estatística não espacial (tabela 11, 12, 13).

Sendo o objetivo primordial do estudo determinar o plano de amostragem adequado para a cálculo do estoque de carbono, pode-se verificar que o menor esforço amostral foi alcançado na amostragem sistemática estratificada, com uma distância de amostragem entre pontos de 979 m. Isso permite conhecer também as estimativas de cada estrato assim como da área total com um erro de 10% e 95% de probabilidade. Pode-se verificar que o raio de amostragem recomendado para a área de estudo permite manter uma independência espacial das amostras, o que não permitiria o uso da geoestatística na profundidade desejada 0-20 cm. Aprecia-se assim que em grandes áreas, nem sempre a geoestatística necessita menor número de amostras comparada à estatística clássica.



## 5 CONCLUSÕES

O sucesso do plano de amostragem em solos depende de quanto conhecimento se possui sobre as variáveis que desejam ser estudadas, e o comportamento que elas apresentam nas profundidades nas quais se tem interesse. O pouco conhecimento do comportamento das variáveis pode levar a escolha de um desenho amostral inadequado que não permitiria chegar às conclusões desejadas, podendo as estimativas de interesse ser sobre ou subestimadas, além de realizar esforços amostrais não adequados, influenciando no custo da amostragem e no esforço desnecessário do pessoal de campo. Ao conhecer os semivariogramas das variáveis em estudo, obtém-se informação do comportamento espacial que elas apresentam, permitindo, assim, conhecer a influência da localização dos pontos de coleta e qual a relação da distância que as separa.

Na estatística clássica ficou demonstrado que o tamanho da amostra é influenciado pela variável estudada e pela profundidade desejada, sendo que, quando se estudam camadas individualmente, são as camadas superficiais as que precisam maior esforço amostral, devido à alta variabilidade presente. Quando o solo é estudado numa camada maior, o esforço amostral começa a reduzir, influenciado pela menor variabilidade das camadas inferiores. A densidade aparente precisa de um número mínimo de amostras, comparado as outras variáveis, o que permitiria manter um número menor de coleta de amostras indeformes para diminuir os custos de coleta e usar uma média para cada estrato no cálculo do estoque de carbono. Assim, o esforço e os custos empregados na coleta de amostras indeformes podem ser aproveitados numa maior coleta de amostras para determinar o teor de carbono. Pode-se apreciar que a estatística clássica foi uma ferramenta efetiva para determinar o estoque de carbono, com uma facilidade maior comparada à geoestatística para a análise dos dados, apresentando um Intervalo de confiança considerado baixo e dentro dos limites esperados.

Do mesmo modo, a geoestatística mostrou ser uma ferramenta eficaz que permite obter mais conhecimento sobre o comportamento das variáveis estudadas, dados que não poderiam ser obtidos só com o uso da estatística clássica, como: dependência espacial, valores de pontos não coletados por meio da interpolação, modelos que se ajustam aos dados. O êxito dos resultados na geoestatística depende da grade de amostragem empregada. Pode-se apreciar que a escolha de modelos por meio do AIC foi apropriada, sendo os modelos exponenciais e esféricos os mais adequados para todas as variáveis e todas as profundidades estudadas, diferenciando-se

unicamente pelo alcance prático que cada uma delas apresentou e que determinam um maior ou menor número de amostras no campo. Na prática, uma maior dependência espacial permite coletar pontos mais distantes, o qual é ótimo na procura de diminuir o esforço amostral. Neste caso onde os modelos ficaram iguais segundo o critério da diferença do AIC, o alcance prático pode ser um critério prático de escolha sobre qual modelo usar para ajustar o semivariograma. Assim, para o estoque de carbono na profundidade 0-20 cm o melhor modelo foi o esférico. A interpolação dos resultados depende da distribuição dos pontos de amostragem no campo, fato pelo qual o esforço amostral deve ser distribuído numa grade que abranja a área total de estudo mantendo sempre a dependência espacial o que permitirá realizar mapas da área. A validação cruzada mostrou que os resultados da interpolação com os modelos escolhidos mostram-se efetivos, com um erro baixo de predição. Em todos os outros casos o maior alcance prático foi para os modelos exponenciais, com uma diferença notória em relação aos esféricos.

A krigagem nas profundidades realizadas apresentou médias não inclusas nos Intervalos de Confiança da estatística clássica, sendo que, para o estoque de carbono a geoestatística apresentou valores maiores.

O motivo de não realizar interpolação de todas as variáveis em todas as profundidades não depende da geoestatística, a qual se mostrou muito eficaz, e sim ao desenho amostral escolhido no início do trabalho, que não permitiu cobrir a área com as exigências da dependência espacial. Uma nova distribuição dos pontos de coleta permitiria usar a geoestatística sem inconvenientes.

O estudo realizado na fazenda Três Lagoas permite concluir que há diferenças entre os sistemas de amostragem empregados, os quais dependem das variáveis de estudo, da profundidade do solo, e do uso do solo, sendo que a amostragem estratificada requer um menor esforço amostral por área para alcançar a precisão desejada (10% de erro com 95% de probabilidade). A estatística clássica assim como a geoestatística mostraram ser ferramentas úteis para a determinação do estoque de carbono em áreas de alta variabilidade, sendo que, a geoestatística mostrou maiores estimativas de estoque por área. Pelo desconhecimento do comportamento das variáveis estudadas espacialmente, a estatística clássica mostrou as estimativas totais do estoque de carbono, as quais a geoestatística não permitiu conhecer pela falta de um desenho amostral adequado. A sistematização e a estratificação da área é a melhor ferramenta de amostragem na determinação do estoque de carbono. O desenvolvimento do estudo permite ter um conhecimento dos semivariogramas das variáveis estudadas, o que ajudará na

definição de novos planos de amostragem com pontos espacialmente dependentes e que permitirá uma interpolação da área total, com um esforço amostral similar ao da estatística clássica.





## REFERÊNCIAS

- ACOSTA, M.; ETCHEVERS, J.D.; MONREAL, C.; QUEDNOW, K.; HIDALGO, C. Un método para la medición del carbono en los compartimientos subterráneos (raíces y suelo) de sistemas forestales y agrícolas en terrenos de ladera en México. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES, 2001, Valdivia. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2001. Não paginado.
- BALBINOT, R.; SCHUMACHER, M.V.; WATZLAWICK, L.F.; SANQUETA, C.R. Inventário de carbono orgânico em um plantio de *Pinus taeda* aos 5 anos de idade no Rio Grande do Sul. **Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava, v. 5, n. 1, p. 59-68, jan./jun. 2003.
- BURNHAM, K.P. ANDERSON, D.R. Information and likelihood theory: a basis for model selection and inference. In: \_\_\_\_\_. **Mode selection and multi-model inference: a practical information – theoretic approach**. 2<sup>nd</sup> ed. New York: Springer, 2002. chap. 2, p. 49-97.
- CAMARGO, E.C.G. Geoestatística: fundamentos e aplicações. In: CÂMARA, G.; MEDEIROS, J.S. de (Org.). **Geoprocessamento para projetos ambientais**. São Jose dos Campos: INPE, 1998. cap. 5, p. 5.1-5.36.
- 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. 1501-1510, Sept./Oct. 1994.
- CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B.van. Determinação da matéria orgânica. In: RAIJ, B.van; ANDRADE, J.C. de; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. cap. 9, p. 173-180.
- CARVALHO, J.R.P de; NICOLLELLA, G. **Uso de geoestatística na definição de plano de amostragem em levantamento de parâmetros do solo: uma proposta**. Campinas: EMBRAPA Informática Agropecuária, 2002. 17 p.
- CARVALHO, J.R.P de; SILVEIRA, P.M da; VIEIRA S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, p. 1151-1159, ago. 2002.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Manual de capacitação mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo**. Brasília, 2008. 276 p.

CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; CHAPLOT, V.; VOLKOFF, B.; VICTORIA, R.L.; MELILLO, J.M.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C.C. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. **Geoderma**, Amsterdam, v: 123, n. 1/2, p. 51-68, Nov. 2004.

COCHRAN, W. G. **Sampling techniques**. New York: Wiley Publications in Statistics, 1953. 330 p.

CRÉPIN, J. JOHNSON, R.L. Soil Sampling for environmental assessment. In: CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of Analysis**. Boca Raton: Lewis Publ., 1993. chap. 2, p. 5-18.

DIGGLE, P.J.; RIBEIRO JUNIOR, P.J. Model-based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., 2000, Caxambu. Caxambu: Associação Brasileira de Estatística, 2000. 129 p.

DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S.; CAMARGO, O.A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. **Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 3, p. 505-517, maio/jun. 2004.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1979. 247 p.

