

Geração e Análise estatística de Modelo Digital de Elevação com Dados de GPS em Tempo Real

Marcelo Soares Teles Santos
Anderson de Medeiros Souza
Washington Luiz Evangelista Teixeira
Alessandro Salles Carvalho
Francisco Pinheiro Lima Filho

UFRN - Departamento de Geologia
59072-970 Natal RN
mstsantos@yahoo.com.br

Resumo: Este trabalho avalia as potencialidades do GPS (*Global Positioning System*) no modo RTK (*Real Time Kinematic*) como fonte de dados para a geração de Modelo Digital de Elevação (MDE). Para isso, como estudo de caso, foi realizado um levantamento topográfico em uma área de aproximadamente 35 ha localizada no município de Macaíba - RN. Nesse levantamento, foram obtidos 795 pontos amostrais com distribuição irregular. A partir deste levantamento, o método de interpolação TIN (*Triangulated Irregular Network*) com a triangulação de Delaunay foi utilizado para gerar o MDE. Na avaliação do modelo digital, foram feitas análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência, utilizando como referência as estatísticas *t* de *student* e Qui-Quadrado. Adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, o modelo gerado foi classificado estatisticamente como de classe A em exatidão e precisão, além de estar livre de tendência (erros sistemáticos).

Palavras chaves: Modelo Digital de Elevação (MDE), Sistema GPS, Sistema RTK.

Abstract: This paper evaluates the GPS (*Global Positioning System*) potentialities in RTK (*Real Time Kinematic*) way as data source for generation of Digital Elevation Model (DEM). For that, as case study, a topographic survey was conducted in an area of approximately 35 hectares located in the municipal of Macaíba-RN. In that survey, were obtained 795 points with irregular distribution. From this survey, the method TIN (*Triangulated Irregular Network*) of interpolation with the triangulation of Delaunay was used to generate the DEM. In evaluation of the digital model, were made statistical analysis of accuracy, precision and trend, using as reference the *t* student and chi-square statistics. Adopting as standard the Regulators Instructions of the Technical Standards of National Mapping, the model generated has been statistically classified as class A in accuracy and precision, and be free of trend (biased).

Keywords: Digital Terrain Modeling, GPS Positioning, RTK System.

1 Introdução

O Modelo Digital de Elevação (MDE), importante em inúmeras áreas do conhecimento, tais como na geodésia, na geofísica, na engenharia e na hidrografia, é uma representação matemática computacional das informações topográficas de uma determinada região da superfície terrestre. O processo para a geração de um MDE consiste, basicamente, em três etapas: aquisição de dados, geração e controle de qualidade do modelo.

A aquisição de dados pode ser feita por digitalização, restituição fotogramétrica, sensoriamento remoto ou levantamento de campo direto. Nesse último, os dados são obtidos utilizando-se instrumentos topográficos convencionais, tais como teodolitos, estações totais e níveis, ou pelo GPS (*Global Positioning System*), no qual as coordenadas tridimensionais são obtidas via satélite.

Em levantamentos locais, onde é coletada uma grande quantidade de pontos em uma área relativamente pequena, já é possível o uso das técnicas de posicionamento GPS em tempo real, com os benefícios da

simplicidade operacional, da rapidez e da eficiência. Dentre elas, se destaca o RTK (*Real Time Kinematic*), devido à alta precisão obtida com as observações da fase da onda portadora (Santos et al., 2007).

Este trabalho avalia as potencialidades do GPS/RTK como fonte de dados para a geração de MDE. Para isso, como estudo de caso, foi realizado um levantamento em uma área de 35 ha localizada no município de Macaíba - RN. A partir deste levantamento, o método TIN de interpolação com a triangulação de Delaunay foi utilizado para gerar o MDE. Análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência do modelo digital foram realizadas, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Nessas análises, foram utilizados pontos de controle distribuídos na área de estudo.

O trabalho se justifica por apresentar, aplicar e avaliar uma das mais modernas técnicas de levantamento topográfico como fonte de dados para geração de MDE, garantindo eficiência, rapidez e alta precisão aos levantamentos.

2 Posicionamento por GPS/RTK

No modo RTK, dois ou mais receptores GPS rastreiam simultaneamente no mínimo quatro satélites em comum. Correções diferenciais são geradas na estação de referência, no momento do posicionamento, e transmitidas para uma estação *rover*, através de um *link* de rádio (Santos et al., 2007). Os dados são transmitidos em formato apropriado, estabelecido pela RTCM SC-104 (*Radio Technical Commission for Maritime Services Special Committe 104*). Com isso, as coordenadas do *rover* são determinadas em tempo real (Ramos, 2007).

Além das correções diferenciais da fase da portadora, a técnica RTK poderá usar as observações brutas de pseudodistância e de fase da onda portadora. Segundo Prado & Krueger (2003), o uso de observações brutas permite uma modelagem mais adequada ao levantamento, bem como a eliminação dos erros dos relógios dos satélites e dos receptores. As correções diferenciais são aplicadas diretamente na fase observada no receptor móvel; as observações de fases brutas são utilizadas em algoritmos de dupla diferença de fase, possibilitando uma navegação com precisão centimétrica em tempo real.

Esta precisão somente é possível com a solução das ambigüidades inteiras no receptor móvel, durante o seu movimento. O tempo de fixação das ambigüidades dependerá do comportamento dos erros dependentes da distância, podendo ser igual a apenas uma época para curtas distâncias e sob condições favoráveis (Prado & Krueger, 2003).

Para bases curtas (até 10 km) a estação de referência e o receptor móvel podem rastrear simultaneamente a mesma constelação de satélites, gerando correlação entre os erros em ambas as estações, tais como os erros dos relógios, os efeitos atmosféricos e os erros nas órbitas; assim, as correções geradas na estação de referência tornam-se mais efetivas no receptor móvel.

As medidas de fase da portadora são altamente sensíveis a perdas de ciclos. É preciso que a estação móvel disponha de *softwares* adequados para a rápida detecção e correção destas falhas de sinal, que estão diretamente associadas à solução das ambigüidades enquanto em movimento.

