

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

**DISSERTAÇÃO**

**Espacialização da Densidade do Solo e do Estoque de Carbono da Bacia Guapi-Macacu/RJ, Determinados por Meio de Funções de Pedotransferência (FPTs)**

**Wesly Jeune**

**2012**



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

**ESPACIALIZAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO E DO ESTOQUE DE  
CARBONO DA BACIA GUAPI-MACACU/RJ, DETERMINADOS POR  
MEIO DE FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA (FPTS)**

**WESLY JEUNE**

*Sob a Orientação do Professor*  
**Márcio Rocha Francelino**

*e Co-orientação do Pesquisador*  
**Waldir de Carvalho Junior**

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

Seropédica, RJ  
Fevereiro de 2012

631.478153

J58e

T

Jeune, Wesly, 1972-

Espacialização da densidade do solo e do estoque de carbono da Bacia Guapi-Macacu/RJ, determinados por meio de funções de pedotransferência (FPTS) / Wesly Jeune – 2012.

52.: il.

Orientador: Márcio Rocha Francelino.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia.

Bibliografia: f. 48-52.

1. Solos – Levantamento – Rio de Janeiro (Estado) – Teses.
2. Solos – Levantamento – Macacu, Rio (RJ) – Teses.
3. Plantas – Efeito do carbono – Teses. I. Francelino, Márcio Rocha, 1966- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

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

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

**WESLY JEUNE**

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

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/02/2012

---

Márcio Rocha Francelino. Dr. UFRRJ  
(Orientador)

---

Gustavo M. Vasques. Ph.D. Embrapa Solos

---

Michele Duarte de Menezes. Dra. UFRRJ.

## **DEDICATORIA**

A minha esposa Marie Eley  
Aos meus filhos Bercy e Kari  
A minha mãe Mélieuse  
Eu dedico.

## AGRADECIMENTOS

A Deus por sua bondade e o seu amor, por ter-me proporcionado o necessário para superar as dificuldades, agradeço-te.

A todo o corpo discente do curso CPGA-CS, pela valiosa contribuição na minha formação.

Ao meu orientador, Prof. Márcio Rocha Francelino, pela confiança, paciência, amizade e o incentivo de superar obstáculos cada vez mais desafiadores.

Ao meu Co-orientador, Waldir de Carvalho Junior, pelo apoio inestimável, atenção e amizade antes e durante a elaboração deste trabalho.

À Universidade Federal Rural de Rio de Janeiro (UFRRJ), especialmente ao CPGA-CS/UFRRJ pelo privilegio de realização deste curso.

Ao CNPq pela concessão da bolsa através do Programa PEC-PG;

À EMBRAPA Solos, por todo o apoio logístico na elaboração desta dissertação;

Ao professor Marcos Bacis Ceddia pelos valiosos ensinamentos em geoestatística;

Ao professor Wagner Tassinari pela ajuda na área estatística;

Ao Sr. Kipman, Tatiana, Patricia e Rafael por todo apoio e incentivo;

Aos colegas da pós-graduação do CPGA-CS pela amizade e carinho;

À equipe do Laboratório GEOFLORA, agradeço do fundo do meu coração;

Ao meu amigo Gessimar pela ajuda no português;

A todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram para a realização deste estudo.

## **BIOGRAFIA**

WESLY JEUNE nasceu em 15 de abril de 1972, filho de Gerard Jeune e Mélieuse Casimir, é natural de Petit-Goâve, Haiti. Em julho de 1999, concluiu o curso de graduação em agronomia pela “*Faculté d’Agronomie et de Médecine Vétérinaire (FAMV)/Université d’État d’Haiti (UEH)*”. Trabalhou no BEJV (Bureau d’Études Jacqueline Volel), PLAN CONSULT, IICA (Instituto Inter-Americano de Cooperação para Agricultura), na Embaixada brasileira no Haiti, especificamente no núcleo de cooperação técnica, e participou em vários estudos e trabalhos na área de engenharia rural no Haiti. Em março de 2010, iniciou o curso de pós-graduação, em nível de Mestrado em Agronomia - Ciência do Solo, na área de concentração Morfologia, Gênese e Classificação de Solos, submetendo-se à defesa em 24 de fevereiro de 2012.

## RESUMO

JEUNE, Wesly. **Espacialização da densidade do solo e do estoque de carbono da Bacia Guapi-Macacu/RJ, determinados por meio de funções de pedotransferência (FPTs)**. 2012. 52f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

O presente trabalho teve como objetivo estimar e mapear a densidade do solo (Ds) e o estoque de carbono (EC) na bacia hidrográfica Guapi-Macacu, no Estado do Rio de Janeiro, utilizando metodologia de Mapeamento Digital de Solos (MDS). Os dados foram originados do levantamento de solos de alta intensidade, realizado pela EMBRAPA Solos durante o último trimestre de 2010 na região de estudo. Nessa etapa foram amostrados 99 perfis e destes, 66 tiveram valores de densidade determinados. Para validar as funções de pedotransferência desenvolvidas, 13 amostras foram reservadas e utilizadas na comparação com outras funções obtidas na literatura. Na análise do estoque de carbono, classes de cobertura do solo e de declividade foram usadas. Duas funções de pedotransferência da densidade do solo (Ds) foram derivadas a partir da regressão linear múltipla e da regressão não linear, utilizando 16 variáveis do solo e auxiliando-se no aplicativo estatístico *Statgraphics Centurion XVI*. Os procedimentos *Stepwise* e *Comparison of Alternative models* do referente programa permitiram escolher os melhores modelos mais simples, com resíduos normais,  $R^2$  maior e erro mínimo. No entanto, o modelo não linear, envolvendo somente a variável carbono orgânico (C) foi utilizado para a espacialização da Ds. Essa função permitiu estimar os valores de Ds para os outros perfis. A espessura do horizonte A apresentou correlação espacial na análise geoestatística realizada no programa GS+ 9, enquanto o C apresentou alta aleatoriedade. Em função disso, a espessura foi interpolada através da krigagem, o Corg através do interpolador determinístico IDW (Inverse Distance weight) e a Ds espacializada pela própria função de pedotransferência, usando a ferramenta *Raster Calculator* do programa *ArcGIS v. 10*. A Ds variou de 0,87 a 1,95  $Mg.m^{-3}$  e o estoque de carbono ( $Ec = Ds.C.E/10$ , em  $Mg.ha^{-1}$ ) de 9,2 a 212,2  $Mg.ha^{-1}$ . A análise de variância do estoque de carbono mapeado com relação ao uso do solo e as classes de declividade foi realizada através do teste LSD (*Least significant difference*) de Fisher. O resultado indicou que entre as classes de uso existe diferença significativa ao nível 5% de significância apenas entre as classes pastagem e campo de altitude. Para as seis classes de relevo, observou-se diferença significativa somente entre relevo plano e escarpado ao nível de 5%.

**Palavras-chave:** Mapeamento digital. Análise multivariada. Modelagem

## ABSTRACT

JEUNE, Wesly. **Spatialization of the soil bulk density and carbon stock in Guapi-Macacu (RJ) Basin, assessed by pedotransfer functions (PTFs)**. 2012. 52p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science) Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica , RJ, 2012.

This study aimed to model the soil attribute bulk density (BD) by pedotransfer function (PTFs), spatializing it and afterwards mapping the carbon stock (CS) in Guapi-Macacu watershed, in state of Rio de Janeiro, based on Digital Soil Mapping (DSM) methodology. The data used is derived from a high intensity soil survey carried out by “EMBRAPA Solos” during the last quarter of 2010 in the area. Thus, 99 soil profiles were sampled and analyzed, and of those, 66 had bulk density values determined. To validate the PTFs developed in the process, comparison with published functions was made from 13 samples that had been reserved. Two bulk density functions were derived from multiple linear regression and non-linear regression, using 16 variables and relying on the statistical software *Statgraphics Centurion XVI*. Stepwise procedures and Comparison of Alternative models of the related program helped to choose the best models which have greater simplicity, normal residuals, larger  $R^2$ , and minimum error. Nevertheless, the non-linear model, the one which involves the single organic carbon (OC) variable and which is easier to be determined, was used for spatialization of BD. This function allowed assessing BD value for the other soil profiles. Geostatistical analysis (semivariogram) performed from GS+ 9 program, showed spatial correlation of A horizon thickness, while OC exhibited high randomness. Since, A horizon thickness was spatialized through kriging interpolator, OC interpolated by the deterministic interpolator IDW (Inverse Distance weight) and BD mapped by using his pedotransfer function through *Raster Calculator* tools of *ArcGIS v. 10*. Bulk density varied from 0.87 and 1.95  $Mg.m^{-3}$ . Finally, the estimated carbon stock ( $CS = Ds.C.E/10$ ,  $Mg.ha^{-1}$ ) range was 9.2 to 212.2  $Mg.ha^{-1}$ , and was spatialized following the same bulk density process. Variance analysis of CS mapped regarding land use and slope classes were performed by Fisher LSD test. The results indicated that among the different land use classes, only pasture and altitude vegetation are significantly different at 5% risk. For the six slope classes, has been observed significant difference exclusively between flat land and steep area at 5% risk.

**Key words:** Digital mapping. Multivariate analysis. Modeling.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Funções de Pedotransferência publicadas.....	21
<b>Tabela 2.</b> Estatística descritiva dos dados físico-químicos.....	28
<b>Tabela 3.</b> Matriz de correlação entre as 16 variáveis do solo (continua) .....	29
<b>Tabela 4.</b> Estatística dos modelos de regressão de densidade do solo.....	31
<b>Tabela 5.</b> Análise da variância (ANOVA).....	31
<b>Tabela 6.</b> Estatística dos resíduos .....	32
<b>Tabela 7.</b> Testes da média e da normalidade dos resíduos para os dois modelos segundo os testes de Student e de Shapiro-Wilks respectivamente. ....	32
<b>Tabela 8.</b> Estatística da amostra independente .....	33
<b>Tabela 9.</b> Avaliação por comparação com outras FPTs. ....	33
<b>Tabela 10.</b> Testes de comparação das médias e dos desvios padrões segundo Student's, Fischer e testes de normalidade .....	35
<b>Tabela 11.</b> Estatística dos valores calculados e espacializados do estoque de carbono .....	42
<b>Tabela 12.</b> Testes t de comparação da média e F desvio padrão. ....	43
<b>Tabela 13.</b> Estoque de carbono em classes de uso na bacia Guapi-Macacu.....	44
<b>Tabela 14.</b> ANOVA do estoque de carbono em classes de uso.....	44
<b>Tabela 15.</b> Comparação múltipla das médias segundo o teste LSD de Fisher .....	44
<b>Tabela 16.</b> Estoque de carbono em classes de relevo .....	45
<b>Tabela 17.</b> ANOVA do estoque de carbono em classes de relevo .....	45
<b>Tabela 18.</b> Comparação múltipla das médias segundo o teste LSD de FISHER .....	46

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Mapa de localização da bacia do Guapi-Macacu.....	7
<b>Figura 2.</b> Isoietas totais anuais da bacia Guapi-Macacu, período 1968- 1995 .....	8
<b>Figura 3.</b> Geologia da Bacia Guapi-Macacu. ....	9
<b>Figura 4.</b> Lentes quartzíticas em material intemperizado na região da bacia do Macacu. ....	10
<b>Figura 5.</b> Sedimentos Colúvio-Aluvionares que ocupam os leitos dos rios e paleocanais no baixo Macacu .....	10
<b>Figura 6.</b> Material referente a Formação Macacu .....	11
<b>Figura 7.</b> Corte estratigráfico da bacia do Macacu.....	11
<b>Figura 8.</b> Geomorfologia da Bacia Guapi-Macacu.....	12
<b>Figura 9.</b> Classes de solos da Bacia Guapi-Macacu e porcentagem de ocorrência (mapa original reprojetoado, recortado e vetorizado).....	14
<b>Figura 10.</b> Perfil topográfico do rio Macacu. ....	15
<b>Figura 11.</b> Uso do solo e distribuição em porcentagem. ....	16
<b>Figura 12.</b> Pontos amostrados no levantamento de solos. ....	18
<b>Figura 13.</b> Abordagem em mapeamento digital. ....	22
<b>Figura 14.</b> Modelo de semivariograma.....	23
<b>Figura 15.</b> Fluxograma geral das etapas de processamento do estudo inspirado da abordagem DSM, SANCHEZ (2010).....	24
<b>Figura 16.</b> Procedimentos de escolha do tamanho da célula (CARVALHO JÚNIOR, 2005) .....	25
<b>Figura 17.</b> Valores observados e preditos para as FPTs propostas e publicadas.....	34
<b>Figura 18.</b> Modelo de semivariograma respectivamente do carbono e da espessura. ....	35
<b>Figura 19.</b> Espacialização da espessura do horizonte A.	
<b>Figura 20.</b> Espacialização do carbono orgânico. ....	36
<b>Figura 21.</b> Distribuição das classes de densidade do solo (Ds) na área. ....	37
<b>Figura 22.</b> Espacialização da densidade do solo (Ds). ....	37
<b>Figura 23:</b> Comparação visual dos MDEs com a curva original de cor vermelha.....	38
<b>Figura 24.</b> Modelo Digital de Elevação da bacia Guapi-Macacu.....	39
<b>Figura 25.</b> Distribuição em porcentagem das classes de altitude na bacia. ....	39
<b>Figura 26.</b> Classes de declividade da bacia Guapi-macacu. ....	40
<b>Figura 27.</b> Distribuição em porcentagem das classes de declive.....	40
<b>Figura 28.</b> Estoque de carbono na bacia Guapi-Macacu. ....	41
<b>Figura 29.</b> Distribuição em porcentagem da área dos valores do estoque de carbono. ....	41
<b>Figura 30.</b> Estoque de carbono reclassificado na bacia Guapi-macacu.....	42
<b>Figura 31.</b> Gráfico dos valores observados e preditos do estoque de carbono.....	43

## LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

APP	Área de Preservação Permanente
AW	Clima tropical com estação seca de inverno (classificação de Köppen)
C	Carbono orgânico
CE	Condutividade elétrica
CFPT	Classes de Funções de Pedotransferência
CTC	Capacidade de troca de cátions
Dp	Densidade das partículas
Ds	Densidade do solo
Ec	Estoque de carbono
FPT	Funções de Pedotransferência
FPTC	Funções de Pedotransferência Contínuas
Mg.m <sup>-3</sup>	Megagrama por metro cúbico
GEE	Gases de efeito estufa
GPS	Global Positioning System (Sistema de Posicionamento Global)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Mg.ha <sup>-1</sup>	Megagrama por hectare
N	Nitrogênio
NT	Nitrogênio total
Pg	Picograma
SIG	Sistema de Informações Geográficas
UTM	Universal Transverse Mercator

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>2</b>
2.1	Funções de Pedotransferência	2
2.2	Densidade do solo (Ds) e a sua Estimação por Funções de Pedotransferência	3
2.3	Estoque de Carbono no Solo e Função de Pedotransferência para sua Avaliação	4
2.4	Classificação e Incertezas das Funções de Pedotransferência (FPTs)	4
2.5	Mapeamento Digital de Solo (MDS)	5
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>7</b>
3.1	Área de Estudo	7
3.1.1	Localização	7
3.1.2	Clima	8
3.1.3	Geologia	8
3.1.4	Geomorfologia	12
3.1.5	Relações solo-paisagem	13
3.1.6	Vegetação	14
3.1.7	Hidrografia	15
3.1.8	Uso do solo	15
3.1.9	Aspecto socioeconômico	16
3.2	Levantamento de Solos, Amostragem e Análises	17
3.3	Delineamento Estatístico	18
3.3.1	Regressão linear múltipla	18
3.3.2	Regressão não-linear	19
3.4	Geração da Função de Pedotransferência (FPT)	20
3.5	Validação com Dados Independentes e Comparação com Outras FPTs	21
3.6	Espacialização da Densidade do Solo e do Estoque de Carbono no Horizonte A	22
3.7	Mapa de Uso do Solo	24
3.8	Modelo Digital de Elevação e Atributos do Terreno	24
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>27</b>
4.1	Análise Exploratória dos Dados	27
4.2	Funções de Pedotransferência Determinadas para a Densidade	31
4.3	Análise dos Resíduos	31
4.4	Avaliação dos Modelos com Relação a Parâmetros de Erros e por Comparação	32
4.5	Espacialização da Densidade do Solo	35
4.6	Avaliação e Definição do Tamanho da Célula do Modelo Digital de Elevação	37
4.7	Modelo Digital de Elevação (MDE) e Declividade	38
4.8	Espacialização do Estoque de Carbono	40
4.9	Comparação dos Valores Calculados com os Espacializados do Estoque de Carbono	42
4.10	Análise do Estoque de Carbono em Relação ao Uso do Solo	43
4.11	Análise do Estoque de Carbono com Relação ao Declive	44
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>47</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O solo, recurso natural considerado não renovável na escala humana, cumpre um papel fundamental no ciclo da vida. Sistema dinâmico constituído por componentes sólidos, líquidos e gasosos de natureza mineral e orgânica, ocupa a maior parte das superfícies continentais do planeta Terra.

Segundo Essington (2003), o solo é o recurso natural que mais contribuiu para o desenvolvimento humano e a sua existência contínua neste planeta. Nele ocorrem trocas físicas, químicas e biológicas entre os diferentes componentes do planeta: a biosfera, a litosfera, a atmosfera e a hidrosfera. É o suporte do crescimento das plantas, garantindo a sua reserva em água e nutrientes. Abriga muitos organismos e constitui um real reservatório de biodiversidade, sendo que vários destes são responsáveis pela decomposição da matéria orgânica restituída no solo, conferindo-o assim uma função chave no ciclo do carbono.

Devido ao seu importante papel na produção de alimentos e regulamento do ciclo hidrológico, a demanda por dados de solos atualizados e relevantes está cada vez maior (SANCHEZ et al. 2009). No entanto, é reconhecido que o processo convencional de levantar, organizar e disponibilizar dados de solos é demorado e oneroso, o que justifica o uso de ferramentas matemáticas, estatísticas e de computação para superar essas limitações.

O uso de técnicas de mapeamento digital de atributos de solos, com destaque para as funções de pedotransferência, tem sido cada vez mais comum nas últimas duas décadas, devido principalmente aos avanços tecnológicos em outras áreas, principalmente da informática.

As informações habitualmente encontradas nos bancos de dados de levantamentos pedológicos não incluem a densidade do solo ( $D_s$ ) e valores do estoque de carbono ( $E_c$ ), que são dois parâmetros importantes na avaliação do nível de conservação do solo quanto ao seu uso, além de influenciarem nas suas propriedades hidrodinâmicas.

Nesse sentido, esse estudo teve como objetivo gerar dados da densidade do solo e de estoque de carbono através do uso de Funções de Pedotransferência (FPT) nas bacias dos rios Guapiaçu e Macacu, no Estado do Rio de Janeiro. A hipótese do estudo é de que a utilização de dados de campo correlacionados, associados a modelos estatísticos e geoestatísticos podem subsidiar o mapeamento de propriedades do solo, tais como estoque de carbono e densidade do solo.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Funções de Pedotransferência

As propriedades físico-químicas do solo são altamente variáveis nas dimensões espaço-temporais e suas determinações tanto no campo como no laboratório representam elevado custo em termos financeiro e de tempo, e, em muitos casos, fornecem apenas resultados pontuais, o que justifica o desenvolvimento de métodos indiretos a partir de dados secundários que tentam estimar resultados semelhantes (RAWLS et al., 1982) e contínuos na superfície, o que é alcançado utilizando as equações de pedotransferência, que foram desenvolvidas para expressar as relações entre as propriedades do solo (BOUMA E VAN LANEN, 1987).

As funções de pedotransferência constituem um meio de se estabelecer relações entre os dados de solo disponíveis e as grandezas necessárias para os modelos que descrevem o seu funcionamento (BRUAND et al., 1994; BRUAND et al., 1996), conformando-se em funções preditivas de determinadas propriedades do solo a partir de outras facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos.

Nesse contexto, o princípio para desenvolver FPTs é o menor custo e o esforço para obter a informação sobre o preditor em relação ao que se pretende prever. Assim, segundo Minasny et al. (2003), as FPTs atendem às demandas por dados frequentemente requeridos a partir de dados normalmente disponíveis em levantamentos de solos e bases de dados, portanto, são relações empíricas cuja exatidão fora da área onde foram desenvolvidas não é totalmente conhecida.

As FPTs são estabelecidas através de modelos matemáticos e correspondem a diferentes modelos empíricos que descrevem de maneira contínua a relação que pode existir entre as várias características do solo (composição granulométrica, teor em carbono orgânico, densidade do solo, etc.) (SCHAETZL & ANDERSON, 2005).

Essas funções são comumente usadas para prever características hidráulicas do solo, porém podem também ser usadas para estimar as características químicas, físicas e biológicas do solo. Timm et al. (2006) geraram FPTs para estimar o nitrogênio total (NT) em solos sob uso agrícola; Zinn et al. (2005) encontraram boa relação entre C e N em solos tropicais. Heumann et al. (2003) usaram FPTs para prever o processo de mineralização do nitrogênio orgânico em solo arênico cultivado no noroeste da Alemanha.

Nas últimas décadas, muitas FPTs têm sido geradas por pesquisadores de vários países, usando diferentes metodologias, diversos grupos de dados e variáveis de entrada. Porém, ainda não existe um método que permita adequar o modelo de pedotransferência a diferentes regiões (PACHEPSKY & RAWLS, 2004). Pelo fato da maioria das FPTs ser desenvolvida em países sob clima temperado, dificulta a aplicabilidade dessas funções em países tropicais com características edáficas distintas (TOMASELLA et al., 2000).

No Brasil existem alguns trabalhos relacionados às FPTs, sendo a maioria voltada para a estimativa das características hidrodinâmicas do solo. Tomasella & Hoodnett (1998) desenvolveram equações de FPT para a região amazônica com base em regressão linear múltipla, para prever parâmetros de Brooks-Corey, utilizando informações sobre a textura, densidade, porosidade e conteúdo de água no solo. Foi encontrada alta significância da correlação entre valores medidos e valores estimados neste estudo. Posteriormente Tomasella et al., (2000) estabeleceram FPT para estimar a capacidade de retenção de água nos solos brasileiros. Já Oliveira et al., (2002) desenvolveram FPT para a predição da umidade retida a

potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco e Benites et al., (2006) propuseram FPTs para prever a densidade dos solos brasileiros.

Porém, esses trabalhos, apesar de relevantes foram efetuados em extensas áreas em escala pequena, às vezes com poder de generalização limitado.

## 2.2 Densidade do solo (Ds) e a sua Estimação por Funções de Pedotransferência

A densidade do solo está relacionada à natureza e a organização dos seus constituintes (CHAUVEL, 1977) e permite calcular a porosidade e avaliar indiretamente a permeabilidade, a resistência à penetração das raízes (MAERTENS, 1964), além da reserva de água do solo. É conhecido que valores elevados de Ds podem constituir impedimento mecânico para o crescimento de raízes e conseqüentemente o desenvolvimento das plantas.

A sua determinação trata da relação entre a massa do solo e o volume que este ocupa. Diferentemente da densidade das partículas (Dp), a Ds considera o volume de vazios, os quais se apresentam preenchidos de ar e água, por isso os valores de Ds são sempre menores que da Dp; ao se considerar o volume de vazios, aumenta-se o valor do denominador na fórmula. Já a densidade das partículas (Dp) da maioria dos materiais constituintes do solo varia aproximadamente entre 2,65 – 2,70 Mg.m<sup>-3</sup>. Esse intervalo constitui o limite superior teórico da densidade do solo, embora na realidade apenas alguns solos muito densos, compactados alcancem Ds acima de 2,3 Mg.m<sup>-3</sup> (SCHAETZL & ANDERSON, 2005).