ESTADOS UNIDOS. Environmental Protection Agency. **Greenhouse gas mitigation potencial in U.S. Forestry and Agriculture**. Washington, 2005. Não paginado.

ETCHEVERS, J.; ACOSTA, M.; MONREAL, C.; QUEDNOW, K.; JIMÉNEZ, L. Los stocks de carbono en diferentes compartimentos de la parte aérea y subterránea en sistemas forestales y agrícolas de ladera en México. In: SIMPOSIO INTERNACIONAL MEDICIÓN Y MONITOREO DE LA CAPTURA DE CARBONO EN ECOSISTEMAS FORESTALES, 2001, Valdivia. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2001. Não paginado.

FAO. **Global forest resources assessment 2005**: progress towards sustainable forest management. Rome, 2006. 320 p.

FREESE, F. **Elementary forest sampling**. Washington: USDA, 1962. 91 p.

FONSECA, S da; BARROS, N.F de; NOVAIS, R.F de; COSTA, M da; LEAL, P.G.L; NEVES, J.C.L Alterações em um latossolo sob eucalipto, mata natural e pastagem. I. Propriedades físicas e químicas. **Arvore**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 271-288, set./dez. 1993a.

FONSECA, S da; BARROS, N.F de; NOVAIS, R.F de; LEAL, P.G.L.; LOURES, E.G.; MOURA FILHO. W. Alterações em um latossolo sob eucalipto, mata natural e pastagem. II. Propriedades orgânicas e microbiológicas. **Arvore**, Viçosa, v. 17, n. 3, p. 289-302, set./dez. 1993b.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483 p. (Applied Geostatistics Series).

\_\_\_\_\_. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soil properties. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 27, n. 4, p. 315-334, Sept. 1998.

\_\_\_\_\_. Geostatistical in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, Amsterdam, v. 89, n. 1/2, p. 1-45, Apr. 1999.

HOUGHTON, R.A. Why are estimates of the terrestrial carbon balance so different? **Global Change Biology**, Oxford, v. 9, n. 4, p. 500–509, Apr. 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Segunda evaluación cambio climático**. [s.l.], 1995. 81 p.

\_\_\_\_\_. **Good practice guidance for land use, land-use change and forestry**. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. Não paginado.

\_\_\_\_\_. **Cambio climático 2007: informe de síntesis**. contribución de los grupos de trabajo i, ii y iii al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Ginebra, 2007. 104 p.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 1-22, Nov. 2004.

\_\_\_\_\_. Bulk density measurement for assessment of soil carbon pools. In: LAL, R.; CERRI, C.C.; BERNOUX, M.; ETCHEVERS, J.; CERRI, C. (Ed). **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Haworth Press, 2006. chap. 23, p. 491-514.

MASON, B.J. **Preparation of soil sampling protocols: sampling techniques and strategies**. Las Vegas: US-EPA, 1992. Não paginado.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 4, p. 617-639, Dec. 1986.

MODLER, I.F.; MATTOS, I.F.A.; ROSSI, M. Influência dos elementos do meio físico geologia, geomorfologia e solos na distribuição de cerrado e floresta estacional semidecidual na Estação Ecológica de Angatuba, SP. **Instituto Florestal, Série Registros**. São Paulo, n. 31, p. 275-280, jul. 2007.

NACIONES UNIDAS. **Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático**. [s.l.:s.n.], 1998. 24 p.

OLIVEIRA, J.B. de; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida**. Campinas: Instituto Agrônômico; EMBRAPA Solos, 1999. Escala:1:500000.

PALMER, C.J. Techniques to measure and strategies to monitor forest soil carbon. In: KIMBLE, J.M.; HEATH, L.; BIRDSEY, R.A.; LAL, R. **The potential of U.S. forest soils to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect**. Boca Raton: Lewis Publ., 2002. chap. 5, p. 73-90.

PRADO, H. do. **Os solos do Estado de São Paulo: mapas pedológicos**. Piracicaba: [s.n.], 1997. 205 p.

QIU, Y.; FU, B.; WANG, J.; CHEN, L. Spatiotemporal prediction of soil moisture content using multiple-linear regression in a small catchment of the Loess Plateau, China. **Catena**, Amsterdam, v. 54, n.1, p. 173-195, Nov. 2003.

QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. van. Comparação de métodos rápidos para a determinação da matéria orgânica em solos. **Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, n. 3, p. 184-187, set./dez. 1979.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna, 2008. Disponível em: <<http://www.r-project.org>>. Acesso em: 10 jan. 2007.

RIBEIRO JUNIOR, P.J.; DIGGLE, P.J. geoR: a package for geostatistical analysis. **R-NEWS**, v. 1, n. 2, p. 15-18, June 2001. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>>. Acesso em: 20 nov. 2008.

SCHLEGEL, B.; GAYOSO, J.; GUERRA, J. **Manual de procedimientos para inventários de carbono en ecosistemas forestales**. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2001. 15 p.

SZACÁKS, G. **Seqüestro de carbono nos solos**: avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens, Anhembi – Piracicaba, SP. 2003. 102 p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 367-372, 1997.

TAN, K.H. Principles of soil sampling. In: \_\_\_\_\_. **Soil sampling, preparation and analysis**. New York: Marcel Dekker, 1993. chap. 1, p: 1-16.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, Departamento de Solos, 1995. 174 p.

TIESSSEN, H.; MOIR, J.O. Total and organic carbon. CARTER, M.R. (Ed.). **Soil sampling and methods of Analysis**. Boca Raton: Lewis Publ., 1993, chap. 21, p: 187-200 .

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

UNITED NATION FRAMEWORK CLIMATE CHANGE CONVENTION. **Approved afforestation and reforestation baseline methodology/AR-AM0002**: "Restoration of degraded lands through afforestation/reforestation". 1 version. [s.l.]: CDM- Executive Board. 2006. 94 p.

