



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA**

**DANILO BATISTA NOGUEIRA**

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO CÁLCULO DE VOLUME A PARTIR DE  
DIFERENTES MÉTODOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.**

**FORTALEZA - CE**

**2016**

**DANILO BATISTA NOGUEIRA**

**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO CÁLCULO DE VOLUME A PARTIR DE  
DIFERENTES MÉTODOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.**

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso e obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Renato Sílvio da Frota Ribeiro

**FORTALEZA - CE**

**2016**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

- 
- N711a Nogueira, Danilo Batista.  
Avaliação da acurácia do cálculo de volume a partir de diferentes métodos de levantamento topográfico / Danilo Batista Nogueira. - 2016.  
58 f. : il. color.
- Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Graduação em Agronomia, Fortaleza, 2016.  
Orientação: Prof. PhD. Renato Sílvia da Frota Ribeiro.  
Coorientação: Daniel de Góes Nepomuceno.
1. Topografia - avaliação. 2. Equipamentos ópticos de medição. I. Título.

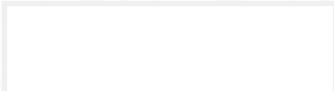
**DANILO BATISTA NOGUEIRA**


**AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA DO CÁLCULO DE VOLUME A PARTIR DE  
DIFERENTES MÉTODOS DE LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO.**

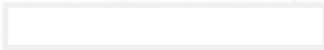
Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso e obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.


Aprovada em: 04/02/2016.

**BANCA EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D.Sc. Renato Sílvio da Frota Ribeiro (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

  
\_\_\_\_\_  
Engº.Agrº.Daniel de Góes Nepomuceno (Coorientador)  
Topographus Engenharia Eireli

  
\_\_\_\_\_  
D.Sc. Cristiano Alves da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

  
\_\_\_\_\_  
Prof. D.Sc Paulo Roberto Lopes Thiers  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

*A Deus, por me dar forças nos momentos difíceis, ajudando a vencer os obstáculos por mais difíceis que possam parecer.*

#### *OFEREÇO*

*Aos meus pais Lucides Sousa Nogueira e Antônia Gorete Batista das Chagas Nogueira por todo amor, esforço e incentivo para que continuasse os estudos. A minha irmã Denise Batista Nogueira pelo carinho. Aos meus avós paternos e maternos, tios e tias, primos e primas que sempre acreditaram em mim e depositaram força e estímulo a minha formação. Ao meu avô Valdir Sousa Nogueira (in memoriam) pelo exemplo de caráter, simplicidade, e virtude.*

#### *DEDICO*

## AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom da vida, por sempre estar presente ao meu lado, me protegendo e dando forças e pela oportunidade de realizar essa pesquisa. Muito obrigado.

À Universidade Federal do Ceará, por ter me proporcionado a oportunidade de cursar o tão sonhado nível superior, fornecendo suporte e base para o meu desenvolvimento profissional.

Ao professor Renato Sílvio da Frota Ribeiro, pela orientação.

Ao coorientador Eng<sup>o</sup>.Agr<sup>o</sup>. Daniel de Góes Nepomuceno, por todos os aconselhamentos, ensinamentos e paciência em todos os momentos. Por ter ingressado comigo nesta luta, acreditando na minha capacidade de vencer.

Ao geógrafo Msc. Cristiano Alves da Silva, por se disponibilizar a participar da banca examinadora, e pela paciência e apoio durante a realização do trabalho, sem suas intervenções não teria sido possível tal realização. Meus mais sinceros agradecimentos

Ao professor D.Sc Paulo Roberto Lopes Thiers, por se disponibilizar a participar da banca examinadora, e assim, contribuir no desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores do curso de Agronomia, em especial aos professores Márcio Cleber de Medeiros Corrêa; Patrícia Verônica Pinheiro Sales Lima; Adunias dos Santos Teixeira e José Newton Pires Reis, pelos ensinamentos transmitidos, e por contribuírem de forma significativa na minha formação.

A todos que fazem a Escola Professora Ana Clara de Magalhães, onde percorri os primeiros passos para a minha formação.

A todos que fizeram parte da Escola Agrotécnica Federal de Iguatu – CE, onde residi, e fiz o ensino médio e técnico, sendo o local que me incentivou e motivou para chegar à universidade.

Aos meus pais Lucides Sousa Nogueira e Antônia Gorete Batista das Chagas Nogueira, por todo amor, carinho e dedicação, sem o incentivo, apoio e educação dada por vocês, eu não teria chegado até aqui.

A toda minha família (meus pais, tios, avós, primos e demais familiares) que sempre estiveram ao meu lado e torcendo por mim desde os meus primeiros passos.

A minha irmã Denise Batista Nogueira, pelo apoio, carinho, conversas e discussões, foram de grande valia para dá sequência aos meus estudos.

A empresa Topographus Engenharia Eireli, – na extensão de todos os seus membros – em especial a Rosangela Nepomuceno e Daniel de Góes Nepomuceno pela

oportunidade de estágio na mesma, o que acrescentou um crescimento pessoal e profissional impar na minha vida, agradeço também por todo o suporte que me foi dado para a realização deste trabalho.

Aos meus amigos, colegas e ex-colegas de trabalho Tito Araújo, Antônio José, Ivanildo Nascimento, Ylido Araújo, José Edmilson, Pâmela Pinheiro e Germana Benevides por todos os ensinamentos transmitidos ao longo do meu estágio na empresa Topographus.

Aos amigos que cativei ao longo deste meu percurso na graduação e como bolsista no programa Ciência sem Fronteiras, em especial à Anielly de Paula Freitas, Nildson Rodrigues, Carlos Vinicius Sanches, Paulo Ricardo Teodoro, Mara Lúcia, Thays Vieira Bueno, José Neto, Gilberto Quevedo Rosa e Rafael Ramom.

A todos que fazem o Grupo PET – Agronomia, grupo ao qual fiz parte durante um ano e seis meses, tendo assim, contribuído muito, para a minha formação, em especial aos tutores Cândida Hermínia C. de Magalhães Bertini e Professor Ervino Bleicher, pelos conhecimentos compartilhados e pela oportunidade de ter feito parte deste grupo.

À Agrônoma – Consultoria e Projetos Agropecuários, Empresa Júnior da Agronomia – UFC, por ter feito parte da fundação e pelas experiências vividas, que terão grande valor em toda minha vida profissional.

Aos amigos e colegas de graduação, pela amizade ao longo desse tempo, em especial à Marcos Chaves Gurgel, Charles Lobo Pinheiro, Alberto Junior, Linda Brenna R. Araújo, Janaina Castro, Maria Albertina, João Germano Gomes, Jefferson Fortes, Emiliano Lopes e Vinicius Bitencourt C. Calou, amizades que não terminarão com o final do Curso.

Ao meu amigo, Marcos Chaves Gurgel, pelos bons momentos compartilhados, pela paciência e pela amizade construída desde o primeiro semestre, e pelo grande exemplo de pessoa.

Agradeço em especial à Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis – PRAE da Universidade Federal do Ceará, pela possibilidade de morar na Residência Universitária, sem a qual, teria sido impossível concluir o Curso de Agronomia.

Aos meus grandes amigos do Complexo 222-221 da residência universitária: Lucas de Aguiar, Tiago Rodrigues, Antônio Vanklane, Antônio Cícero, Antônio Neto, Edilson Bieh, Dayme Cavalcante, Janiquelle Rabelo e em especial, José Israel Pinheiro, Valsergio Barros, Alfredo Mendonça e Edibergue Santos, pela vivência enriquecedora nos quartos 222 e 221 da residência universitária, quero preservar suas amizades por toda vida.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho, meu muito obrigado.

*“O coração do homem planeja o seu caminho,  
mas o SENHOR lhe dirige os passos.”*

(Pr. 16:9)

*“Feliz aquele que transfere o que sabe e  
aprende o que ensina.”*

(Cora Coralina)



## RESUMO

Nos últimos 15 anos os receptores GNSS tornaram-se bastante acessíveis à comunidade civil, esta tecnologia passou a representar uma poderosa ferramenta de posicionamento da topografia moderna, com contribuições inovadoras nos mais diversos ramos de pesquisa e de prestação de serviços, todavia vale salientar que alguns equipamentos ópticos de medição ainda ocupam seu devido espaço, principalmente em locais ou situações que promovem a degradação do sinal GNSS. A popularização desta tecnologia bem como sua constante inovação acarreta a carência de informações técnicas baseadas em análises estatísticas confiáveis, sobre o desempenho destes receptores frente aos equipamentos ópticos de medição e o modo mais adequado de utilização segundo demandas específicas. Por esses motivos o objetivo principal desta pesquisa foi realizar, para este estudo de caso, a avaliação e comparação da acurácia altimétrica dos MDT's gerados a partir de levantamento topográfico realizado com estação total, e receptor GNSS em modo: (1) cinemático, (2) *Stop and Go*, e (3) cinemático com correção em tempo real (RTK) para fins de cubagem de material e indicar o mais recomendado dentro da relação custo x benefício. Todas as análises foram feitas com base no Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Os levantamentos topográficos foram realizados na parede do açude Alto Alegre no município de Caridade-Ce, com distância máxima de 500 metros de linha de base e estação de referência com 6 horas de rastreamento, pós-processada pelo serviço on-line IBGE-PPP. Ao longo da parede foram rastreados 15 pontos de referência utilizados na análise de tendência e precisão a partir de testes de hipóteses, em comparação com os MDT's gerados por interpolação em cada um dos métodos. O MDT gerado por meio do levantamento utilizando GNSS em modo *Stop and Go* foi o mais acurado com resultados bem próximos à modelagem realizada pelo método cinemático com correção em tempo real (RTK), obtendo classificação classe A para o PEC-PCD com equidistâncias vertical de 0,64 m e 0,8 m respectivamente, Esta mesma classificação foi alcançada pelo levantamento em modo cinemático pós-processado (PP) com equidistância vertical de 0,88 m, sendo este o que levou menos tempo no levantamento, 45 minutos, frente aos demais que foram mais de 2 horas. Já o MDT gerado a partir do levantamento com a estação total ficou sem classificação por ter sido reprovado na avaliação de tendência, não obstante obteve um bom resultado no teste de precisão com equidistâncias vertical de 0,83 m e um volume calculado próximo do modelo mais acurado, indicando que a tendência não foi tão significativa para comprometer o resultado final. Diante dos resultados, conclui-se que para este estudo de caso o método mais recomendado com base

na análise de acurácia e na avaliação superficial dos gastos de cada levantamento seria o levantamento em modo cinemático pós-processado (PP), uma vez que apesar de ser menos preciso que o GNSS em levantamento *Stop and Go*, obteve uma melhor relação custo x benefício e a discrepância de 5% a mais no volume não foi tão expressiva para o material em questão.