Segundo Costa et al. (2003), a Ds tende a aumentar com a profundidade, o que se deve a fatores tais como: teor reduzido de matéria orgânica, menor agregação, menor penetração de raízes, maior compactação ocasionada pelo peso das camadas subjacentes, diminuição da porosidade total devido a eluviação de argila, dentre outros.

Conforme Carvalho et al. (2007), atributos físicos como a densidade e umidade são indicadores da qualidade do solo, ou seja, a capacidade deste em proporcionar as condições adequadas à produtividade biológica, a qualidade ambiental e a vida vegetal e animal (DORAN & PARKIN, 1994).

Solos e horizontes com valor alto de matéria orgânica tendem a ter densidades do solo mais baixas, porém, segundo Franzluebbers (2002), a influência do aumento do teor da matéria orgânica não é linear, pois a densidade do solo reduz e tende a estabilizar na faixa de densidade dos solos orgânicos. Surpreendentemente, solos de textura argila e siltosa tendem a apresentar baixas densidades de solo, enquanto solos com texturas franco-arenosa e franco-argilo-arenosa têm maior possibilidade de apresentar alta densidade (BERNOUX et al., 1998). Esses autores também afirmam que a densidade do solo alta está frequentemente associada a solos de textura franca, onde a argila e silte podem preencher os poros maiores entre grãos de areia, potencializando a matriz do solo enquanto solos argilosos apresentam muitos microporos.

Segundo Benites et al. (2006), a densidade do solo é essencial para estimar o estoque de carbono no solo. O estudo aponta que medições diretas desta propriedade através de amostras de campo, especialmente em profundidade, são trabalhosas e geralmente impraticáveis. Por isso, a predição da Ds através de FPT revela-se uma alternativa relevante para se estimar esse atributo quando não está disponível por meios convencionais de análise.

No Brasil, Bernoux et al. (1998) e Tomasella & Hodnett (1998) forneceram a primeira base para prever a Ds a partir das propriedades dos solos na Bacia Amazônica. Esses autores, usando o procedimento de regressão múltipla com inclusão progressiva de variáveis (“*forward stepwise*”), mostraram que o conteúdo de argila, o carbono orgânico, o pH e a granulometria são os melhores preditores de Ds para os solos daquela região. Posteriormente, os resultados de Bernoux et al. (1998) foram utilizados para estimar o estoque de carbono (massa de carbono por área) para solos similares em todo o Brasil (BERNOUX, 2002).

### 2.3 Estoque de Carbono no Solo e Função de Pedotransferência para sua Avaliação

O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres, representando aproximadamente quatro vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C) (MACHADO, 2005).

O carbono orgânico do solo é de importância local no sentido que determina o funcionamento do agro-ecossistema, influenciando a fertilidade do solo, a capacidade de armazenamento da água e muitas outras funções. Também possui importância global pelo seu papel no ciclo de carbono e conseqüentemente, desempenha uma função central na mitigação ou degradação do nível atmosférico dos gases de efeito de estufa (GEE).

Estudos experimentais conduzidos a longo prazo mostram que o carbono do solo é altamente sensível a mudanças no modo de uso do solo, sobretudo quando ocorre a alteração de ecossistemas nativos como as florestas para sistemas agrícolas, resultando quase sempre em perda (JENKINSON & RAYNER, 1977). Ou seja, o tipo de uso do solo afeta o estoque e a dinâmica do carbono nesse substrato, como também depende do tipo de solo e do seu nível de degradação. As maiores mudanças no uso da terra e no estoque de carbono orgânico no solo ocorrem nas regiões tropicais (GEFSOC, 2006).

Conforme Minasny et al. (2006), a distribuição do conteúdo de carbono com a profundidade é uma informação essencial para estimar o estoque de carbono, que convencionalmente é calculado somando a densidade de carbono das diferentes camadas, conforme equação a seguir:

$$C_1 = \sum_{j=1}^n (C_{mj} \times \rho_j) \times T_j$$

Onde  $C_1$ : densidade de carbono ( $\text{kg.m}^{-3}$ );  
 $C_m$ : conteúdo de carbono em massa ( $\text{kg.kg}^{-1}$ ),  
 $\rho$ : densidade do solo ( $\text{kg.m}^{-3}$ ); e  
 $t$ : a espessura da camada (m).

Expressar o estoque de carbono em função da profundidade é vantajoso quando se trata de base de dados de solo onde as profundidades não são amostradas completamente e uniformemente (ARROUAYS & PÉLISSIER, 1994).

Nesse contexto, o monitoramento do estoque de carbono no solo é de suma importância para permitir entender o processo evolutivo do solo e ao mesmo tempo ajudar a encontrar estratégia para potencializar o seu seqüestro (GEFSOC, 2006).

### 2.4 Classificação e Incertezas das Funções de Pedotransferência (FTPs)

Segundo Wösten et al. (1995), as FTPs podem ser classificadas como Funções de Pedotransferência por Classe (CFPT) ou Contínuas (FPTC) (WÖSTEN et al., 1995). A primeira permite uma correspondência entre as propriedades hídricas e a classe de solo; enquanto que a FPTC prediz certas propriedades dos solos como uma função contínua das variáveis medidas. A CFPT, ainda segundo esses autores, apresenta capacidade de estimação de baixa qualidade comparativamente a FPTC.

Apesar das incertezas associadas, as CFPTs possuem a vantagem de serem de fácil uso, requerendo poucas informações sobre o solo e conseqüentemente são mais adaptadas para estimar as propriedades de retenção da água em escalas regionais (MAJOU et al., 2007).

Entretanto, Nemes et al., (2003) mostram que o uso de CFPT e FPTC estabelecidas em determinada escala de área, fornecem resultados pouco confiáveis quando aplicadas em escala diferente. Tomasella et al., (2003) também mostram que quando CFPT e FPTC estabelecidas em determinada escala de área e aplicada na mesma escala, mas em solos de naturezas muito distintas, a qualidade das predições é relativamente inferior as aplicadas em solo de natureza similar.

Segundo Minasny e McBratney (2002), um fator importante que deve ser levado em consideração é a incerteza da predição, que pode resultar dos próprios modelos, dos parâmetros estimados e de equívocos na escolha das variáveis de entrada. Em várias aplicações não está sendo admitida apenas a modelagem de processos, mas também fornecer a melhor predição a partir dos resultados do modelo (IMAN, 1992).

A incerteza nos resultados tem que ser consideradas, bem como, identificar as principais variáveis responsáveis. Por isso, a análise de incerteza deve ser realizada para julgar a confiabilidade da predição. Porém, as incertezas raramente são avaliadas nas FPTs. Vereecken et al. (1989) estimaram os erros nas FPTs hidráulicas e avaliaram os efeitos sobre os resultados do modelo de fluxo da água no solo e confirmaram a necessidade de conhecer sua variação para se determinar o modelo mais adequado.

A incerteza associada a um modelo pode ser calculada por método não paramétrico tipo “*bootstrap*”, conforme Efron & Tibshirani (1993).

## **2.5 Mapeamento Digital de Solo (MDS)**

O mapeamento de solos é uma abordagem morfogenética baseada nos processos de formação do solo e nas características morfológicas e é proveniente das idéias de Dokuchaev (1883) e Jenny (1941) (BEHRENS & SCHOLTEN, 2006). Com a evolução da tecnologia computacional nas últimas décadas, o mapeamento de solo tem passado a ser cada vez mais digitalizado ou automatizado.

O mapeamento digital de solo começou nos anos 70 (WEBSTER & BURROUGH, 1972) e acelerou-se significativamente nos anos 80 graças aos avanços em tecnologias de informação e sensoriamento remoto, computação, estatística e modelagem, informações espaciais e Sistema de Posicionamento Global (GNSS), sistemas de medida (como espectroscopia infravermelho), e mais recentemente, acesso on-line para informação espacializadas (SANCHEZ et al., 2009).

Ainda segundo Sanchez et al. (2009), o mapeamento digital de solo é essencialmente uma base de dados espaciais de propriedades de solo, baseada em amostragem estatística da paisagem. Amostras de campo são usadas para determinar a distribuição espacial das propriedades do solo, que são normalmente medidas em laboratório. Esses dados são usados para prever propriedades de solo em áreas não amostradas. Já para Behrens & Scholten (2006), o mapeamento digital tornou-se ferramenta que permite gerar informação de solo fornecendo soluções em relação às demandas crescentes por mapas de alta resolução.

Segundo Sanchez et al. (2009), existem três (3) principais etapas propostas para o mapeamento digital de solo:

- A primeira refere-se à entrada de dados e calibração espacial das covariáveis contíguas a partir de dados disponíveis, as quais refletem os fatores de formação de solo incluindo informação climática (temperatura, chuva, evaporação); cobertura vegetal, e grupos de dados do terreno;

- A segunda etapa procura estimar as propriedades do solo expressas em probabilidade de ocorrência. São derivadas a partir do uso de relações quantitativas entre medidas realizadas

em certos pontos do solo e as covariáveis espacialmente contínuas. Isso resulta em mapa de propriedades de solo tais como: quantidade de argila, carbono orgânico, pH, CTC, condutividade elétrica (CE) e a densidade de solo. Esse processo facilita a produção de mapas de vários sistemas de classificação de solo.

- A terceira etapa refere-se às propriedades de solo usadas para prever outras propriedades e/ou atributos de difícil determinação tais como: disponibilidade de água, densidade de carbono e fixação de fósforo. Isto passa a ser possível pela utilização de função de pedotransfêrencia (FPT).

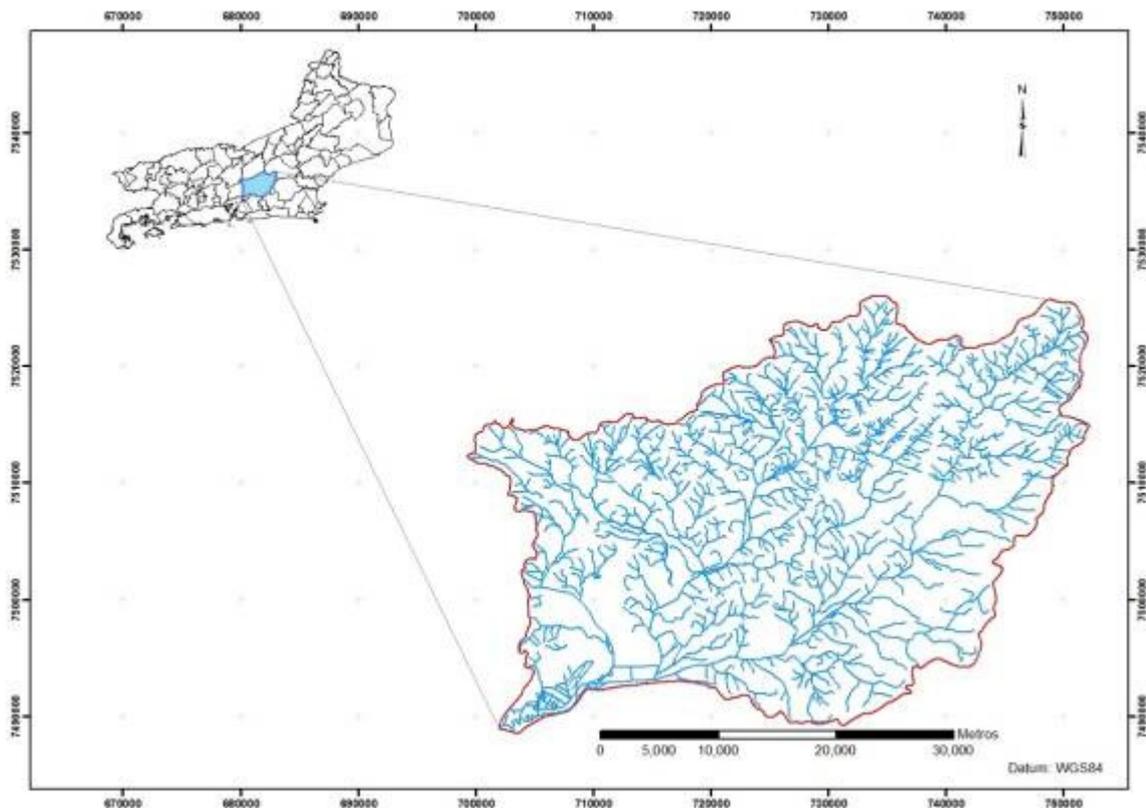
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

##### 3.1.1 Localização

A área do estudo está localizada na bacia hidrográfica dos rios Guapiaçu e Macacu (Guapi-Macacu), no Estado do Rio de Janeiro, entre as latitudes médias de 22°21' e 22°47'S e de longitudes médias de 42°33' e 43°2'W (Figura 1). É limitada ao norte e noroeste pela serra dos Órgãos, a nordeste pela serra de Macaé de Cima, a leste pelas serras da Botija e de Monte Azul e ao sul pelas serras do Sambê e dos Garcias. Abrange os municípios de Itaboraí, Cachoeira de Macacu e Guapimirim.

Essa bacia hidrográfica é constituída pelos rios Macacu, Guapiaçu e Guapimirim, totalizando uma área de 1.640 km<sup>2</sup> (IBGE, 2002, DANTAS, 2007), no entanto, para esse estudo foi considerado uma área de 1.250 km<sup>2</sup>. O rio Guapi-Macacu teve o seu nome originado a partir da construção do canal de Imunana que reduziu a incidência das frequentes inundações consequentes da confluência dos rios Macacu e Guapi-Açu (DANTAS, 2007). Ao ser desviado do seu curso natural, o rio Macacu passou a desaguar no rio Guapimirim (DANTAS, 2007).



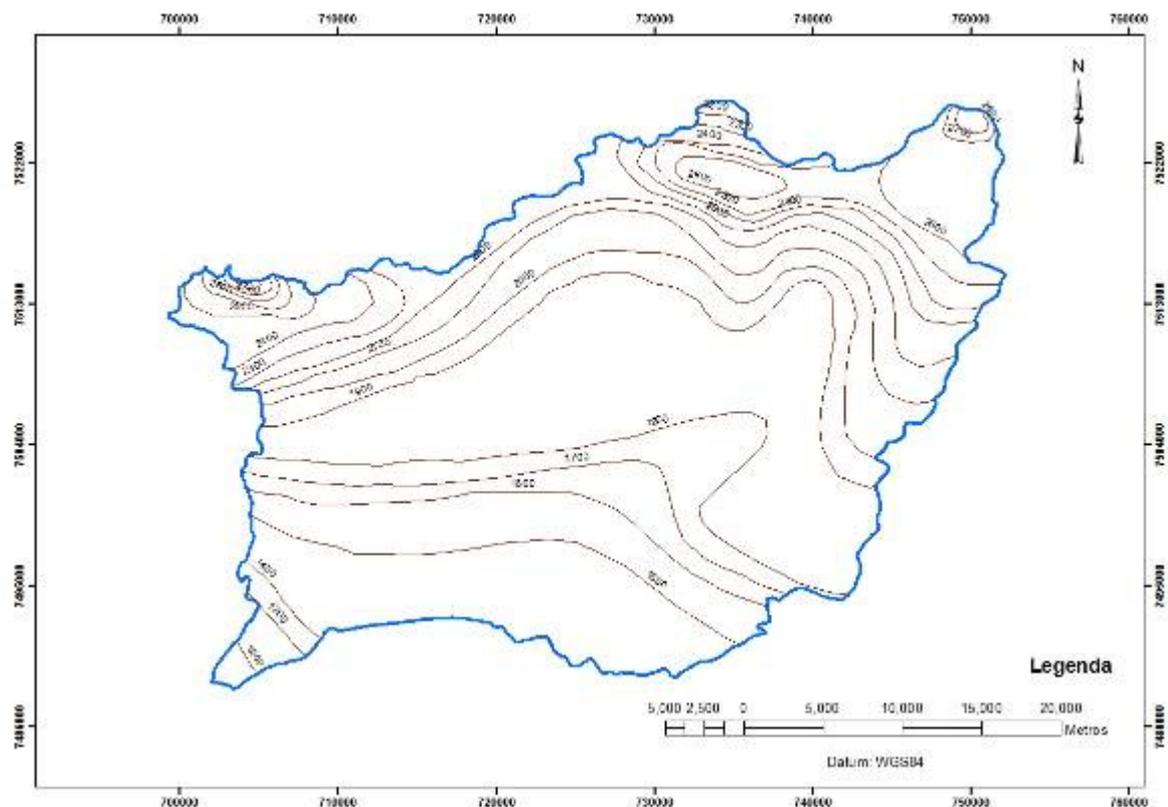
**Figura 1.** Mapa de localização da bacia do Guapi-Macacu.

Fonte: IBGE para os dados de base

### 3.1.2 Clima

O clima na região é do tipo Aw, de acordo com a classificação de KÖPPEN, sendo quente e chuvoso, tipicamente tropical, com médias de chuvas anuais entre 1.200 e 1.600 mm (AMADOR, 1997) nas baixadas e atinge 2.500 mm nas escarpas (DANTAS et al., 2000) (Figura. 2). A umidade relativa média anual do ar é de 83%, e a temperatura varia de 9° a 35°C, com a média anual oscilando entre 18° a 23°C.

Os meses do verão são bastante úmidos com pluviosidade de até 350 mm. Já no inverno (período seco) este padrão se reverte, quando as pluviosidades não ultrapassam 90 mm por mês. Observa-se ainda que a pluviosidade se intensifique em direção a Serra do Mar, onde os valores são bastante elevados. A chuva abastece abundantemente os solos da região, contudo, a reduzida dimensão das bacias de drenagem não permite a criação de um estoque de água, como é o caso do Rio Paraíba do Sul (CÔRTEZ et al., 2010).

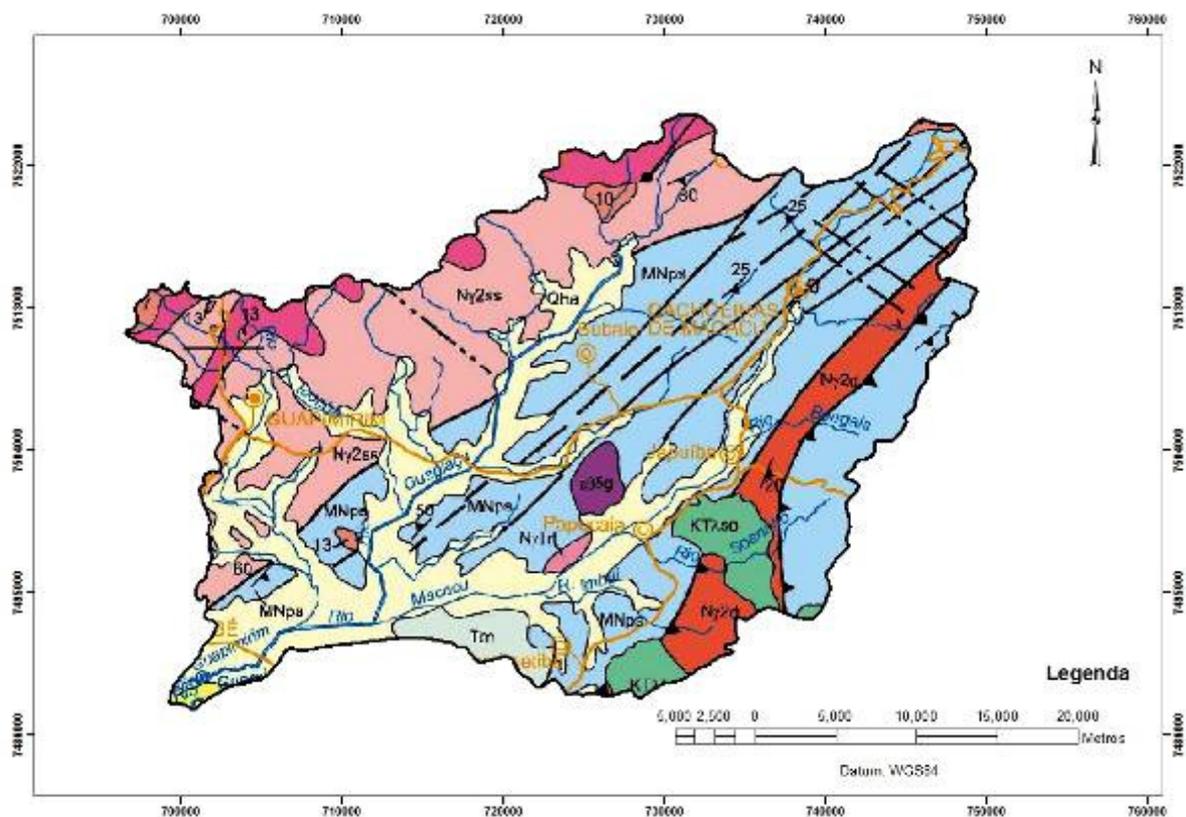


**Figura 2.** Isoietas totais anuais da bacia Guapi-Macacu, período 1968- 1995 (precipitação em mm).

Fonte: CPRM/BRANDÃO et al. (2000).

### 3.1.3 Geologia

Na bacia são encontradas diversas formações geológicas e de diferentes idades (Figura 3). As áreas pertencentes à cadeia da Serra do Mar estão formadas basicamente por rochas intrusivas e metamórficas Paleozóicas (granitos e gnaisses) do Complexo Paraíba do Sul, expostas em diversos pontos, sendo composta de três unidades estratificadas: um corpo intrusivo sirogenético, rochas intensamente migmatizadas e corpos graníticos pós-orogênese (Granito Nova Friburgo) (DANTAS et al., 2000). Neste Complexo é comum a presença de substratos intemperizados de gnaisses apresentando lentes quartzíticas remanescentes com espessura variável (Figura 4).



**Figura 3.** Geologia da Bacia Guapi-Macacu.

*MNps: Complexos Paraíba do Sul; Ny2ss: Unidade Santo Aleixo; Ny2d: Desengano; Qha: Depósito Colúvio-Aluvionar; KTlsO: Rochas alcalinas cretácicas/terciárias; Ny1rt: Gnaiss Tingüi; eβ5g: Complexo Básico de Gleba Ribeira; TM : Formação Macacu; Qphm: Depósito Marinho e Flúvio-Marinho.*

Fonte: CPRM/Dantas (2000)

O relevo movimentado é oriundo dos falhamentos e dobramentos da morfoestrutura geológica, que resultaram num embasamento complexo, cuja origem está relacionada a movimentos tectônicos iniciados há aproximadamente 80 milhões de anos (período Cretáceo), com o soerguimento da borda do continente (epirogênese) em todo o sudeste brasileiro (DANTAS et al., 2000).



**Figura 4.** Lentes quartzíticas em material intemperizado na região da bacia do Macacu.

Outra unidade é a Santo Aleixo, localizada em toda parte oeste da bacia, constituída por granada-hornblenda-biotita granodiorito, rico em xenólitos de paragneisse parcialmente fundido e assimilado (migmatito de injeção). São igualmente comuns intrusões tardias de leucogranito tipo-S (DANTAS et al., 2000). Das formações Quaternárias, se destaca o depósito Colúvio-Aluvionar que ocupa principalmente os terraços fluviais e linhas de drenagem. Essa unidade está constituída de depósitos fluviais e flúvio-marinhos areno-silto-argilosos, com camadas de cascalheiras associados a depósitos de tálus nas áreas próxima das escarpas serranas, e sedimentos lacustrinos e de manguezais retrabalhado no trecho final da bacia (DANTAS et al., 2000) (Figura5).