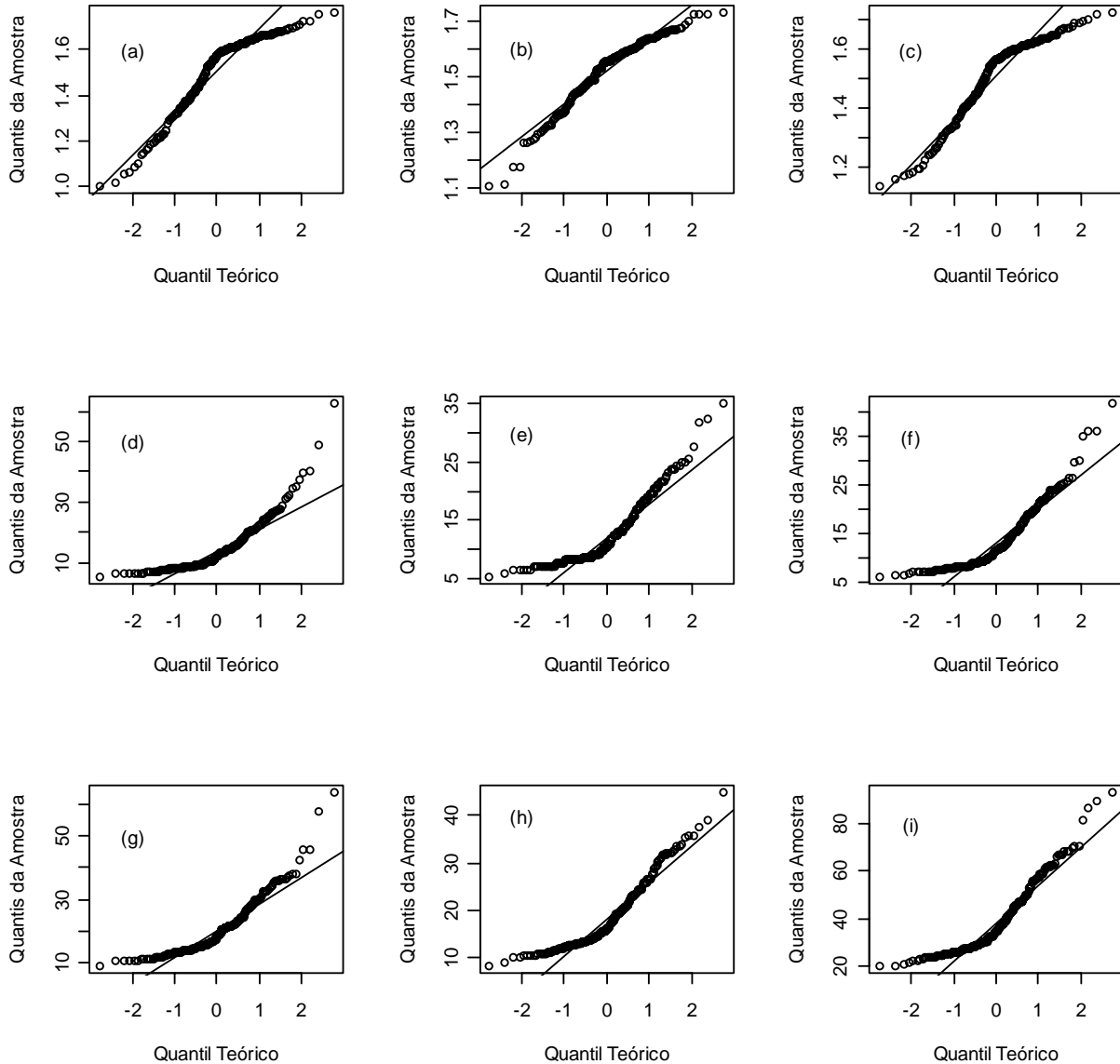


**ANEXOS**



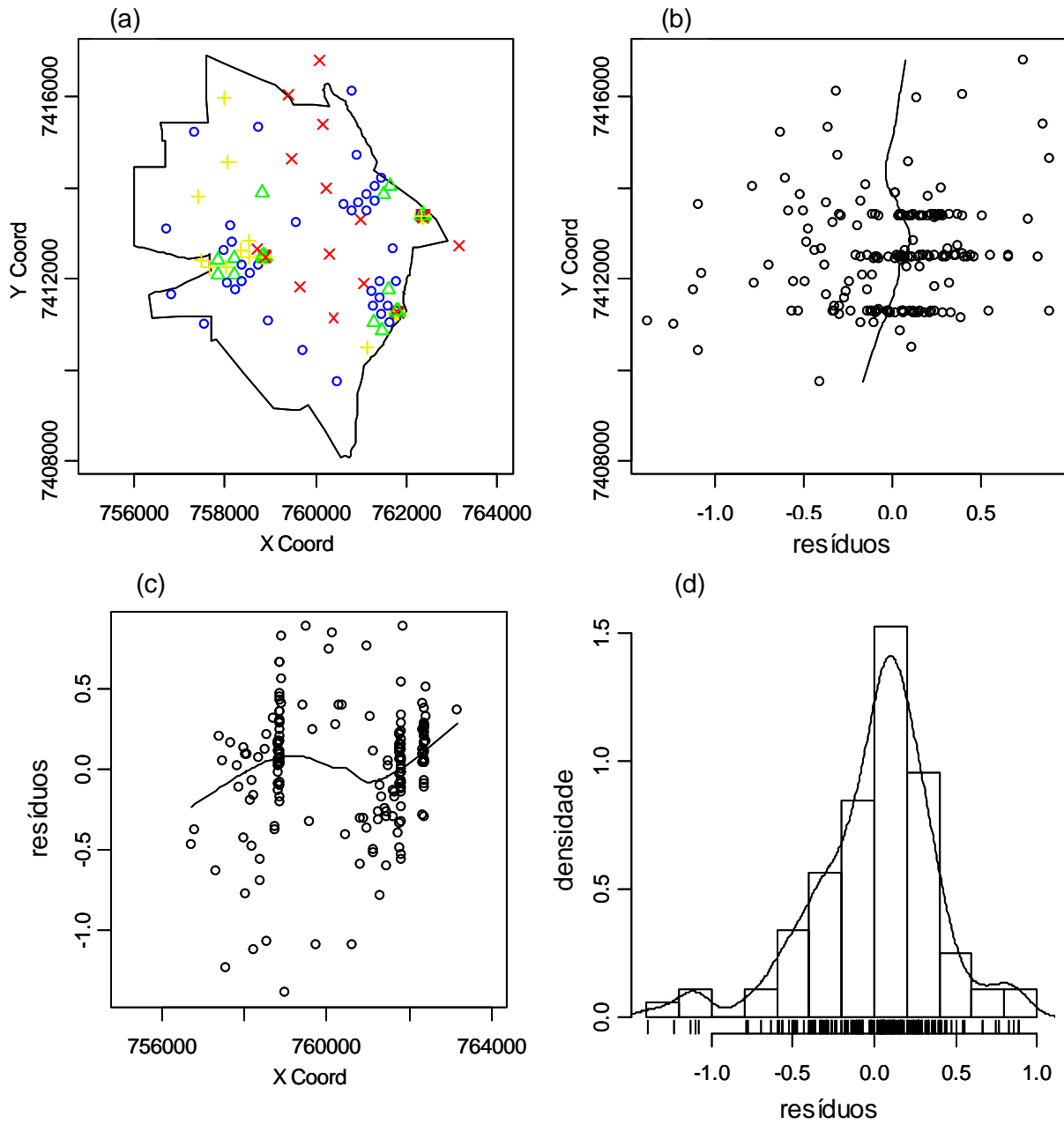


## ANEXO A – Distribuição da normalidade das variáveis



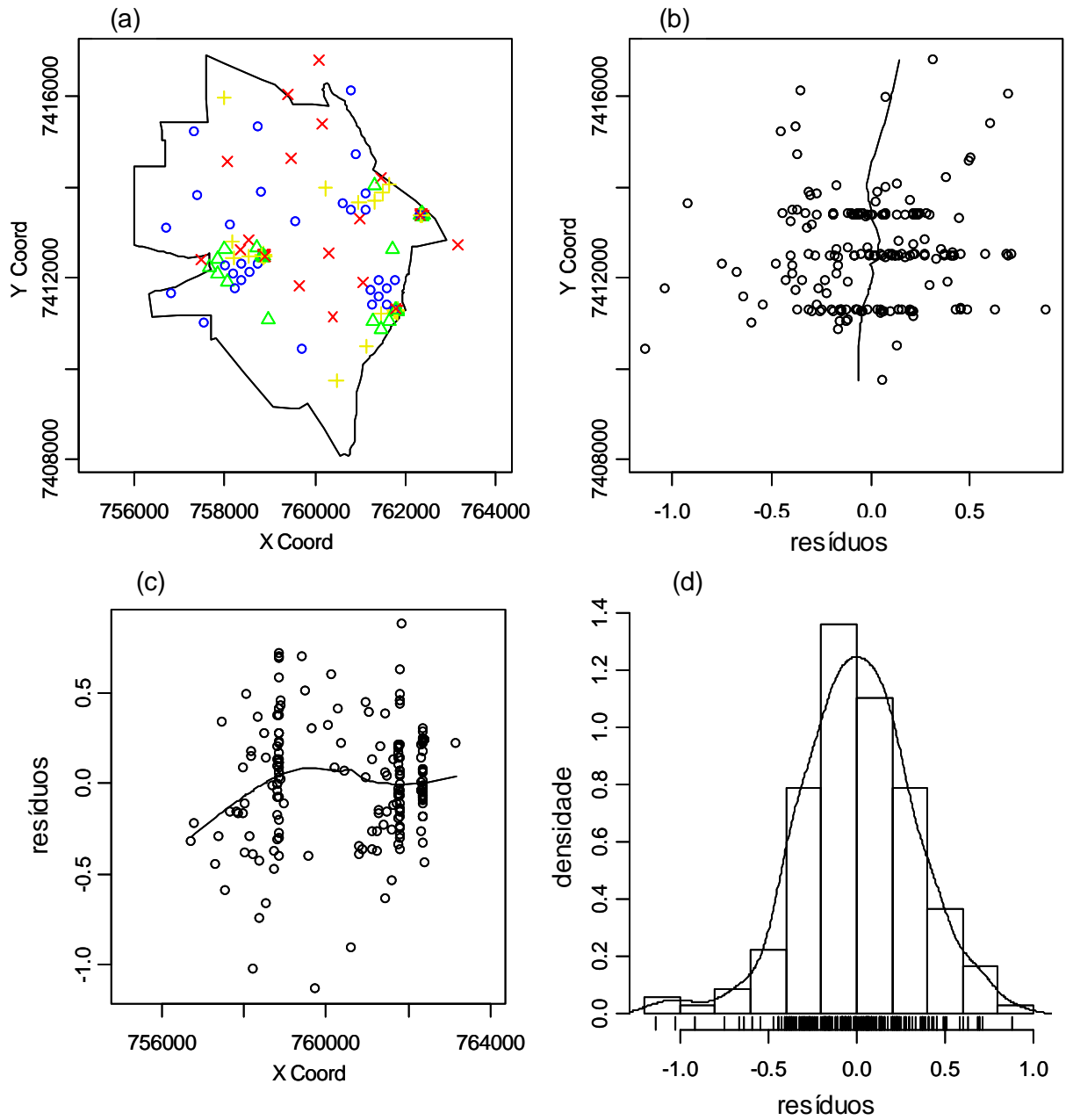
(a) Densidade aparente profundidade 0-10 cm (b) Densidade aparente profundidade 10-20 cm (c) Densidade aparente profundidade 0-20 cm. (d) Teor de carbono profundidade 0-10 cm (e) Teor de carbono profundidade 10-20 cm (f) Teor de carbono profundidade 0-20 cm. (g) Estoque de carbono profundidade 0-10 cm (h) Estoque de carbono profundidade 10-20 cm (i) Estoque de carbono profundidade 0-20 cm.