3 Modelagem Digital de Elevação

Como apresentado na Introdução, a modelagem digital de elevação envolve principalmente 3 fases: 1) Aquisição de dados, 2) geração do modelo, e 3) análise de qualidade do modelo. Este capítulo descreve estas fases.

3.1 Aquisição de Dados

Na aquisição de dados para geração de um MDE, são realizados levantamentos topográficos planialtimétricos. Nesses levantamentos, “pontos cotados” ou “pontos notáveis” são levantados com auxílio de equipamentos topográfico, tais como teodolitos, estações totais ou GPS. Esses pontos são coletados com objetivo de representar feições topográficas importantes, normalmente representativas de descontinuidades na inclinação do terreno, tais como picos, depressões, divisores de águas, vales e desfiladeiros. Em cada ponto levantado, são coletados dados para se obter as informações planimétricas

(X,Y) e as altimétricas (Z).

Nos levantamentos, deve-se coletar uma amostra de dados compatível em número e distribuição espacial com a precisão requerida para a modelagem do terreno. Quanto maior a complexidade da topografia, maior deve ser o número de pontos notáveis levantados. As maiores dificuldades na interpolação são causadas por erros observacionais, amostragem insuficiente (subamostragem) e amostragem redundante (superamostragem). A subamostragem, por falta de informação, gera modelos pobres, com tendência de suavizar o terreno. A superamostragem, por excesso de informação, sobrecarrega o sistema e encarece desnecessariamente o levantamento. Segundo Matos (2005), nenhuma metodologia, por mais complexa ou moderna que seja, pode compensar os efeitos de uma amostragem insuficiente.

3.2 Geração do Modelo

Dados com distribuição espacial podem ser posicionados de duas maneiras: aleatoriamente, sem um arranjo geométrico preferencial, ou em malha, com espaçamento regular, geometria e origem definidas. Estes dados podem ser submetidos a processos determinísticos de interpolação (triangulação com interpolação linear, inverso ponderado da distância, curvatura mínima, etc.) ou probabilísticos (estimadores krigagem) (Fonteles, 2003).

3.2.1 Triangulação e Reticulação

Nos casos de dados distribuídos irregularmente, pode-se recorrer a duas técnicas: triangulação ou reticulação (Zanardi, 2006; Matos, 2005; Fonteles, 2003).

No processo de triangulação, os pontos são conectados através de triângulos e entre eles os valores são interpolados linearmente. Com este procedimento, as curvas de contorno (isolinhas) são traçadas a partir da disposição original dos dados. Não ocorre extrapolação e as estimativas limitam-se à área resultante da soma das áreas dos triângulos.

O processo de reticulação é caracterizado pelo estabelecimento de uma malha regular sobre a área levantada. Os valores a serem estimados são representados pelos nós formados com a nova malha estabelecida. Ainda, os vértices da malha podem ser os próprios pontos amostrados, caso estes tenham sido obtidos nas mesmas localizações que definem a grade desejada.

A maioria dos modelos adota a malha regular devido ao seu baixo custo, à rápida leitura no computador e à eficiência da estrutura dos dados para algoritmos de análise e representação da superfície. Porém, o uso deste tipo de malha pode gerar perda de informação em regiões de descontinuidade, pois, nessas regiões, os dados podem sofrer suavização no momento da reamostragem por interpolação.

Portanto, a malha regular não é adequada para representar a topografia, pela dificuldade em representar descontinuidades naturais (divisores de água, canais, falhas geológicas e lagos) e artificiais (reservatórios, prédios e taludes de rodovias) do terreno. São mais apropriadas para modelos de terreno da terra desnuda, nos quais não existam descontinuidades naturais. De acordo com Matos (2005), em cartografia, a malha regular é apropriada apenas para aplicações em pequena escala, onde a precisão posicional absoluta requerida não é de extrema qualidade e as características da superfície não precisam ser exatamente determinadas.

3.2.2 Triangulação de Delaunay

Na representação da topografia, são utilizados algoritmos que fazem uso da técnica de triangulação. A técnica geralmente usada é a TIN (*Triangulated Irregular Network*), a qual consiste numa estrutura em que pontos cotados com distribuição irregular são conectados por uma rede de arestas que formam triângulos não-sobrepostos. Os pontos são conectados geralmente de acordo com a triangulação de Delaunay.

O critério utilizado na triangulação de Delaunay é o de maximização dos ângulos mínimos de cada triângulo. Assim, a malha final deve conter triângulos o mais próximos possível de equiláteros, evitando-se a criação de triângulos com ângulos internos muito agudos. Uma forma equivalente de implementação da triangulação de Delaunay consiste em utilizar o critério do circuncírculo (Felgueiras, 2001).

De acordo com este critério, ilustrado na Figura 1, uma triangulação é de Delaunay se o círculo que passa pelos três vértices de cada triângulo da malha triangular não contém, no seu interior, nenhum ponto do

conjunto das amostras além dos vértices do triângulo em questão.

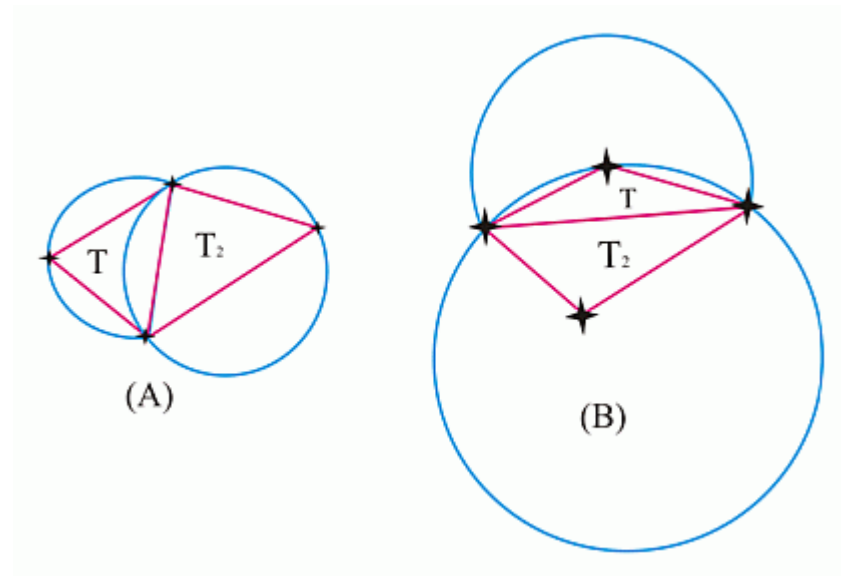


Figura 1 : Critério do circuncírculo para geração da triangulação de Delaunay: (a) T1 e T2 são triângulos de Delaunay e (b) T1 e T2 não são triângulos de Delaunay (Felgueiras, 2001).