**Figura 5.** Sedimentos Colúvio-Aluvionares que ocupam os leitos dos rios e paleocanais no baixo rio Macacu.

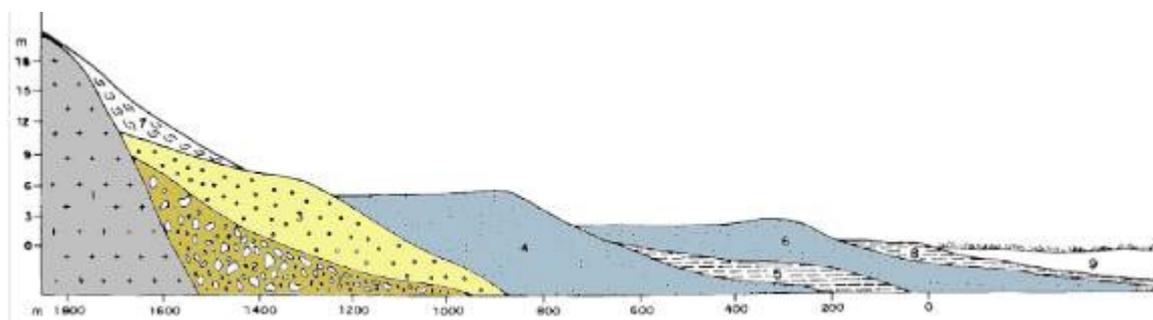
No interior da bacia do rio Macacu, observam-se duas unidades sedimentares: a Formação Macacu, constituída de sucessão de lentes e camadas pouco espessas de sedimentos predominantemente arenosos, arredondados e pouco consolidados, de idade pliopleistocênica, e a unidade “pré-Macacu”, definida como “produto da colmatção de blocos tectonicamente rebaixados no Terciário Médio” (DANTAS, 2000; EIRADO et al, 2003a;b) (Figura 6).



**Figura 6.** Material referente à Formação Macacu.

O processo evolutivo desses sedimentos está relacionado ao do Grupo Barreiras (RADAMBRASIL, 1983), embora essa correlação tenha sido reavaliada, pois os dados estratigráficos (CABRAL et al., 1992), palinológicos e geocronológicos (LIMA et al., 1996) e estruturais (SANTOS et al., 2007) dissociam os sedimentos Macacu e pré-Macacu e os considerará como parte de uma bacia tafrogênica relacionada ao Sistema de *Riftes* Continentais do Sudeste do Brasil (SRCSB) (RICCOMINI & RODRIGUES-FRANCISCO, 1992).

Segundo SANT’ANA (1999), a bacia do Macacu foi preenchida por um pacote sedimentar eocênico-oligocênico, depositado em ambiente de leques aluviais, intercalado com fácies de natureza provavelmente lacustre (Figura 7). A maior parte dos afloramentos rochosos é composta de granitos, que em alguns casos já foram ‘inselbergs’ no passado, acompanhados nas áreas de baixada de áreas sedimentares, oriundas da decomposição química das rochas graníticas (DANTAS et al., 2000).



**Figura 7.** Corte estratigráfico da bacia do Macacu.

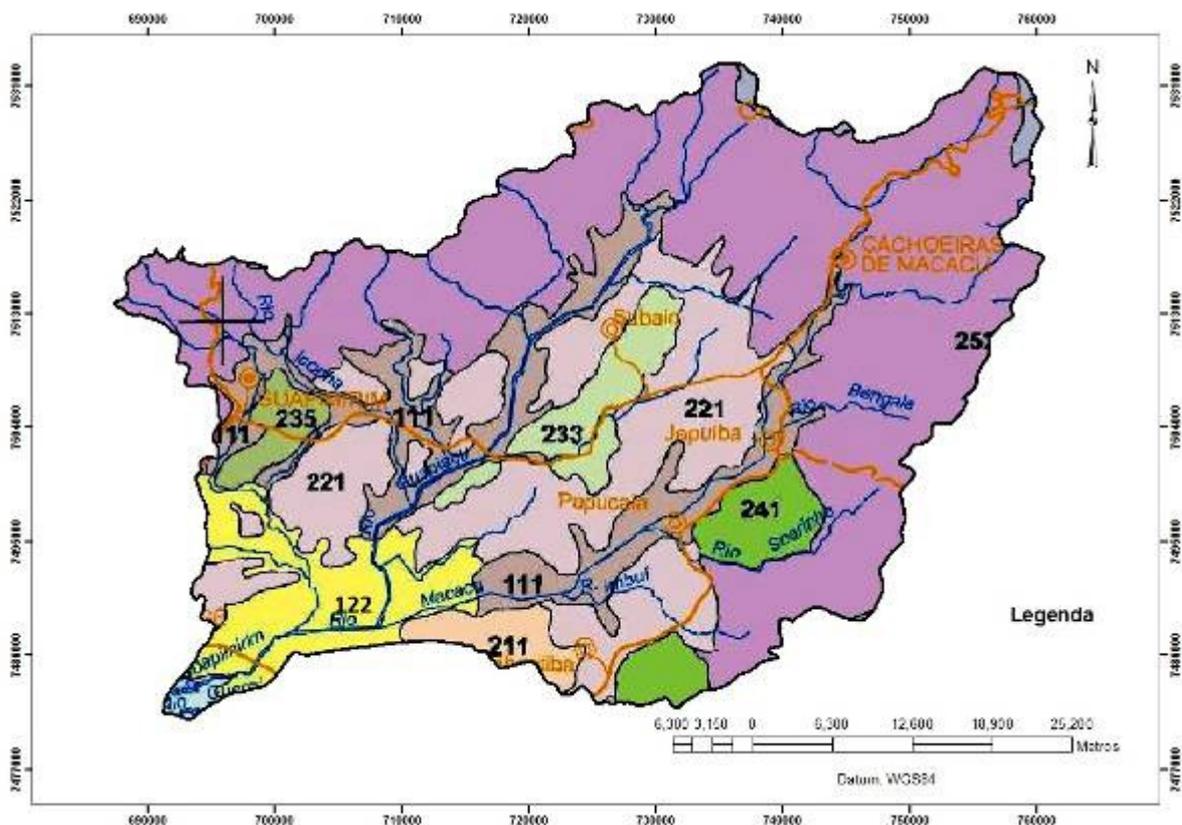
1= Complexo Cristalino; 2= Formação Macacu; 3= Depósitos Colúvio-aluviais; 4 e 6= Terraços Marinheiros; 5= Depósito de Mangue; 7= Colúvio; 8= Mangue atual e 9= Baía da Guanabara.

### 3.1.4 Geomorfologia

A bacia Guapi-Macacu apresenta uma grande variedade de paisagens, com altitudes ultrapassando os 2.000 m. Os sistemas de relevo (Figura 8) foram agrupados, segundo Dantas (2000), nas seguintes classes:

- Escarpas Serranas: caracterizadas por relevo montanhoso, extremamente acidentado, transicional entre dois sistemas de relevo. Apresentam vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados. A densidade de drenagem é muito alta com padrão de drenagem variável, de paralelo a dendrítico, ou treliça a retangular. Há predomínio de amplitudes topográficas superiores a 500m e gradientes muito elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus, solos rasos e afloramentos de rocha;

- Colinas Isoladas: são formas de relevo residuais com vertentes convexas e topos arredondados ou alongados com sedimentação de colúvios, remanescentes de afogamento generalizado do relevo produzido pela sedimentação flúvio-marinha que caracteriza as baixadas litorâneas. Densidade de drenagem muito baixa com padrão de drenagem dendrítico e drenagem imperfeita nos fundos de vales afogados. Apresenta predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 100 m e gradientes suaves;



**Figura 8.** Geomorfologia da Bacia Guapi-Macacu. (Fonte: CPRM/Dantas (DANTAS, 2000)  
111: Planícies aluviais; 122: Planícies Colúvio-Alúvio-Marinhas; 211: Tabuleiros; 221: Colinas Isoladas; 233: Domínio de Colinas Dissecadas, Morrotes e Morros Baixos; 235: Alinhamentos Serranos e Degraus Estruturais; 241: Maciços Intrusivos Alcalinos; 252: Escarpas Serranas

- Maciços Intrusivos Alcalinos: são relevos dômicos sustentados por Maciços Alcalinos, com vertentes predominantemente retilíneas a côncavas, escarpadas, com topos

arredondados, por vezes preservando uma borda circular (cratera vulcânica erodida). Densidade de drenagem alta com padrão de drenagem radial ou anelar. Predomínio de amplitudes topográficas superiores a 500m e gradientes elevados a muito elevados, com sedimentação de colúvios e depósitos de tálus e solos rasos;

- Domínio de Colinas Dissecadas, Morrotes e Morros Baixos: Trata-se das áreas com relevo de colinas dissecadas, com vertentes convexo-côncavas e topos arredondados e/ou alongados e de morrotes e morros dissecados, com vertentes retilíneas e côncavas e topos aguçados ou alinhados, com sedimentação de colúvios e alúvios. Densidade de drenagem média a alta com padrão de drenagem variável, de dendrítico a treliça ou retangular. Essa unidade apresenta predomínio de amplitudes topográficas entre 100 e 200m e gradientes suaves a médios;

- Alinhamentos Serranos e Degraus Estruturais: descritos como relevo de patamares litoestruturais, com vertentes predominantemente retilíneas a côncavas e escarpadas e topos de cristas alinhadas, aguçados ou levemente arredondados, que se destacam topograficamente do domínio colinoso. Densidade de drenagem alta com padrão de drenagem variável, de paralelo a dendrítico. Predomínio de amplitudes topográficas entre 300 e 700m e gradientes médios a elevados, com ocorrência de colúvios e depósitos de tálus, solos rasos e afloramentos de rocha;

- Tabuleiros: são formas de relevo suavemente dissecadas, com extensas superfícies de gradientes extremamente suaves ou colinas tabulares, com topos planos e alongados e vertentes retilíneas nos vales encaixados em “forma de U”, resultantes da dissecação fluvial recente. Possui densidade de drenagem muito baixa com padrão paralelo. Predomínio de amplitudes topográficas inferiores a 50m e gradientes muito suaves, com sedimentação de colúvios e alúvios;

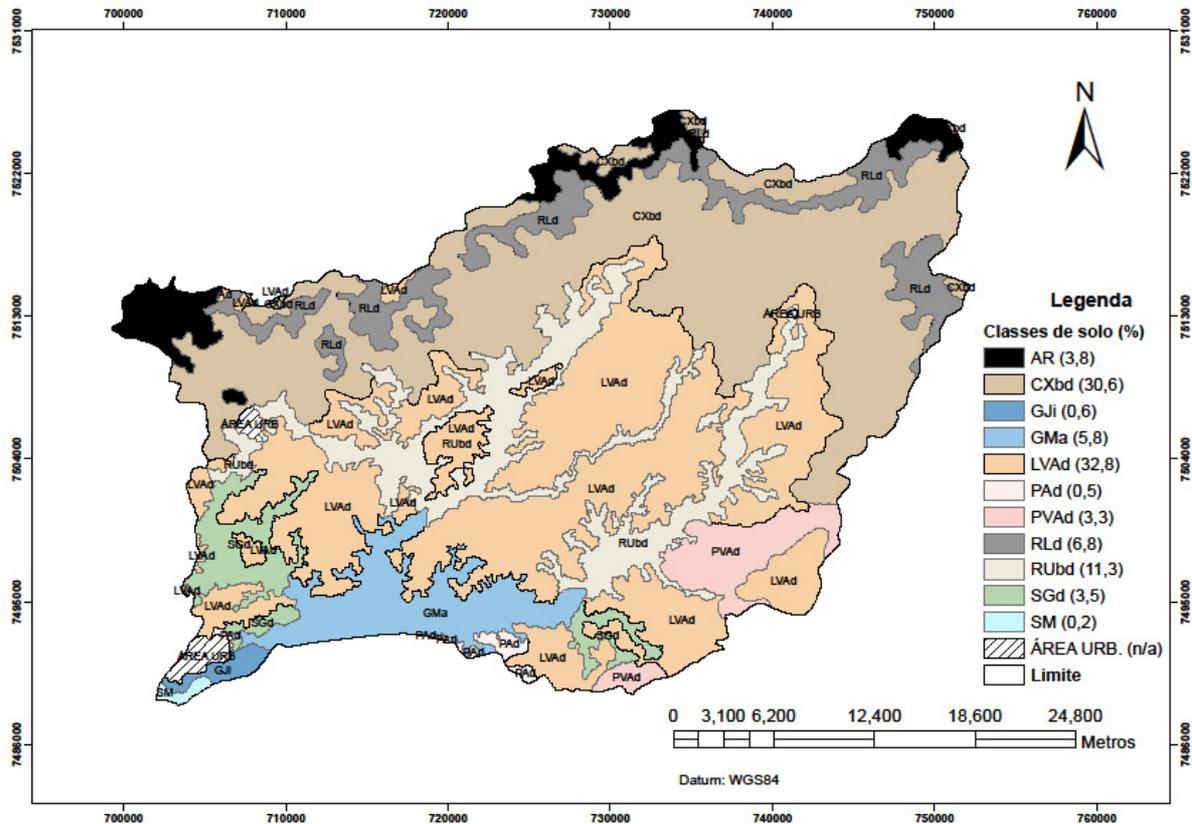
- Planícies Aluviais (Planícies de Inundação, Terraços Fluviais e Leques Alúvio-Colúviais): superfícies subhorizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes em direção aos canais-tronco;

- Planícies Colúvio-Alúvio-Marinhas (Terrenos Argilo-Arenosos das Baixadas): Superfícies subhorizontais, com gradientes extremamente suaves e convergentes à linha de costa, de interface com os Sistemas Depositionais Continentais (processos fluviais e de encosta) e Marinhas. Terrenos mal drenados com padrão de canais meandrante e divagante. Presença de superfícies de aplainamento e pequenas colinas ajustadas ao nível de base das Baixadas;

### **3.1.5 Relações solo-paisagem**

Em função da diversidade litológica e topográfica, os solos mostram grande variação nas suas propriedades morfológicas, físicas, químicas e mineralógicas. (VALLADARES et al., 2003). Nesse sentido, as fases do relevo e a litológica são determinantes na formação das unidades pedológicas da área.

Os solos da bacia encontram-se sobre diferentes materiais litológicos. O mapa de solos (Figura 9) elaborado pela EMBRAPA (2003) mostra que as unidades pedológicas (associações) dominantes da área estão compostas das seguintes classes: Latossolos, que ocupam principalmente nos terços médios das encostas, representando 33% da área; Cambissolos, localizados no terço superior da área com porcentagem de 31%; Neossolos Litólicos, que totalizam 18%, situados na parte mais declivosa da região. Já os Gleissolos representam 6,4% dos solos e são encontrados nas baixadas e fundos de vale; enquanto que os Argissolos (3,8%) estão principalmente em associação com os Latossolos. Com menor expressão geográfica, encontram-se os Planossolos, os solos indiscriminados de mangue e afloramentos rochosos.



**Figura 9.** Classes de solos da Bacia Guapi-Macacu e porcentagem de ocorrência (mapa original reprojetoado, recortado e vetorizado). Escala: 1: 250.000.

Fonte: EMBRAPA (2003).

AR: Alforamento rochoso; CXbd: CAMBISSOLOS HÁPLICOS Tb Distróficos; Gji: GLEISSOLOS TIOMÓRFICOS Hísticos; GMa: GLEISSOLOS MELÁNICOS Alumínicos; LVAd: LATOSSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos; PAd: ARGISSOLOS AMARELOS Distróficos; PVAd: ARGISSOLOS VERMELHO-AMARELOS Distróficos; RLd: NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos; RUbd: NEOSSOLOS FLÚVICOS Tb Distróficos; SGd: PLANOSSOLOS HIDROMÓRFICOS Distróficos; SM: Solos Indiscriminados de Mangue.

### 3.1.6 Vegetação

A bacia Guapi-Macacu possui muitas áreas preservadas, mas com características diferentes. Segundo Bochner (2010), aproximadamente 50% da bacia encontra-se coberta por vegetação florestal, em diferentes estágios sucessionais. A floresta nativa em estágio avançado de regeneração presente principalmente nas escarpas serranas apresenta árvores de grande porte, dossel fechado e sub-bosque diferenciado em uma ou mais camadas (estratos) vegetais. A maior parte destas florestas concentra-se dentro dos limites do Parque Estadual dos Três Picos (Unidade de Conservação de Proteção Integral), situado na parte alta da bacia hidrográfica, próximo aos divisores topográficos, associadas a solos rasos e afloramentos rochosos, em locais de difícil acesso.

A floresta em estágio médio de regeneração possui árvores e arbustos em dossel mediamente fechado, com diferentes estratos e espécies vegetais que se desenvolvem melhor em áreas sombreadas. A altura média das árvores varia de 5 a 12 metros e a idade entre 11 e 25 anos. A serapilheira tem muitas plântulas e o sub-bosque, trepadeiras (BOCHNER, 2010).

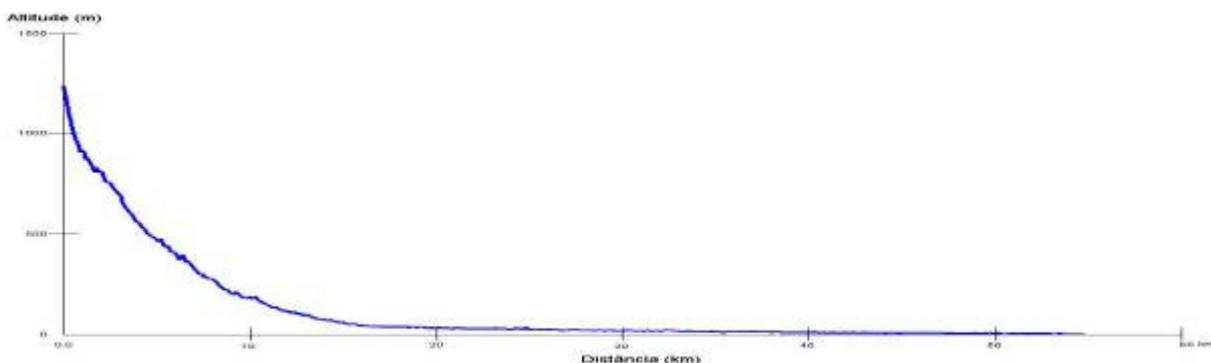
A floresta em estágio inicial de regeneração é caracterizada pela presença de muitas plantas herbáceas e arbustos, além de algumas árvores maiores de forma isolada. O dossel

encontra-se aberto e a maioria das espécies vegetais tem suas sementes dispersas pelo vento (heliófitas). As árvores apresentam altura média de até 5 metros e idade entre 0 e 10 anos. Possuem crescimento rápido e ciclo biológico curto. É raro ter epífitas, mas podem ocorrer trepadeiras. Não existe sub-bosque, nem há formação serapilheira.

Na parte baixa da bacia encontra-se vegetação do tipo Manguezal, com influência marinha, típica de solos de regiões estuarinas. Nesse ambiente halófilo, desenvolve-se flora específica. Nessa área é igualmente expressiva a presença de vegetação tipo Campo inundado, formada por arbustos ou herbáceas, presente em áreas sujeitas a alagamento constante ou periódico, causado por falta de drenagem, por escoamento superficial ou infiltração, existência de camadas impermeáveis próximas à superfície ou lençol freático elevado (INSTITUTO BIOATLÂNTICA, 2011).

### 3.1.7 Hidrografia

O rio Macacu nasce na Serra dos Órgãos, a cerca de 1.500m de altitude, no município de Cachoeiras de Macacu, e percorre aproximadamente 74 km até a sua junção com o rio Guapimirim (Figura 10). Os principais afluentes são os rios São Joaquim, Bela Vista, Bengala, Soarinho, das Pedras, Pontilhão e Alto Jacu, pela margem esquerda, e os rios Duas Barras, Cassiano e Guapiaçu, seu maior afluente, pela margem direita.

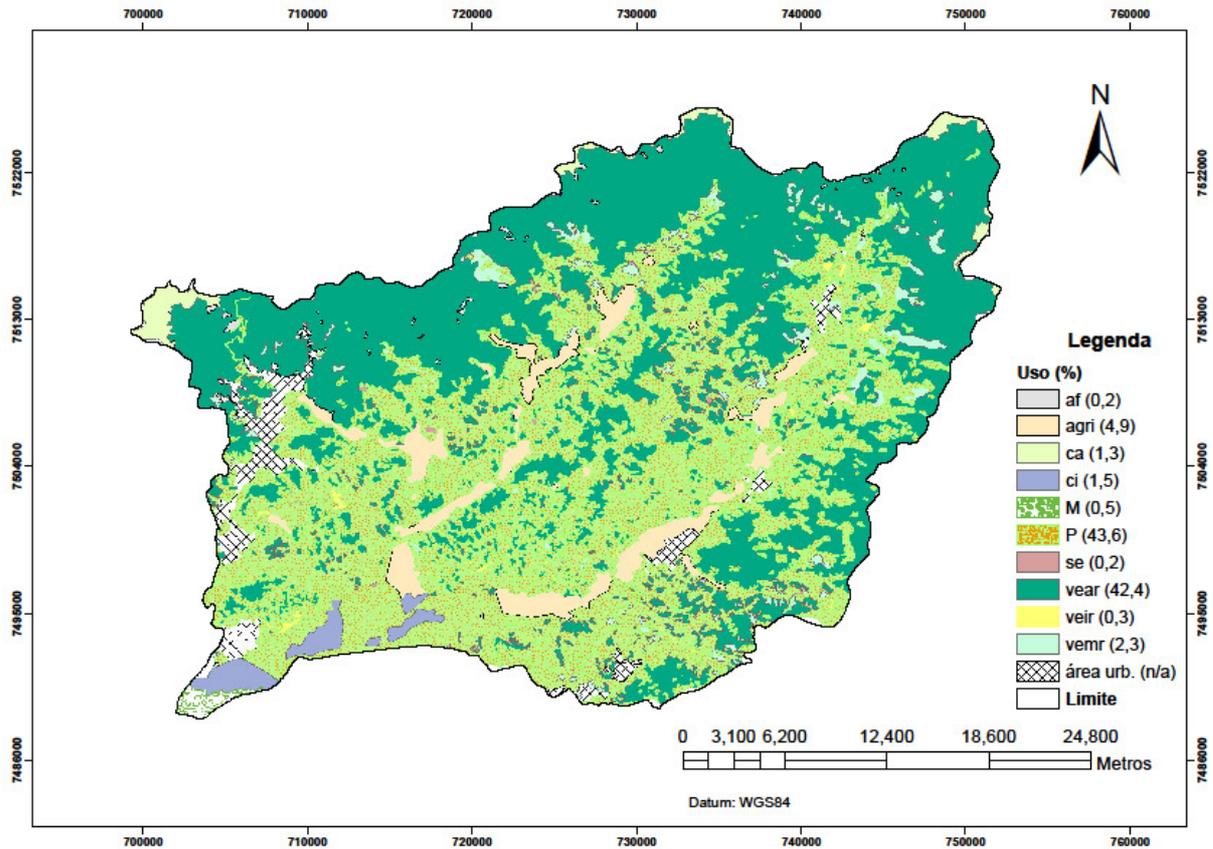


**Figura 10.** Perfil topográfico do rio Macacu.

A partir da confluência do Guapiaçu com o Macacu inicia-se o Canal de Imunana, construído pelo extinto Departamento Nacional de Obras e Saneamento (DNOS) com o objetivo de drenar as áreas adjacentes frequentemente inundadas. Com a construção do canal o curso natural do rio Macacu foi desviado e ele se uniu ao Guapimirim. Sua área de drenagem, por essa razão, foi enormemente aumentada e o rio Guapimirim, após receber as águas do Macacu/Guapiaçu passou a ser chamado de Guapi até a sua foz na Baía de Guanabara. O rio Caceribu, que também era afluente do Macacu pela margem esquerda, ganhou, a partir das obras do DNOS, desembocadura independente, ocupando o antigo baixo leito e a foz do Macacu na Baía de Guanabara (VALCARCEL e FRANCELINO, 2006).