### ANEXO B – Distribuição Espacial da Densidade Aparente na profundidade 0-10 cm



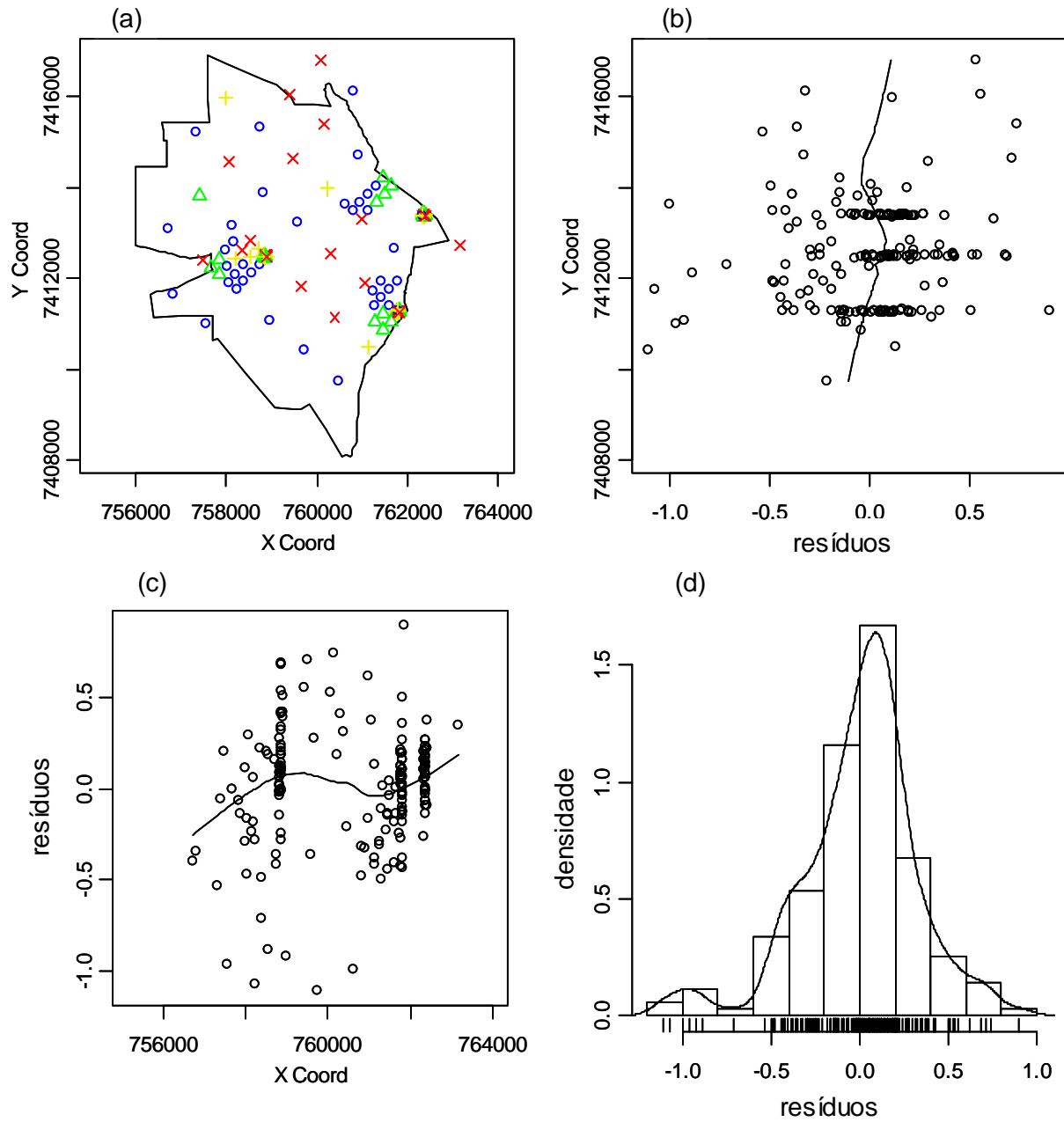
(a) Densidade aparente do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Densidade aparente relacionada ao eixo y. (c) Densidade aparente relacionada ao eixo x. (d) Histograma da distribuição da Densidade Aparente. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=4$ .

### ANEXO C – Distribuição Espacial da Densidade Aparente na profundidade 10-20 cm



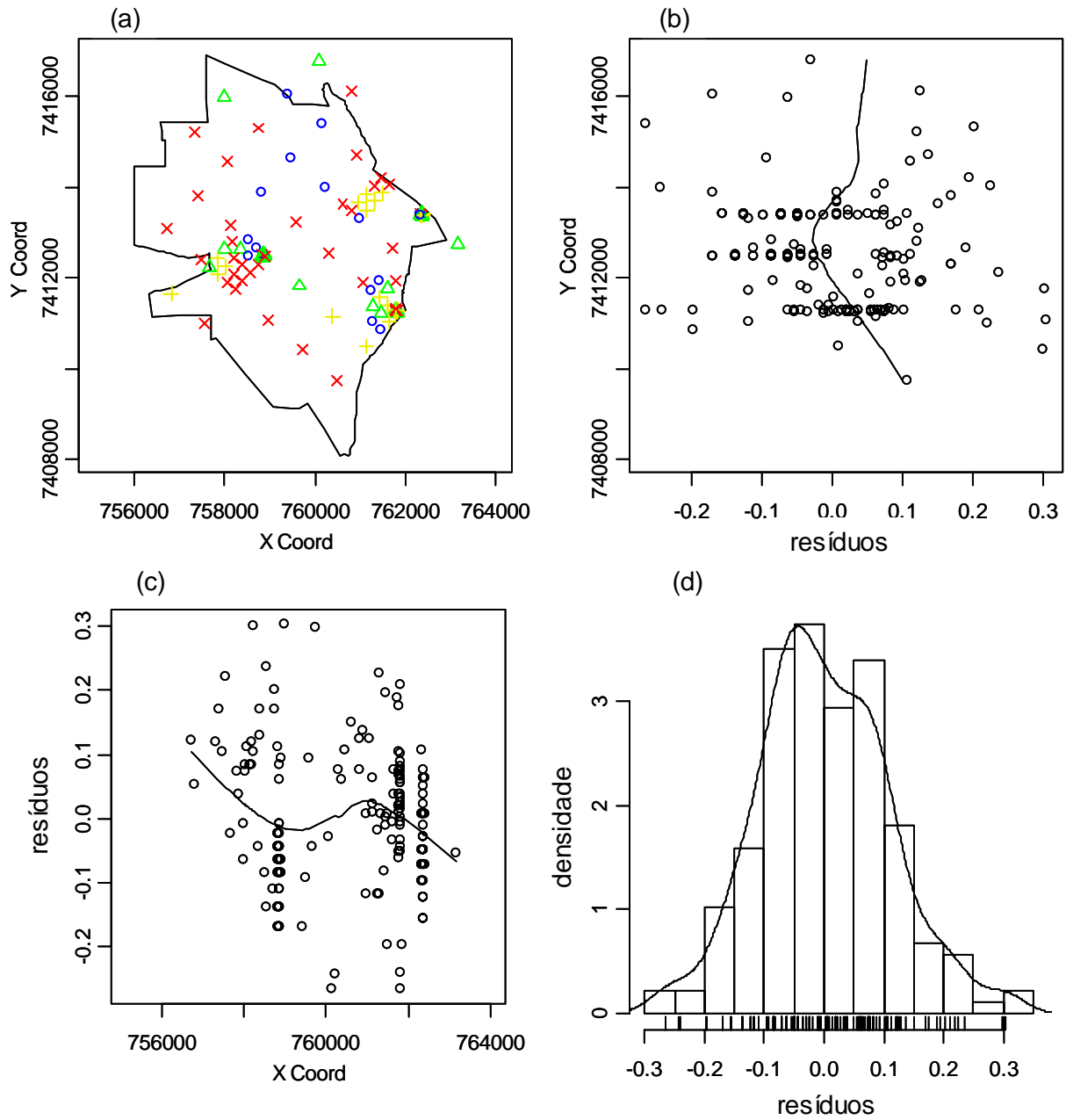
(a) Densidade aparente do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Densidade aparente relacionada ao eixo y. (c) Densidade aparente relacionada ao eixo x. (d) Histograma da distribuição da Densidade Aparente. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=4$ .