Na construção de um MDE é muito importante que as características topográficas da superfície sejam preservadas. Assim, é interessante que o conjunto de amostras de entrada contenha as linhas de descontinuidade de acidentes geográficos (*breaklines*). Essas linhas representam as descontinuidades naturais ou artificiais na topografia do terreno e, não devem ser atravessadas por arestas de triangulação. A não utilização das linhas geralmente suaviza a topografia (Matos, 2005; Felgueiras, 2001). A estrutura do modelo de grade triangular é a mais propícia para a inclusão de linhas de descontinuidade no modelo. Na maioria dos programas específicos para topografia, os quais fazem uso da técnica TIN, é possível inserir as linhas de descontinuidade.

O método TIN ainda apresenta a vantagem de não extrapolar a área de interpolação para as regiões periféricas do levantamento, onde não foram coletados dados. A interpolação nessas áreas pode criar feições topográficas irreais. Por este motivo, os modelos gerados por grades regulares, os quais efetuam a extrapolação, geralmente apresentam problemas na representação da topografia na borda da área. Programas específicos para topografia permitem a exclusão de arestas de qualquer triângulo da malha triangular. Assim, pode-se reduzir ou eliminar os problemas de borda com a simples exclusão de arestas.

3.3 Controle de Qualidade dos Modelos

O controle de qualidade foi baseado na análise estatística das discrepâncias entre as altitudes de referência (x_i^r) e as obtidas no modelo analisado (x_i^m), pela equação

$$\Delta x_i = x_i^r - x_i^m \quad (1)$$

em amostras com $i = 1, 2, 3, \dots, n$ pontos de controle selecionadas aleatoriamente na área de estudo. Assim, para os n pontos de controle, são calculados a média e o desvio padrão das discrepâncias, respectivamente, por,

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (2)$$

e

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta \bar{x})^2 \quad (3)$$

A partir das discrepâncias obtidas, são feitas análises estatísticas de acurácia, precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Brasil, 1984).

3.3.1 Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC)

A classificação de documentos cartográficos segue as normas ditadas pelo Decreto Lei no 89.817 de 20 de junho de 1984, que define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) (Brasil, 1984). PEC é um indicador estatístico por dispersão, relativo a 90% de probabilidade, que define a exatidão de documentos cartográficos. O decreto apresenta as normas que estabelecem a forma de classificar um documento cartográfico segundo sua forma geométrica.

Segundo o decreto, noventa por cento dos pontos isolados de altitude obtidos por interpolação de curvas de nível, quando testadas no terreno, não deverão apresentar erro superior ao PEC altimétrico estabelecido. As cartas são classificadas nas classes A, B ou C. O PEC altimétrico (acurácia) das classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/2, 3/5 e 3/4 da equidistância entre as curvas de nível. Os erros padrões (precisão) das classes A, B e C correspondem, respectivamente, a 1/3, 2/5 e 1/2 da equidistância entre as curvas de nível.

3.3.2 Tamanho da amostra

O tamanho da amostra, importante para a adequada análise estatística de exatidão, de precisão e de tendência, depende da variação na variável aleatória e do grau de acurácia desejado. Pode ser calculado a partir da definição do intervalo de confiança, do erro amostral, e das estatísticas (média e desvio padrão) dos erros obtidos em uma amostra inicial qualquer (por exemplo, 5 ou 10). O cálculo do tamanho da amostra pode ser feito através da equação (Zanardi, 2006):

$$n = \frac{Z^2 \gamma^2 N}{(N-1)\varepsilon_r^2 + Z^2 \gamma^2} \quad (4)$$

onde, Z é o intervalo de confiança, $\gamma = s / \bar{x}$, s é o desvio padrão amostral, $\bar{x}$ é a média amostral, N é o tamanho da população, ε é o erro amostral, e ε_r é o erro amostral relativo ($\varepsilon_r = \varepsilon / \bar{x}$).

O valor calculado de n deve ser considerado estatisticamente suficiente para as análises se seu valor for menor do que o tamanho da amostra utilizada.

Os valores do intervalo de confiança e do erro amostral são atribuídos em função da precisão da estimativa, da finalidade da pesquisa, do custo econômico e do tempo disponível. O valor do erro amostral corresponde ao erro máximo a ser aceito quando se utiliza uma média amostral ao invés da média populacional (Zanardi, 2006; Rocha, 2002; Itame, 2001).

3.3.3 Análise da exatidão

A análise de exatidão consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias (equação 1), se o valor da média populacional estimada é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em acurácia, de acordo com o PEC. Neste caso, utiliza-se a estimativa intervalar dada pela distribuição t de *student*, sendo particularmente válida para amostras pequenas (até 30 pontos) (Zanardi, 2006; Rocha, 2002; Itame, 2001; Galo & Camargo, 1994).

A análise consiste em construir inicialmente um intervalo de confiança com $100(1 - \alpha) \%$ de certeza para a

média populacional estimada μ a partir da média amostral $\bar{x}$ e da variância amostral s^2 , dado por (Montgomery & Runger, 2003):

$$\bar{x} - \left(t_{\alpha/2}\right) \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \leq \mu \leq \bar{x} + \left(t_{\alpha/2}\right) \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (5)$$

onde, μ é a média populacional, $\bar{x}$ é a média amostral, α é o nível e significância, s é o desvio padrão amostral, n é o tamanho da amostra, e $t_{\alpha/2}$ é o ponto $100\alpha/2\%$ superior da distribuição t de *student*.