### 3.1.8 Uso do solo

O uso atual do solo é predominantemente rural, com áreas de vegetação natural, agricultura e pastagens. Na bacia hidrográfica ocorre predomínio de áreas de pastagem, seguido pela vegetação natural em estágio avançado de regeneração (floresta densa), ocupando, respectivamente, 43,6% e 42,4% da sua área total (PEDREIRA et al., 2009) (Figura 11).



**Figura 11.** Uso do solo e distribuição em porcentagem.

Fonte: PEDREIRA et al. (2009) *af*: afloramento rochoso; *agri*: área agrícola; *ca*: campo de altitude; *ci*: campo inundável; *M*: mangue; *P*: pastagem; *se*: solo exposto; *vear*: vegetação em estágio avançado de regeneração; *vemr*: vegetação em estágio médio de regeneração; *veir*: vegetação em estágio inicial de regeneração; *área urb.*: área urbana.

A vegetação natural aparece concentrada nas partes mais altas do relevo, em fragmentos maiores e contínuos e nas baixadas, recobrando morros e morrotes sob a forma de fragmentos menores; enquanto que as pastagens ocupam as baixadas e/ou recobrem os morros. O manguezal concentra-se na foz do rio Macacu, na confluência da bacia do rio Macacu com a baía da Guanabara, constituindo Área de Preservação Permanente (APP) e está incluído na Área de Proteção Ambiental de Guapimirim e na Estação Ecológica da Baía de Guanabara. Já as áreas de produção agrícola estão concentradas ao longo de rodovias e rios principais, em locais de mais fácil acesso. As áreas das baixadas no médio Macacu, encontram-se cultivadas com olerícolas e fruticultura, além de grama para paisagismo. Já no baixo Macacu, as planícies de inundação estão ocupadas principalmente com pastagens. Existem também áreas onde a cobertura vegetal foi removida e deixou o solo exposto, devido às atividades de mineradoras ou devido aos processos erosivos decorrentes da presença de pastagem degradada. Em áreas de elevadas altitudes ocorre os afloramentos rochosos, que por vezes apresenta vegetação de baixo porte (PEDREIRA, 2009).

### 3.1.9 Aspecto socioeconômico

A bacia Guapi-Macacu é responsável pelo abastecimento de água para cerca de 2,5 milhões de habitantes dos municípios de Cachoeira de Macacu, Guapimirim, Itaboraí, São Gonçalo e Niterói, além de ser utilizada para a irrigação e piscicultura. A captação para o

abastecimento de água é efetuada no canal de Imunana, no município de Guapimirim. Essa captação situa-se no trecho inferior da bacia, que recebe contribuição das sub-bacias dos rios Macacu, Caceribu e Guapi-Açu, ficando, porém à jusante das tomadas d'água para diversas finalidades (HELDER, 1999).

A agricultura é a base da economia da bacia, com a geração de emprego e renda e evitando o êxodo rural. O município de Cachoeiras de Macacu é grande pólo de fruticultura, com destaque para a goiaba e banana, além de produzir inhame e milho. A produção de grama para uso paisagístico também é importante atividade econômica da região.

A pecuária também se destaca, ocupando grande parte da média e baixa bacia do rio Macacu com 35,23% da área total (BOCHNER, 2010).

Essa bacia está localizada na região de Baixadas Litorâneas, a 100 km da capital (RJ), e com características basicamente agropecuárias. Porém, desde 2006 é classificada como região urbano-industrial, segundo o Zoneamento Econômico e Ecológico (ZEE) (1998) do estado do Rio de Janeiro, devido a grandes empreendimentos que estão previstos para a região. O mais importante deles trata-se do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPERJ), que será implantado na divisa dos municípios de Itaboraí com Cachoeiras de Macacu, em uma área de 45 km<sup>2</sup>. Esse empreendimento movimentará e transformará a economia e o cotidiano dos habitantes da região.

### **3.2 Levantamento de Solos, Amostragem e Análises**

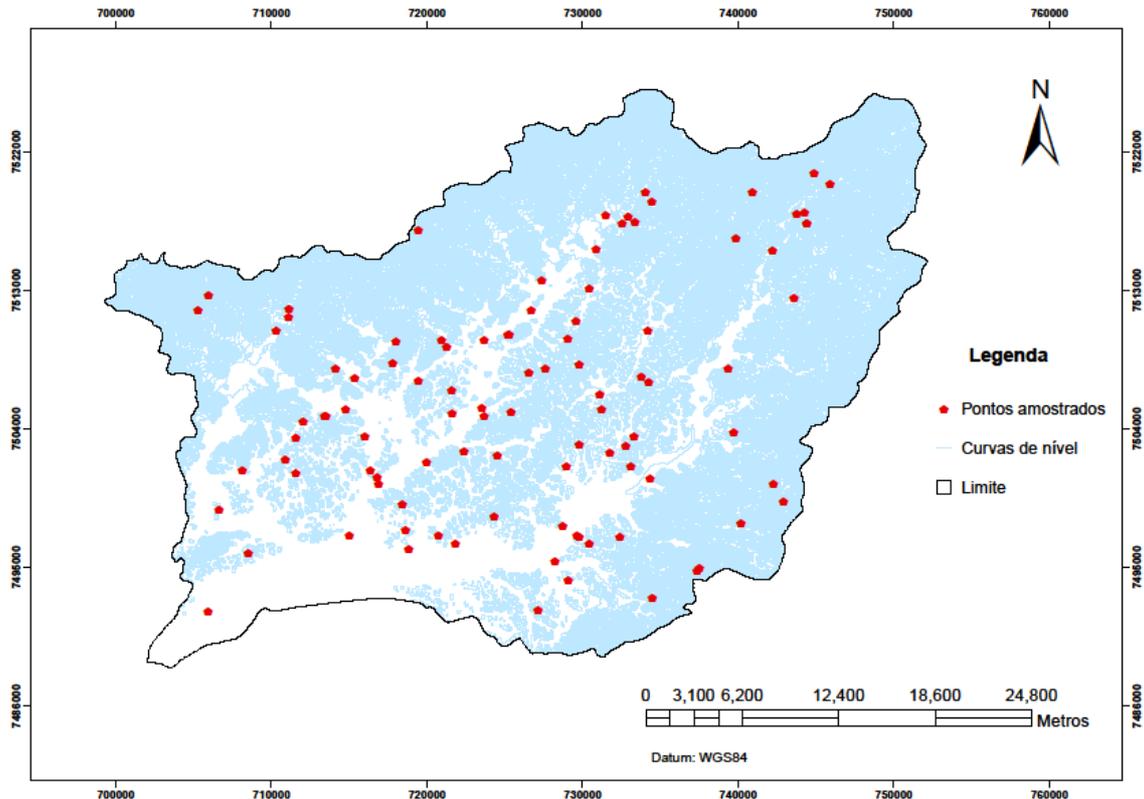
Os dados foram originados do levantamento de solos de nível intermediário e de alta intensidade, realizado na área de estudo durante o último trimestre de 2010 pela equipe da EMBRAPA SOLOS/RJ e participação de alunos da UFRRJ.

Os locais dos perfis descritos e amostrados foram previamente demarcados através do pré-processamento de modelos de atributos de terreno, com objetivo de reduzir as limitações relacionadas ao acesso e a representatividade da paisagem. Para isso foi gerado um *buffer* entorno da rede de estradas existentes utilizando ferramentas do Arcgis 10 (*Analysis Tools – Proximity – Buffer*).

Posteriormente converteu-se o MDE em um arquivo de pontos através do comando *Raster to Points* (Arcgis 10), dos quais os localizados dentro do *buffer* foram extraídos e exportados no programa Hipercubo latino ou LHCS (*Sandia National Laboratories - Matchworks, 2005*) para serem amostrados de acordo com os objetivos predefinidos. Hipercubo latino (LHS) é um método estatístico de amostragem randômica estratificada que oferece uma maneira eficiente de se amostrar variáveis a partir das suas distribuições multivariadas (MINASNY e McBRATNEY, 2005). Assim sendo, 100 pontos representativos das condições geomorfológica da área foram selecionados nesse programa, sendo 99 destes amostrados e descritos no campo (Figura 12).

Três tipos de amostras foram coletados no levantamento de solo:

- Amostras para auxiliar a identificação e classificação das unidades de mapeamento;
- Amostras para análise de fertilidade coletadas na camada superficial do solo na profundidade média de 20 cm; e
- Amostras para análise de densidade do solo coletadas nos horizontes A e B com o auxílio do anel de *Kopeck*.



**Figura 12.** Pontos amostrados no levantamento de solos.

Todas as amostras foram submetidas às análises físicas e químicas no laboratório da EMBRAPA SOLOS (RJ) segundo a metodologia proposta em EMBRAPA (1997).

A partir do resultado das análises, foram selecionadas as 16 seguintes variáveis incluindo a variável endógena (Ds): areia grossa (Ag), areia fina (Af), Silte, argila (Arg), carbono (C), soma de cálcio e magnésio (Ca+Mg), capacidade de troca de cátions (CTC), densidade do solo (Ds), espessura do horizonte A (E), hidrogênio ( $H^+$ ), potássio ( $K^+$ ), nitrogênio (N), sódio ( $Na^+$ ), pH, soma das bases (SB) e saturação por bases (V).

### 3.3 Delineamento Estatístico

O tratamento estatístico levou em conta apenas 66 amostras do horizonte superficial (A) que possuíam valores de densidade. Deste total, 20% representando 13 observações foram reservadas para avaliação da acurácia do modelo final. Esses valores foram selecionados por casualidade por meio do programa R 2.14.0 (*core team*) usando a linha de comando `dataname[Sample(1:nrow(dataname), x) 1:ncol(dataname)]`, onde, *dataname* é o nome da tabela e *x*, o número de observações a serem amostradas.

Na análise exploratória dos dados, foram calculados os parâmetros de posição (média, mediana e moda), parâmetros de dispersão (variância, desvio padrão) e medidas de forma de distribuição (coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, curtose). Todo esse procedimento permite ter uma idéia da distribuição dos dados a respeito da normalidade e detectar possíveis erros ou valores fora do padrão.

#### 3.3.1 Regressão linear múltipla

A regressão linear múltipla (RLM) é uma técnica da estatística multivariada utilizada para a predição de valores de uma variável de resposta (dependente) a partir de diversas

variáveis preditoras ou independentes. Pode ser considerada uma extensão da regressão simples.

Foi utilizado o método Gauss-Markov-Normal, que consiste em se determinar o estimador que minimiza a soma do quadrado das diferenças entre valores observados e valores preditos pelo modelo, conforme apresentado a seguir:

$$Y = X\beta + \varepsilon, \text{ onde}$$

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_n \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{21} & \dots & X_{p1} \\ 1 & X_{12} & X_{22} & \dots & X_{p2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & X_{1n} & X_{2n} & \dots & X_{pn} \end{bmatrix}, \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_p \end{bmatrix}$$

Em relação à RLM, foi considerado:  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_p, \varepsilon)$ ; assim o modelo linear é representado por:

$Y = X\beta + \varepsilon$ ,  $\varepsilon \sim N(\mu, \sigma^2)$ , onde Y: variável dependente; X: variáveis exógenas; um parâmetro desconhecido;  $\varepsilon$ : resíduos;  $\mu$ : média dos resíduos;  $\sigma^2$ : variância.

Para escolher as variáveis preditoras foi usado o procedimento *forward stepwise*. Cada variável exógena teve que ser avaliada individualmente para julgá-la quanto à sua facilidade de ser obtida ou determinada tanto no campo como no laboratório. Todas as variáveis que fossem difíceis de serem obtidas ou estatisticamente insignificantes foram excluídas do modelo.

No intuito de evitar efeito de multicolinearidade, a matriz de correlação das variáveis foi previamente determinada. Na existência de correlação forte entre algumas variáveis, foi selecionada a variável mais facilmente obtida, seja no campo ou no laboratório, dentre cada par de variáveis.

Também foram excluídos os “outliers” que poderiam influenciar a acurácia do modelo seja pela redução do  $R^2$  ou pela ocorrência de heteroscedasticidade.

São consideradas “outliers” neste estudo, as observações com resíduos estudentizados  $\geq 2,50$ .

Os resíduos estudentizados são da forma:

$$T_i = \frac{E_i}{\sqrt{QMRE(i) \cdot (1 - h_{ii})}}$$

Onde:  $E_i = Y_i - \hat{Y}_i$ , os resíduos;  $QMRE(-i)$  o valor de  $QMRE$  resultante de um ajustamento da Regressão excluindo a  $i$ -ésima;  $h_{ii}$  indica o  $i$ -ésimo elemento diagonal da matriz H de projeções ortogonais sobre o subespaço C (X), gerado pelas colunas da matriz X.

### 3.3.2 Regressão não-linear

A regressão não-linear (RNL) pode ser uma alternativa à regressão linear, pois essa não é adequada para todos os problemas; e pode ocorrer que a variável resposta e as variáveis regressoras estejam relacionadas por meio de uma função não-linear. De maneira geral, a função não-linear se apresenta na seguinte forma:

$$y_i = f(x_i, \theta^o) + \varepsilon_i, \quad i = 1, \dots, n$$

Onde:  $Y_i$  representa a observação da variável dependente,  $X_i$  representa um vetor de observações em  $k$  variáveis regressoras ou variáveis exógenas,  $\theta^o = [\theta^o_1, \theta^o_2, \dots, \theta^o_p]$ , é um vetor de parâmetros  $p$  dimensional desconhecido e  $\varepsilon_i$  Representa o erro experimental suposto normal, com média zero e variância desconhecida.

### 3.4 Geração da Função de Pedotransferencia (FPT)

A FPT escolhida foi aquela que apresenta o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior, erros menores, resíduos normais. O  $R^2$  do modelo indica a porcentagem da variável dependente explicada pelo conjunto de variáveis independentes. A expressão a seguir representa a forma de como ele foi determinado.

$$\sum_{i=1}^n ((y_i - \hat{y}_i)^2)$$

$$R^2_{adj} = \frac{1 - (1 - R^2) \cdot (n - 1)}{(n - m - 1)}$$

$R^2$ : o coeficiente de determinação;  $\hat{y}_i$ : valores preditos

$\bar{y}$ : média da variável exógena;  $y_i$ : valores observados

Onde  $R^2_{adj}$ : Coeficiente de determinação ajustado;

$n$ : número de amostras;

$m$ : o número de variáveis

A análise da variância (ANOVA) do modelo foi realizada para avaliar o nível de significância do resultado com relação ao valor crítico (valor-p). Um valor-p menor que 0,05 é indicador de um modelo estatisticamente significante.

Foi utilizado o erro médio de predição (MPE) e a raiz quadrada do erro quadrado médio de predição (RMSPE) para comparar o potencial preditivo dos modelos de regressão:

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)$$

Onde:  $n$ = o número de observações;  $\hat{y}_i$  = valores preditos;  $y_i$ = valores observados.

O MPE permite avaliar a discrepância positiva ou negativa da FPT, indicando a tendência média à superestimação ou subestimação, respectivamente.

$$RMSPE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}$$

O RMSPE expressa o potencial preditivo de determinado modelo, ou seja, a magnitude do erro de predição do modelo.

A inferência estatística relativa ao modelo de regressão baseia-se na hipótese ligada ao termo do erro ou resíduo. É preciso que as seguintes hipóteses sejam verificadas para poder interpretar os resultados - a sua distribuição deve ser simétrica, ou seja, seguir uma lei normal. Assim, a normalidade foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilks ao nível de confiança de 95%, que consiste em medir a conformidade da distribuição normal observada com a distribuição

teórica em representação, permitindo visualizar a distribuição de frequência acumulada com uma reta.

A detecção da presunção de homoscedasticidade<sup>1</sup> da FPT escolhida foi realizada através do teste de Breusch-Pagan disponível no pacote ‘lmtest’ do programa R 2.1.14 (Core Team). A hipótese nula  $H_0$  é rejeitada quando houver relação entre a variância dos resíduos e as variáveis explicativas.

### 3.5 Validação com Dados Independentes e Comparação com outras FPTs

A função de pedotransferência proposta foi avaliada com as 13 observações mencionadas no item 3.3. Esse procedimento permite avaliar o poder de predição de determinado modelo, usando uma amostra independente. Assim, foram utilizados os testes t de Student’s e de Fisher para comparar respectivamente a média e o desvio padrão entre os valores observados e preditos.

O aplicativo STATGRAPHICS CENTURION XVI foi usado para analisar os dados e gerar os modelos. O modelo validado e retido serviu para completar os 33 perfis desprovidos de valor de densidade.

Também foi realizada a comparação da função obtida com outras já desenvolvidas no Brasil e em outros países para avaliar o poder de predição da mesma, baseado nos erros médios de estimação (MPE) de cada função e nos erros de predição expressados pelo RMSPE. Assim foram utilizadas as seguintes FPTs: Jeffrey (1970) para o norte da Inglaterra, Manrique and Jones (1991) para a os Estados Unidos, Bernoux et al. (1998), Tomasella e Hodnett (1998) ambos para a Amazônia, Benites et al, (2006), para o Brasil (Tabela 1).

**Tabela 1.** Funções de Pedotransferência publicadas

FPTs	Referência	Fórmula (Ds)	$R^2_{aj}$	N
B	Jeffrey (1970)	$1,482 - 0,6786 \cdot \log_{10}(OM)$	0,82	80
C	Manrique and Jones (1991)	$1,660 - 0,318 \cdot \sqrt{(OC)}$	0,41	19651
D	Bernoux et al. (1998)	$1,524 - 0,0046(\%argila) - 0,051(\%COT) - 0,0045(pH\acute{a}gua) + 0,001(areia)$	0,56	323
E	Tomasella e Hodnett (1998)	$1,578 - 0,054(\%COT) - 0,006(\%silte) - 0,004(\%argila)$	0,74	396
F	Benites et al. (2006)	$1,56 - 0,0005argila - 0,0100COT + 0,0075SB$	0,66	1396

OM, estimação da matéria orgânica (%) usando a seguinte fórmula:  $OM = 1.724 \cdot OC$ ; OC: carbono orgânico (%); COT: carbono orgânico total; SB: soma das bases.

Segundo Wösten (2001), os estudos existentes não permitem ainda tirar conclusões acerca da especificidade regional das funções de pedotransferência, mas é possível observar que as funções obtidas a partir de dados regionais permitem obter boas predições em regiões com tipos de solo e topografia semelhantes ainda que em locais distintos.

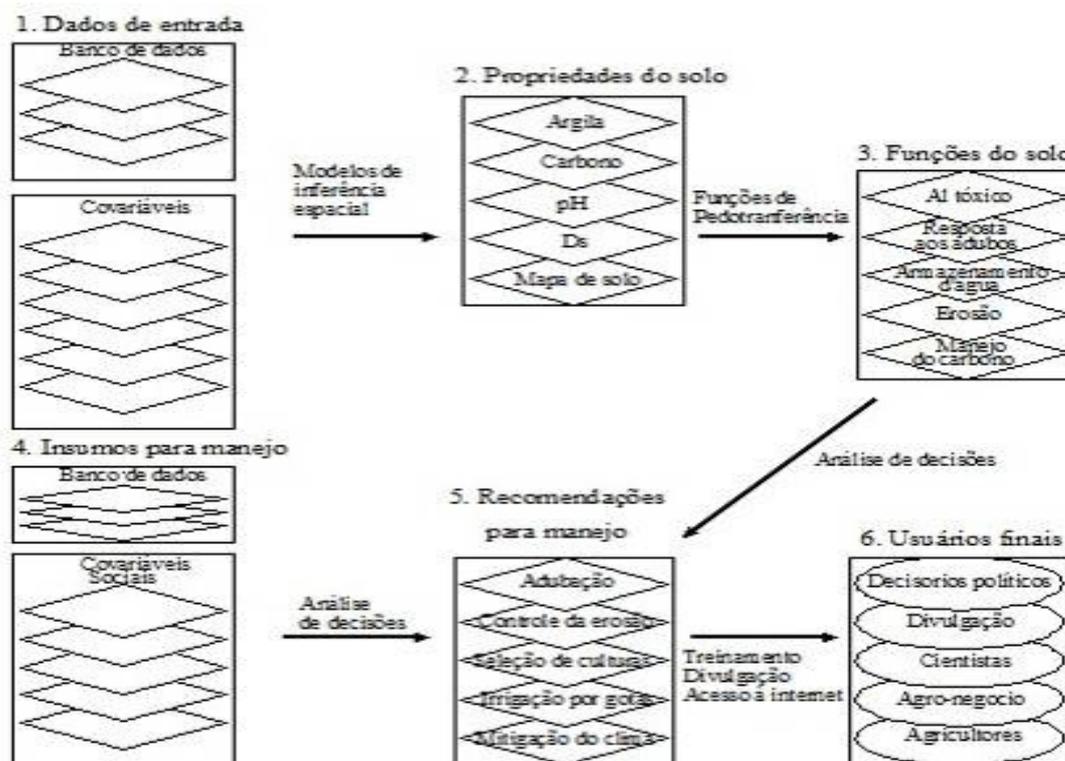
Quanto à validação das funções de pedotransferência, foi usada uma série independente de dados regionais não utilizados no desenvolvimento das funções. Este

<sup>1</sup> Variância dos resíduos constante:  $\text{var}(\epsilon) = \sigma^2 = \text{cte.}$

método, quando possível de aplicar, é o ideal para análise da capacidade de predição do modelo construído, no caso das FPTs.

### 3.6 Espacialização da Densidade do Solo e do Estoque de Carbono no Horizonte A

As técnicas de mapeamento digital dos atributos de solos seguiram a linha do “Global Soil Map” (Figura 13), preconizando a espacialização de cada variável envolvida num determinado algoritmo usando o interpolador apropriado ou uma função de pedotransferência.



**Figura 13.** Abordagem em mapeamento digital.

Fonte: Sanchez, 2010.

Para escolher o melhor interpolador dos dados, foi efetuada primeiramente a análise geoestatística através da krigagem com o uso do programa *GS+ 9 Demo*, antes de optar pelos métodos determinísticos, tais como o inverso do quadrado da distância (IDW), e o *topogrid* chamado *topo to raster* do *ArcGIS 10*.

A Geoestatística tem-se mostrado de grande utilidade para caracterizar e mapear a variação espacial das propriedades dos sistemas (COUTO et al., 1997), considerando o comportamento das chamadas variáveis regionalizadas. A krigagem tem-se revelado como um método de geoestatística bastante utilizado (STEIN, 1995).