### ANEXO D – Distribuição Espacial da Densidade Aparente na profundidade 0-20 cm



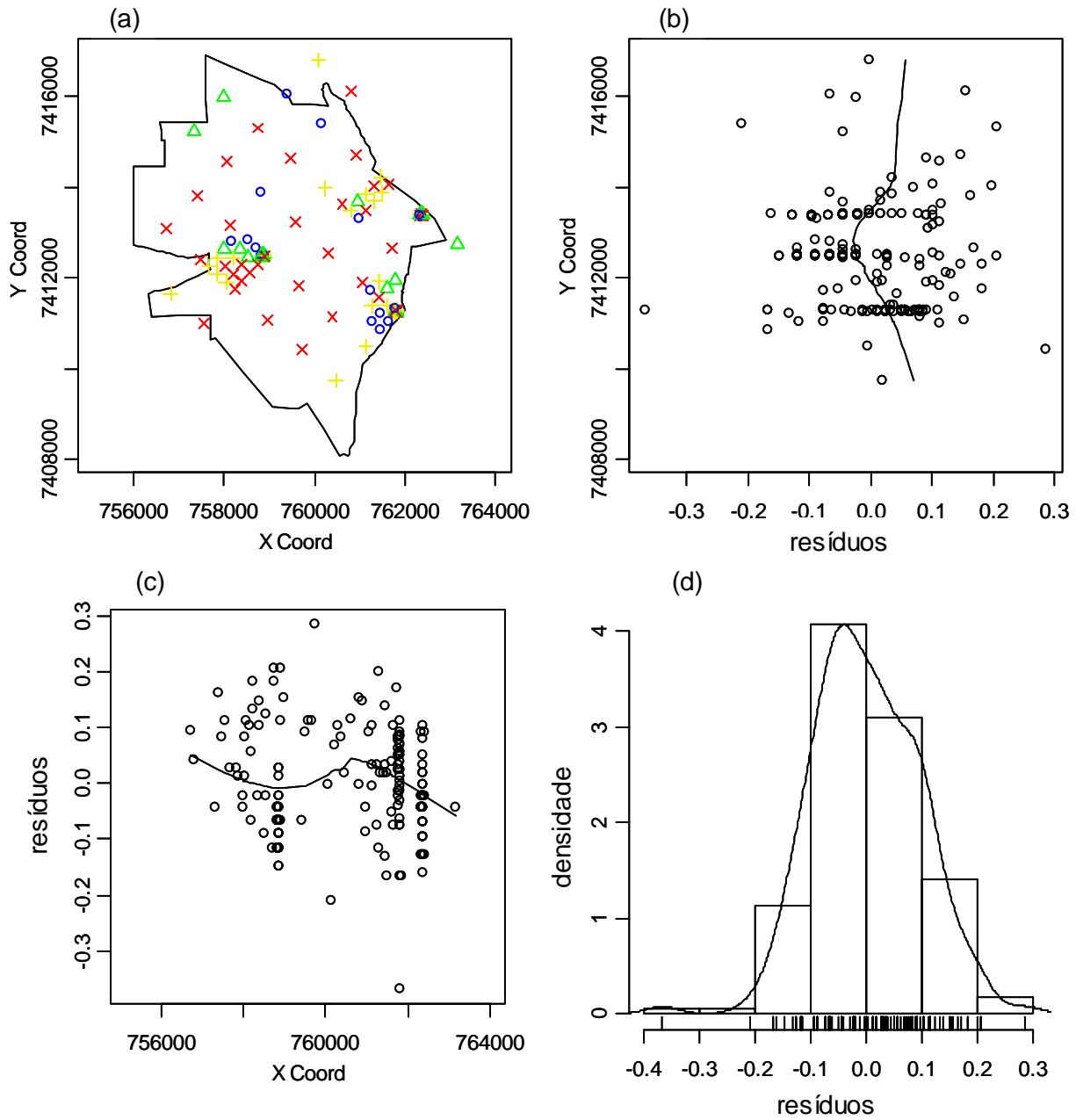
(a) Densidade aparente do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Densidade aparente relacionada ao eixo y. (c) Densidade aparente relacionada ao eixo x. (d) Histograma da distribuição da Densidade Aparente. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=4$ .

### ANEXO E – Distribuição Espacial do Teor de Carbono na profundidade 0-10 cm



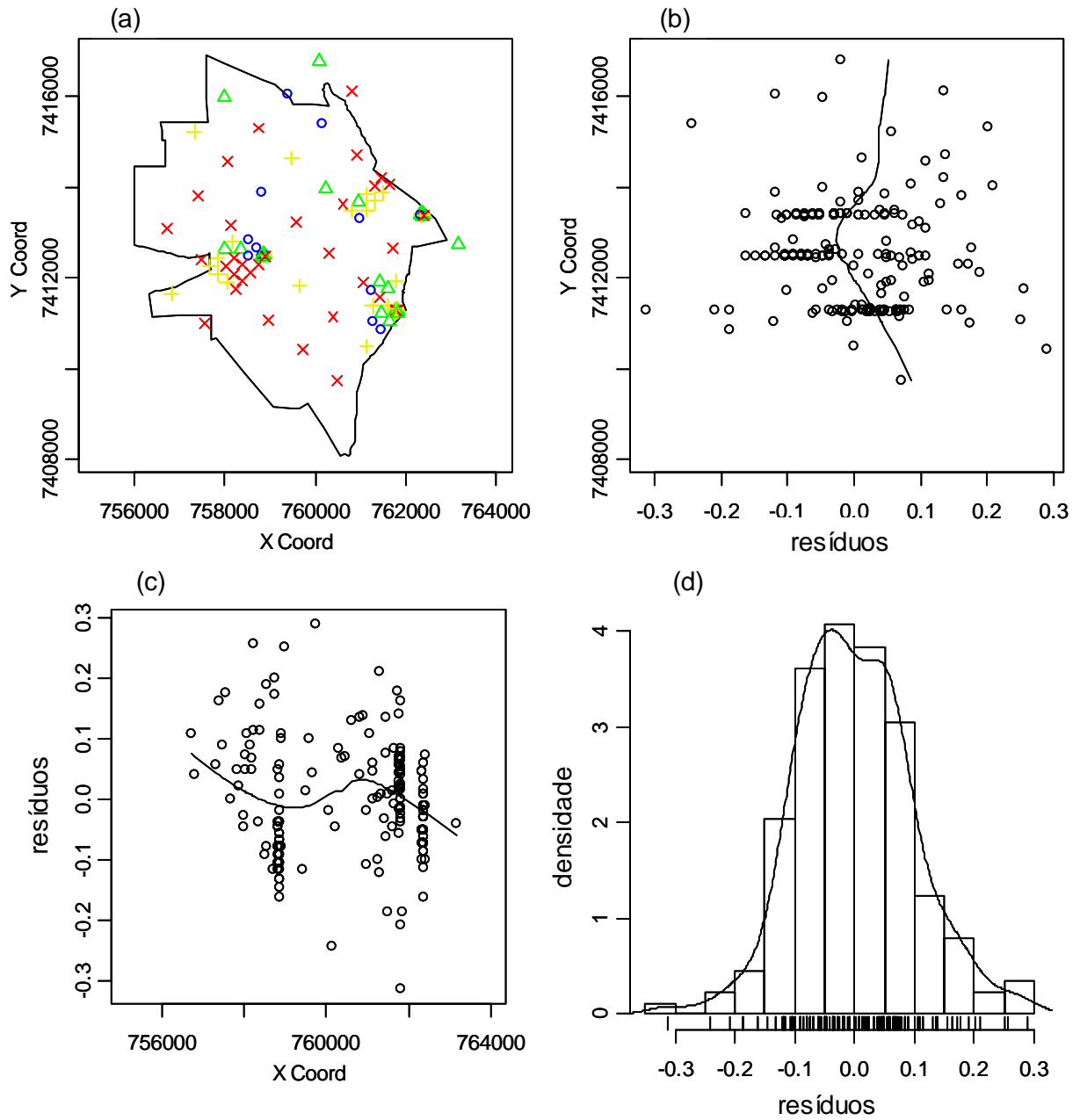
(a) Teor de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Teor de carbono relacionado ao eixo  $y$ . (c) Teor de carbono relacionado ao eixo  $x$ . (d) Histograma da distribuição do Teor de Carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