Posteriormente, aplica-se o teste de hipótese com nível de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para a validação da exatidão, confrontando:

$$\begin{aligned} H_0 : \mu &= X, \text{ contra} \\ H_1 : \mu &< X \end{aligned} \quad (6)$$

onde, X é o erro máximo admissível em acurácia. Neste trabalho, X corresponde ao 1/2 da equidistância entre as curvas de nível do modelo, de acordo com o PEC (ver sessão 3.3.1).

O calculo da estatística t é dado por

$$t = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\frac{s}{\sqrt{n}}} \quad (7)$$

onde, μ_0 é a média populacional esperada.

Como a hipótese alternativa H_1 é unilateral ($\mu < X$), rejeita-se H_0 se

$$t < -t_{\alpha} \quad (8)$$

onde, $-t_{\alpha}$ é o ponto $100\alpha\%$ inferior da distribuição t de *student*, com $n-1$ graus de liberdade. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo testado possui exatidão melhor do que o valor adotado para X .

Ainda, como a hipótese alternativa H_1 é unilateral ($\mu < X$), o intervalo de confiança da média populacional, dado pela equação 5, se reduz ao intervalo de confiança unilateral superior da média populacional, estabelecendo o limite inferior igual a $-\infty$ e trocando $t_{\alpha/2}$ por t_{α} , ou seja,

$$\mu \leq \bar{x} + \left(t_{\alpha}\right) \left(\frac{s}{\sqrt{n}}\right) \quad (9)$$

onde, t_{α} é o ponto $100\alpha\%$ superior da distribuição t de *Student*, com $n-1$ graus de liberdade.

3.3.4 Análise da Precisão

A análise de precisão, que é a coerência interna dos elementos do MDE, consiste em verificar, a partir de amostras de discrepâncias (equação 1), se o valor do desvio padrão populacional estimado é estatisticamente menor do que o valor limite admissível em precisão, de acordo com o PEC. Neste caso, utiliza-se a distribuição Qui-quadrado χ^2 (Zanardi, 2006; Rocha, 2002; Itame, 2001, Galo & Camargo, 1994).

A análise consiste em construir inicialmente um intervalo de confiança com $100(1-\alpha)\%$ de certeza para o desvio padrão populacional σ a partir do desvio padrão amostral s , dado por (Montgomery & Runger, 2003):

$$\sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{\alpha/2}}} \leq \sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha/2}}} \quad (10)$$

onde, $\chi^2_{\alpha/2}$ e $\chi^2_{1-\alpha/2}$ são, respectivamente, os pontos $100\alpha/2\%$ superior e inferior da distribuição Qui-quadrado, com $n-1$ graus de liberdade.

Posteriormente aplica-se o teste de hipótese com nível de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para a validação da precisão, confrontando:

$$\begin{aligned} H_0 : \sigma^2 &= X^2, \text{ contra} \\ H_1 : \sigma^2 &< X^2 \end{aligned} \quad (11)$$

onde, X é o erro máximo admissível (desvio padrão) em precisão. Neste trabalho, X corresponde ao 1/3 da equidistância entre as curvas de nível do modelo, de acordo com o PEC (ver sessão 3.3.1).

O cálculo da estatística χ^2 é dado por

$$\chi^2 \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\sigma_o^2}} \quad (12)$$

onde, σ_o^2 é a variância populacional esperada.

Como a hipótese alternativa H_1 é unilateral ($\sigma^2 < X^2$), rejeita-se H_0 se

$$\chi^2 < \chi^2_{1-\alpha} \quad (13)$$

onde, $\chi^2_{1-\alpha}$ é o ponto $100(1-\alpha)\%$ inferior da distribuição Qui-quadrado, com $n-1$ graus de liberdade. A rejeição da hipótese nula indica que o modelo testado possui precisão melhor do que o valor adotado para X .

Ainda, como a hipótese alternativa H_1 é unilateral ($\sigma^2 < X^2$), o intervalo de confiança da média populacional, dado pela equação 10, se reduz ao intervalo de confiança unilateral superior do desvio padrão populacional, estabelecendo o limite inferior igual a zero e trocando $\chi^2_{1-\alpha/2}$ por $\chi^2_{1-\alpha}$, ou seja,

$$\sigma \leq \sqrt{\frac{(n-1)s^2}{\chi^2_{1-\alpha}}} \quad (14)$$

onde, $\chi^2_{1-\alpha}$ é o ponto $100\alpha\%$ inferior da distribuição Qui-quadrado, com $n-1$ graus de liberdade.

3.3.5 Análise de Tendência

A análise de tendência consiste em verificar se a média das discrepâncias (equação 1) é estatisticamente nula, ou seja, se a amostra está livre de tendência. Neste caso, utiliza-se a estimativa intervalar dada pela distribuição *t* de *student* (para amostras com até 30 pontos) (Zanardi, 2006; Rocha, 2002; Itame, 2001, Galo & Camargo, 1994).

A análise consiste na aplicação de um teste de hipótese com nível de confiança de $100(1-\alpha)\%$ para a

verificação da tendência, confrontando (Montgomery & Runger, 2003):

$$\begin{aligned} H_0 : \bar{x} &= 0, \text{ contra} \\ H_1 : \bar{x} &\neq 0 \end{aligned} \quad (15)$$

onde, $\bar{x}$ é a média amostral.

O calculo da estatística t é dado por

$$t = \frac{\bar{x}}{s} \sqrt{n} \quad (16)$$

Como a hipótese alternativa H_1 é bilateral ($\bar{x} \neq 0$), aceita-se H_0 se

$$-t_{\alpha/2} \leq t \leq +t_{\alpha/2} \quad (17)$$

onde, $t_{\alpha/2}$ e $-t_{\alpha/2}$ são os pontos $100\alpha/2$ % superior e inferior da distribuição t de *student*.