**Palavras-chave:** GNSS; Técnicas de levantamento; Equipamentos ópticos de medição; MDT; PEC-PCD.

## ABSTRACT

Over the past 15 years the GNSS receivers have become quite affordable the civil community, this technology came to represent a tool powerful positioning of modern surveying with innovative contributions in the most diverse fields of research and service, too although it's worth pointing out that some optical measuring equipment still occupy its owing space, especially in places or situations that promote the degradation of the GNSS signal. However the rapid accessibility to this technology and its constant innovation leads to the lack of technical information based on reliable statistical analyzes, about the performance of these receptors compared to optical measuring equipment and the most appropriate way to use according to specific demands. For these reasons the main objective of this research was to carry out the evaluation and comparison of accuracy and altimetric precision of DEMs generated from topographic survey of total station and GNSS receiver in order: (1) kinematic, (2) Stop and Go, and (3) real-time kinematic correction (RTK), for determining the volume material and indicate the most recommended in the cost-benefit ratio. All analyzes were based on the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD) published by the Directorate of Geographic Service of the Brazilian Army (DSG). The surveys were carried out in the wall of the dam Alto Alegre in Caridade municipality of Ceará, with a maximum distance of 500 meters baseline and reference station with 6 hours of screening, post-processed by the online service IBGE-PPP. Along the wall 15 were screened reference points used in evaluate the accuracy from hypothesis testing, where it is held trend analysis and accuracy in comparison with the DEM generated by interpolation in each of the methods. DEM generated through the survey using GNSS Stop and Go mode was the most accurate with very close results to modeling conducted by the kinematic method with real-time correction (RTK), obtaining class A rating for the PEC-PCD with vertical equidistance of 0.64 and 0.8m respectively, This same classification was achieved by the survey in post-processed kinematic mode (PP) with vertical contour interval of 0.88 m, being that it took less time in the survey, 45 minutes, compared to the others that were more than 2 hours. But the DEM generated from the survey with the total station was unrated by having flunked the evaluation of trend, nevertheless obtained a good result in the accuracy test with vertical equidistance of 0.83 m and a calculated volume near from the most accurate model, indicating that the trend was not so significant to compromise the end result. From the results it is concluded that for this case study, the most recommended method based on an accuracy analysis and surface evaluation of each call expenses would be the post-processed kinematic

mode, since despite being less precise than the GNSS survey Stop and Go, obtained a better cost-benefit ratio and the discrepancy of 5% more in volume wasn't as important for the material in question.

**Keywords:** GNSS; Lifting techniques; Optical measuring equipment; MDT; PEC-PCD.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Constelação Nominal GPS.....	20
Figura 2 - Localização das estações terrestres do segmento de controle do GPS.....	20
Figura 3 - Interação entre os três segmentos do sistema GPS.....	21
Figura 4 - Estrutura básica do sinal GPS atualizada.....	22
Figura 5 - Posicionamento por ponto, posicionamento relativo e posicionamento diferencial (DGPS), respectivamente.....	24
Figura 6 - Representação da superfície ortométrica e geométrica (elipsoidal) e a relação de interconversão entre elas.....	29
Figura 7 - Representação da diferença entre um modelo digital de superfície (MDS) e um modelo digital de terreno (MDT).....	30
Figura 8 - Modelo Digital Matricial (a) e Modelo Digital Vetorial (b).....	31
Figura 9 - Ilustração da definição de acurácia e precisão.....	33
Figura 10 - Localização da área de estudo.....	35
Figura 11 - Área experimental em diferentes panoramas.....	37
Figura 12 - Modelo Digital do Terreno em malha triangular (TIN) para cada metodologia de levantamento.....	43
Figura 13 - Representação da densidade e da nuvem de pontos obtidas pelos diferentes métodos de levantamento.....	44
Figura 14 - Gráfico das discrepâncias altimétricas em relação aos pontos de referência.....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das principais características dos métodos de levantamentos GNSS.....	27
Tabela 2 - Comparativo entre as características do Modelo Digital Matricial e Vetorial.....	32
Tabela 3 - Comparação do levantamento topográfico realizado com estação total e receptor GNSS em diferentes métodos de posicionamento.....	38
Tabela 4 - Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia conforme PEC-PCD e PEC.....	41
Tabela 5 - Nuvem de pontos e TIN gerados, utilizando os diferentes métodos de levantamento.....	42
Tabela 6 - Estatística das discrepâncias.....	45
Tabela 7 - Valores para a análise de tendência.....	46
Tabela 8 - Valores para a análise de precisão.....	47
Tabela 9 - Volume calculado na pilha segundo cada metodologia adotada.....	48

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
<b>2.</b>	<b>OBJETIVO</b> .....	<b>17</b>
<b>2.1.</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>3.</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.</b>	<b>Breve histórico e aspectos gerais dos métodos de posicionamento.</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1.1</b>	<i>GPS – Global Positioning System</i> .....	<b>19</b>
<b>3.1.2</b>	<i>GLONASS - Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema</i> .....	<b>22</b>
<b>3.1.3</b>	<i>GALILEO</i> .....	<b>22</b>
<b>3.1.4</b>	<i>BEIDOU</i> .....	<b>23</b>
<b>3.1.5</b>	<i>GNSS</i> .....	<b>23</b>
<b>3.2</b>	<b>Técnicas de posicionamento por GNSS</b> .....	<b>24</b>
<b>3.2.1</b>	<i>Posicionamento Absoluto</i> .....	<b>25</b>
<b>3.2.2</b>	<i>Posicionamento Relativo</i> .....	<b>25</b>
<b>3.2.2.1</b>	<i>Posicionamento Relativo estático</i> .....	<b>25</b>
<b>3.2.2.2</b>	<i>Posicionamento Relativo estático-rápido</i> .....	<b>26</b>
<b>3.2.2.3</b>	<i>Posicionamento Relativo semicinemático (Stop and Go)</i> .....	<b>26</b>
<b>3.2.2.4</b>	<i>Posicionamento Relativo cinemático</i> .....	<b>26</b>
<b>3.2.2.5</b>	<i>Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK)</i> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Determinação da altimetria</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4.</b>	<b>Representação Digital dos dados</b> .....	<b>29</b>
<b>3.5.</b>	<b>Precisão e Acurácia</b> .....	<b>32</b>
<b>3.6</b>	<b>Avaliação do PEC para cartografia digital</b> .....	<b>33</b>
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>35</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização da área experimental</b> .....	<b>35</b>
<b>4.2</b>	<b>Metodologias de levantamento e equipamentos utilizados</b> .....	<b>36</b>
<b>4.3.</b>	<b>Cálculos de volume dos Modelos Digitais do Terreno</b> .....	<b>39</b>
<b>4.4.</b>	<b>Acurácia e precisão dos Modelos Digitais do Terreno</b> .....	<b>40</b>
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>42</b>
<b>5.1.</b>	<b>Processamento dos dados</b> .....	<b>42</b>
<b>5.2.</b>	<b>Estatística descritiva dos modelos</b> .....	<b>45</b>
<b>5.3.</b>	<b>Avaliação da precisão e da acurácia dos modelos</b> .....	<b>46</b>

<b>5.4.</b>	<b>Cálculo de Volume.....</b>	<b>47</b>
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>50</b>
<b>7.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>51</b>



## 1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios, o ser humano sempre teve o interesse e a necessidade em conhecer e interpretar o espaço em que habitava; este interesse inicial não tinha caráter científico mas, apesar disso, o homem buscava o conhecimento da forma, dimensão e composição da Terra, tendo em vista que um simples deslocamento de um espaço a outro na superfície terrestre já justificava a necessidade de se visualizar, de alguma maneira, as características físicas do planeta. (IBGE, 2008). Neste âmbito, a origem e o próprio conceito de Cartografia e Geodésia tem suas origens intimamente relacionadas às inquietudes do homem em conhecer melhor as dinâmicas do espaço que o cercava.

As atividades geodésicas experimentaram uma verdadeira revolução desde o advento do sistema de posicionamento por satélites artificiais, devido à capacidade que este sistema possui de determinar posições, estáticas ou cinemáticas, aliando rapidez e precisão superiores aos métodos clássicos de levantamento. Apesar de ter sido desenvolvido com finalidade militar, tão logo a potencialidade de uso civil foi percebida e hoje são inúmeras as atividades que fazem uso do sistema *Global Navigation Satellite System* (GNSS), este método de posicionamento está revolucionando inúmeras pesquisas, serviços e setores da economia. Dentre os sistemas GNSS existentes, os únicos que tem cobertura global e estão em pleno funcionamento, são o *Global Positioning System* (GPS), desenvolvido pelos Estados Unidos e o *Global'naya Navigatsionnay Sputnikovaya Sistema* (GLONASS), da Rússia.

Segundo Galo e Camargo (1994), esta acelerada evolução tecnológica aumenta proporcionalmente o número de usuários não especialistas em mapeamento. Assim, em função deste despreparo e a falta de fiscalização sobre a produção cartográfica nacional está levando a qualidade geométrica a segundo plano nos serviços de mapeamento. Esta qualidade também é distorcida em função da carência de informações técnicas sobre o desempenho de receptores GNSS e aparelhos ópticos de medição, especialmente sobre qual técnica ou qual equipamento deve-se utilizar para trabalhos específicos. Observa-se a ausência de metodologias com base em princípios estatísticos robustos para avaliação da qualidade dos resultados de posicionamento para diferentes categorias de equipamentos topográficos e em diferentes condições de trabalho e aplicações.