### ANEXO F – Distribuição Espacial do Teor de Carbono na profundidade 10-20 cm



(a) Teor de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Teor de carbono relacionado ao eixo y. (c) Teor de carbono relacionado ao eixo x. (d) Histograma da distribuição do Teor de Carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

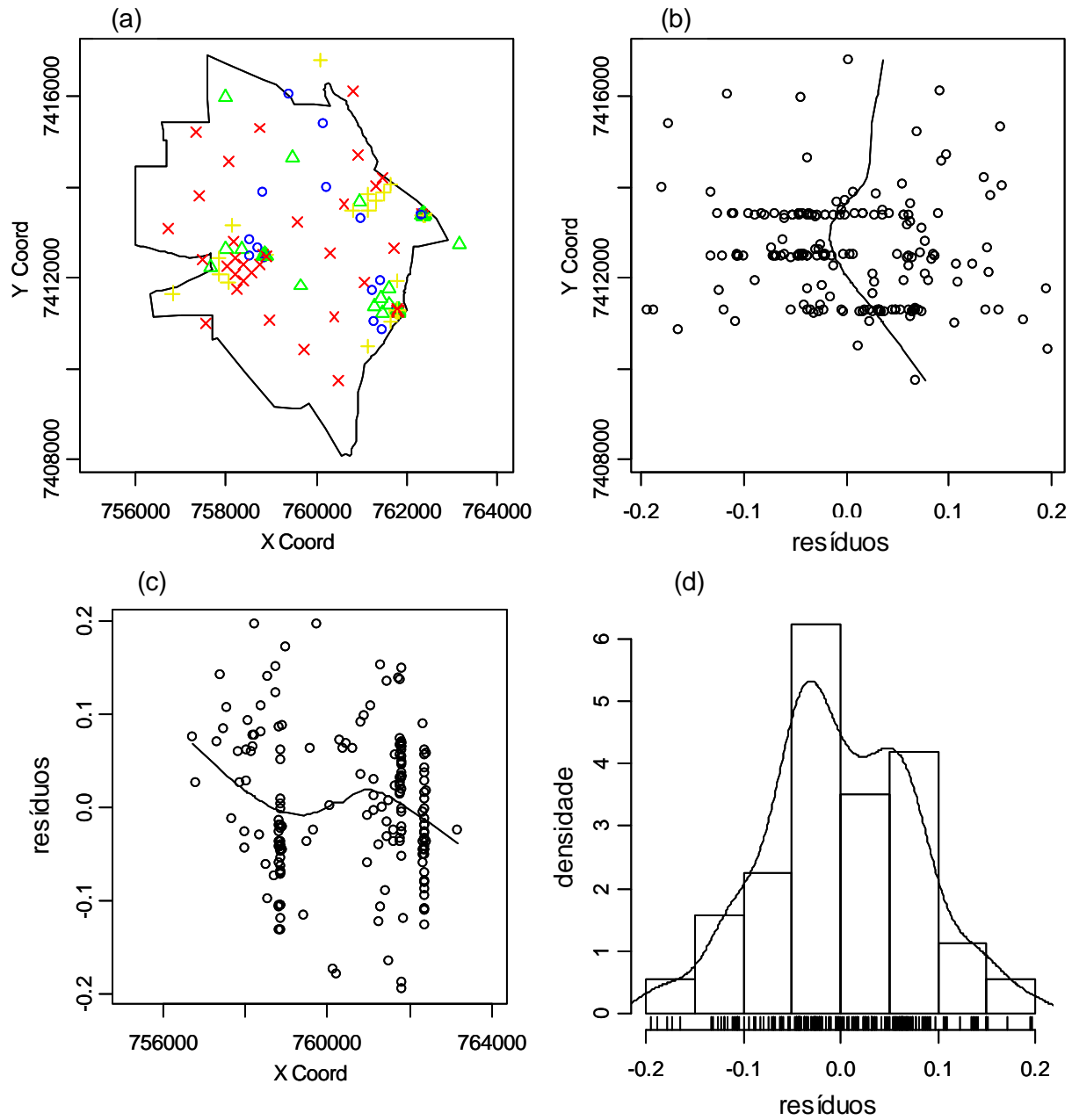
### ANEXO G – Distribuição Espacial do Teor de Carbono na profundidade 0-20 cm



(a) Teor de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Teor de carbono relacionado ao eixo y. (c) Teor de carbono relacionado ao eixo x. (d) Histograma da distribuição do Teor de Carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