A semi-variância mede o grau de variação espacial entre duas variáveis regionalizadas. Supostamente, a magnitude da semi-variância entre dois pontos depende da distância entre eles, implicando em semi-variâncias menores para distâncias menores e semi-variâncias maiores para distâncias maiores. O gráfico das semi-variâncias em função da distância a um ponto é chamado de semi-variograma (Figura 14). A partir de uma determinada distância a semi-variância não mais aumentará com a distância e se estabilizará num valor próximo à variância média, dando a esta região o nome de patamar. A distância entre o início do semi-variograma e o patamar recebe o nome de alcance. Ao extrapolarmos a curva do semi-

variograma para a distância zero, podemos chegar a um valor não-nulo de semi-variância. Este valor recebe o nome de efeito pepita.

O modelo de semivariograma é representado a seguir:

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

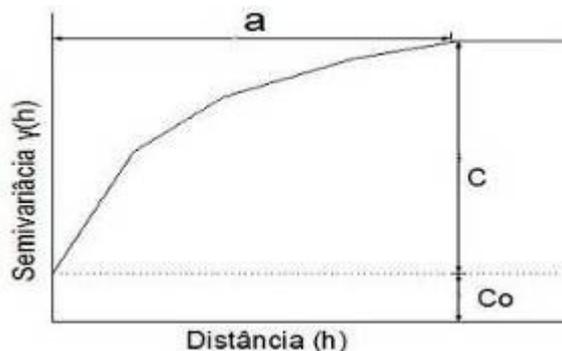
Onde:  $\tilde{\alpha}(h)$  – Semivariância

$u$ , vetor de coordenadas espaciais  $x, y$ ;

$Z(u)$ , a variável considerada como função espacial;

$h$ , vetor da distancia entre dois pontos espacialmente localizados;

$N$ , número de pares de valores analisados;



**Figura 14.** Modelo de semivariograma.

Onde,  $Co$ : Efeito Pepita;  $C$ : Semivariância Estrutural;  $C+Co$ : Patamar ou Soleira; e  $a$ : Alcance.

A densidade do solo ( $Ds$ ) foi espacializada pela aplicação da equação de pedotransferência determinada através do uso da ferramenta “*raster calculator*” do programa *ArcGis v 10*. O estoque de carbono no horizonte A foi espacializado com espessura variável, através da aplicação de álgebra de mapa da ferramenta *Raster Calculator* do *ArcGIS v. 10*, conforme o fluxograma (Figura 15) baseado no método DSM (*Digital Soil Mapping*).

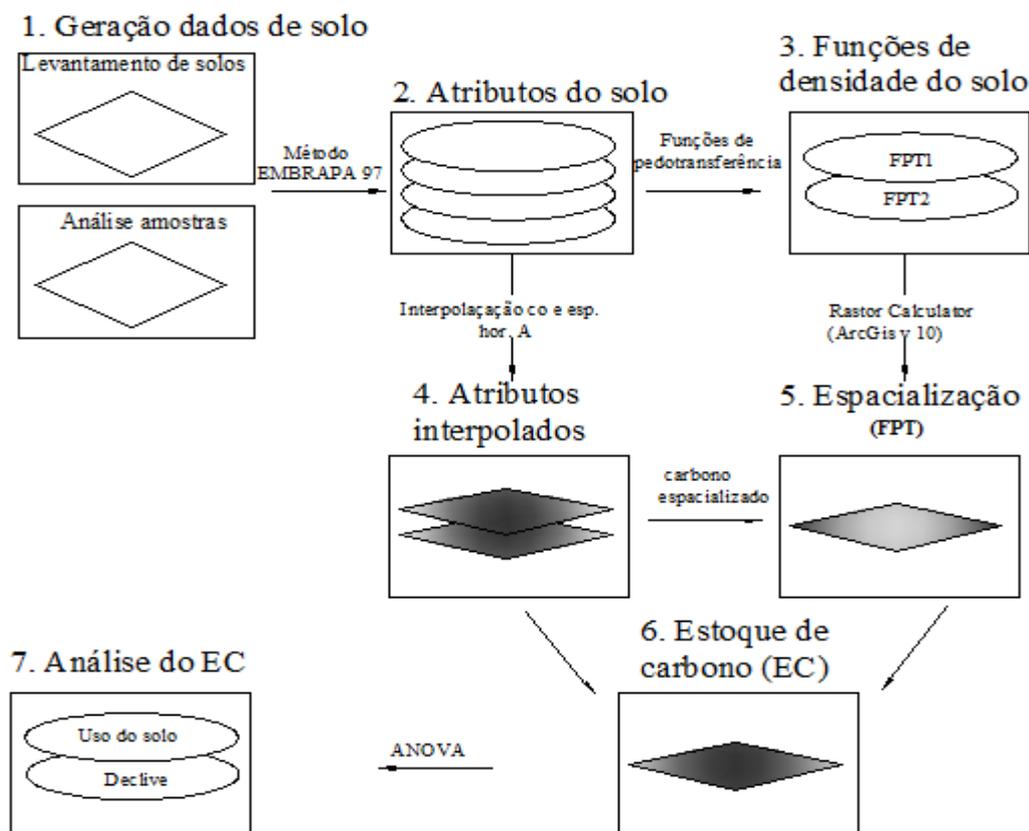
A fórmula aplicada foi:

$$Ec = C * Ds * \frac{E}{10}$$

Onde:  $Ec$ : Estoque de carbono ( $Mg.ha^{-1}$ );  $C$ : Carbono orgânico ( $g.kg^{-1}$ );  $Ds$ : densidade do solo ( $Mg.m^{-3}$  ou  $g.cm^{-3}$  ou  $kg.dm^{-3}$ ); e  $E$ : Espessura variável do horizonte A (cm).

Para análise do índice de dependência espacial (IDE), foi utilizada a relação  $C1/(C0 + C1)$  e os intervalos propostos por Zimback (2001) que considera: dependência espacial fraca ( $IDE < 25\%$ ); moderada ( $25\% \leq IDE < 75\%$ ) e forte ( $IDE \geq 75\%$ ).

O estoque, assim espacializado, foi comparado com o estoque calculado nos pontos de observação pelo teste da média de Student e F de Fisher, sendo os valores extraídos no próprio *ArcGIS 10*, através do uso da ferramenta “*Extract Multi Values to Points*”.



**Figura 15.** Fluxograma geral das etapas de processamento do estudo inspirado da abordagem DSM, SANCHEZ (2010).

### 3.7 Mapa de uso do solo

O conhecimento de uso do solo permitiu analisar os valores de cada atributo com relação ao tipo de uso do solo. O mapa de uso utilizado nesse estudo foi produzido por PEDREIRA et al. (2009) a partir de imagens dos sistemas ASTER e CBERS e fotografias aéreas ortorretificadas, manipuladas em SIG. As classes mapeadas foram associadas a tipos de vegetação e de cobertura do solo conhecidos e utilizados em estudos, mapeamentos e levantamentos já realizados no Estado do Rio de Janeiro e em outras regiões do país.

### 3.8 Modelo Digital de Elevação e Atributos do Terreno

Dados topográficos quantitativos estão sendo utilizados intensamente na forma de modelos digitais de terreno (MDT) nas duas últimas décadas (FLORINSKY et al, 2001). Esses modelos são representações de variáveis descrevendo a superfície topográfica, tais como os modelos digitais de elevação (MDE), declive, aspecto, etc. (BURROUGH e McDONNEL, 2005). Os MDTs são um sistema de métodos quantitativos para analisar e modelar o terreno permitindo que as relações entre a topografia e os componentes geológico, hidrológico, biológico e antrópico da paisagem sejam identificadas.

Para melhor entendimento da relação existente entre os atributos analisados (Ds e Estoque de Carbono no horizonte A) e a paisagem, foram derivados os seguintes atributos primários e secundários do terreno.

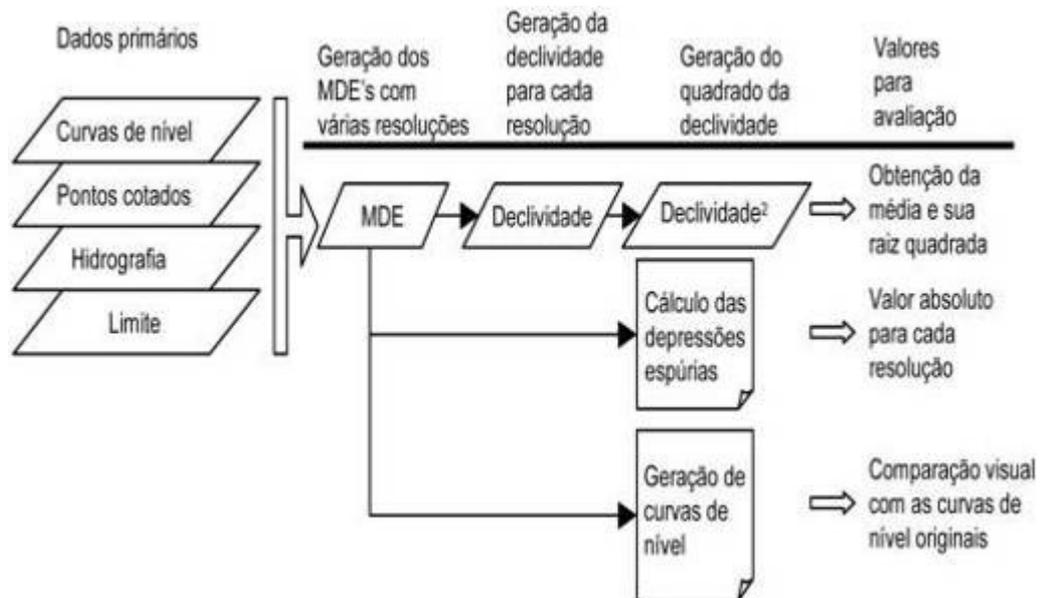
### a) Modelo Digital de Elevação (MDE)

O modelo digital de elevação (MDE) é uma representação digital de uma seção da superfície, dada por uma matriz de células com coordenadas planimétricas (x, y) e um valor de intensidade do pixel, correspondente à elevação.

Para gerar o MDE da área, foram usadas as curvas de nível das cartas topográficas vetoriais de 20 m de equidistância, as linhas de drenagem, todas obtidas do IBGE na escala de 1:50.000, assim como, pontos cotados do sensor SRTM relacionados às áreas mais planas da bacia. O processamento foi realizado com o auxílio do software *ArcGIS v. 10 (ESRI)*, utilizando o interpolador “*Topogrid*” (*Topo to raster*).

O MDE proposto se baseia no método de interpolação para criar modelos hidrologicamente consistentes. Esse método se utiliza do conhecimento sobre as superfícies, impondo restrições na interpolação, o que resulta numa estrutura de drenagem conectada e uma correta representação dos cumes e dos canais de drenagem (CHAGAS, 2006).

Como fonte de outros atributos primários e secundários, alguns cuidados têm que ser tomados com o MDE. Nesse contexto, vários procedimentos permitem escolher a melhor resolução do modelo e reduzir os erros ligados ao próprio modelo (Figura 16).



**Figura 16.** Procedimentos de escolha do tamanho da célula (CARVALHO JÚNIOR, 2005).

Foram gerados seis (6) modelos com resolução de 40, 30, 25, 20, 15, 10 cujas curvas de nível (“*contour*”) foram derivadas para comparação com as curvas originais no intuito de conferir o modelo que se aproxima melhor das curvas originais. O modelo que apresenta menor diferença com as curvas originais foi o escolhido.

Subsequentemente foram eliminadas as depressões espúrias (ou “*sinks*”) que são defeitos associados aos modelos. Uma depressão é uma célula ou grupos de células espacialmente conectadas cuja direção do fluxo não pode ser alinhada a nenhum dos oito valores válidos numa grade de direção do fluxo. Isso acontece quando todas as células vizinhas possuem valores maiores que a célula processada ou quando duas células fluem uma à outra. O comando *Fill* permitiu corrigir as depressões espúrias.

## **b) Declive**

O declive é um dos atributos topográficos mais utilizados, pois exerce influência sobre o fluxo ou a dinâmica da água é fundamental nos estudos da erosão hídrica. É admitido que os solos localizados na parte mais elevada da paisagem com declive suficientemente baixo, são mais bem drenados que os situados nas áreas de baixada ou inclinadas. Esse atributo foi derivado utilizando o comando “*slope*” do programa ArcGIS 10.

No intuito de comparar o estoque de carbono, foi transformado o mapa do estoque de carbono em pontos que foram extraídos dentro de cada classe de uso e de declive para serem processados e analisados, sendo usado o comando “*Raster to points*” na geração dos pontos. Desta forma, aos pontos assim gerados foram adicionadas as suas coordenadas x, y pelo comando “*Add x y Coordinates*” antes de serem tabelados e na sequência sorteados com amostra de vinte (20) observações por classe com o auxílio do Hypecubo latino (LHS). Sendo necessário realizar a análise de variância (ANOVA) com a amostra sorteada, o teste LSD (*last significant difference*) de Fisher foi aplicado para discriminar o estoque de carbono dentre as classes de uso e de declive.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise Exploratória dos Dados

A análise exploratória dos dados foi efetuada em 45 observações, após a eliminação de oito observações consideradas como “outliers” por apresentarem resíduos estudentizados  $\geq 2,50$  no desenvolvimento das FPTs.

A maioria das variáveis evidencia a existência de forte dispersão com relação à média. Apenas sete (7) variáveis: pH, Ag (areia grossa), Af (areia fina), silte, Arg (argila), Ds, E (espessura hor. A) apresentaram coeficiente de variação menor que 50%, o que indica a existência de heterogeneidade (forte dispersão) nos dados, ou maior variabilidade espacial (Tabela 2). Nielsen et al. (1973) consideram como pequena variabilidade os valores de C.V. menores que 30% no caso de análise de atributos de solos. O caso do sódio ( $\text{Na}^+$ , CV=198%) pode ser explicado pela variedade de material de origem com teores distintos desse elemento, acrescentado o fato dos valores serem muito baixos, fazendo com que pequenas diferenças gerem elevado coeficiente de variação.

O carbono do solo apresentou CV bem maior que a Ds, mostrando que o mesmo pode ser alterado de forma mais rápida no ambiente em função dos diferentes solos existentes na bacia e da ação biótica e abiótica no meio.

Pelo teste de Shapiro-Wilks apenas as variáveis Ag, Af, Arg, e E apresentaram distribuição normal, ou seja, apresentaram valores de p (p-value) maior que 5%. De acordo com Diggle e Ribeiro Jr. (2000), essa normalidade dos dados é uma condição desejável para o ajuste dos modelos de distribuição espacial dos atributos.

**Tabela 2.** Estatística descritiva dos dados físico-químicos.

Estatística	pH	Ag	Af	Silte	Arg	Ds	E	C	N	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup> _Mg <sup>2+</sup>	H <sup>+</sup>	SB	CTC	V
	--	-----g.kg <sup>-1</sup> -----				Mg.m <sup>-3</sup>	Cm	---g.kg <sup>-1</sup> ---	-----cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup> -----					%		
Média	4,9	381	149	169	301	1,42	17,2	18,8	2,03	0,03	0,16	1,72	6,34	1,94	9,28	22
Mediana	4,9	402	138	151	285	1,5	16	15,2	1,8	0	0,1	1,4	5,5	1,5	8,2	17
Desvio padrão	0,44	166	71,4	81,8	139	0,20	6,0	17,5	1,57	0,09	0,13	1,65	4,04	1,79	4,85	15
CV (%)	<b>9</b>	<b>44</b>	<b>48</b>	<b>48</b>	<b>46</b>	<b>14</b>	<b>35</b>	93	77	264	82	96	64	92	52	68
Mínimo	3,8	10	15	34	60	0,8	6,0	2,4	0,5	0,0	0,0	0,5	1,7	0,6	3,2	6
Máximo	6,1	796	384	440	655	1,8	33	106	9	0,5	0,7	10,5	25,6	11,7	32,4	80
Assimetria	0,26	-0,32	0,80	1,45	0,42	-0,69	0,61	3,95	3,57	3,90	2,22	3,74	3,3	3,96	3,16	2,82
Curtose	1,79	0,51	1,64	2,59	-0,43	0,99	0,33	17,20	13,70	18,20	6,55	18,3	13,20	20,30	12,50	4,25
<b>Teste de normalidade Shapiro-Wilks</b>																
W	0,93	<b>0,96</b>	<b>0,96</b>	0,88	<b>0,96</b>	0,94	<b>0,96</b>	0,54	0,57	0,45	0,74	0,64	0,66	0,62	0,69	0,83
Valor-P	0,03	<b>0,22</b>	<b>0,19</b>	0,00	<b>0,23</b>	0,05	<b>0,20</b>	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Ds: densidade do solo; Ag: areia grossa; Ca<sup>2+</sup>\_Mg<sup>2+</sup>: Calcio mais Magnésio; CTC: capacidade de troca de cátions; N: nitrogênio; H<sup>+</sup>: hidrogênio; Af: areia fina; C: carbono orgânico; E: espessura do horizonte A; K<sup>+</sup>: potássio; Na<sup>+</sup>: sódio; pH: potencial hidrogênio; SB: soma das bases; V: saturação por base.

No procedimento *forward stepwise* foram excluídas as variáveis nitrogênio (N), CTC e hidrogênio (H<sup>+</sup>) por apresentarem alta correlação com o carbono orgânico (C) e necessitariam mais tempo para serem determinadas (Tabela 3).

**Tabela 3.** Matriz de correlação entre as 16 variáveis do solo (continua)

	pH	Ag	Af	Silte	Arg	Ds	E	C	N
pH	1								
	0,00								
Ag	-0,03	1							
	0,86	0,00							
Af	0,04	0,18	1						
	0,8	0,23	0,00						
Silte	0,04	-0,78	-0,27	1					
	0,81	0,00	0,07	0,00					
Arg	-0,01	-0,83	-0,57	0,48	1				
	0,96	0,00	0,00	0,00	0,00				
Ds	0,41	-0,09	0,07	0,21	-0,05	1			
	0,01	0,55	0,67	0,18	0,77	0,00			
E	0,04	0,14	0,00	0,00	-0,17	0,21	1		
	0,77	0,35	1	0,98	0,26	0,16	0,00		
C	-0,26	-0,01	-0,06	-0,05	0,08	<b>-0,73</b>	-0,23	1	
	0,08	0,92	0,71	0,74	0,61	<b>0,00</b>	0,13	0,00	
N	-0,26	0,01	-0,05	-0,08	0,06	<b>-0,75</b>	-0,26	0,99	1
	0,09	0,95	0,72	0,61	0,69	<b>0</b>	0,08	0,00	0

Primeira linha: Correlação; Secunda linha: P-valor (5%)

**Tabela 3.** Matriz de correlação entre as 16 variáveis do solo (continuação)

	pH	Ag	Af	Silte	Arg	Ds	E	C	N	Na	K	Ca_Mg	H	SB	CTC	V
Na	0,40	0,06	0,16	-0,02	-0,14	-0,14	0,12	0,14	0,17	1,00						
	0,01	0,68	0,30	0,88	0,35	0,34	0,44	0,36	0,27	0,00						
K	0,41	-0,06	0,02	-0,01	0,06	-0,22	0,00	0,25	0,28	0,71	1,00					
	0,00	0,70	0,87	0,95	0,68	0,15	1,00	0,09	0,06	0,00	0,00					
Ca_Mg	0,55	0,08	0,12	-0,16	-0,06	-0,13	0,12	0,15	0,17	0,73	0,65	1,00				
	0,00	0,62	0,45	0,30	0,71	0,38	0,44	0,31	0,26	0,00	0,00	0,00				
H	-0,46	0,00	-0,01	-0,05	0,03	<b>-0,77</b>	-0,21	0,96	0,95	0,03	0,10	-0,01	1,00			
	0,00	0,98	0,95	0,72	0,84	<b>0,00</b>	0,16	0,00	0,00	0,83	0,51	0,97	0,00			
SB	0,57	0,07	0,11	-0,15	-0,05	-0,13	0,12	0,17	0,19	0,76	0,71	0,99	0,00	1,00		
	0,00	0,65	0,45	0,32	0,73	0,39	0,44	0,27	0,22	0,00	0,00	0,00	1,00	0,00		
CTC	-0,28	0,02	0,05	-0,10	0,01	<b>-0,78</b>	-0,14	0,95	0,95	0,28	0,32	0,31	0,94	0,31	1,00	
	0,06	0,91	0,75	0,52	0,95	<b>0,00</b>	0,36	0,00	0,00	0,07	0,03	0,04	0,00	0,04	0,00	
V	0,79	0,09	0,04	-0,13	-0,06	<b>0,29</b>	0,09	-0,20	-0,19	0,50	0,51	0,82	-0,40	0,82	-0,14	1,00
	0,00	0,55	0,77	0,38	0,72	<b>0,05</b>	0,55	0,18	0,20	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,34	0,00

Primeira linha: Correlação; Secunda linha: P-valor (5%)

## 4.2 Funções de Pedotransferência Determinadas para a Densidade

Conforme descrito no item 3.4, foram realizadas a Regressão linear múltipla “*Forward Stepwise*” com as 16 variáveis e a regressão não linear com variável individual, após a análise descritiva.

Do processamento, resultaram dois modelos FPT1 e FPT2 (Tabela 4):

a) O modelo FPT1 integra três (3) variáveis: carbono orgânico (C), pH, SB (Soma das bases), livre de efeito de multicolinearidade, com erro normal;

b) O modelo FPT2 integra apenas a variável C, com erro normal.

A variável dependente (Y) = Ds (Mg.m<sup>-3</sup>);

A variável independente (x) = ln(C), onde “ln” é logaritmo natural.

**Tabela 4.** Estatística dos modelos de regressão de densidade do solo.

Modelo	Parâmetro	B	EP	T	Valor-p	r	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> <sub>aj</sub>
<b>FPT1</b> / Ds = 0.656 - 0.0066*C + 0.192*pH - 0.0312*SB	C	0,656	0,29	2,26	0,029	n/a	62,3	59,5
	pH	-0,0066	0,001	-5,26	0,000			
		0,192	0,060	3,19	0,003			
	SB	-0,0312	0,014	-2,16	0,037			
<b>FPT2</b> / Ds = 1/[0,489 + 0,0301*(lnC) <sup>2</sup> ]	(lnC) <sup>2</sup>	0,489	0,024	20,10	0,000	0,85	72,0	71,4
		0,0301	0,003	10,50	0,000			

T: Estatística de Student; (β): β Estimado; EP: Erro Padrão de estimação; r: Coeficiente de correlação; R<sup>2</sup>/: Coeficiente de determinação; R<sup>2</sup><sub>aj</sub>: Coeficiente de determinação ajustado; n/a: não aplicável;.

\*\*\*\*Todas as variáveis apresentam nível de significância estatística\*\*\*\*

A análise da variância ou ANOVA (Tabela 5) mostra que a relação entre as variáveis é significativa com p-valor igual a zero, ou seja, menor que o nível de risco de 5%.

**Tabela 5.** Análise da variância (ANOVA)

	FPT1			FPT2		
	Modelo <sub>1</sub>	Resíduo <sub>1</sub>	Total <sub>1</sub>	Modelo <sub>2</sub>	Resíduo <sub>2</sub>	Total <sub>2</sub>
SQ	1,12	0,64	1,8	0,498	0,193	0,692
GL	3	41	44	1	43	44
QM	0,374	0,07		0,498	0,0045	
F-Ratio	22,58			110,69		
P-Valor	0,00			0,00		

SQ: soma dos quadrados; GL: grau de liberdade; QM: quadrado da média; F-Ratio: Coeficiente de Fischer; P-Valor: Valor crítico (nível de 5%)

## 4.3 Análise dos Resíduos

A Tabela 6 apresenta a estatística dos resíduos das duas funções de pedotransferência geradas na perspectiva de comparação e de avaliação.