É fundamental a disponibilização de informação relacionada ao desempenho dos diferentes tipos de receptores e métodos de levantamento utilizados, bem como das tecnologias associadas, especialmente a acurácia, em condições semelhantes àquelas em que

esses equipamentos são utilizados no campo. É necessário definir, antes de ir a campo, a técnica de levantamento GNSS (método absoluto, método relativo estático, método relativo semi-cinemático, método relativo cinemático, método relativo cinemático tempo real - RTK), segundo a acurácia necessária a aplicação do projeto a ser executado e o tempo em que o mesmo deve ser entregue.

Sendo assim, o presente trabalho objetivou testar 3 metodologias de posicionamento relativo de receptores GNSS (Cinemático pós-processado, cinemático RTK e *Stop and Go*) juntamente com um levantamento por topografia clássica usando estação total, aplicados no levantamento altimétrico e estudo de volume da parede do açude Alto Alegre situado no município de Caridade-Ce, em uma área aberta sem barreiras ou condições de potencial interferência tanto do sinal GNSS como do sinal de rádio comunicação entre os receptores no caso do posicionamento cinemático com correção em tempo real (RTK). Para isto foram rastreados 15 pontos de referência ao longo da parede com receptor GNSS no modo estático rápido e tempo de ocupação de 5 minutos, estes foram utilizados nos testes estatísticos de precisão, em comparação com cada um dos pontos correspondentes nos modelos digitais, depois de analisado a acurácia dos modelos foi calculado o volume no *software* ArcGis ® e avaliado brevemente o custo e tempo despendido nos levantamentos. O levantamento realizado através da metodologia *Stop and Go* obteve uma maior acurácia com índices bem semelhantes ao levantamento no modo RTK, sendo ambos enquadrados na classe A para o PEC-PCD com equidistâncias vertical de 0,64 m e 0,8 m respectivamente, Esta mesma classificação foi alcançada pelo levantamento em modo cinemático pós-processado (PP) com equidistância vertical de 0,88 m, sendo este o que levou menos tempo no levantamento, 45 minutos, frente aos demais que foram mais de 2 horas. O MDT gerado para levantamento com estação total não alcançou uma classificação segundo o PEC-PCD porque não passou na análise de tendência, todavia obteve um bom resultado no teste de precisão com equidistâncias vertical de 0,83 m e um volume calculado próximo do modelo mais acurado, indicando que a tendência não foi tão significativa para comprometer o resultado final. Vale ressaltar que os resultados aqui obtidos não especificam a acurácia dos métodos de levantamento, mas sim do estudo de caso realizado com cada um destes métodos, onde os pontos altimétricos avaliados foram obtidos a partir da interpolação dos pontos de levantamento coletados em campo. Diante dos resultados, conclui-se que o método mais recomendado com base na análise de acurácia e na avaliação superficial dos custos e rendimento de cada levantamento seria o levantamento em modo cinemático pós-processado.

## **2. OBJETIVO**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar a exatidão altimétrica dos MDT's gerados a partir dos levantamentos feitos com estação total e diferentes métodos de levantamento GNSS para cálculo de volume de materiais.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Comparar a acurácia dos MDT's gerados com estação total, e receptor GNSS em modo: (1) cinemático, (2) *Stop and Go*, e (3) cinemático com correção em tempo real (RTK),
- Avaliar qual a metodologia de levantamento de melhor custo benefício para cálculo de volume de materiais, considerando fatores como tempo e custo;
- Classificar os MDT's gerados pelos diferentes métodos segundo o PEC-PCD altimétrico.
- Relacionar a representatividade do modelo com o número de pontos coletados em campo e a acurácia obtida.

### **3. REVISÃO DE LITERATURA**

#### **3.1. Breve histórico e aspectos gerais dos métodos de posicionamento.**

Posicionar um objeto corresponde à prática de lhe atribuir coordenadas em relação a um referencial específico, e este foi um dos primeiros problemas de cunho científico que o ser humano procurou solucionar. O homem, desde os primórdios, tinha a necessidade de se localizar e interpretar o espaço em que habitavam, a princípio, restrito ao ambiente circunvizinho, mas com o desenvolvimento intelectual e social das civilizações, este interesse foi se expandindo para as áreas de comércio até atingir, praticamente, todo o mundo moderno durante o empreendimento das navegações marítimas e desbravamento do Novo mundo entre os séculos XV e XVI.

Já no século XV, se percebia uma evolução significativa nos métodos de posicionamento passando de uma orientação espacial baseada estritamente nas observações astronômica e de referencial terrestre para o uso de cartografia náutica e de equipamentos de navegação. O primeiro grande invento de orientação foi a bússola, que surgiu diante da necessidade de técnicas mais precisas de posicionamento em alto mar. Desenvolvida pelos chineses, e responsável por uma grande revolução nas navegações marítimas, contudo, os sistemas de geoposição ainda continuavam a mercê da grande margem de erros sistemáticos.

Por volta de 1912, com o avanço da eletrônica, passaram a serem desenvolvidos e empregados pela marinha dos EUA os primeiros sistemas de radio-navegação para determinar a posição de objetos, a princípio eram bastante limitados e imprecisos, mas já era um grande avanço para a época (GORGULHO, 2001 apud SILVA, 2002). Estes sistemas foram amplamente utilizados até a segunda Guerra Mundial, no pós-guerra e dentro do contexto da guerra fria. Com a revolução tecnológica e o advento da era espacial, os soviéticos lançaram em outubro de 1957 o primeiro satélite artificial na órbita da terra, o SPUTNIK 1 (KRUEGER; NADAL; ZANETTI, 2004) intensificando a corrida armamentista com os americanos e impulsionando a ciência e a tecnologia de um modo jamais visto durante toda a história da humanidade.

Já na década de 1960, na busca por um sistema de posicionamento baseado em satélites artificiais, as forças armadas dos EUA, já conhecedora das variações de frequência do efeito Doppler presentes nos sinais do SPUTNIK 1 e com toda experiência adquirida durante o desenvolvimento dos sistemas de radionavegação, iniciou as pesquisas para o

desenvolvimento do que futuramente seria chamado “Navy Navigation Sattelite System” – NNSS também conhecido como TRANSIT, o predecessor do moderno sistema de posicionamento que temos disponível atualmente, o GPS.

Todo este contexto histórico da humanidade, de guerras e disputa por poder e espaço entre as nações, foi fundamental para o rápido impulso das várias áreas do conhecimento, mas principalmente para aquelas ligadas à tecnologia de softwares, informática e equipamentos digitais como é o caso da Geodésia e Topografia, cuja evolução dos equipamentos, acessórios e programas voltados à coleta e processamento de dados ocorreram e ocorrem de forma muito rápida, o que traz a necessidade de estudos para balizar a aplicação prática com segurança, de tal maneira a se evitar usos indevidos de equipamentos e procedimentos.

### ***3.1.1 GPS – Global Positioning System***

Diante de tantas limitações com os sistemas de posição e navegação já desenvolvidos, foi iniciado em 1973 o projeto NAVSTAR-GPS, um sistema de navegação de alta precisão coordenado pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos (DoD– Department of Defense) apoiado por diversas instituições de pesquisa americanas e que, segundo Hofmann-Wellenhof, Lichtenegger e Collins (1997) e Segantine, (1999), surgia a partir da fusão de outros dois programas militares, o TIMATION, desenvolvido pela marinha, e o SISTEMA 621B, desenvolvido pela força aérea. Sua principal finalidade era suprir as necessidades militares, possibilitando o posicionamento tridimensional contínuo, em tempo real e de precisão centimétrica para qualquer ponto sobre ou próximo da superfície terrestre, em relação a um sistema de referência definido (CORRÊA, 1999).

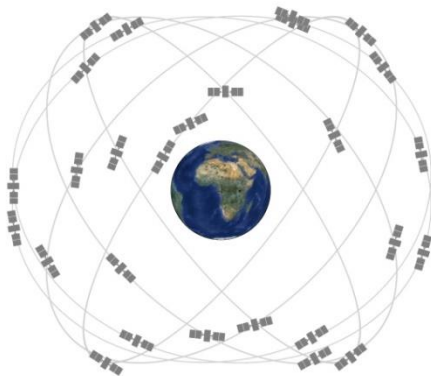
O sistema GPS foi declarado completamente operacional em 27 de abril de 1995, muito embora já viesse sendo utilizado no posicionamento geodésico desde a década de 80 (MONICO, 2008) e (ARANA, 1997), e apesar de ter sido concebido inicialmente para atividades militares, o seu grande potencial para aplicações da comunidade civil fez com que o Congresso Americano entrasse em consenso e junto ao DoD liberasse este serviço para o uso civil. No entanto, o mesmo continha uma degradação dos dados das efemérides transmitidas, chamada de Selective Availability (SA) ou "disponibilidade seletiva", que consistia num erro induzido à precisão do sinal recebido pelos receptores e que foi mantido até 1º de maio de 2000, quando foi assinada uma lei determinando o fim dessa interferência e,

desde então o Departamento de Defesa americano mantém este serviço sem restrições de precisão.

Convencionalmente, o sistema é dividido em três segmentos principais:

a) Segmento espacial: Composto pelos satélites que orbitam ao redor da terra conforme a Figura 1.

Figura 1- Constelação Nominal GPS.