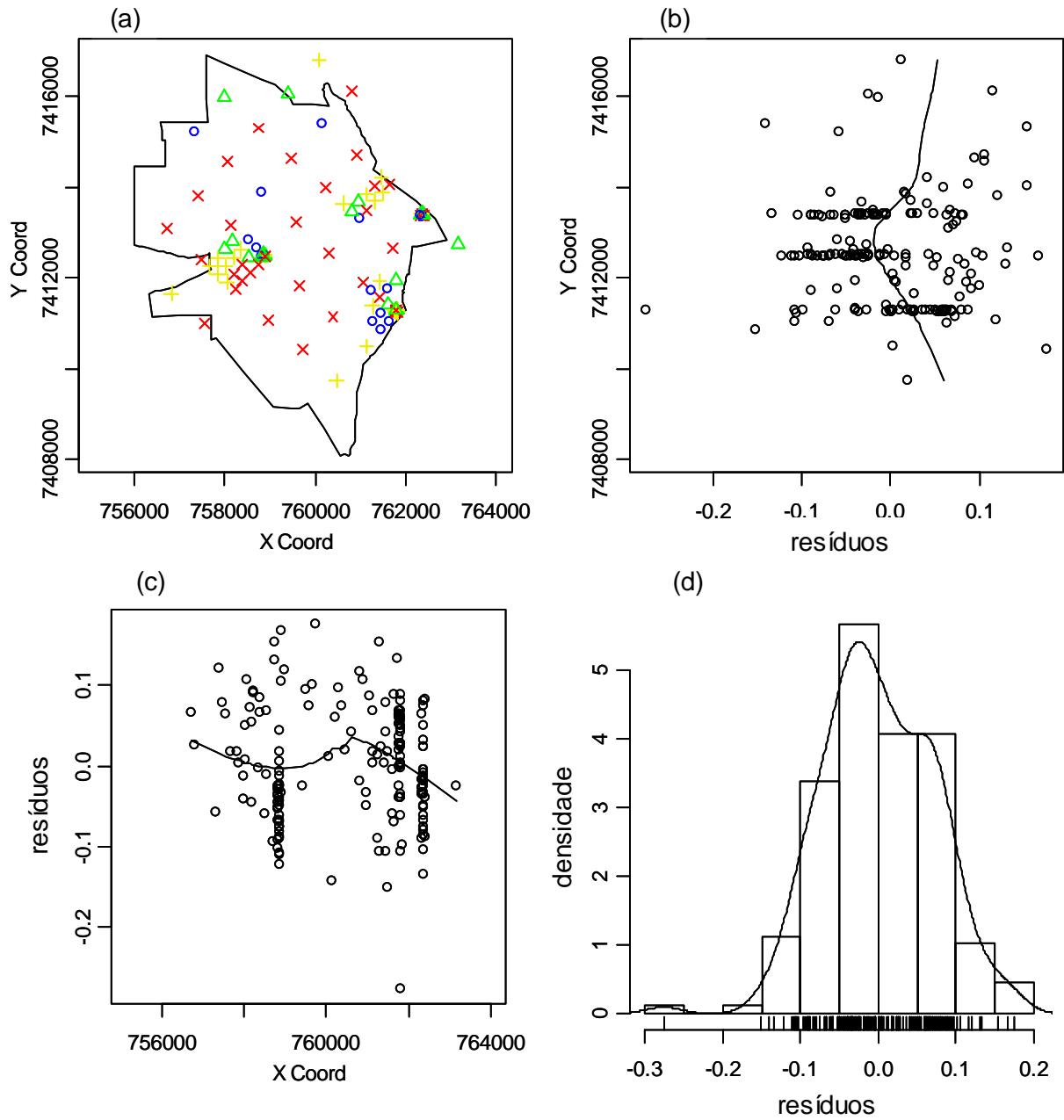


## ANEXO H – Distribuição Espacial do Estoque de Carbono na profundidade 0-10 cm



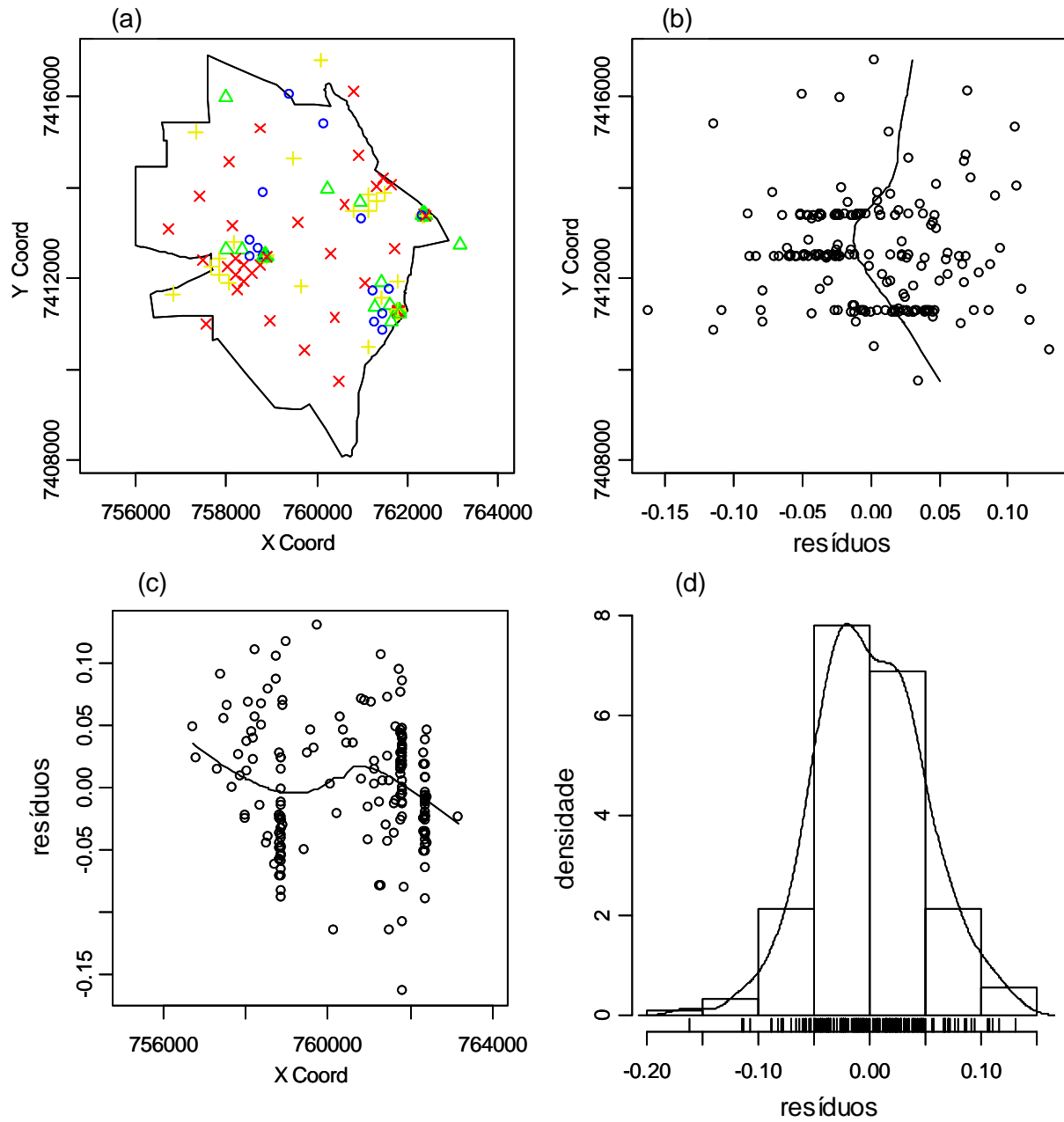
(a) Estoque de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Estoque de carbono relacionado ao eixo y. (c) Estoque de carbono relacionado ao eixo x. (d) Histograma da distribuição do estoque de carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

### ANEXO I – Distribuição Espacial do Estoque de Carbono na profundidade 10-20 cm



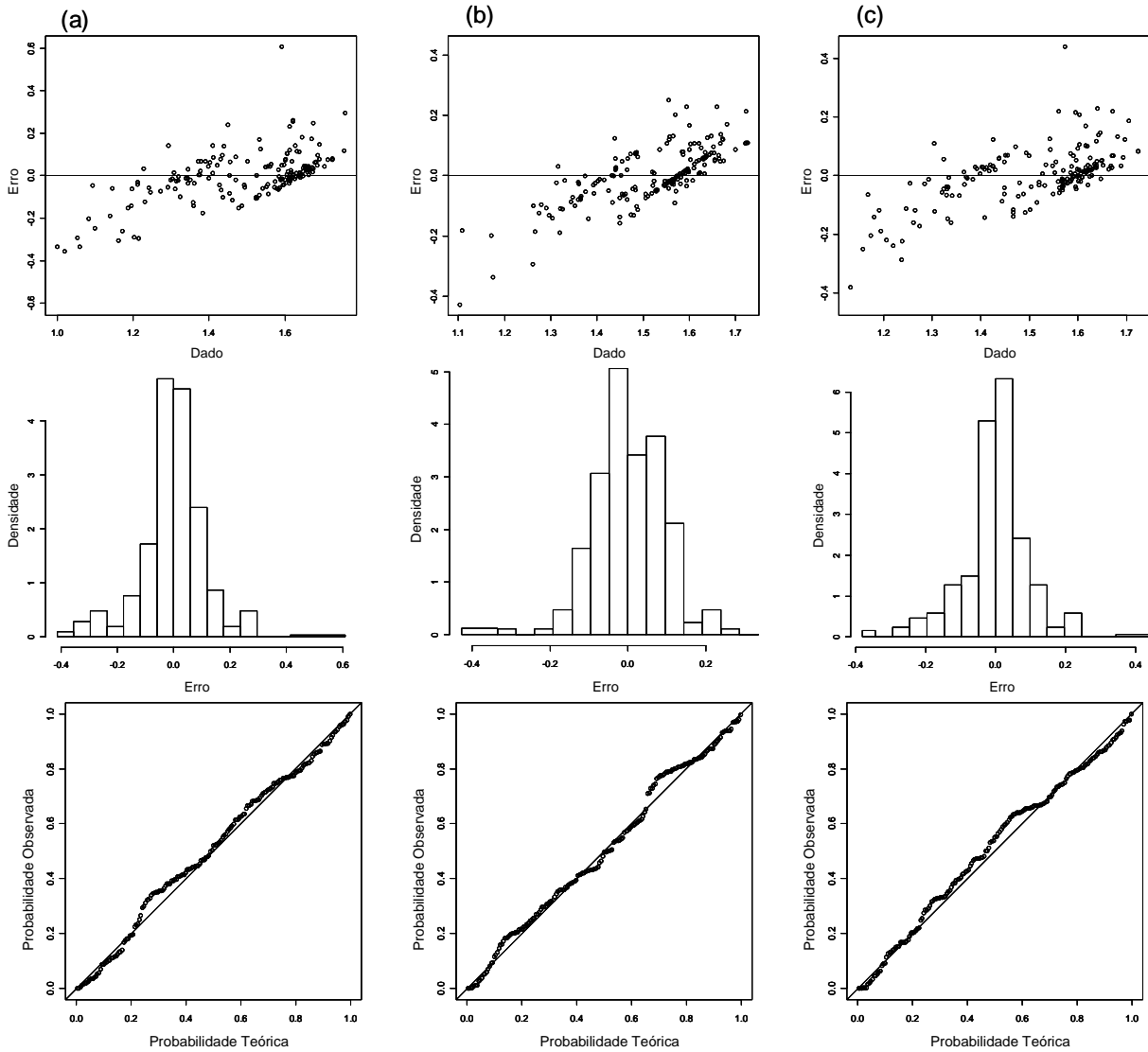
(a) Estoque de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Estoque de carbono relacionado ao eixo y. (c) Estoque de carbono relacionado ao eixo x. (d) Histograma da distribuição do estoque de carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