A aceitação da hipótese nula indica que o modelo testado está livre de tendência. A existência de tendência em alguma direção significa a ocorrência de problemas na modelagem, cujas causas podem ser as mais variadas. Conhecido o valor da tendência, seu efeito pode ser minimizado, pela subtração do valor a cada coordenada do modelo (Nogueira Jr, 2003; Galo & Camargo, 1994).

4 Estudo de caso

Com o objetivo de avaliar as potencialidades do GPS/RTK como fonte de dados para a geração de MDE, um levantamento topográfico foi realizado numa área de aproximadamente 35 ha. O método TIN de interpolação com a triangulação de Delaunay foi utilizado na geração do MDE. Análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência do MDE foram realizadas, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Este capítulo descreve as etapas utilizadas neste trabalho.

4.1 Aquisição de dados

A área selecionada para o estudo de caso está localizada no município de Macaíba – RN, distante aproximadamente 30 Km de Natal-RN. A área foi selecionada por possuir topografia heterogênea, com relevo acidentado e regiões de diferentes gradientes topográficos, ideal para este tipo de avaliação.

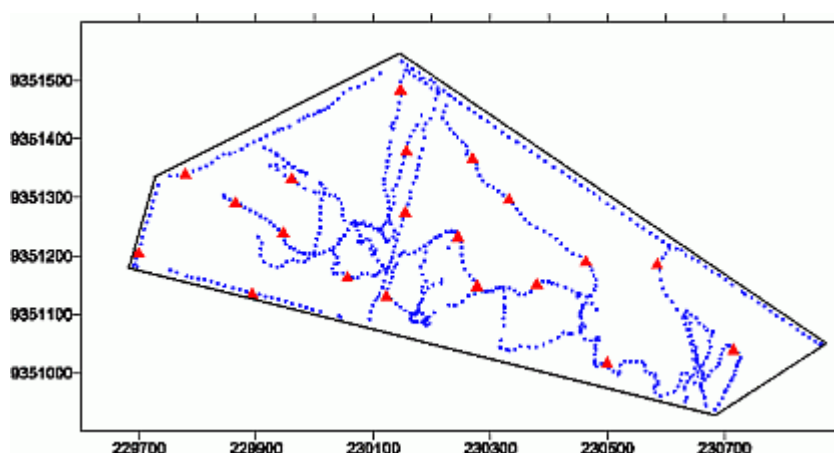


Figura 2 : Distribuição espacial dos pontos obtidos no levantamento topográfico. Círculos azuis: pontos do levantamento topográfico. Triângulos vermelhos: pontos de controle.

O levantamento topográfico foi feito com GPS operando no modo RTK. Nesse levantamento, foram obtidos 795 pontos amostrais com distribuição irregular (densidade de 23 pontos / hectare). Além desses pontos, foram levantados 20 pontos de controle no interior da área, para serem usados como referência no controle de qualidade do MDE gerado. Esses pontos foram levantados aleatoriamente na área de estudo e os mesmos não foram usados na geração do MDE.

A Figura 2 mostra os pontos obtidos no levantamento topográfico juntamente com os pontos de controle. O caminhamento foi feito ao longo das principais feições topográficas e cruzando-as, com o objetivo de representá-las através das curvas de nível. Na Figura 2, se pode notar a boa distribuição espacial dos pontos de controle, abrangendo todas as regiões da área.

A Tabela 1 mostra as estatísticas das coordenadas dos pontos levantados em campo. As coordenadas estão no sistema de projeção UTM (Fuso 25) e no Datum SAD69.

TABELA 1 – ESTATÍSTICAS DOS PONTOS OBTIDOS NO LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

	<i>N(m)</i>	<i>E(m)</i>	<i>h(m)</i>
<i>N. DADOS</i>	795	795	795
<i>MÉDIA</i>	9351194,591	230268,098	95,815
<i>D.P.</i>	138,763	267,789	8,864
<i>NÍMIMO</i>	9350937,956	229689,759	77,964
<i>MÁXIMO</i>	9351531,654	230864,870	110,221
<i>AMPLITUDE</i>	593,698	1175,111	32,257

No posicionamento por RTK, um receptor permaneceu fixo na estação de referência (Base) enquanto outro foi posicionado nos pontos de interesse (Rover). Os pontos foram posicionados em tempo real, através de correções diferenciais enviadas através de link de rádio da base para o rover (Ver Capítulo 2).

A estação de referência utilizada no posicionamento pelo RTK foi implantada no interior da área, com o objetivo de fornecer bases curtas ao posicionamento. Com a implantação da estação de referência, a base máxima utilizada foi de 960 m. Segundo Santos et al. (2007), para bases dessa ordem de comprimento, o RTK fornece acurácia centimétrica.

No transporte das coordenadas da estação de referência, foi utilizado o posicionamento relativo estático GPS convencional, com sessão de 4 horas de observações, utilizando as estações CRAT, BRFT e RECF da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC) distantes, respectivamente, 465, 400 e 250 Km da estação de referência. Os erros padrões estimados no processamento e ajustamento da estação de referência foram de 6.5 cm em N, 6.2 cm em E e 7.9 cm em h. Os processamentos e ajustamentos foram efetuados com o programa *Topcon Tools* Vr. 6.04 da Topcon (TPS, 2006).

Os receptores utilizados no trabalho foram do modelo *HiperLite* da Topcon, o qual rastreia observações GPS nas duas frequências (L1 e L2). No modo RTK, a precisão nominal horizontal é de 10 mm + 1.5 ppm e a vertical é de 20 mm + 1.5 ppm. O rádio interno do sistema possui alcance de 2 km. No modo relativo estático pós-processado, a precisão nominal horizontal é de 3 mm + 1 ppm e a vertical é de 5 mm + 1.4 ppm. Os equipamentos são de propriedade do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (DG/UFRN). Os receptores da RBMC foram dos modelos *Trimble 4000 SSI* e *Leica GRS 1200*, todos de dupla frequência.