O valor crítico (valor-p) pelo risco de 5% do teste de Shapiro-Wilks é respectivamente de 0,51 para o modelo FPT1 e 0,92 para o modelo FPT2; assim a idéia de que os resíduos são originados de uma distribuição normal não pode ser rejeitada. Tal asserção é indício de que a

média dos erros dos modelos tende a zero, o que foi confirmado pelo teste t de Student da média (Tabela 7).

**Tabela 6.** Estatística dos resíduos

<b>Estatística</b>	<b>FPT1</b>	<b>FPT2</b>
Média	-8,79E-8	0,008
Desvio padrão	0,124	0,139
Mínimo	-0,215	-0,351
Máximo	0,313	0,342
Assimetria	0,324	-0,224
Curtose	-0,054	0,362

**Tabela 7.** Testes da média e da normalidade dos resíduos para os dois modelos segundo os testes de Student e de Shapiro-Wilks respectivamente.

	Teste t de Student's			Teste de Shapiro-Wilks	
	Média	T	p(5%)	W	p(5%)
FPT1	-8,79E-8	-4,75E-7	1	0,97	0,51
FPT2	0,008	0,39	0,70	0,99	0,92

Hipótese nula: média = 0; T: estatística de Student's; W: estatística de Shapiro-Wilks; p(5%): valor-p

A detecção da presunção de homoscedasticidade foi realizada no aplicativo R 2.14.0, usando o pacote “*lmtest*” e aplicando o teste de Breusch-Pagan nas duas FPTs. O resultado do teste conduz à rejeição da hipótese nula  $H_0$  pela FPT1 com BP de 9,48 e valor-p de 0,002, indicando que a variância dos resíduos da mesma não é constante. Quanto à FPT2 foi aceita a hipótese nula  $H_0$  traduzindo a presença de homoscedasticidade evidenciada pelos parâmetros do teste (BP 1,21 e valor-p 0,27). A homoscedasticidade é uma circunstância favorável para uma função de regressão ser válida.

#### **4.4 Avaliação dos Modelos com Relação a Parâmetros de Erros e por Comparação**

Conforme descrito no item 3.5, os parâmetros erro médio de predição (MPE) e a raiz quadrada do erro quadrado médio de predição (RMSPE) são usados, para julgar do desempenho das FPTs geradas, ajustando-as à amostra independente (Tabela 8) e ao mesmo tempo comparando-os com outras FPTs publicadas (Tabela 9).

Ao considerar a variabilidade dos dados apresentados na Tabela 8, percebe-se que apenas a variável soma das bases (SB) apresentou coeficiente de variação maior que 50%. Isso traduz que as outras variáveis envolvidas nas funções de pedotransferência a serem ajustadas com a amostra, têm homogeneidade, apesar de o tamanho amostral ser pequeno. Pelo que diz respeito à correlação entre a densidade e as outras variáveis, verificou-se que as variáveis texturais não apresentaram correlação significativa com a densidade do solo.

**Tabela 8.** Estatística da amostra independente

ESTATÍSTICA	pH	Ag	Af	Silte	Arg	C	Mo	SB	Ds
	-	-----g.kg <sup>-1</sup> -----					%	cmol <sub>c</sub> .kg <sup>-1</sup>	Mg.m <sup>-3</sup>
Média	4,88	416	160	145	279	13,7	2,41	1,4	1,40
Mediana	4,9	416	158	141	284	13,1	2,3	1,2	1,40
Desvio padrão	0,45	96,20	60,30	50,60	120,00	6,64	1,16	1,20	0,21
CV (%)	9	23	38	35	43	48	48	86	15
Mínimo	3,9	260	61	87	121	3,3	0,58	0,3	0,90
Máximo	5,9	553	312	260	507	28	4,91	4,9	1,70
Assimetria	0,09	-0,16	1,02	1,01	0,36	0,99	0,99	2,38	-1,20
Curtose	3,21	-1,05	2,84	0,98	-0,59	1,38	1,37	6,39	1,72
Correlação (Ds)	0,64	-0,33	-0,12	-0,16	0,39	-0,85	-0,85	0,22	1
Valor-p	0,02	0,28	0,7	0,61	0,19	0,00	0,00	0,48	0,00

Ds: densidade do solo; Ag: areia grossa; Af: areia fina; C: carbono orgânico; S: soma das bases; Mo: matéria orgânica [Mo (%) = 1,724\*C].

Ds<sup>1</sup> correlação entre a densidade do solo e as outras variáveis. \*Correlação significativa a 95% de confiança.

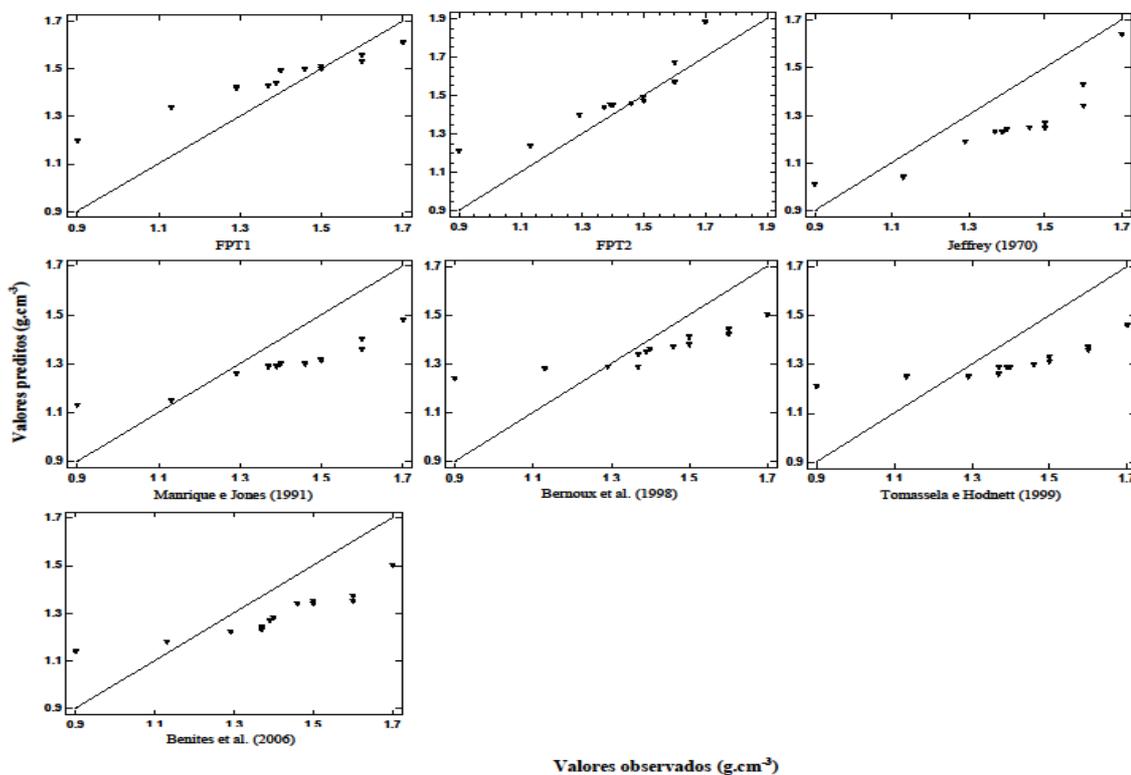
**Tabela 9.** Avaliação por comparação com outras FPTs.

Referência	Formula (Ds)	MPE	RMSPE	r <sub>p</sub>	R <sup>2</sup> <sub>p</sub>
		-----Mg.m <sup>-3</sup> -----			
†FPT1	0.656 - 0.0066*C + 0.192*pH - 0.0312*SB	0,06	0,21	0,80	0,64
†FPT2	1/[0,489 + 0,0301*(lnC) <sup>2</sup> ]	0,08	0,22	0,71	0,51
Jeffrey (1970)	1,482 - 0,6786*log <sub>10</sub> (OM)	-0,14	0,20	0,71	0,51
Manrique e Jones (1991)	1,660 - 0,318* $\sqrt{OC}$	-0,1	0,18	0,80	0,64
Bernoux et al. (1998)	1,524 - 0,0046(%argila) - 0,051(%COT) - 0,0045(pH <sub>água</sub> ) + 0,001(%areia)	-0,04	0,22	0,03	0,0
Tomasella e Hodnett (1998)	1,578 - 0,054(%COT) - 0,006(%silte) - 0,004(%argila)	-0,10	0,22	0,26	0,07
Benites et al. (2006)	1,56 - 0,0005 argila - 0,0100COT + 0,0075SB	-0,11	0,22	0,37	0,13

†FPT1: Primeira Função de Pedotransferência gerada; †FPT2: Segunda Função de Pedotransferência gerada; MPE: Erro médio de predição; RMSPE: Raiz Quadrado médio do erro de predição; r<sub>p</sub>: Correlação entre densidade observada e predita; R<sup>2</sup><sub>p</sub>: Coeficiente de determinação de predição; OM: estimativa da matéria orgânica (%) conforme a seguinte formula: OM = 1.724\*OC; OC: carbono orgânico (%); COT: carbono orgânico total; SB: soma das bases; C: carbono orgânico.

Na Tabela 9 mostrando o resultado do ajustamento das PTFs, nota-se que os modelos publicados subestimam a densidade do solo, evidenciando valor de MPE negativo. A mesma observação foi feita por De Vos et al. (2005) na Belgica, analisando a qualidade preditiva de doze funções de pedotranferência.

Pelo contrário, as FPTs propostas superestimam a densidade do solo. Os maiores valores de RMSPE foram constatados tanto pela FPT2 como pelas FPTs de Bernoux et al. (1998) e de Benites et al. (2006) enquanto a FPT de Manrique e Jones (1991) mostrou menor valor pelo parâmetro considerado. Baseando-se nos coeficientes de correlação ( $r$ ) e de determinação  $R^2$  entre os valores observados e preditos (Figura 17), as FPTs que envolvem as variáveis texturais, acusaram os valores mais baixos. Este fato é compreensível na medida em que não foi constatada correlação significativa entre a densidade do solo e as variáveis texturais.



**Figura 17.** Valores observados e preditos para as FPTs propostas e publicadas.

Ao analisar os parâmetros em conjunto, a FPT1 desenvolvida ( $D_s = 0.656 - 0.0066 * C + 0.192 * pH - 0.0312 * SB$ ) mostrou maior desempenho, seguido pela FPT de Manrique e Jones (1991). Dentre das duas FPTs desenvolvidas, a FPT2 ( $D_s = 1 / [0.489 + 0.0301 * (\ln C)^2]$ ) com erro de imprecisão representado pelo RMSPE (raiz quadrado médio do erro de predição) de  $0,22 \text{ Mg.m}^{-3}$  e superestimação de  $0,08 \text{ Mg.m}^{-3}$  foi escolhida, por ser simples, envolvendo a variável única de carbono orgânico e conseqüentemente facilmente aplicável. Esta função assemelha-se ao modelo desenvolvido por Jeffrey (1970), corroborando a asserção de que a relação entre o carbono e a densidade não é linear.

A análise comparativa entre os valores observados e preditos pela FPT escolhida foi realizada a partir do ajustamento com a amostra independente. A média e o desvio padrão dos valores observados e preditos, comparados respectivamente segundo os testes T de Student e F de Fischer, não foram constatados diferentes a 95% de confiança. Além disso, o teste de

normalidade de Shapiro-Wilks associado ao teste de *Chi-2* mostra que as duas amostras estão originadas de distribuição normal (Tabela 10).

**Tabela 10.** Testes de comparação das médias e dos desvios padrões segundo Student's e Fischer; e testes de normalidade

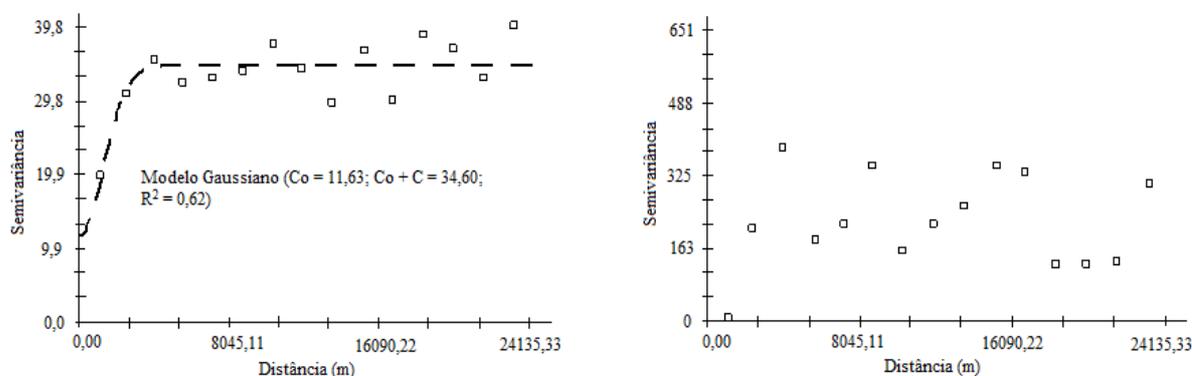
	Student	Fischer	Shapiro-Wilks		Chi-2	
Valores da Densidade	Média	DVP	W	p(5%)	Q	p(5%)
Observados	1,40 +/- 0,127	0,21	0,92	0,26	4,77	0,78
Preditos	1,47 +/- 0,103	0,17	0,89	0,09	14,9	0,06
Valor-p (5%)	0,33	0,47				

H0:  $\mu_1 = \mu_2$  pela média; H0:  $\sigma_1 = \sigma_2$  pelo desvio padrão;

DVP: desvio padrão; W: estatística de Shapiro-Wilks; Q: estatística de Chi-2; p(5%): valor-p.

A geração de semivariograma respectivamente aos dados do carbono orgânico e espessura do horizonte A, revelou que apenas a espessura apresentou dependência espacial com IDE de 63% caracterizado de moderado, efeito pepita (Co) de 11,63, patamar (Co + C) de 34,60 e  $R^2$  de 0,63 pelo modelo isotrópico Gaussiano. Quanto à covariável carbono orgânico, pelo contrário, foi observada alta aleatoriedade. Consequentemente, a krigagem foi usada para espacializar a espessura, enquanto o carbono orgânico foi espacializado através do interpolador determinístico "inverso do quadrado da distância" (IDW) (Figura 18).

A não adequação do carbono à krigagem pode ser explicada pela grande variação desse atributo e a sua distribuição muito discrepante em relação à normalidade.

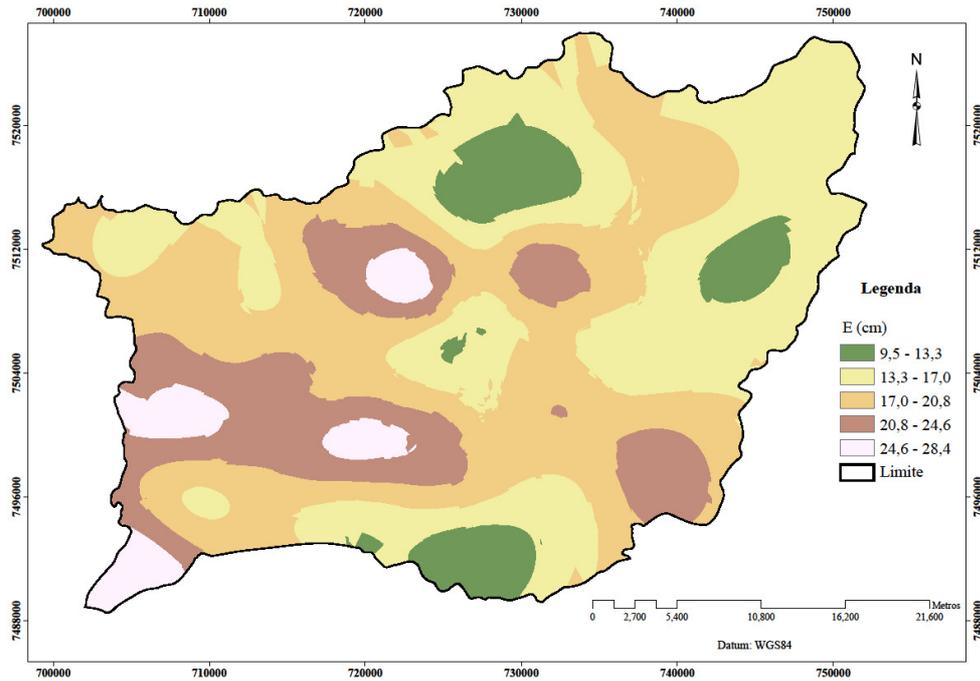


**Figura 18.** Modelo de semivariograma respectivamente da espessura e do carbono.

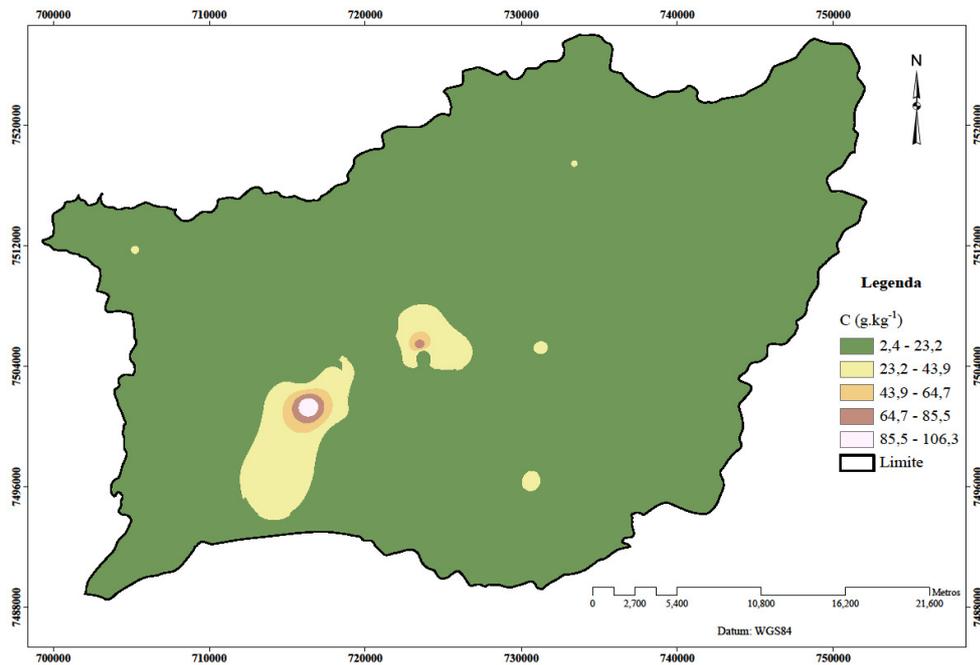
#### 4.5. Espacialização da Densidade do Solo

A densidade do solo foi espacializada através da espessura do horizonte A como variável (Figura 19) e através da aplicação do algoritmo da FPT2, incluindo a variável carbono orgânico (Figura 20).

A análise da distribuição da densidade do solo (DS) (Figura 21) mostra que ocorreu uma maior concentração na classe entre 1,34 e 1,41  $Mg.m^{-3}$  e 96% da área têm Ds com valores menores que 1,51  $Mg.m^{-3}$ , o que indica quase ausência do fenômeno de compactação do horizonte A, favorecendo assim o desenvolvimento da maioria das espécies cultivadas. A mesma interpretação foi feita por Manrique e Jones (1991) que observaram que a maioria dos solos minerais, em estado natural, tem densidade do solo entre 1,1 e 1,6  $Mg.m^{-3}$ .



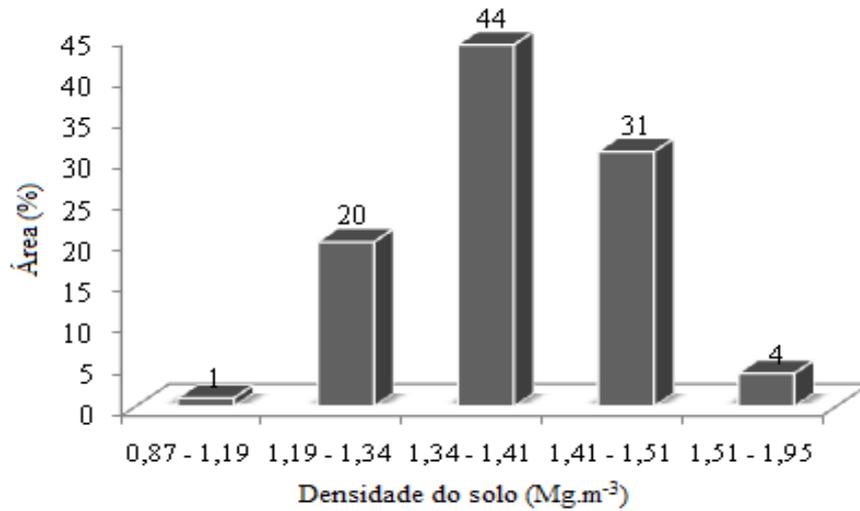
**Figura 19.** Espacialização da espessura do horizonte A.



**Figura 20.** Espacialização do carbono orgânico.

A resiliência do solo com densidade relativamente baixa à compactação é uma função da matéria orgânica, constatação que foi igualmente feita por Fernandez-Medina (1985).

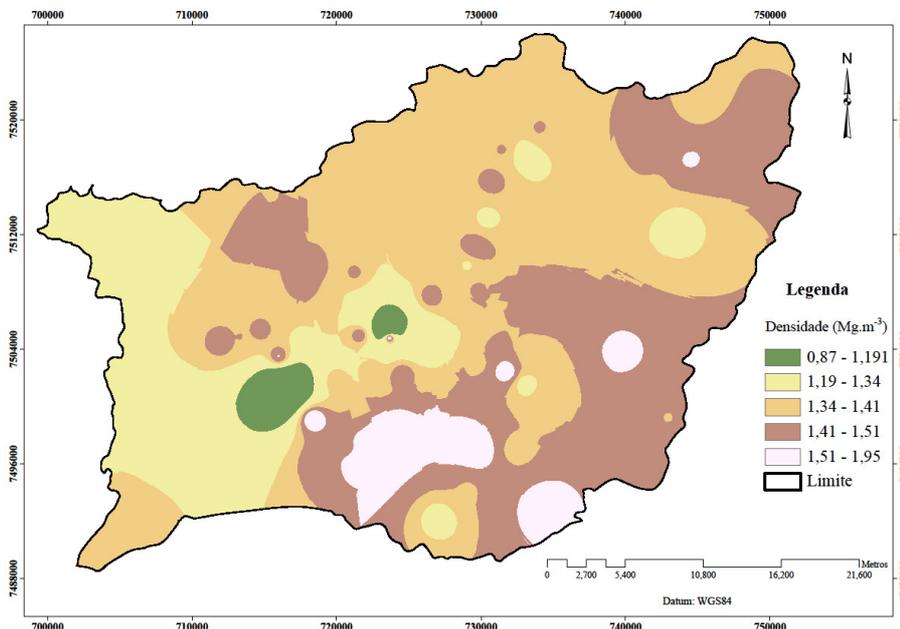
Pode-se observar diferença de  $0,02 \text{ Mg.m}^{-3}$  entre a média encontrada ( $1,38 \text{ Mg.m}^{-3}$ ), e o valor médio de densidade dos solos do Brasil  $1,36 \text{ Mg.m}^{-3}$  relatado por Benites et al. (2006).