### ANEXO J – Distribuição Espacial do Estoque de Carbono na profundidade 0-20 cm



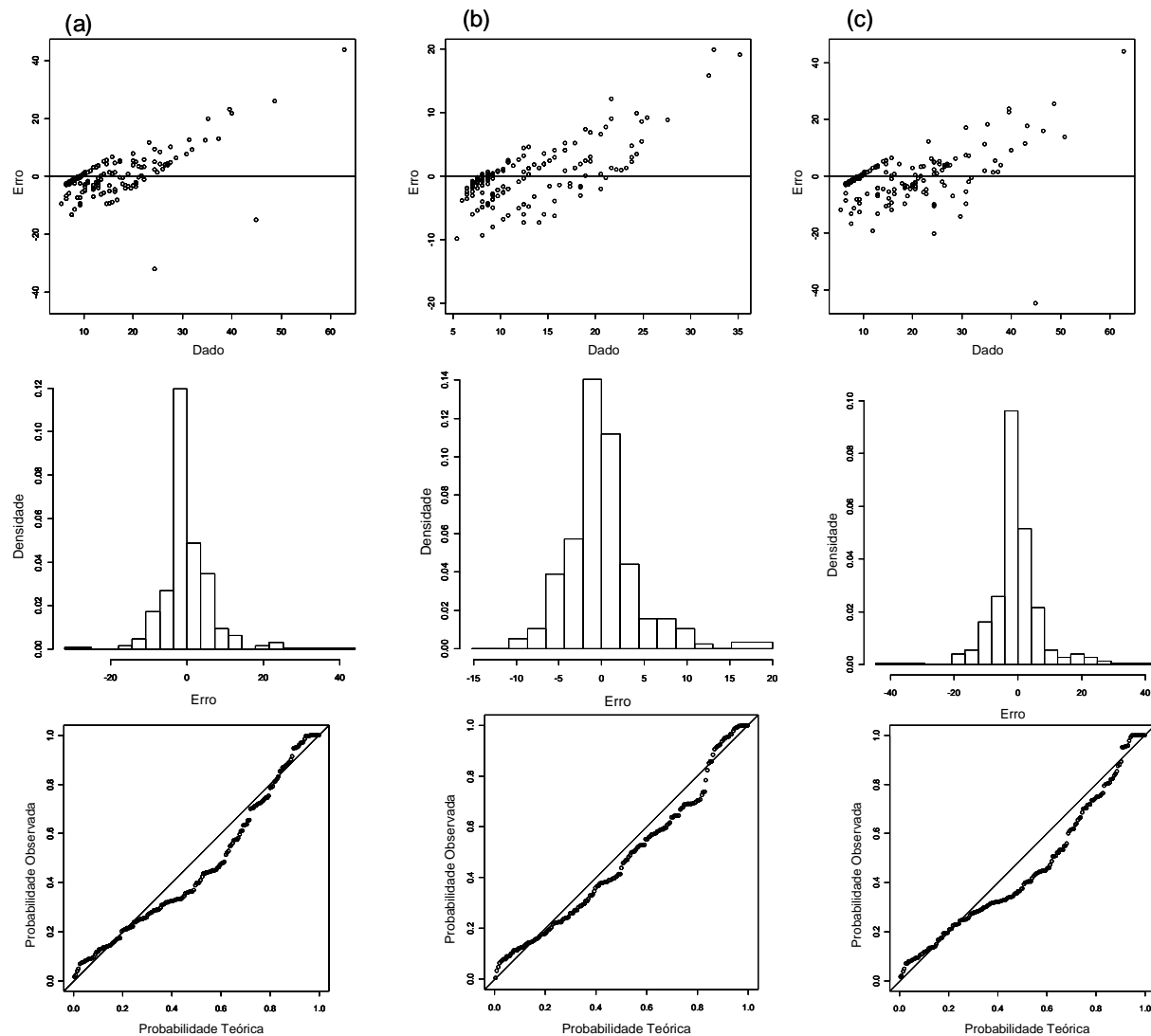
(a) Estoque de Carbono do solo na área de estudo distribuído por quantis. (b) Estoque de carbono relacionado ao eixo y. (c) Estoque de carbono relacionado ao eixo x. (d) Histograma da distribuição do estoque de carbono. Dados são apresentados transformados com  $\lambda=-0,5$ .

## ANEXO K - VALIDAÇÃO CRUZADA DA DENSIDADE APARENTE



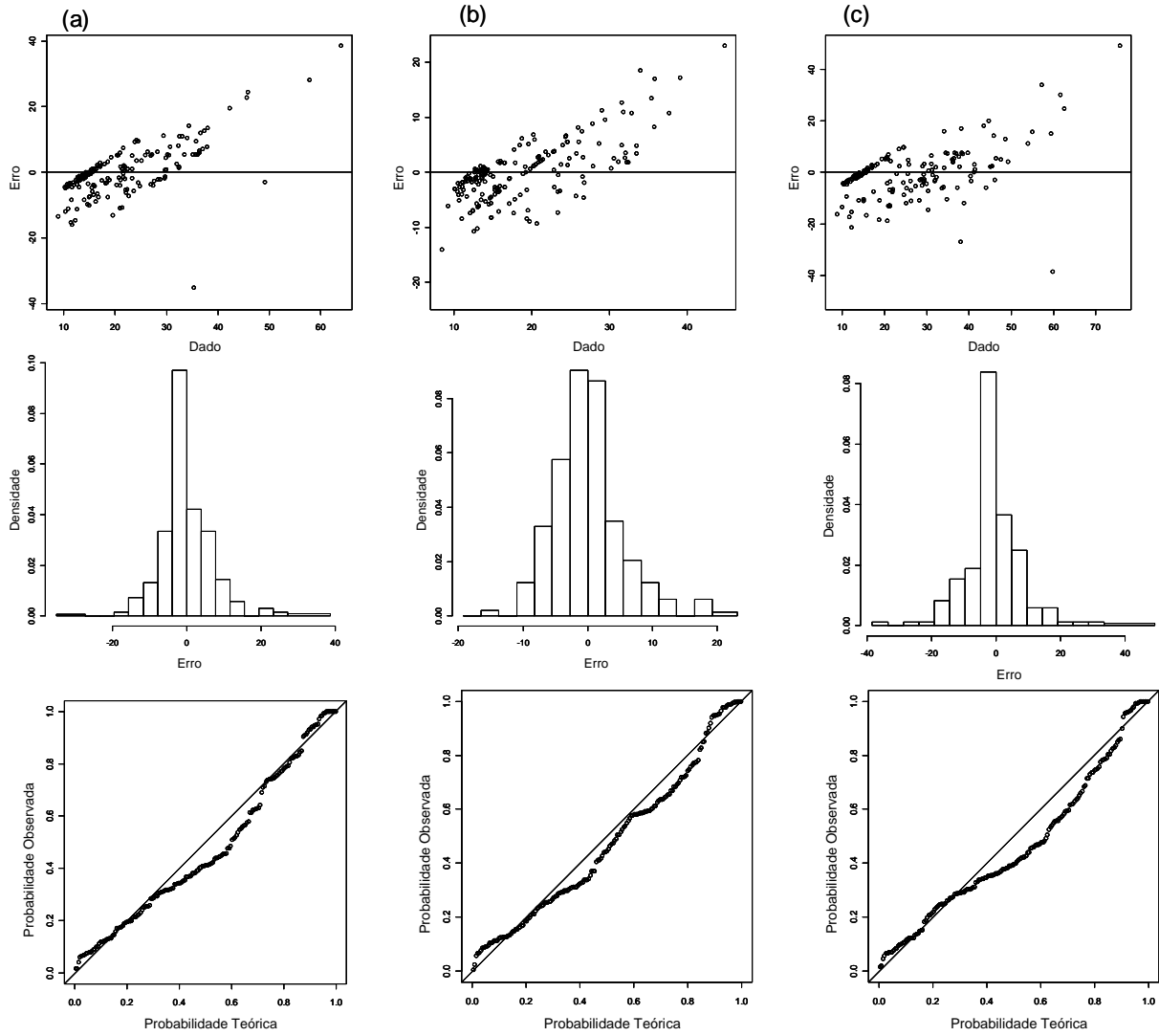
Distribuição do erro em relação aos dados (acima), Histograma do erro da krigagem na validação (centro) e Probabilidades do erro (abaixo) da Densidade aparente na (a) Profundidade 0-10 cm (b) Profundidade 10-20 cm (c) Profundidade 0-20 cm.

## ANEXO L - VALIDAÇÃO CRUZADA DO TEOR DE CARBONO



Distribuição do erro em relação aos dados (acima), Histograma do erro da krigagem na validação (centro) e Probabilidades do erro (abaixo) do Teor de Carbono na (a) Profundidade 0-10 cm (b) Profundidade 10-20 cm (c) Profundidade 0-20 cm.

## ANEXO M - VALIDAÇÃO CRUZADA DO ESTOQUE DE CARBONO



Distribuição do erro em relação aos dados (acima), Histograma do erro da krigagem na validação (centro) e Probabilidades do erro (abaixo) do Teor de Carbono na (a) Profundidade 0-10 cm (b) Profundidade 10-20 cm (c) Profundidade 0-20 cm.