Deve-se destacar a alta produção na aquisição de dados pela técnica RTK. O levantamento foi realizado em aproximadamente 8 horas, onde foram levantados 795 pontos amostrais, ou seja, aproximadamente 100 pontos / hora. Essa alta produção se deve principalmente pelos seguintes motivos: os dados são coletados em tempo real com sessões curtas (geralmente de 1 época); não se utiliza alvos para a medição; e não há mudança do aparelho (instalação/reinstalação) durante o desenvolvimento do caminhamento.

4.2 Geração do modelo

O MDE foi gerado através do método TIN de interpolação com uso da triangulação de Delaunay (ver Sessão 3.2). Para isso, foi utilizado o programa *Topograph*, da Char Pointer Tecnologia.

A Figura 3 mostra as curvas de nível geradas pelo método TIN e a Figura 4 mostra a malha triangular gerada para este fim. Na Figura 3, se pode notar as irregularidades topográficas da superfície, bem modeladas através do método TIN.

O processo de geração do MDE envolveu as seguintes etapas: A triangulação dos pontos no plano horizontal, através da triangulação de Delaunay, e a geração das curvas de nível. O aplicativo pesquisa dentre todos os pontos do desenho aqueles que possuem cota e que serão utilizados na geração da malha triangular. O número mínimo de pontos para gerar a malha é 3. Ao término do processamento, a malha triangular é apresentada na tela. Após a geração da malha, é iniciada a geração das curvas de nível, onde se deve informar o valor da equidistância vertical entre as curvas. Neste trabalho, a equidistância vertical foi de 1m.

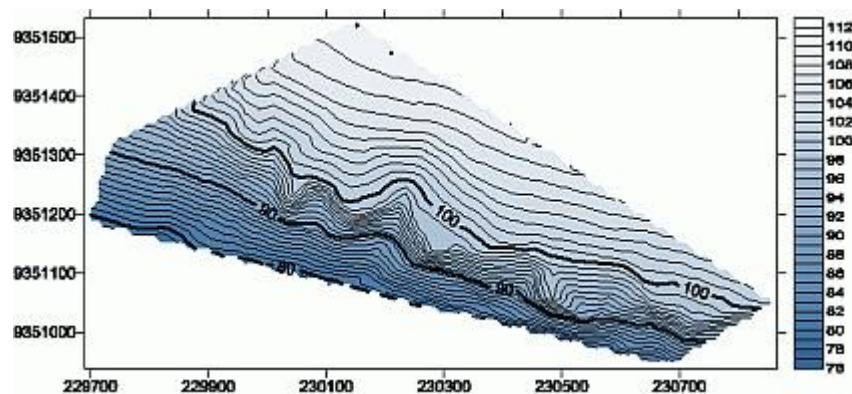


Figura 3 : Modelo Digital de Elevação (MDE) da área em estudo

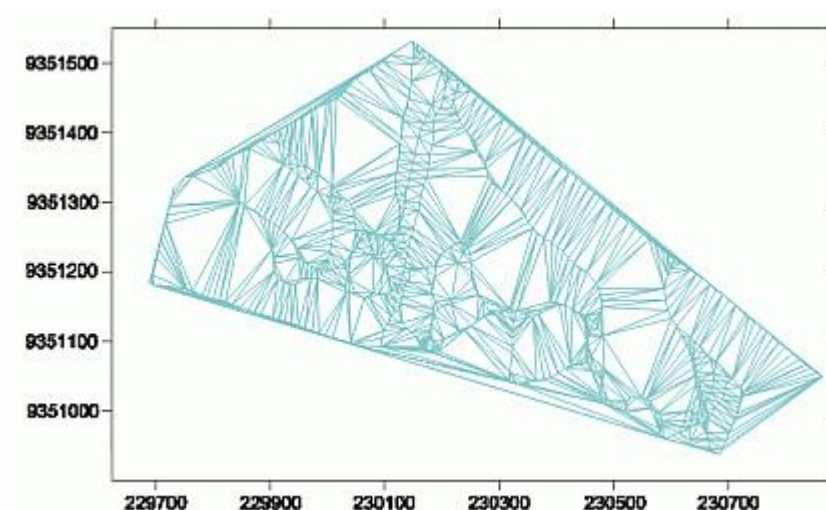


Figura 4 : Malha triangular usado no cálculo do MDE

4.3 Controle de qualidade do modelo

O controle de qualidade foi feito através de análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência do modelo (ver Seção 3.3), usando, como referência, as discrepâncias entre as altitudes de referência (reais) e as do modelo (equação 1), obtidas em amostra com 20 pontos de controle (Figura 2) localizados na área do levantamento. A Tabela 2 mostra as estatísticas das discrepâncias obtidas nos 20 pontos de controle. Vale lembrar que esses pontos foram levantados aleatoriamente na área de estudo e os mesmos não

foram usados na geração do MDE.

TABELA 2 – ESTATÍSTICAS DAS DISCREPÂNCIAS DOS 20 PONTOS DE CONTROLE

<i>Estatística</i>	<i>Discrepância (m)</i>
MÉDIA	0,019
D.P.	0,064
MINIMO	-0,105
MÁXIMO	0,120
AMPLIT.	0,225

A Figura 5 mostra o diagrama de dispersão entre as altitudes interpoladas e as de referência. Na mesma figura, encontra-se a curva de tendência ajustada aos dados. Percebe-se que as estimativas realizadas se ajustaram linearmente aos valores verdadeiros de altitude, significando que o modelo de interpolação usado está coerente com a variabilidade espacial da topografia da área.