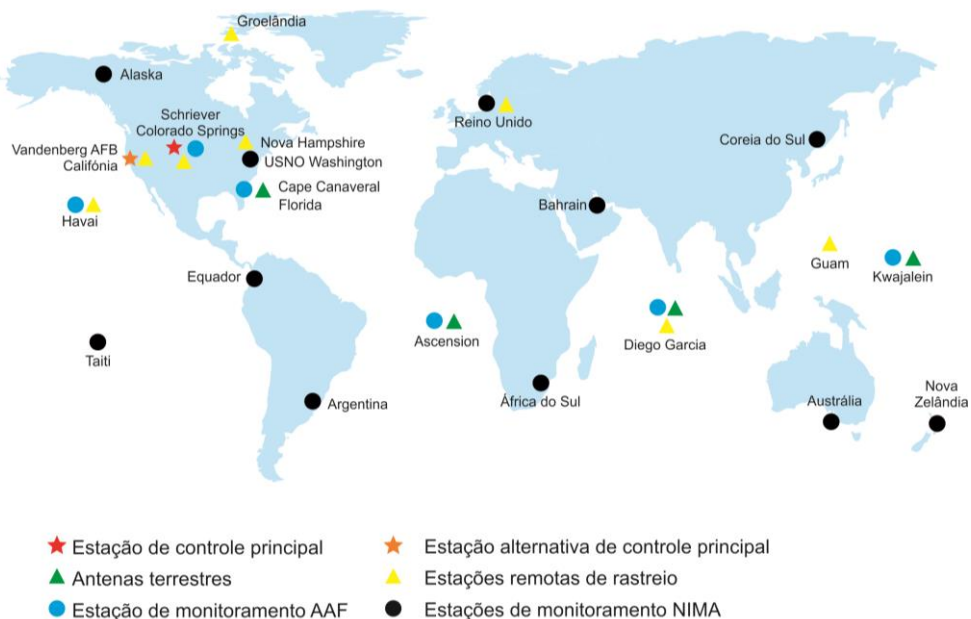


- ➡ Uma constelação de no mínimo 24 satélites operacionais, atualmente encontra-se com 31.
- ➡ Distribuídos em 6 planos orbitais distintos
- ➡ Inclinação orbital de 55°(em relação ao equador)
- ➡ Altitude aproximada de 20.200 km
- ➡ Período orbital de aproximadamente 12 horas siderais

Fonte: Adaptado de GPS.gov (2015)

b) Segmento de controle: Consiste em uma rede global de instalações terrestres que rastreiam permanentemente os satélites GPS, monitoram suas transmissões, realizam análises, corrigem o tempo dos relógios, das órbitas e as demais informações e enviam comandos e dados para a constelação (MONICO, 2008).

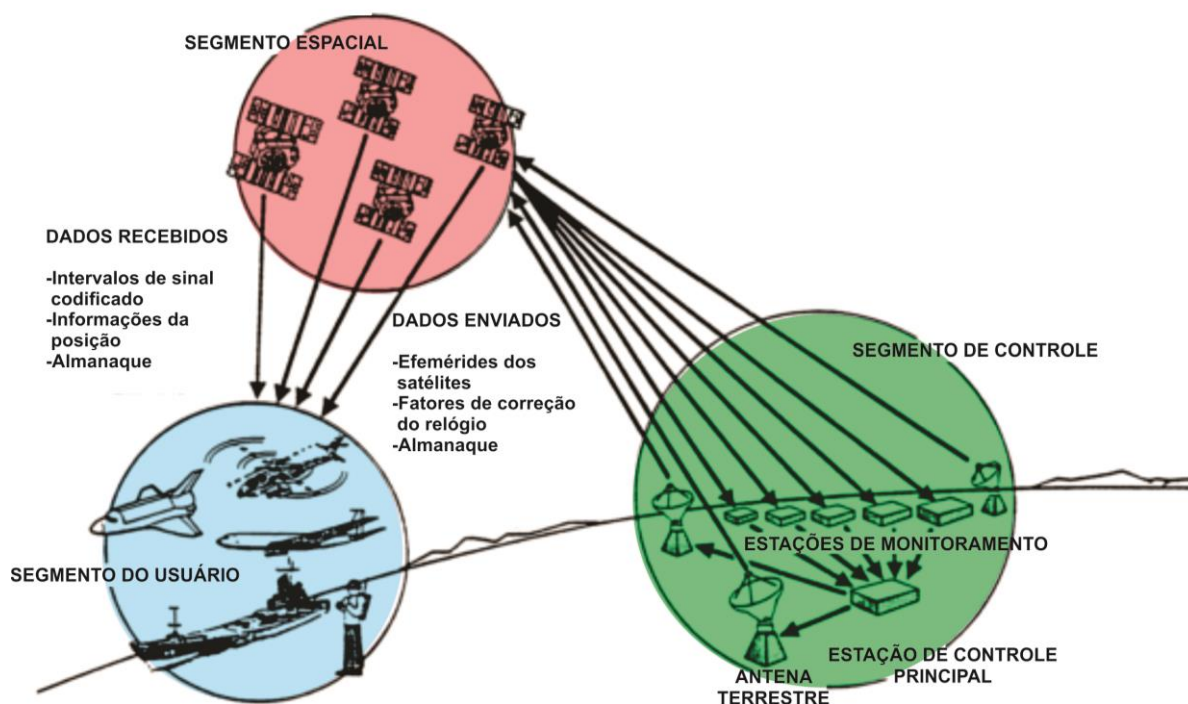
Figura 2- Localização das estações terrestres do segmento de controle do GPS



Fonte: Adaptado de GPS.gov (2015)

c) Segmento do Usuário: está diretamente relacionada aos equipamentos (receptores) usados para o posicionamento dos pontos sobre a superfície terrestre, e que devem ser apropriados ao propósito a que se destinam (Figura 3), citado em (SEEBER, 2003)

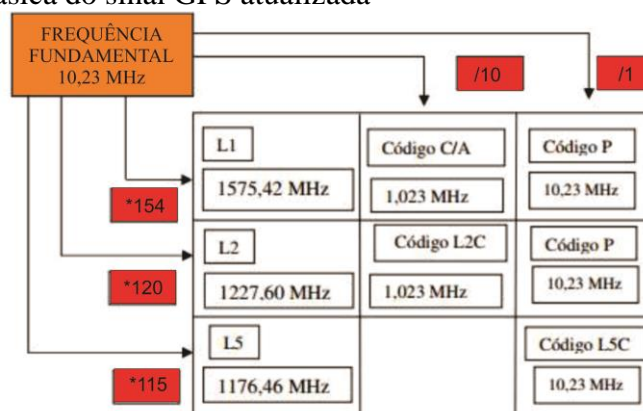
Figura 3- Interação entre os três segmentos do sistema GPS



Esta configuração espacial garante ao sistema o mínimo de quatro satélites GPS rastreáveis em qualquer local da superfície terrestre, a qualquer hora, sendo três satélites suficientes para definir a posição do receptor e um quarto necessário para sincronizar o tempo (MARINO, 2011) e (MONICO, 2008), conforme ilustrado no segmento espacial da Figura 3.

Os satélites transmitem constantemente ondas de rádio-frequência baseado em uma frequência fundamental ( $f_0$ ) de 10,23 MHz. Desta se obtém 3 novas frequências operacionais, multiplicando-se a  $f_0$  pelas constantes 154, 120 e 115, pertencentes a banda L, quais sejam : L1 (Link one), L2 (Link two) e L5 (Link five) respectivamente. Estas portadoras são moduladas em fase, gerando códigos chamados de PRN (Pseudo Random Noise), ruído falsamente aleatório, sendo únicos e empregados para identificação e determinação da posição dos satélites, as observáveis que formam o PRN são basicamente os códigos C/A, P e recentemente o L2C e o L5C que são modulados nas portadoras conforme a representação simplificada abaixo (Figura 4) com informações obtidas de (IBGE, 2008) e (MONICO, 2008) e atualizações pelo site norte-americano ([www.gps.gov](http://www.gps.gov)).

Figura 4- Estrutura básica do sinal GPS atualizada



Fonte: Modificado de Monico (2000, p.273)

### 3.1.2 GLONASS - *Global'naya Navigatsionnaya Sputnikowaya Sistema*

Em paralelo e de maneira independente, o sistema GLONASS foi desenvolvido pela antiga URSS com a mesma finalidade militar e com características bastante semelhantes ao GPS, tanto na estrutura organizacional como no princípio de funcionamento. Foi declarado totalmente operacional no final de 1995, com uma constelação de 24 satélites e aberto ao uso civil em 1999 (IBGE, 2008). Entretanto, a crise econômica advinda do fim da União Soviética reduziu os investimentos no sistema, que entrou em franca decadência. Em meados do século XXI, o governo russo temendo a dependência do sistema de navegação americano lançou um projeto de revitalização e modernização do sistema GLONASS que retomou a cobertura global em 2011, e atualmente atua com 23 satélites, sendo a única alternativa válida ao GPS (MANO, 2012) e (RUSSIAN FEDERAL SPACE AGENCY, 2015).

### 3.1.3 GALILEO

No final de década de 90, impulsionados pela dependência do sistema NAVSTAR-GPS e pelo fato do mesmo ser mantido pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos, servindo primariamente às Forças Armadas, que tem total liberdade de manipular ou até mesmo desabilitar o sinal do GPS sem aviso prévio, foi que fez com que alguns países europeus e países colaboradores como o Japão e o Canadá somassem esforços pelo desenvolvimento do sistema de navegação por satélites, denominado GALILEO, fazendo menção ao astrônomo italiano Galileu Galilei. Ao contrário do GPS e do GLONASS, o



GALILEO e de responsabilidade civil, sendo a ESA (European Space Agency) uma das encarregadas pela criação e desenvolvimento deste sistema.

Atualmente já foram lançados 12 satélites em órbita, sendo que a capacidade do sistema completo inclui um serviço comercial criptografado beneficiando 24 satélites operacionais, e está previsto para entrar em vigor em 2020 (EUROPEAN SPACE AGENCY, 2015).

### **3.1.4 BEIDOU**

Por volta de 2006 a mídia anunciou o sistema de navegação por satélites em desenvolvimento na China, trata-se do BEIDOU ou COMPASS (China's Compass Navigation Satellite System – CNSS), iniciado pelas forças militares da China e estabelecido pelo CSNPC (China Satellite Navigation Project Center) que intensificará as pesquisas, a construção e administração do CNSS (IBGE, 2008).

Atualmente o programa de desenvolvimento do sistema de navegação BEIDOU atua com 19 satélites em órbita e já opera na região Ásia-Pacífico com previsão de cobertura global até 2020 através de uma constelação de 35 satélites (CHINA SATELLITE NAVIGATION SYSTEM COMMITTEE, 2015).

### **3.1.5 GNSS**

A denominação GNSS (Global Navigation Satellite System) foi usada pela primeira vez pela Internacional Civil Aviation Organization (Icao) durante uma de suas reuniões, e atualmente abrange todos os sistemas de posicionamento global por satélites bem como a infraestrutura terrestre (GBAS – Ground Based Augmentatin System) e a espacial (SBAS – Satellite Based Augmentation System) associada (IBGE, 2008). Esta integração garante ao usuário maior velocidade e confiabilidade de definição das coordenadas, melhor correção dos efeitos ionosféricos, possibilidade de levantamento com precisão em ambientes com interferências e melhoria considerável da acurácia em aplicações de tempo real Zhang et al. (2005). Todavia para que se torne possível a compatibilidade entre estes sistemas é preciso ponderar algumas das particularidades entre eles (MANO, 2012) e (MONICO, 2008).