**Figura 21.** Distribuição das classes de densidade do solo (Ds) na área.

Esta distribuição não segue nenhum padrão da paisagem, ou seja, os atributos do terreno tais como relevo e declive não explicam a variação da densidade do solo na área.

Pode-se observar na Figura 22 que os menores valores de densidade estimados pelo modelo encontram-se principalmente nas áreas dos terraços fluviais e na parte baixa da bacia. Essas áreas estão ocupadas principalmente por pastagens e podem apresentar solos hidromórficos, os quais geralmente apresentam baixa densidade.

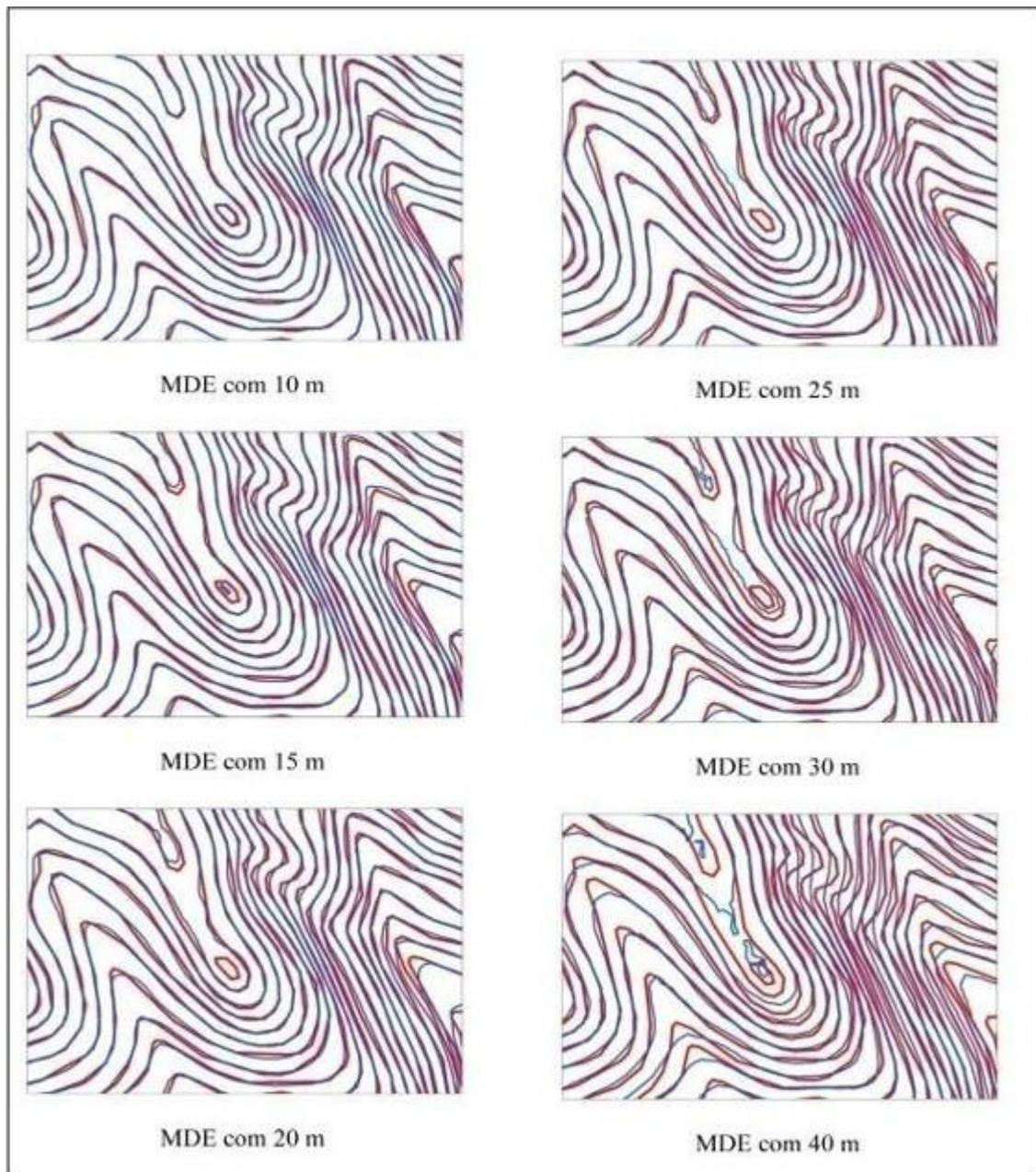


**Figura 22.** Espacialização da densidade do solo (Ds).

#### 4.6 Avaliação e Definição do Tamanho da Célula do Modelo Digital de Elevação

Na comparação visual das curvas geradas a partir dos modelos de 40, 30, 25, 20, 15 e 10 m (Figura 23), verificou-se que as curvas correspondentes à grade de 10 m de resolução apresentaram melhor adequação com as curvas originais. Portanto, foi o MDE a partir do qual foi derivado o atributo declive. Segundo Chagas (2006), o objetivo que se busca na criação de

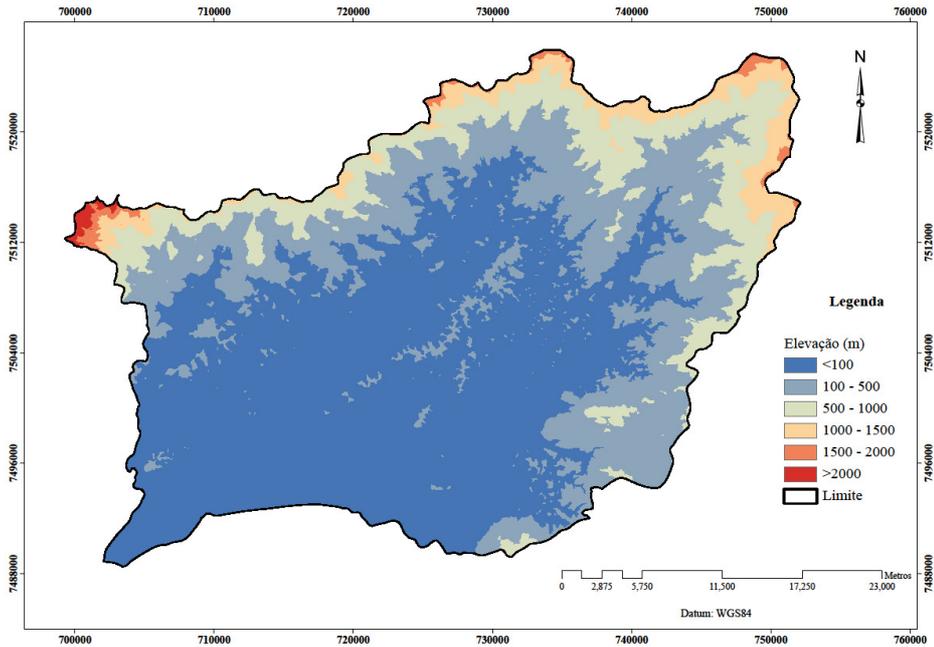
um MDE é a obtenção de um modelo que contenha o máximo possível de detalhes topográficos, preservando sempre as características do terreno.



**Figura 23:** Comparação visual dos MDEs com a curva original de cor vermelha.

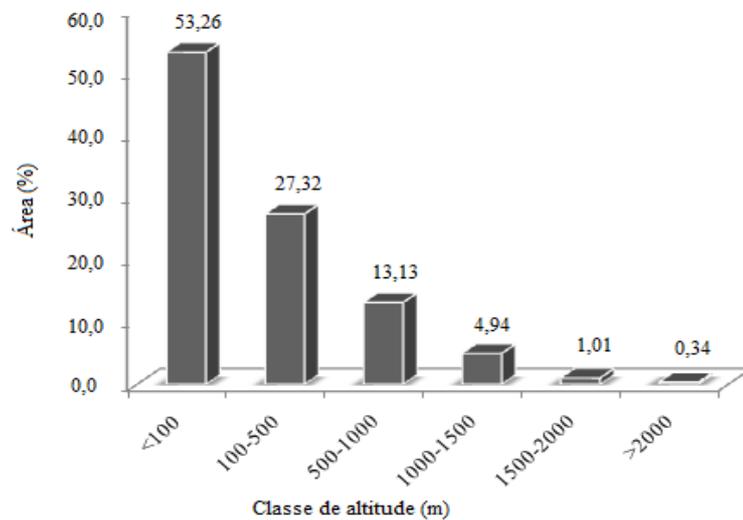
#### **4.7 Modelo Digital de Elevação (MDE) e Declividade**

O modelo digital de elevação (MDE) gerado mostra que a altitude da área varia de 0 m a mais de 2200 m (Figura 24). O gradiente de altitude segue um padrão geomorfológico com área de planície e várzea saindo da Baía de Guanabara para subir gradualmente até as escarpas serranas onde o relevo pode ser caracterizado de montanhoso a escarpado. Porém, a região mais elevada da bacia está localizada ao oeste da bacia.



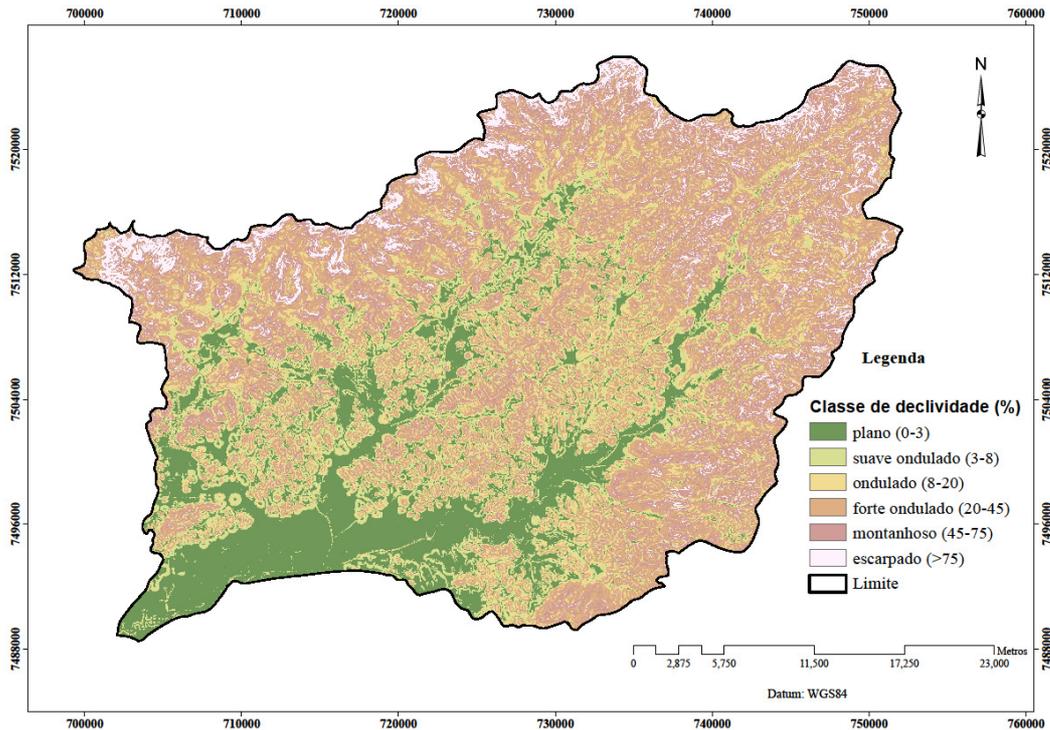
**Figura 24.** Modelo Digital de Elevação da bacia Guapi-Macacu.

Da variação da altitude, observa-se que 53 % da área têm altitude menor que 100 metros, enquanto menos que 0,5% da área tem altitude maior que 2000 metros (Figura 25).



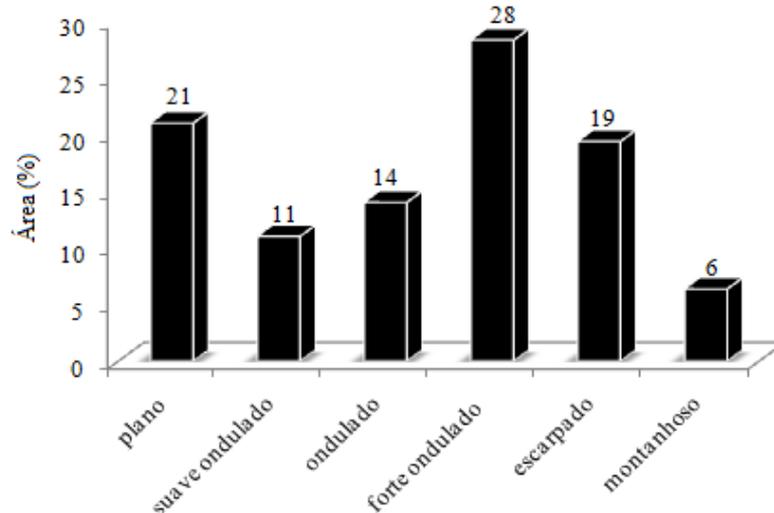
**Figura 25.** Distribuição em percentagem das classes de altitude na bacia.

Quanto à declividade da bacia, observa-se boa adequação entre o padrão de declividade e as feições geomorfológicas evidenciadas pelo MDE. Como apresentado no mapa (Figura 26), encontram-se na área as seis classes de declive segundo a EMBRAPA.



**Figura 26.** Classes de declividade da bacia Guapi-Macacu.

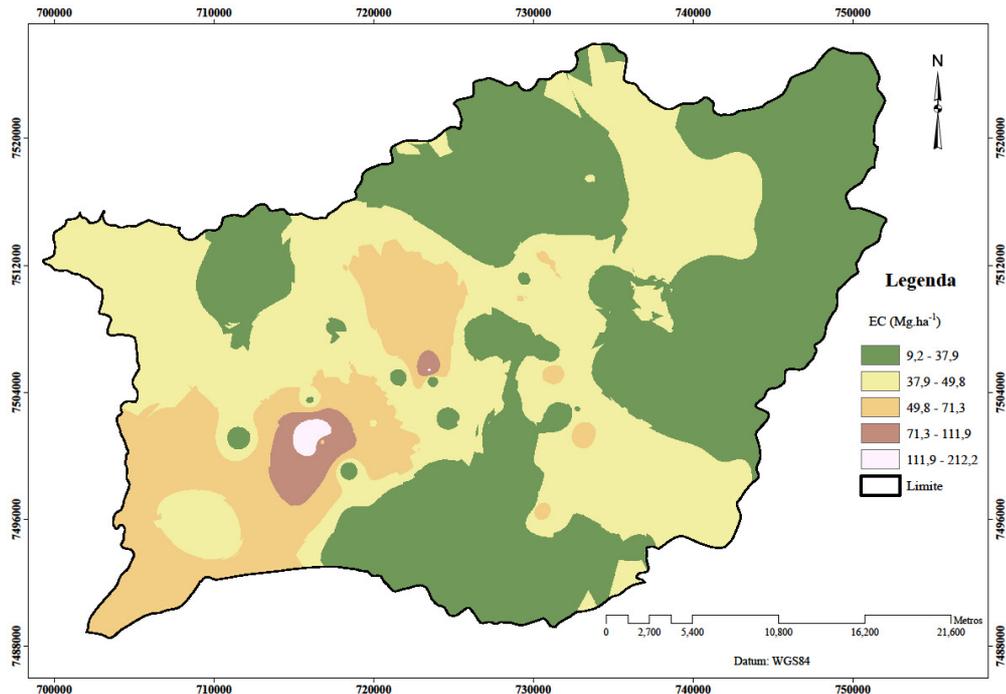
A Figura 27 mostra que duas classes de relevo dominam na área: a forte ondulado, correspondendo à faixa de 20-45 % de declive e que representa 28% da bacia, e a classe plano, com declive entre 0-3%, com 21% da área. As classes escarpado e montanhoso ocupando a parte mais alta da paisagem, representam 25% da área. Esse tipo de distribuição caracteriza área declivosa com implicação na dinâmica da água e no fluxo de massa em geral.



**Figura 27.** Distribuição em porcentagem das classes de declive

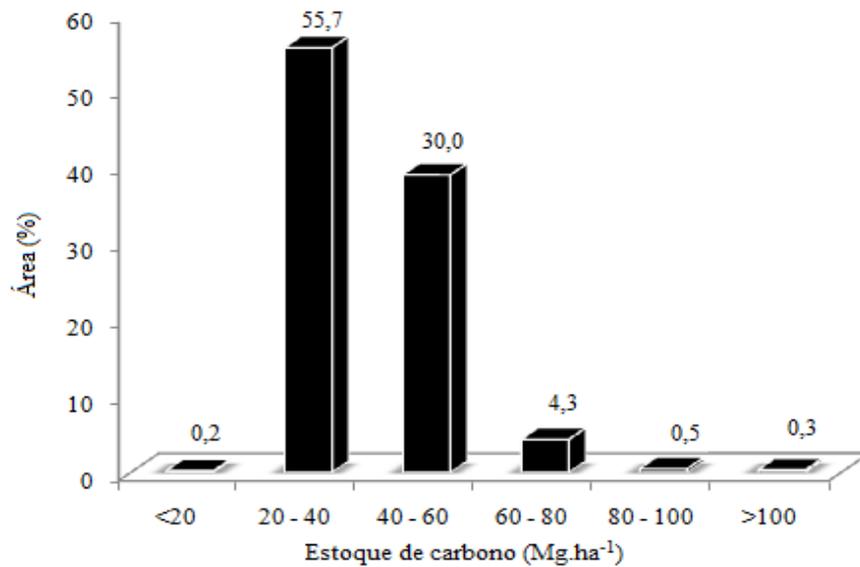
#### 4.8 Espacialização do Estoque de Carbono

Conforme descrito no item 3.6, a Figura 28 apresenta o estoque de carbono no horizonte A espacializado com espessura variável pela bacia Guapi-macacu.

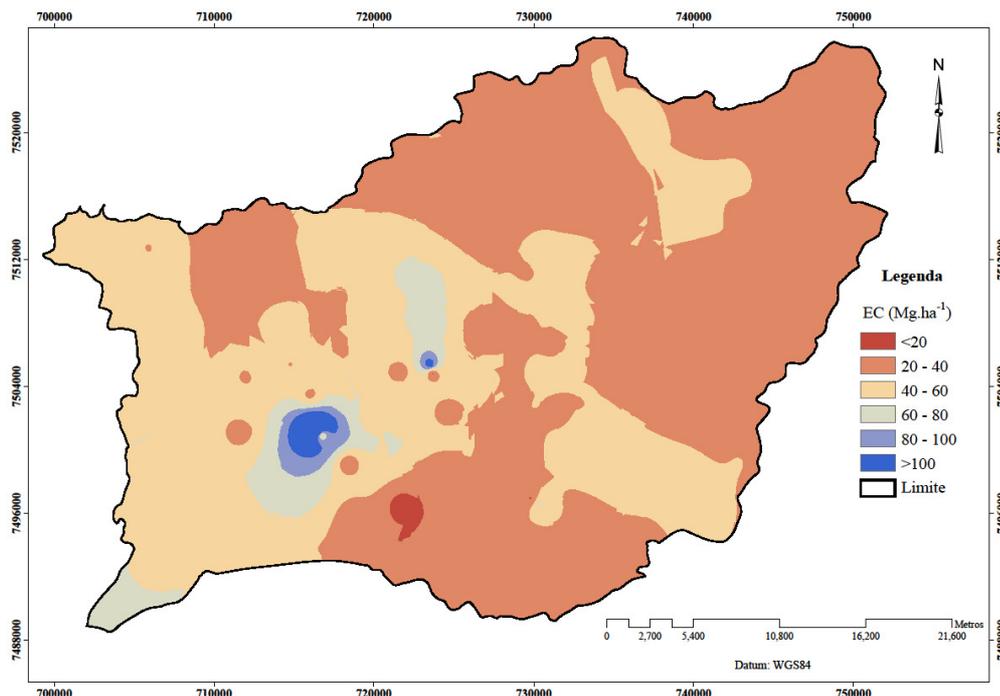


**Figura 28.** Estoque de carbono na bacia Guapi-macacu.

O estoque espacializado variou entre 9,2 a 212,2 Mg.ha<sup>-1</sup>. Destes valores, 95% da área apresentou um teor menor que 60 Mg.ha<sup>-1</sup>. Os valores acima de 100 Mg.ha<sup>-1</sup> constatados, representam menos de 1% conforme mostradas as Figuras 29 e 30. Assim a média geral de 41±12 Mg.ha<sup>-1</sup>, se aproxima dos teores reportados por CORREZZA et al. (1999) no cerrado.



**Figura 29.** Distribuição em porcentagem da área dos valores do estoque de carbono.



**Figura 30.** Estoque de carbono reclassificado na bacia Guapi-macacu.

Os valores mapeados parecem relativamente elevados, mas ao considerar o gradiente de espessura do horizonte A e a morfologia do terreno, a grande variação de estoque observada pode ser consistente na medida em que, se trata de uma área altamente heterogênea e bastante declivosa evidenciando ao mesmo tempo a presença de setores com grande acumulação e áreas de baixo teor de carbono. Observação semelhante foi feita por Mendonça-Santos et al. (2007) que mapearam o estoque de carbono do Estado do Rio de Janeiro na camada superficial entre 0-10 cm e verificaram uma variação de 0 a 71  $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Segundo estes autores isso se deve ao tipo de solo e a sua posição na paisagem.

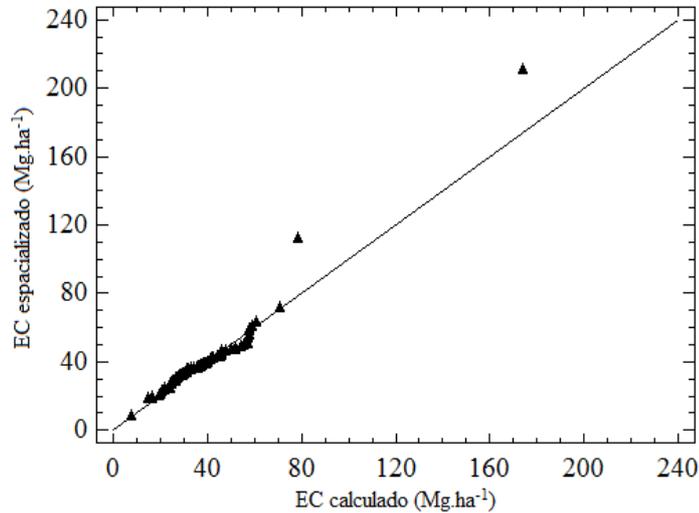
#### 4.9 Comparação dos Valores Calculados com os Especializados do Estoque de Carbono

A Tabela 11 apresenta os parâmetros estatísticos dos estoques de carbono calculado nos pontos amostrais e especializado. Ao analisar os valores das medidas de posição e de dispersão, pode-se ter uma primeira idéia do nível de aproximação dos dois grupos.

**Tabela 11.** Estatística dos valores calculados e especializados do estoque de carbono

Parâmetros	Estoque de carbono (EC)	
	Calculado	Especializado
Média	38,3 +/- 4,65	41,3 +/- 5,44
Mediana	35,7	37,7
Desvio padrão	20,6	24,1
CV (%)	54	58
Mínimo	7,7	9,3
Maximo	174,0	212,0
Coeficiente de assimetria	3,9	5,0
Curtose	24,1	33,5

O gráfico dos estoques calculados e mapeados (Figura 31) mostra que as duas distribuições são semelhantes, embora exista um pequeno afastamento nos maiores valores e ligeira superestimação nos valores espacializados. O coeficiente de correlação de Pearson indica bom desempenho na reprodução dos valores, com  $r$  de 0,96 ao nível de confiança de 95%.