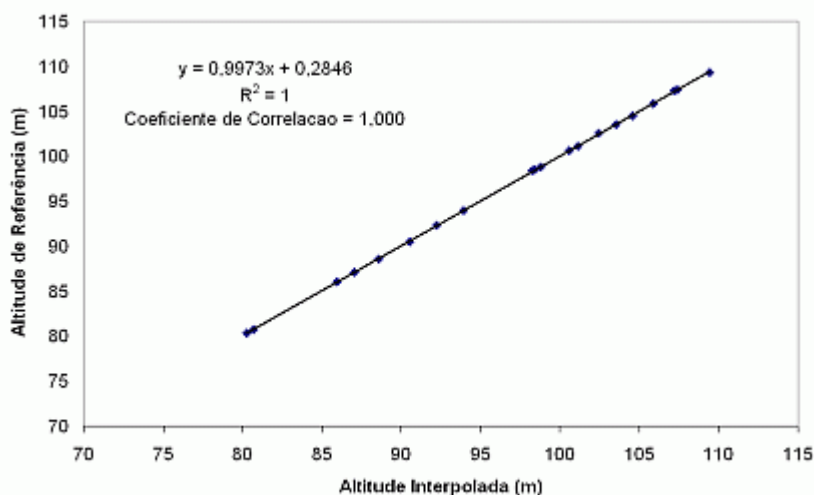


Figura 5 : Diagrama de dispersão entre as altitudes interpolada e de referência.

4.3.1 Tamanho da amostra

No cálculo do número ideal de pontos amostrais (n) para as análises de acurácia, precisão e tendência, a partir da equação 4, os 20 pontos de controle disponíveis (ver Tabela 2) foram usados como amostra inicial.

No cálculo de n , adotou-se um valor de 95% para o intervalo de confiança e um erro amostral de 3 cm. Nesse caso, o valor de N foi de 17,1 (menor do que 20). Isso significa que a amostra inicial foi considerada estatisticamente suficiente para a realização das análises posteriores de exatidão, de precisão e de tendência.

4.3.2 Análise da exatidão

A Tabela 3 mostra os parâmetros utilizados na análise de exatidão do MDE, a partir das equações 5 a 9. Os parâmetros foram listados na tabela na seguinte sequência: média amostral ($\bar{x}$), desvio padrão amostral (s), número de dados da amostra (n), Grau de Liberdade ($G.L.$), Intervalo de Confiança ($I.C.$), teste t de *student* tabelado (t_α), média populacional estimada (μ), erro máximo admissível em acurácia (X), e teste t de *student* calculado (t).

Como mostra a Tabela 3, a média populacional (equação 9), foi inferior a 3,8 cm no intervalo de confiança de 90 %. No modelo analisado, o valor do teste t calculado, pela equação 7, foi menor do que o valor do teste t tabelado (ver equação 8). Portanto, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental. Isso significa que a média populacional foi estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em acurácia, ao nível de confiança de 90%. Neste trabalho, o erro máximo admissível de 50,0 cm correspondeu ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para a classe A (1/2 da equidistância entre as curvas de nível). Portanto, o modelo analisado foi classificado como de classe A em acurácia.

TABELA 3 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA A ANÁLISE DA EXATIDÃO

<i>Estatística</i>	$\bar{x}$	s	n	G.L.	I.C.	t_{α}	μ	X	t
<i>Valor</i>	1,9 cm	6,4 cm	20	19	90%	-1,328	3,8 cm	50,0 cm	-33,6

4.3.3 Análise da precisão

A Tabela 4 mostra os parâmetros utilizados na análise de precisão do MDE, a partir das equações 10 a 14. Os parâmetros foram listados na tabela na seguinte sequência: desvio padrão amostral (s), número de dados da amostra (n), Grau de Liberdade (GL), Intervalo de Confiança (IC), teste Qui-quadrado tabelado ($\chi^2_{1-\alpha}$), erro máximo admissível em precisão (X), desvio populacional estimado (σ), e teste Qui-quadrado calculado (χ^2).

Como mostra a Tabela 4, o desvio padrão populacional (equação 14), foi inferior a 8,2 cm no intervalo de confiança de 90 %. No modelo analisado, o valor de χ^2 calculado, pela equação 12, foi menor do que o valor de χ^2 tabelado ($\chi^2_{1-\alpha}$) (ver equação 13). Dessa forma, foi rejeitada a hipótese nula e aceita a hipótese experimental. Isso significa que o desvio padrão populacional foi estatisticamente menor ou igual ao erro máximo admissível em precisão, ao nível de confiança de 90%. Neste trabalho, o erro máximo admissível de 33,3 cm correspondeu ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) em precisão para a classe A (1/3 da equidistância entre as curvas de nível). Portanto, o modelo analisado foi classificado como de classe A em precisão.

TABELA 4 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA A ANÁLISE DA PRECISÃO

<i>Estatística</i>	s	n	G.L.	I.C.	$\chi^2_{1-\alpha}$	X	σ	χ^2
<i>Valor</i>	6,4 cm	20	19	90%	11,651	33,3 cm	8,2 cm	0,701

4.3.4 Análise de tendência

A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados na análise de tendência do MDE, a partir das equações 15 a 17. Os parâmetros foram listados na tabela na seguinte sequência: média amostral ($\bar{x}$), desvio padrão amostral (s), tamanho da amostra (n), Grau de Liberdade (GL), teste t de *student* calculado (t) e teste t de *student* tabelado ($t_{(\alpha/2)}$).

TABELA 5 – PARÂMETROS ESTATÍSTICOS PARA A ANÁLISE DE TENDÊNCIA

<i>Estatística</i>	$\bar{x}$	s	n	G.L.	t	$t_{(\alpha/2)}$
<i>Valor</i>	1,9 cm	6,4 cm	20	19	1,328	1,328

Como mostra a Tabela 5, o valor do teste t de *student* calculado (equação 16) foi igual ao valor do teste t de *student* tabelado. Dessa forma, de acordo com a equação 17, a hipótese nula foi aceita. Isso significa que o modelo gerado está livre de tendência, ao nível de confiança de 90%.

4.4 Considerações finais

Observa-se que, apesar do RTK operar com erros melhores do que 1 cm para bases de até 1 Km (Santos et al., 2007), a média populacional estimada das discrepâncias foi de 3,8 cm. Isso ocorreu porque, no produto final gerado, além dos erros obtidos na aquisição de dados, estão inseridos os erros de amostragem inadequada e as aproximações realizadas nos algoritmos de interpolação. Essas fontes de erros fazem com que, na prática, não exista um MDE que represente fielmente uma superfície topográfica.