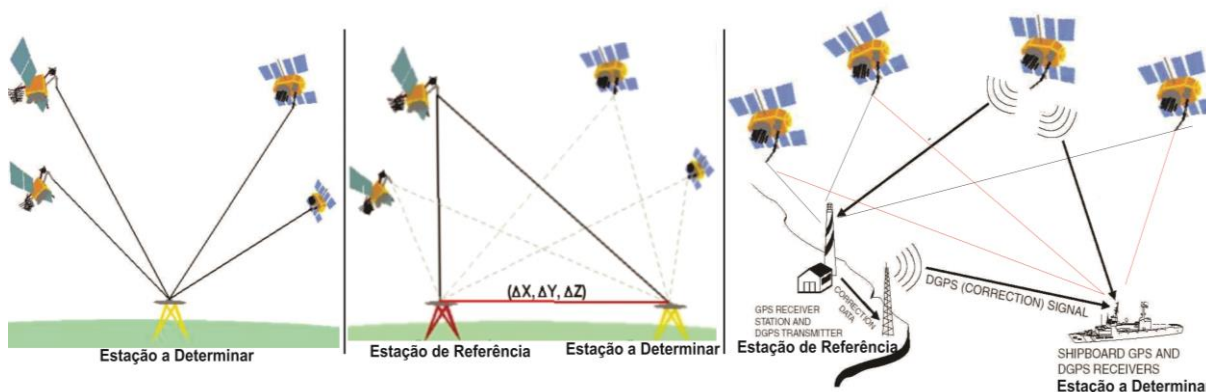
Muito embora a evolução de um sistema de satélites seja muito mais lenta que as demais áreas, em face do tempo requerido para os processos de concepção, realização e

lançamento de satélites, o cenário atual é de constantes inovações e os diversos usuário devem estar atentos para dar prioridades a receptores que estejam aptos ou próximos de permitir o uso máximo da tecnologia GNSS disponível.

### 3.2 Técnicas de posicionamento por GNSS

O Posicionamento por GNSS pode ser realizado através de diversas metodologias, utilizando diferentes observáveis, que variam segundo a capacidade do receptor utilizado, e a combinação entre estes fatores é fundamental na determinação da acurácia do levantamento. Monico (2008) divide as técnicas de posicionamento em: posicionamento absoluto (também denominado como posicionamento isolado), quando as coordenadas definidas estão referenciadas ao geocentro e são obtidas através de um receptor isolado; posicionamento relativo, quando as coordenadas estão associadas a um referencial materializado por um ou mais pontos de coordenadas conhecidas; e posicionamento diferencial ou DGPS, concebido para reduzir os efeitos da disponibilidade seletiva (SA), onde a posição da estação de interesse (estação de navegação) é definida com base nas correções estimadas na estação base (estação de coordenadas conhecidas) através das pseudodistâncias (Figura 5).

Figura 5-Posicionamento por ponto, posicionamento relativo e posicionamento diferencial (DGPS), respectivamente.



Fonte: Adaptada de IBGE (2008)

Estas técnicas ainda podem ser classificadas como estática ou cinemática, dependendo se a estação de navegação está em repouso ou em movimento e, também, quanto ao processamento da posição desta estação. Se ocorre durante ou após a coleta das observações, sendo classificado, respectivamente, como posicionamento em tempo real e posicionamento pós-processado (HOFMANN-WELLENHOF, LICHTENEGGER e

COLLINS, 1997; IBGE, 2008). Cada uma destas metodologias apresenta suas vantagens e desvantagens e sua adoção depende, sobretudo, da aplicação.

### ***3.2.1 Posicionamento Absoluto***

O posicionamento absoluto pode ser subdividido em posicionamento por ponto (PP) e posicionamento por ponto preciso (PPP) (IBGE, 2008). Segundo Marques (2012) esses métodos se diferenciam pelas observáveis empregadas e a acurácia alcançada enquanto o PP oferece uma acurácia em escala métrica, o PPP pode possibilitar levantamentos de precisão milimétrica.

No posicionamento por ponto (PP) as observáveis das efemérides transmitidas são pseudodistâncias derivadas do código C/A, onde são modulados apenas os erros do relógio do satélite e do receptor. Já no Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), são empregadas efemérides precisas e as correções do relógio com dados da onda portadora L1, L2 e mais recente a L3 além da combinação entre elas, adquiridas do International GNSS Service (IGS) (MONICO, 2008).

### ***3.2.2 Posicionamento Relativo***

No posicionamento relativo é necessário pelo menos dois receptores captando simultaneamente os sinais de no mínimo dois satélites, tomando um ou mais destes receptores (estação de referência-base) como ponto de coordenadas conhecidas, para a definição da posição da estação remota (rover).

Como forma de explorar a capacidade do posicionamento GNSS em fornecer coordenadas altamente precisas, depois de um breve período de coleta de dados, foi que surgiu vários métodos intermediários entre o posicionamento estático e cinemático. Em IBGE (2008) e Monico (2008) o posicionamento relativo é subdividido em quatro grupos: estático, estático-rápido, semicinemático e cinemático.

#### ***3.2.2.1 Posicionamento Relativo estático***

Neste método de levantamento, tanto a estação de referência (base) como a estação remota (rover) permanecem estacionárias durante todo o levantamento, sendo que o

tempo de rastreamento pode durar de 20 minutos a várias horas, de acordo com a precisão requerida. O comprimento da linha de base e o tipo de observáveis rastreadas (Tabela 1). Segundo Monico (2008), a precisão obtida com esta técnica varia de 0,1 a 1 ppm, no entanto para redes geodésicas com linha de base superior a 15 km é imprescindível o uso de receptores de dupla frequência para manter este grau de precisão

Este método é adotado para linhas de base longas (superior a 20 km), indicado para densificação de redes geodésicas, acompanhamento de tectônica de placas, implantação de coordenadas na certificação de imóveis rurais (segundo as normas do INCRA), transporte de coordenadas de vértices de controle planimétrico, etc. (BORGES, 2015) e (INCRA, 2013)

#### *3.2.2.2 Posicionamento Relativo estático-rápido*

Este levantamento segue os mesmos princípios do relativo estático, porém com um curto período de ocupação, de até 20 minutos, adequado para levantamentos com linhas de base de no máximo 20 km, fornecendo, em condições normais, uma precisão de 1 a 5 ppm (MONICO, 2008) e (INCRA, 2013). A utilização deste método é propícia para levantamentos em que se deseja alta produtividade, mas há muitas obstruções entre as estações a serem levantadas, pois não há necessidade da continuidade de rastreamento durante as mudanças das sessões de coleta. Usado em mapeamentos cadastrais, para estabelecer redes locais de controle, na certificação de imóveis rurais (segundo as normas do INCRA), etc.

#### *3.2.2.3 Posicionamento Relativo semicinemático (Stop and Go)*

Este método de levantamento proporciona ótimos resultados com tempo de permanência inferior entre 2 a 5 minutos, sendo que o receptor deve permanecer ligado durante todo o período do levantamento para que a geometria dos satélites envolvida entre os receptores (base e rover) se altere, solucionando o vetor de ambiguidade. O comprimento de linha de base para este tipo de posicionamento deve ser de, no máximo 20 km, como mesmo nível de precisão do estático rápido (MONICO, 2008).

#### *3.2.2.4 Posicionamento Relativo cinemático*

O método cinemático de levantamento caracteriza-se pelo fato de um receptor ocupar uma estação base de coordenadas conhecidas, enquanto o receptor remoto (rover) está estacionado ou em pleno movimento coletando dados sobre as feições de interesse, determinando, assim, as coordenadas de uma trajetória (SEEBER, 2003). No posicionamento relativo cinemático, tem-se como observável fundamental a fase da onda portadora, gerando levantamentos de precisão da ordem de 1 a 10 ppm, com comprimento máximo de 20 km de linha de base (IBGE, 2008). Segundo Silva (2015), antes de iniciar um trabalho com este método é necessário inicializar a base e o rover, simultaneamente para um rastreamento paralelo por um período de 10 a 20 min, a fim de resolver o vetor de ambiguidade.

### 3.2.2.5 Posicionamento relativo cinemático em tempo real (RTK)

Geralmente, o processamento dos métodos já descritos anteriormente é realizado após a coleta dos dados. No entanto, existem algumas aplicações que exigem o conhecimento das coordenadas da antena do receptor remoto (rover) em tempo real. Para isto faz-se necessário o uso de um link de rádio ou algum outro sistema de comunicação que comunique a estação base com o rover, promovendo resoluções quase instantâneas, e dentro de um formato apropriado, do vetor de ambiguidade (MONICO, 2008) e (SEEBER, 2003).

No posicionamento RTK a precisão esperada é da ordem de poucos centímetros com alcance na maioria das vezes limitado pelo link de comunicação (MONICO, 2008).

Tabela 1 - Resumo das principais características dos métodos de levantamentos já descritos, segundo dados apresentados em Santos (2014) e IBGE (2006)

Técnica		Oserváveis	Tempo de observação	Precisão
Por ponto	Convencional	Pseudodistância	30 - 60 seg	5 m – 15 m
	Preciso (PPP)	Pseudodistância e fase	4 – 6 horas	0,006m + 1ppm
Relativo	Estático	DD pseudodistância e fase	1 – 4 horas	5 mm + 1 ppm
	Estático-rápido	DD pseudodistância e fase	10 a 20 min	1 cm + 1 ppm
	Semicinemático	DD pseudodistância e fase	10 a 20 seg	10 cm – 20 cm
	Cinemático	DD pseudodistância e fase	1 seg	10 cm – 1 m
	RTK	DD pseudodistância e fase	1 seg	10 cm – 20 m
DGPS	Convencional	Pseudodistância	30 – 60 seg	1 – 3 metros

Fonte: Adaptada de Santos (2014)

\*DD-Dupla Diferença da fase

### 3.3 Determinação da altimetria

O método e os equipamentos empregados na aquisição de dados para levantamentos topográficos e geodésicos são escolhidos segundo a possibilidade de utilizá-los. Existe uma série de fatores que podem ser limitantes durante a coleta dos dados, tais como: impossibilidade de medição direta de distância; instabilidade (por vibração do solo) no local do levantamento; impossibilidade de intervisibilidade entre as estações de levantamento; levantamento em locais fechados com obstrução ao sinal GNSS, etc.