**Figura 31.** Gráfico dos valores observados e preditos do estoque de carbono.

A comparação da média e do desvio padrão segundo os testes respectivos de Student's e Fisher pode ser observada na Tabela 12. O valor-p de ambos os testes indica que os dois parâmetros não são diferentes ao nível crítico de 5%.

**Tabela 12.** Testes t de comparação da média e F desvio padrão.

Teste de t Student's		Teste F de Fisher	
T	Valor-p	F	Valor-p
-0,841	0,40	0,73	0,17

H0:  $\mu_1 = \mu_2$  pela média; H0:  $\sigma_1 = \sigma_2$  pelo desvio padrão.

#### 4.10 Análise do Estoque de Carbono em Relação ao Uso do Solo

Procurando-se explicar a distribuição espacial do estoque de carbono (EC) em função das classes de uso do solo na bacia, observa-se que a área agrícola apresenta maior coeficiente de variação, indicando maior variabilidade dessas áreas.

Na Tabela 13 pode-se observar que o maior estoque de carbono está associado à classe de pastagem, com valor médio de  $45,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ , enquanto o menor valor ocorre na classe Campo de altitude com valor médio de  $37,1 \text{ Mg.ha}^{-1}$ . Vários estudos mostram maior teor de C orgânico em solos sob pastagens em relação a outros sistemas (NEILL et al.; 1997).

O teor de  $43,6 \text{ Mg.ha}^{-1}$  de estoque carbono associado à área agrícola, pode ser explicado pela sua localização na paisagem. Segundo Pedreira et al. (2009), na bacia Guapi-Macacu, as áreas de produção agrícola estão concentradas ao longo dos rios principais e nas baixadas, que correspondem a ambientes de acúmulo (importador) de sedimentos em geral e de maior preservação de material orgânico, consequentemente o alto teor de carbono observado na área pode ser imputável a essa condição.

**Tabela 13.** Estoque de carbono em classes de uso na bacia Guapi-macacu

USO	MIN	MAX	MÉDIA	DP	CV (%)	N
	----- Mg.ha <sup>-1</sup> -----					
AGRI	21,3	94,9	43,6	18,0	41	20
CA	23,2	46,1	37,1	7,07	19	20
P	31,4	66,5	45,5	9,51	21	20
VEAR	29,0	61,7	39,1	7,47	19	20
Total	21,3	94,9	41,3	11,7	28	80

AGRI: área agrícola; P: pastagem; CA: campo de altitude; VEAR: vegetação em estágio avançado de regeneração; CV: coeficiente de variação; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; MÉDIA: média por classe de uso; MÉDIA<sup>1</sup>: média das 20 observações extraídas por classe de uso.

Da análise de variância (ANOVA) realizada com a amostra extraída e sorteada (Tabela 14), observa-se a ocorrência de diferença significativa do estoque de carbono entre as classes de uso com valor-p menor que 0,05.

**Tabela 14.** ANOVA do estoque de carbono em classes de uso

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	Valor-p
Entre grupos	906,0	3	302,0	2,32	0,08
Dentro tratamentos	9,88E3	76	130,0		
Total (Corr.)	1,08E4	79			

SQ: Soma dos quadrados; QM: Quadrado da média; GL: grau de liberdade.

No intuito de discriminar as classes de uso em relação aos valores do estoque de carbono, foi aplicado o teste LSD de Fisher, que mostrou diferença significativa apenas entre as classes pastagem e campo de altitude, ao considerar-se um nível de significância de 5% (Tabela 15). Essas diferenças são imputáveis ao fato de que a vegetação caracterizada campo de altitude está localizada nas áreas onde ocorre maior grau de erosão deixando os materiais mais grosseiros, incapaz de fixar o carbono, além de apresentar uma cobertura vegetal natural mais rala.

**Tabela 15.** Comparação múltipla das médias segundo o teste LSD de Fisher

USO	MÉDIA <sup>1</sup> (Mg.ha <sup>-1</sup> )	CONTRASTE	DIF.	+/-LIMITE
AGRI	43,6	AGRI – CA	6,44	7,18
P	37,1	AGRI - P	-1,97	7,18
CA	45,5	AGRI - VEAR	4,46	7,18
VEAR	39,1	<b>CA – P*</b>	<b>-8,41</b>	<b>7,18</b>
-	-	CA - VEAR	-1,98	7,18
-	-	P - VEAR	6,43	7,18

AGRI: área agrícola; P: pastagem; CA: campo de altitude; VEAR: vegetação em estágio avançado de regeneração; DIF.: diferença entre as médias das classes de uso.

#### 4.11 Análise do Estoque de Carbono com Relação ao Declive

Analisou-se a distribuição do estoque de carbono na área com relação ao atributo do terreno declive, e calculou-se a estatística do estoque para cada classe de relevo (Tabela 16),

verificou-se que o maior valor do estoque de carbono está associado ao relevo plano (44,8 Mg.ha<sup>-1</sup>) enquanto, o menor valor (37,5 Mg.ha<sup>-1</sup>) está relacionado ao relevo escarpado.

**Tabela 16.** Estoque de carbono em classes de relevo

Declive	CD (%)	Min	Max	Média	DP	CV (%)	N
		----- Mg.ha <sup>-1</sup> -----					
PL	0-3	22,5	71,2	44,8	13,9	31	20
SO	3-8	21,4	67,3	42,1	12,3	29	20
O	8-20	27,4	63,8	40,9	8,71	21	20
FO	20-45	28,4	55,1	40	7,09	18	20
MO	45-75	21,2	94,7	39	14,5	37	20
ES	>75	27,7	45,5	37,5	4,73	13	20
Total		21,2	94,7	40,7	10,8	27	120

PL: plano; SO: suave ondulado; O: ondulado; FO: forte ondulado; MO: montanhoso; ES: escarpado; DP: desvio padrão; CV: coeficiente de variação; MÉDIA<sup>2</sup>: média das 20 observações extraídas por classe de declive (CD).

A análise de variância foi calculada a partir da estatística da amostra extraída e sorteada para as seis classes de relevo (Tabela 17). Verificou-se que globalmente não existe diferença significativa entre pelo menos uma classe de relevo.

**Tabela 17.** ANOVA do estoque de carbono em classes de relevo

Fonte de variação	SQ	GL	QM	F	Valor-p
Entre grupos	651,0	5	130,0	1,11	0,3579
Dentro tratamentos	1,33E4	114	117,0		
Total (Corr.)	1,4E4	119			

SQ: Soma dos quadrados; QM: Quadrado da média; GL: grau de liberdade

Na Tabela 18 é apresentada a comparação múltipla das médias nas seis (6) classes de relevo conforme o teste LSD de FISHER. Observa-se que nas classes de relevo plano e escarpado, a diferença do estoque de carbono é significativa ao valor crítico de 0,05.

O relevo como fator de formação do solo, conforme apontado por Jenny (1941), associado com a declividade, controla o fluxo da água. Assim, é compreensível que a ação erosiva da água na área pode levar à acumulação de materiais incluindo a matéria orgânica na parte mais baixa da paisagem, resultando em acumulação de materiais e de água. O mapa de solo da área evidencia o predomínio de afloramento rochoso e de Neossolo Litólico na parte mais alta da paisagem, implicando no maior escoamento superficial da água, susceptível de potencializar as perdas de solos nessas partes altas.

Segundo Kleiss (1970), condição de alta umidade no relevo plano e nas depressões limita as atividades microbianas, contribuindo assim à acumulação da matéria orgânica.

**Tabela 18.** Comparação múltipla das médias segundo o teste LSD de FISHER

DECLIVE	MÉDIA	GRUPOS	DIFERENÇA	+/- LIMITES
PL	44,8	ES – FO	-2,49	6,78
SO	42,1	ES – MONT	-1,51	6,78
O	40,9	ES – O	-3,41	6,78
FO	40	<b>ES – PL*</b>	<b>-7,3</b>	<b>6,78</b>
MO	39	ES – SO	-4,64	6,78
ES	37,5	FO – MONT	0,979	6,78
-	-	FO – O	-0,917	6,78
-	-	FO – PL	-4,81	6,78
-	-	FO – SO	-2,15	6,78
-	-	MONT – O	-1,9	6,78
-	-	MONT – PL	-5,79	6,78
-	-	MONT – SO	-3,13	6,78
-	-	O – PL	-3,9	6,78
-	-	O – SO	-1,24	6,78
-	-	PL – SO	2,66	6,78

ES: escarpado; FO: forte ondulado; MO: montanhoso; O: ondulado; PL: plano; SO: suave ondulado.

\*diferença significativa ao valor crítico de 0,05.

## 5 CONCLUSÕES

- Os Modelos de regressão linear múltipla e de regressão não linear são capazes de prever a Ds do solo nas condições dos solos da bacia Guapi-Macacu, a partir de outras propriedades do solo, especificamente o carbono orgânico, sendo a relação entre o carbono orgânico e a densidade do solo na maioria dos casos é não linear.

- A proposta é adequada para prever a densidade da maioria dos solos brasileiros, baseando-se nos valores espacializados com variação de 0,87 a 1,95 Mg.m<sup>-3</sup>. Esses valores cobrem uma ampla faixa de solos com características físicas diferenciadas desde Organossolos até solos adensados ou compactados.

- Ao considerar o MPE e o RMSPE das funções de pedotransferência publicadas, os fatores locais influenciam nos seus resultados. Isto é, os modelos de pedotransferência podem dificilmente ser adequados às condições pedológicas diferentes da qual que foram desenvolvidas. Além disso, o grau de correlação existente entre cada par de variáveis é um condicionante para o ajustamento de qualquer tipo de FPT a um determinado dado de solos.

- O estoque de carbono do solo da bacia Guapi-Macacu é influenciado pelo uso do solo e pelo declive. O estoque de carbono nas áreas de vegetação em estágio avançado de regeneração foi menor que nas classes de pastagem e área agrícola, explicado pela forte influência do relevo, pois as áreas de baixada apresentaram alta condição de umidade e maior acúmulo de carbono.

- O uso do SIG e da geoestatística tem potencial para auxiliar no entendimento de processos de ocorrência e na espacialização de vários atributos de solo, particularmente para densidade do solo e estoque de carbono.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMADOR, E. S. Baía de Guanabara e Ecossistemas Periféricos: homem e natureza. Tese de Doutorado. PPGG Instituto de Geociências/UFRJ, Ed. Reproarte Gráfica e Editora, 1997. 539p.
- ARROUAYS, D., PELISSIER, P. Modeling carbon storage profiles in temperate forest humic loamy soils of France. *Soil Science*, v.157:185-192, 1994.
- BEHRENS, T., SCHOLTEN, T. Digital soil mapping in Germany—D-72070 Tübingen, Germany. *Revista J. Plant Nutr. Soil Sci.*, v.169:434–443, 2006.
- BENITES, V. M.; MACHADO, P. O. A.; FIGALDO, E. C. C.; COELHO, M. R.; MADARI, E. B.; LIMA, C. X. Funções de Pedotransferência para Estimativa da Densidade dos Solos Brasileiros. *EMBRAPA Solos*. 2006. 30p. ISSN 1678-0892.
- BERNOUX, M.; ARROUAYS, D.; CERRI, C.; VOLKOFF, B.; JOLIVET, C. Bulk densities of Brazilian Amazon soils related to other soil properties. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 62, n. 3, p. 743-749, May/ Jun. 1998.
- BERNOUX, M.; CARVALHO, M. C. S.; VOLKOFF, B.; CERRI, C. C. Brazil's BISHOP T.F.A, MCBRATNEY A. B. A comparison of prediction methods for the creation of field-extent soil property maps. *Geoderma*, p.149–160. 2001.
- BOCHNER J. K. Proposta Metodológica para Identificação de Áreas Prioritárias para Recomposição Florestal – Estudo de Caso: Bacia Hidrográfica do rio Macacu/RJ. 2010. 152p. Dissertação (Mestrado em ciência ambiental), Instituto Floresta - UFRRJ, Seropédica.
- BOUMA, J.; Van LANEN, J. A. J. Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: P.A.B. K.J. Beek, D.E. MacCormack (Eds). *Quantified land evaluation Procedures*. Earth Science Publications N.6 ITC Publ. Enschede. Netherlands, p. 106-110. 1987.
- BURROUGH, P.A e McDONNEL R. *A Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Oxford , 2005. 325p.
- BRUAND, A. ; DUVAL, O. ; GAILLARD, H. ; DARTHOUT, R.; JAMAGNE, M. ; Variabilité des propriétés de rétention en eau des sols: importance de la densité apparente. *Etude et Gestion des Sols*, 3(1), p. 27-40, 1996.
- BRUAND, A.; BAIZE, D.; HARDY, M; Prediction of water retention properties of clayey soils: validity of relationships using a single soil characteristic. *Soil Use Management*. 10, 3, p. 99–103, 1994.
- CABRAL JR., M.; MOTTA. J.F.M.; TANNO, L.C.; HELLMEISTER JR., Z. & COIMBRA, A.M. Revisão estratigráfica do Nordeste do Estado de São Paulo. In: *Simpósio sobre as Bacias Cretácicas Brasileiras*, 2, Rio Claro. Resumos Expandidos. Rio Claro: UNESP, 1992, p. 134-136.
- CARVALHO JUNIOR, W. Classificação Supervisionada de Pedopaisagens do Domínio dos Mares de Morros Utilizando Redes Neurais Artificiais. 2005. 143p. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade de Viçosa, Viçosa.

- CARVALHO, A.J.A.; SOUZA, E.H.; MARQUES, C.T.S.; GAMA, E.V.S.; NACIF, P.G.S. Caracterização física dos solos dos quintais agroflorestais e cultivos monotípicos na região de Amargosa, Bahia. *Rev. Bras. de Agroecologia*. vol.2, n.2. p. 941-944. 2007.
- CHAGAS, C. da S. Mapeamento digital de solos por correlação ambiental e redes neurais em uma bacia hidrográfica no domínio de mar de morros. 2006. 239p. Tese (Doutorado em solos e nutrição de plantas). Universidade de Viçosa, Viçosa.
- CHAUVEL, A. Recherches sur la transformation des sols ferrallitiques dans la zone tropicale à saisons contrastées. Evolution et réorganisation des sols rouges de moyenne Casamance. 1977. 532 p. Thèse, Université de Strasbourg. ORSTOM, Paris.
- DANTAS, M. E. Geomorfologia. Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro. Brasília-DF, CPRM-DEGET. 2000. 66 p.
- DE VOS, B.; VAN MEIRVENNE, M.; QUATAERT, P.; DECKERS, J.; MUYS, B. Predictive Quality of Pedotransfer Functions for Estimating Bulk Density of Forest Soils. On Published in *Soil Sci. Soc. Am. J.* p. 500–510. 2005.
- DIGGLE, P. J.; RIBEIRO Jr, P. J. Model based geostatistics. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA, 14., Caxambu, 2000. Resumos. Caxambu: Associação Brasileira de Estatística, 2000, 192 p.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America, 35, p. 3-22. 1994.
- EFRON, B.; TIBSHIRANI, R. *An introduction to the bootstrap*. New York, Chapman & Hall, 1993. 436p.
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, EMBRAPA/CNPS. Rio de Janeiro, RJ, 212p. 1997.
- ESSINGTON, M. E.; *Soil and water chemistry: an integrative approach*. CRC Press. 2003. 533 p. ISBN 0-8493-1258-2.
- FERNANDEZ-MEDINA, B. Influência de dois métodos de preparo de área na compactação de um Latossolo amarelo. *R. bras. Ci. Solo*, Campinas, 9:67-71, 1985.
- HELDER, C. Subsídios para Gestão dos Recursos Hídricos das Bacias Hidrográficas dos rios Macacu, São João, Macaé e Macabu. SEMA, Rio de Janeiro, 1999, 280 p.
- HEUMANN, S.; BOTTCHEER, J. & SPRINGOB, B. Pedotransfer functions for the pool size of slowly mineralizable organic N in sandy arable soils. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science–Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, 166, p. 308–318, 2003.
- IMAN, R.L. 1992. Uncertainty and Sensitivity Analysis for Computer Modeling Applications, Reliability Technology. The Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers, Anaheim, California, nov. 8-13, p. 153-168, 1992.
- INSTITUTO BIOATLÂNTICA. Projeto entre Serras e Águas - Elaboração da Proposta de Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental da Bacia do Rio Macacu. Disponível em: <<http://www.bioatlantica.org.br>> Acessado em 12 de setembro de 2011.
- JEFFREY, D.W. A note on the use of ignition loss as a means for the approximate estimation of soil bulk density. *J. Ecol.* 58, p. 297–299. 1970.

- JENKINSON D.S AND RAYNER J.H. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted Classical Experiments. *Soil Science* 123, p. 298-305, 1977.
- KLEISS, H. J. Hillslope sedimentation and soil formation in northeastern Iowa. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, p. 287–290, 1970.
- LIMA, M. R., CABRAL JUNIOR, M. & STEFANI, F. L. Palinologia de Sedimentos da Formação Macacu - Rifte da Guanabara, Terciário do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *An. Acad. Bras. Ci.*, Rio de Janeiro, 68 (4): 531- 543. 1996.
- MACHADO, P. L. O. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, São Paulo, Vol. 28, No. 2, 329-334, mar.- abr., 2005.
- MAERTENS, C. La résistance mécanique des sols à la pénétration: ses facteurs et son influence sur l'enracinement. *Annual Agronomie.*, v. 15, n. 5, p. 539-557, 1964.
- MAJOU H. AL ; BRUAND A ; DUVAL O. & COUSIN I. Comparaison de fonctions de pédotransfert nationales et européennes pour prédire les propriétés de rétention en eau des sols. *Etude et Gestion des Sols*, Paris, 14, p. 103-116. 2007.
- MANRIQUE, L. A. & C. A. JONES. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 55: 476–481. 1991.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. A conditioned Latin hypercube method for sampling in the presence of ancillary information. *Computers & Geosciences*, 32, p. 1378-1388. 2006.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; MENDOÇA-SANTOS, M. L.; ODEH, I. O. A.; GUYON, B. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley. *Australian Journal of Soil Research*, 44, p. 233-244. 2006.
- MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B.; MENDOÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Embrapa Solos. Documentos; n.º. 45). ISSN 1517-2627.
- MINASNY, B; McBRATNEY, A. B. Uncertainty analysis for Pedotransfer Fontion. *European Journal of Soil Science.* 53. p. 417-429. 2002.
- NEILL, C; M.; MELILO, J. M.; STEUDLER, P. A.; CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L.; PICCOLO, M. C.; BRITO, M. Soil carbon and nitrogen stocks following forest clearing for pasture in the southwestern brazilian amazon. *Ecological Applications*, 7, p.1216–1225. 1997.
- NEMES A., SCHAAP M.G., WÖSTEN J.H.M. Functions evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. *Soil Science Society of America Journal*, 67, p. 1093-1102. 2003.
- NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W.; ERH, K. T. Spatial variability of field measured soil water properties. *Hilgardia*, Oakland, v. 42, n. 07, p. 215-259, 1973.
- OLIVEIRA L. B.; RIBEIRO, M.R.; JACOMINE P.K.T.; RODRIGUES, J.V.V. & MARQUES, F.A. Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:315-323, 2002.
- PACHEPSKY Y.A, RAWLS W.J., LIN H.S. Hydropedology and pedotransfer functions. *Geoderma*. 131, pp. 308-316. Predictive quality of pedotransfer functions for estimating bulk density of forest soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 69, n.2, p. 500-510. 2006.

- PEDREIRA, B. C. C. G, FIGALDO, E. C. C, ABREU, M. B. Mapeamento do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do rio Guapi-Macacu, RJ. 2009. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 2111-2118.
- RADAMBRASIL. Levantamento de Recursos Naturais, Folha SF 23/24 - Rio de Janeiro/Vitória. Vol. 32. MME/SG/Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro, 1983.
- RAWLS W.J., BRAKENSIEK D.L., SAXTON K.E. Estimation of soil water properties. Trans. ASAE, 1982. 26p.
- RICCOMINI, C.; RODRIGUES-FRANCISCO, B.H. Idade potássio-argônio do derrame de ankaramito da Bacia de Itaboraí, Rio de Janeiro, Brasil: implicações tectônicas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 37, São Paulo. Resumos Expandidos... São Paulo: SBG p. 469-470. 1992.
- SANCHEZ, P., A.; AHAMED, S.; CARRÉ, F.; HARTEMINK, A. E.; HEMPEL, J.; HUISING, J.; LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A., B.; MCKENZIE, N., J.; MENDONÇA-SANTOS, M., L., DE; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C., A.; SACHS, J., D.; SHEPHERD, K., D.; VÅGEN, T.; VANLAUWE, B.; WALSH, M., G.; WINOWIECKI, L., A.; ZHANG, G. Digital Soil Map of the World. Policy Forum on Environmental Science. 2009. Disponível em: <http://www.Sciencemag.org> > acesso em: 10 mar. 2011.
- SANCHEZ, P., A. GlobalSoilMap.net: The digital soil map of the world. Columbia University / Global Soil.net. 43p. 7 abr. 2010.
- SANT'ANNA, L.G. Geologia, mineralogia e gênese das esmectitas dos depósitos paleogênicos do Rift Continental do Sudeste do Brasil. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 239p. 1999.
- SANTOS, A.P.A.; AVILLA, L.S.; IGLESIAS, A. & SOUTO, P.R.F. Itaboraian grass: cuticular morphology, taxonomy and paleoenvironmental significance. In: Congresso Brasileiro de Paleontologia, 20, Búzios. Anais... Búzios: SBP, p. 168. 2007.
- SCHAETZL, R. & ANDERSON, S. Soils: Genesis and Geomorphology soil characteristics to land qualities. New-York: Cambridge University Press, 2005. 833p.
- STEIN, A. Spatial statistics for soils and the environment - Preliminary version. Enschede: ITC. 1995. 72p.
- TIMM, L.C., GOMES, D.T., BARBOSA, E.P., REICHARDT, K., DE SOUZA, M.D. & DYNIA, J.F. Neural network and state-space models for studying relationships among soil properties. Scientia Agricola, 63, 386-395. 2006.
- TOMASELLA J., PACHEPSKY Y.A., CRESTANA S., RAWLS J., - Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. Soil Sci. Am. J., 67, p. 1085-1092. 2003.
- TOMASELLA, J., HODNETT, M. G., ROSSATO, L. Pedotransfer Functions for the Estimation of Soil Water Retention in Brazilian Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 64, p. 327-338. 2000.
- TOMASELLA, J.; HODNETT, M. G. Estimating soil water retention characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. Soil Science, Philadelphia, v. 163, n. 3, p. 190-202, Mar. 1998.

VALCARCEL, R; FRANCELINO, M. R. Problemas de drenagem do COMPERJ. Seropédica:FAPUR. Relatório Técnico. 2006. 71p.

VERECKEN H., MAES J., FEYEN J., DARIUS P. Estimating the soil moisture retention characteristics from texture, bulk density and carbon content. Soil Science 148, p. 389-403. 1989.

WEBSTER, R., BURROUGH, J. P. A. Computer-based soil mapping of small areas from sample data. J. Soil Sci. 23, p. 210–234. 1972.

WÖSTEN J.H.M., FINKE P.A., JANSEN M.J.W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. Geoderma, 66, pp. 227-237. 1995.

ZIMBACK, C.R.L. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

ZINN, Y.L., LAL, R. & RESCK, D.V.S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. Geoderma, 127, p. 168–173. 2005.