Na realidade, o que se busca não é um MDE isento de erros, e sim, minimizar as fontes de erros sistemáticos envolvidos no processo de geração do modelo. Assim, os MDE's devem ser desenvolvidos em função do tipo de aplicação ao qual será utilizado, que é função da precisão requerida e do custo envolvido. Ainda na fase de planejamento, devem-se definir os equipamentos e técnicas mais adequadas para a aquisição de dados, além do nível de detalhamento do levantamento. O nível de detalhamento indica a equidistância das curvas de nível, e vice-versa.

Quanto menor for a equidistância entre as curvas de nível, menores devem ser as feições topográficas a serem identificadas no modelo, ou seja, mais pontos de detalhes (pontos amostrais) devem ser coletados em campo. Por isso, nota-se a importância de avaliações dos modelos gerados, através de pontos de controle externos, com o objetivo de aferir a sensibilidade do modelo, ou seja, o tamanho das feições topográficas que ele pode representar.

No estudo de caso deste trabalho, no qual a equidistância vertical foi de 1m, um erro de 3,8 cm na interpolação (média populacional estimada) não afeta a forma das curvas de nível do modelo. Ainda, para esta magnitude de erros, as principais feições topográficas podem ser representadas no modelo digital.

5 Conclusões

Este trabalho avaliou as potencialidades do GPS/RTK como fonte de dados para a geração de MDE. Para isso, como estudo de caso, foi realizado um levantamento topográfico com uso do GPS no modo RTK, numa área de aproximadamente 35 ha, localizada no município de Macaíba - RN. O método TIN de interpolação com a triangulação de Delaunay foi usado para gerar o MDE. Na controle de qualidade do modelo digital, foram feitas análises estatísticas de exatidão, precisão e tendência, adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Para isso, foram utilizados 20 pontos de controle distribuídos na área de estudo.

A Figura 2 mostrou os pontos obtidos no levantamento topográfico juntamente com os pontos de controle. No levantamento, foram obtidos 795 pontos amostrais com distribuição irregular (densidade de 23 pontos / hectare). Os 20 pontos de controle foram levantados aleatoriamente no interior da área de estudo.

A Figura 3 mostrou as curvas de nível geradas a partir do modelo digital gerado e a Figura 4 mostrou a malha triangular gerada para este fim. As curvas de nível foram geradas com equidistância vertical de 1m.

A Tabela 2 mostrou as estatísticas das discrepâncias entre as altitudes observadas e as do modelo (equação 1), nos 20 pontos de controle. A média e o desvio padrão amostrais das discrepâncias foram, respectivamente, de 1,9 e 6,4 cm. De acordo com as Tabelas 3 e 4, a média e o desvio padrão populacionais estimados das discrepâncias foram, respectivamente, de 3,8 e 8,2 cm. Adotando como padrão as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, o modelo gerado foi classificado estatisticamente como de classe A em acurácia e precisão, além de estar livre de tendência (erros sistemáticos).

Os resultados obtidos comprovaram a acurácia e a confiabilidade do RTK na modelagem de terreno, em adição aos benefícios da praticidade operacional, da rapidez e da eficiência.

6 Referências Bibliográficas

Brasil, Decreto no 89.817 de 20 de julho de 1984.: *Estabelece as instruções reguladoras e normas técnicas da Cartografia Nacional.* Diário Oficial, Brasília.

Felgueiras, C.A.: *Modelagem Numérica de Terreno.* Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE-8081-PRE/3896, 39 f., 2001

Fonteles, H.R.N.: *Caracterização Geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em geoestatística.* Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Universidade de São Paulo (EESC/USP), São Carlos, 2006, 135 f, 2003.

Galo, M.; Camargo, P. de O.: *O uso do GPS no controle de qualidade de cartas.* In.: COBRAC - 1994, 1o Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, p. 41-48, Florianópolis - SC, 1994.

Itame, O.Y.: *Controle de Qualidade Aplicado na Modelagem Digital de Terreno.* Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, Departamento de Cartografia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 106 f, 2001.

Matos, A.C.O.C.: *Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul.* Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Departamento de Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 355 f, 2005.

Montgomery, D.C. & Runger, G.C.: *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros.* Editora LTC, Rio de Janeiro, 463 f, 2003.

Nogueira Jr., J.B.: *Controle de Qualidade de Produtos Cartográficos: Uma proposta metodológica.* Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Cartográficas da UNESP, Presidente Prudente-SP, 2003.

Prado, A. & Krueger, C.P.: *Análise da acurácia nos posicionamentos diferenciais aplicando as técnicas DGPS e RTK.* Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro, No 55/2003, p. 29-38.

Ramos, A.M.: *Aplicação, investigação e análise da metodologia de reduções batimétricas através do método GPS diferencial preciso.* Dissertação de Mestrado. Curso de pós-graduação em Ciências Geodésicas da UFPR, Paraná, 2007.

Rocha, R.S.: *Exatidão Cartográfica Para as Cartas Digitais Urbanas.* Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, Departamento de Engenharia de Produção e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 126 f, 2002.

Santos, M.S.T; Souza, A.M.; Teixeira, W.L.E.; Silva,E.B.S; Lima Filho, F.P.: O uso do *Real Time Kinematic* (GPS-RTK) no transporte de altitudes geométricas. XXIII Congresso Brasileiro de Cartografia, Rio de Janeiro, Anais (cd-rom), 2007.

TPS (TOPCON POSITIONING SYSTEMS).: *Topcon Tools Reference Manual.* Part Number 7010-0612 Rev G, 2006.

Zanardi, R.P. *Geração de Modelo Digital de Terreno a Partir de Par Estereoscópico do Sensor CCD do Satélite CBERS-2 e Controle de Qualidade das Informações Altimétricas.* Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 94 f, 2006.