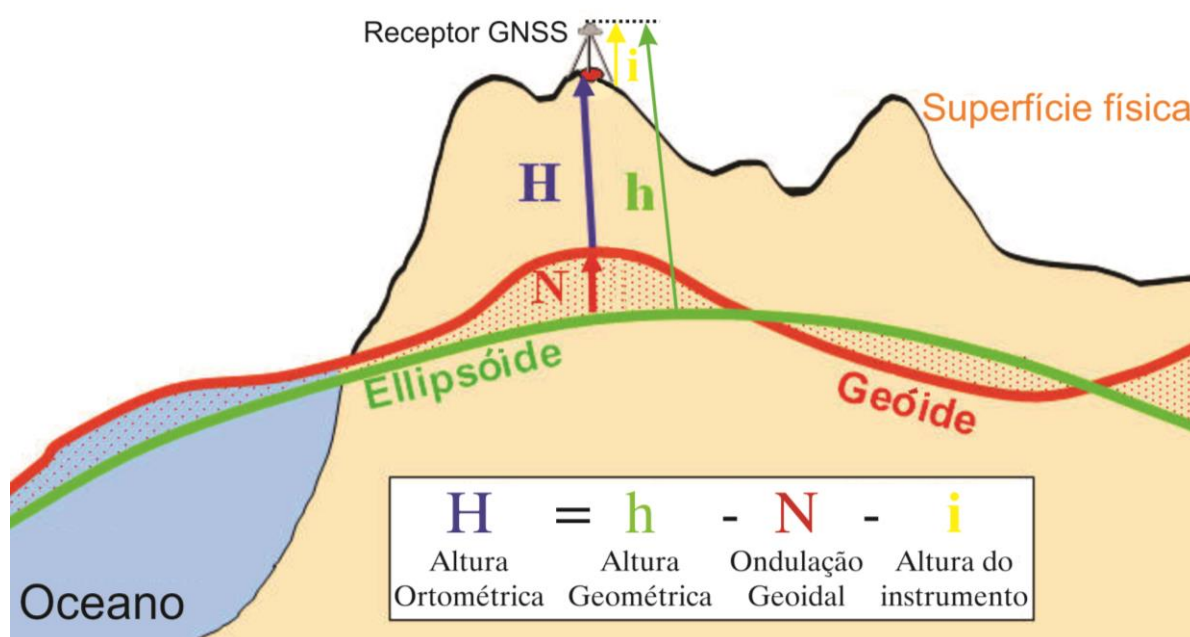
Há uns 15 anos atrás, a topografia clássica era a principal ferramenta utilizada para realizar serviços de natureza planialtimétrica e encontrava-se em plena modernização com o surgimento de prismas 360°, estações servo motorizadas, etc. Wolf (2003) relata que a estação total, era na época o mais importante instrumento empregado em levantamentos topográficos modernos, tendo substituído os teodolitos e medidores eletrônicos de distância isolados. O sistema de posicionamento por GNSS, na época ainda incipiente e com algumas limitações de precisão e custos mais elevados dos receptores, não era tão popularizado como atualmente, sendo que mesmo atualmente com o crescente interesse pela utilização desta tecnologia para medições geodésicas e topográficas, a estação ainda tem sua reserva de mercado, sendo utilizada principalmente em áreas onde o sinal GNSS sofre muita interferência. Sendo que a NBR 13133/1994 recomenda o uso da estação total para a execução de operações topográficas como levantamento planialtimétrico, entre outras, desde que sejam levadas em consideração algumas condições que estão descritas na própria norma.

Nos últimos anos o sistema GNSS obteve um rápido crescimento em popularidade e aplicabilidade, sendo amplamente usados em levantamentos geodésicos, topográficos, e nas mais diversas aplicações de posicionamentos e navegação. Segundo Lago (2002) apud Silva (2015), há uma grande expectativa no uso de receptores GNSS para determinar altitude, principalmente quando o levantamento de campo resulta em uma densa malha de pontos rastreados, buscando assegurar um modelo digital do terreno mais representativo possível. Este otimismo gira ao redor dos benefícios que estes equipamentos podem trazer frente ao levantamento convencional, tais como, maior eficiência na coleta de dados, dispensa de intervisibilidade entre vértices, transporte simultâneo de coordenadas tridimensionais em qualquer hora do dia, etc.

Entretanto, para fazer uso de GNSS em levantamentos altimétricos é necessário ter o conhecimento de que a superfície de referencia altimetria adotada no Brasil é o geoide

(altitude ortométrica), enquanto que o receptor GNSS proporciona altitudes referidas ao elipsóide (altitude geométrica), e para obter esta interconversão, segundo IBGE (2008), é necessário estabelecer uma relação com a ondulação geoidal, nacionalmente realizada pelo modelo MAPGEO2010, conforme a equação da figura 6.

Figura 6 - Representação da superfície ortométrica e geométrica (elipsoidal) e a relação de interconversão entre elas.



Fonte: adaptado de Abreu (2014)

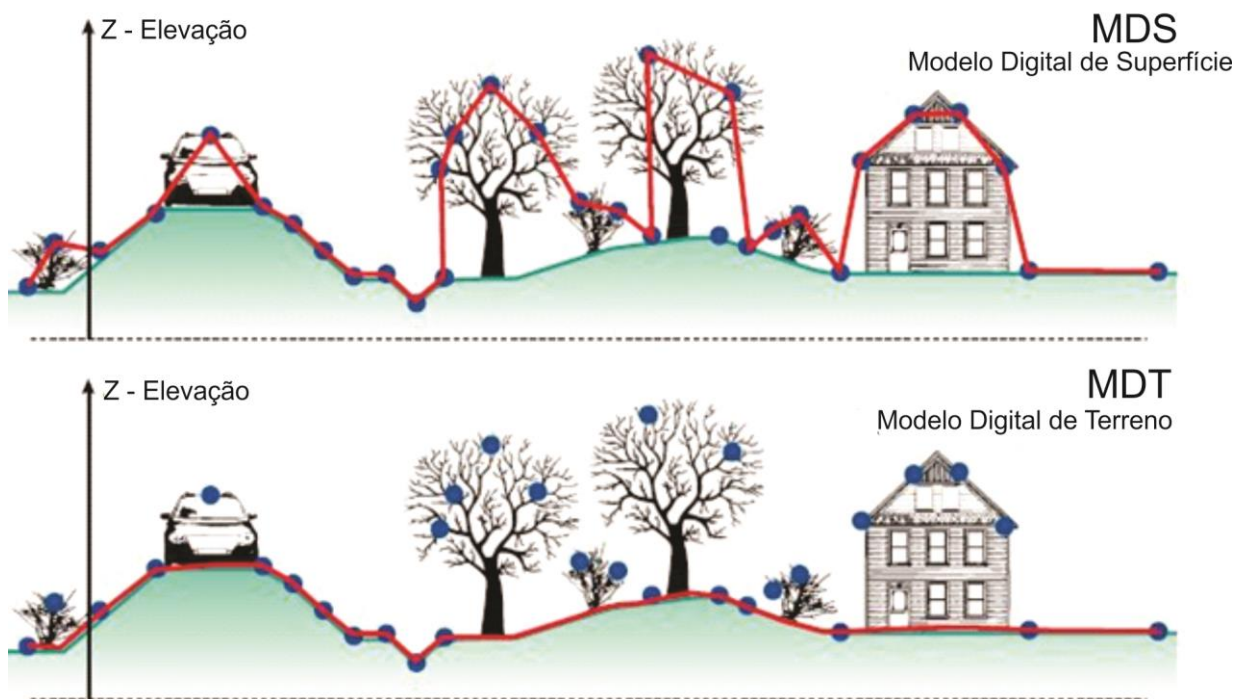
### 3.4. Representação Digital dos dados.

Segundo Felgueiras (2004), um modelo numérico de terreno (MNT) é uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial vinculado a uma região da superfície terrestre. Esta representação é amplamente aplicada em vários campos científicos, Guzzetti et al. (2005) e Kheir et al. (2007) analisaram a susceptibilidade de deslizamento de terra e formação de voçorocas com morfometria gerada a partir de MNT. Minasny & McBratney. (2007) e Sanchez et al. (2009) utilizaram modelos digitais de elevação para compreensão das relações espaciais e temporais entre classes de solos e diferentes variáveis ambientais, Pereira (2007) gerou modelo numérico do terreno para caracterização da configuração espacial de feições geomorfológicas costeiras a partir de levantamentos topográficos e geodésicos, enfim, a vasta área de pesquisa envolvendo este modelo de abstração comprova a viabilidade e a representatividade que o mesmo proporciona.

De acordo com Felgueiras (2004) a modelagem numérica de terreno é uma nova forma de encarar o problema da elaboração e implantação de projetos, a partir dos modelos digitais pode-se gerar mapas de declividade, calcular diretamente volumes e áreas, desenhar perfis e seções transversais, apresentar perspectivas tridimensionais, analisar a sistematização do terreno natural para as mais diferentes finalidades, entre outros usos.

A altimetria é um típico fenômeno representado através de modelagem digital, sendo estes modelos muito abordados em estudos morfométricos, principalmente na elaboração de modelos digitais de superfície (MDS) e Modelos digitais de terreno (MDT). Segundo Li, Zhu e Gold (2005) um MDT representa somente a informação referente ao terreno que está sendo modelado, enquanto um MDS pode conter informações do terreno além de outros elementos que estão sobre este, como edificações, vegetações, etc. (Figura 7)

Figura 7 - Representação da diferença entre um modelo digital de superfície (MDS) e um modelo digital de terreno (MDT)



Fonte: Elaborada pelo autor

Para construção de um modelo digital seja de superfície ou de terreno é necessário fazer uma amostragem representativa da variação do fenômeno de interesse, com posterior interpolação destes dados e criação do modelo propriamente dito. Geralmente estas amostras são representadas por isolinhas ou pontos tridimensionais levantados em campo



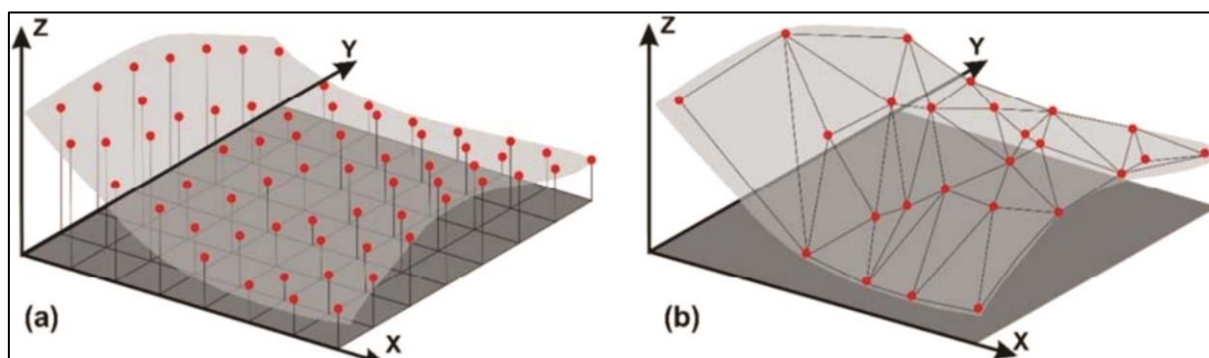
(FELGUEIRAS, 2004), sendo importante coletar dados distribuídos ao longo de toda a região a ser modelada, com um maior número de amostras onde o fenômeno modelado possuir maior variação (pontos notáveis).

Na altimetria pode-se obter estas amostras de maneira remota, seja a partir de pares estéreos de imagens ou tecnologia de varredura, ou de forma direta por meio de ocupação dos pontos tridimensionais a serem coletados através de equipamentos como receptor GNSS, estação total, nível etc. Silva (2015), em um estudo de caso, comparou a acurácia dos modelos digitais de terreno através de modelagem numérica gerada por duas metodologias de coleta indireta dos dados, veículo aéreo não tripulado (VANT) e Laser scanner (Light Detection And Ranging- LIDAR) e uma metodologia direta de coleta dos dados, fazendo uso de um receptor GNSS em modo cinemático.

Os métodos indiretos de amostragem permitem a aquisição de uma vasta gama de pontos ao longo da superfície de interesse em um curto período de tempo o que torna o modelo digital mais fidedigno à realidade, enquanto que a representação de pontos coletados em campo através dos métodos diretos é mais grosseira, devido ao maior espaçamento entre os pontos.

Segundo Felgueiras (2004) a partir dos pontos levantados pode-se construir um modelo digital matricial ou vetorial de distribuição triangular, mais conhecida como TIN (Triangular Irregular Network), a partir dos quais se define uma superfície (Figura 8). Para as grades triangulares, as coordenadas de cada um dos nós que interligam as faces triangulares dos poliedros, são as mesmas dos pontos levantados em campo. Já para as grades regulares representadas por uma estrutura raster, as coordenadas dos vértices da face retangular do poliedro podem corresponder os próprios pontos levantados em campo ou serem gerado a partir de interpolação.

Figura 8 – Modelo Digital Matricial (a) e Modelo Digital Vetorial (b)



Fonte: Adaptado de Felgueira (2004)

A tabela 2 abaixo apresenta algumas implicações entre a escolha de um ou outro modelo de representação.

Tabela 2 - Comparativo entre as características do Modelo Digital Matricial e Vetorial

<b>Modelo Digital Matricial</b>	<b>Modelo Digital Vetorial</b>
Apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo	Não apresenta regularidade na distribuição espacial dos vértices das células do modelo
Os vértices dos retângulos são estimados a partir das amostras	Os vértices dos triângulos pertencem ao conjunto amostral
Apresenta problemas para representar superfícies com variações locais acentuadas	Representa melhor superfícies não homogêneas com variações locais acentuadas
Estrutura de dados mais simples	Estrutura de dados mais complexa
Relações topológicas entre os retângulos são explícitas	É necessário identificar e armazenar as relações topológicas entre triângulos
Mais utilizado em aplicações qualitativas e para análises multiníveis no formato "raster"	Mais utilizado em aplicações quantitativas

Fonte: Adaptado de Felgueiras (2004)

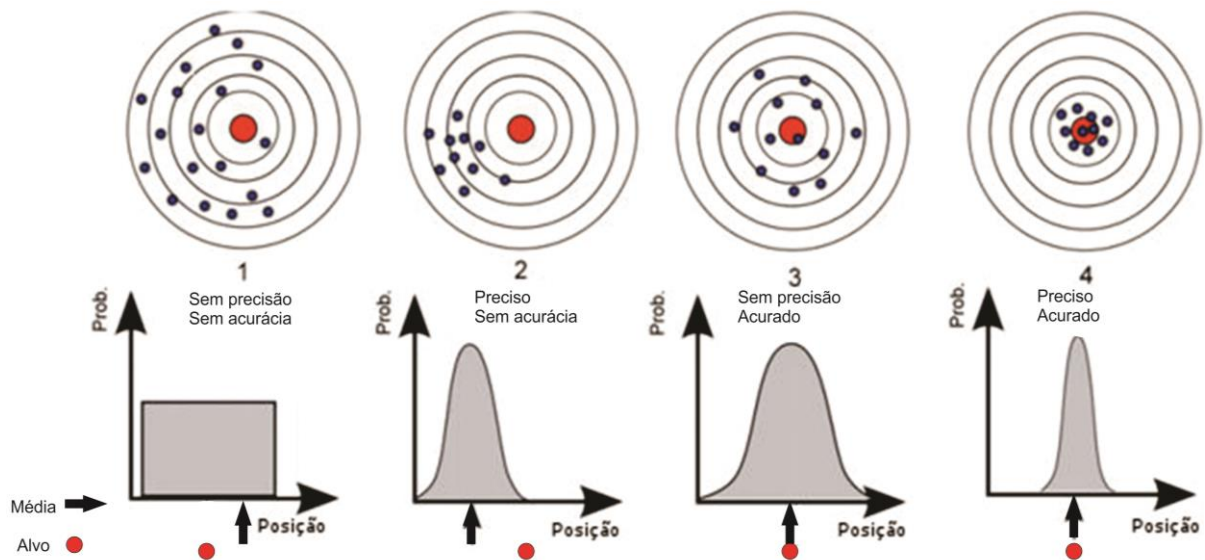
### 3.5. Precisão e Acurácia

Segundo Monico (2009) a qualidade de uma grandeza observada ou de um parâmetro estimado nas áreas de Cartografia e Geodésia comumente são indicadas através das análises de acurácia e da precisão, que nem sempre são usadas de acordo com sua real definição. Para realizar tais análises é importante partir do princípio que toda medida está sujeita aos mais variados tipos de erros, sendo que o importante não é obter amostras tais quais os valores de referencia (valores verdadeiros), mas sim, conhecer os principais erros causados durante a obtenção e tratamento destes dados buscando dirimir seus efeitos sobre o produto final, sendo as análises de acurácia e precisão técnicas que quando bem interpretadas possibilitam tal prática.

Monico (2009) e Silveira (2004) reportam-se ao termo precisão como sendo o grau de consistência dos valores medidos repetidamente sob mesmas condições experimentais em torno do valor médio observado, enquanto que acurácia refere-se à exatidão da medida, ou seja, o quão próximo o valor medido está do seu parâmetro. A figura 9 expressa uma

adaptação do clássico tiro ao alvo em conjunto com um gráfico de distribuição de probabilidade utilizado por Mikhail e Ackermann (1976) apud Monico et al., (2009) como indicador de precisão e acurácia.

Figura 9 - Ilustração da definição de acurácia e precisão



Fonte: Adaptado de Mikhail e Ackermann (1976).

A precisão é afetada somente pelos erros aleatórios ou randômicos, de ocorrência imprevista no processo de medição, enquanto a acurácia é afetada por erros aleatórios e sistemáticos ou tendências (bias), causados por fontes conhecidas e que podem ser compensados ou eliminados.

### 3.6 Avaliação do PEC para cartografia digital

Segundo Lopez (2002), o controle de qualidade posicional é um procedimento indispensável na produção cartográfica. Antunes e Lingnau (1997) apud (DALMOLIN, 2001), afirmam que para um mapeamento ser utilizado como fonte fidedigna de informações necessita ser associado a processos de avaliação da acurácia. Atualmente, mesmo com tanta inovação tecnológica na área de geolocalização, o que se pratica no Brasil em termo de controle de qualidade de produtos cartográficos e que está vigente em lei (Decreto Lei nº 89.817/1984), é o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), para a avaliação e classificação da acurácia posicional, sendo que em 2011 foi publicado pela DSG (Diretoria de Serviços Geográficos do Exército Brasileiro) a 2ª edição de especificações técnicas para a aquisição de

dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV), documento este ligado a INDE (Infra-Estrutura Nacional de Dados Espaciais). Em suma a ET-ADGV cria uma classificação mais restritiva, o PEC-PCD, que estabelece os critérios necessários para que um produto digital possa ser aceito como referência no Sistema Cartográfico Nacional (SCN).

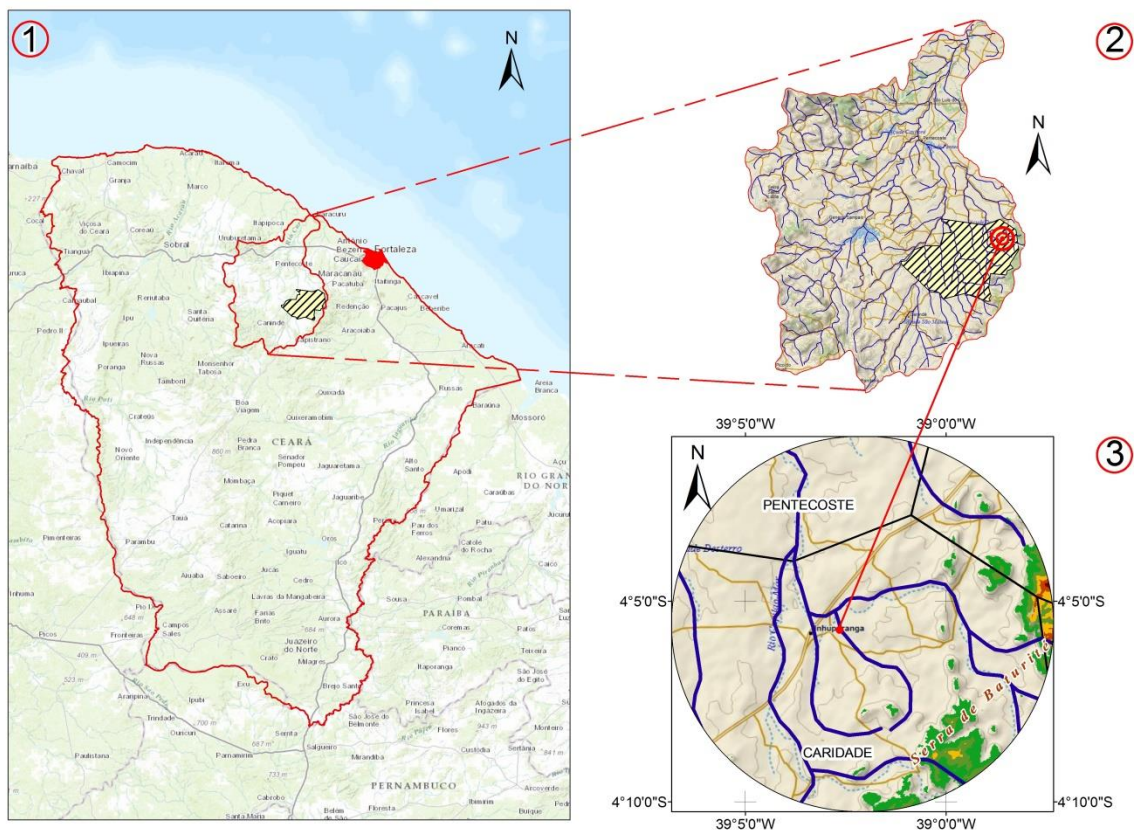
Todavia o PEC-PCD ainda deixa muito a desejar pela falta de normas claras para a avaliação da acurácia, Santos (2010) destaca que apesar da modernização do Decreto nº 89.817/84, o mesmo ainda não especifica metodologias para a escolha das amostras ou para se determinar o tipo de amostras a serem coletados em campo, não define um tratamento estatístico que melhor se adapta à estimativa da exatidão e precisão; não informa a quantidade de pontos de apoio a serem coletados em campo para os testes estatísticos bem como a adoção dos elementos de qualidade dos dados na forma de metadados. A falta da normatização destas informações deixa espaço para diversas interpretações e aplicações de diferentes testes estatísticos para o enquadramento do PEC-PCD, como as análises que foram usadas em Galo & Camargo (1994), Paradella et al. (2005), Santos & Vieira (2009), Barros et al. (2011) apud Silva (2015). O resultado é um ambiente heterogêneo, onde cada organização tem sua maneira de tratar a informação espacial, que podem ser mais rigorosa ou não.

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área experimental

A área de estudo da referida pesquisa esta hidrograficamente situada na Bacia do Curu no município de Caridade (Figura 10), trata-se da parede do açude Alto Alegre construído ainda pelo antigo Inspetoria Federal de Obras Contra as Secas (IFOCS), atualmente Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS), por meio do programa de açudagem pública, entre os anos de 1920 e 1921. É um barramento artificial do riacho Julião e do riacho dos Pebas, que na concepção do projeto tem uma altura de 9,2 metros com uma capacidade para armazenar 629.000 m<sup>3</sup> de água (DNOCS, 2015). O relevo local é suavemente plano com mudança abrupta entre a planície sertaneja e o maciço de Baturité.

Figura 10 - Localização da área de estudo, (1) Estado do Ceará, (2) Bacia do Curu, destacando o município de caridade e (3) localização do açude Alto Alegre.



Fonte: Elaborado pelo autor

## 4.2 Metodologias de levantamento e equipamentos utilizados

Os levantamentos topográficos da área em estudo foram realizados simultaneamente no dia 6 de janeiro de 2016, nos quais foram utilizados os seguintes aparelhos:

- a) Um par de receptores GNSS Trimble R4 com 220 canais paralelos e tecnologia Trimble R-Track para rastreamento dos sinais GPS L1/CA, L2 e L2C com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA e L2 com um rádio base UHF TRIMBLE TDL 450H, com 14 canais selecionáveis e alcance que varia de 10 a 20 km;
- b) Um receptor GNSS Trimble R6 com 72 canais e rastreamento dos sinais GPS código L1/CA e L1/L2 com suporte para WASS e EGNOS, GLONASS L1/CA/P e L2/P;
- c) Uma estação total Topcon GTS 102N com um alcance de até 2000 m e precisão linear de 2 mm + 2ppm.

Com estes equipamentos foi feito a cubagem da parede do açude Alto Alegre por meio de quatro metodologias distintas: na primeira, utilizando o receptor GNSS Trimble R6 em modo: (1) *Stop and Go*, com tempo de ocupação de 10 segundos; (2) utilizando o receptor GNSS Trimble R4, em modo cinemático com correção em tempo real (RTK); (3) utilizando o mesmo receptor R6 em modo cinemático pós-processado com uma taxa de coleta de um ponto a cada cinco segundos; e (4) utilizando topografia clássica utilizando uma estação total Topcon GTS 102N, buscando durante o levantamento manter padronizada as linhas de trajetória ao longo da parede com espaçamento médio de 5 metros. De forma paralela aos levantamentos para cubagem, foram rastreados 15 pontos de referência de forma aleatória ao longo da parede, utilizando o receptor GNSS Trimble R4 pelo método de levantamento por posicionamento relativo estático-rápido com um tempo de rastreio de 5 minutos (Figura 11), sendo estes pontos utilizados para realizar a avaliação da acurácia dos MDT's resultantes do processamento nas quatro metodologias ponderadas neste trabalho.

Todos os levantamentos foram georreferenciados com base em uma estação de referência localizada a 60 metros do início da parede do açude, materializada por um marco de concreto de 15 cm acima do solo (Figura 11), que teve suas coordenadas e altitude ortométrica unívoca definida pelo método de posicionamento relativo estático, com 6 horas de rastreio, pós-processada pelo serviço on-line IBGE-PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), o que forneceu níveis de confiabilidade de 95%, precisão horizontal de 0,003 m e 0,006 m vertical. Pesquisas como a de Perdigão (2010) e IBGE (2013) comprovam que levantamentos



realizados com receptores L1 e L2, em tempo de rastreamento acima de 2 horas e pós-processados utilizando o IBGE-PPP, proporcionam precisão planialtimétrica abaixo de 50 cm, atingindo após 6 horas de rastreamento precisão menor que 0,02 m, podendo facilmente alcançar precisões milimétricas.

Figura 11 - Área experimental em diferentes panoramas, (1) Estação de referência para georreferenciamento dos levantamentos; (2) rastreamento de um dos 15 pontos de referência (3) vista panorâmica da parede do açude Julião.



Fonte: Elaborada pelo autor

No levantamento realizado com a estação total foi necessária a instalação do equipamento em apenas uma estação de trabalho, A partir daí foram irradiados um total de 298 pontos, em 2 horas e 30 minutos de trabalho, com 2 profissionais (01 topógrafo e 01 auxiliar). Nos trabalhos feitos com os receptores GNSS Trimble R4 e R6, foi necessário o mesmo número de profissionais para realizar cada levantamento, variando apenas o número de pontos coletados e o tempo necessário para a conclusão segundo cada metodologia de posicionamento adotada (Tabela 3).

No tocante a gastos despendido para realizar um levantamento segundo cada metodologia, atualmente, o preço médio da diária cobrado pelas empresas de locação de

aparelhos topográficos, em Fortaleza, para a Estação Total do modelo utilizado é de R\$ 60,00, enquanto que a diária paga por um receptor GNSS com link de radio e configurações semelhantes ao R4 utilizado no experimento é de R\$ 450,00, e para um receptor GNSS sem comunicação via rádio é de R\$ 250,00. Já os topógrafos e os auxiliares, que atuam na região, tem cobrado uma faixa de R\$ 200,00 e R\$ 100,00 a diária, respectivamente (Tabela 4), sendo que pelo fato do serviço ter desprendido menos de um dia para ser realizado em todas as formas de levantamento, foi feito então uma projeção do rendimento diário para este tipo de serviço utilizando cada uma destas metodologias de levantamento. Nos custos envolvendo deslocamento, alimentação e hospedagem foram considerados custos fixos e por isto não foram computados na planilha de gastos.

Tabela 3 - Comparação do levantamento topográfico realizado com estação total e receptor GNSS em diferentes métodos de posicionamento.

<b>Quantitativos Técnicos</b>	<b>Métodos de levantamento</b>			
	<i>Stop and Go</i> (Trimble R6- PP)	Cinemático (Trimble R6- PP)	Cinemático (Trimble R4- RTK)	Topografia clássica (Topcon GTS 102N)
Nº de pontos topográficos levantados em campo	294	908	406	298
Nº de profissionais	2	2	2	2
Tempo de levantamento em campo	2 horas e 20 minutos	45 minutos	2 horas e 10 minutos	2 horas e 30 minutos
Valor da diária de Aluguel dos equipamentos	R\$ 250	R\$ 250	R\$ 450	R\$ 60
Valor do topógrafo (no levantamento)	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00	R\$ 200,00
Valor do Auxiliar (no levantamento)	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00	R\$ 100,00
Custo total	R\$ 550,00	R\$ 550,00	R\$ 750,00	R\$ 360,00

Fonte: Elaborada pelo autor



Para pós-processamento dos dados obtidos pelos receptores GNSS foi usado o software Trimble Business Center Survey Advanced, onde foram feitas as correções da coordenada rastreada na estação de referência e o processamento das linhas de base gerando os vetores posição de cada ponto do levantamento. Para isto foi utilizado uma tolerância vertical de até 10 cm e uma horizontal de 5 cm como critério de aceitação para a fixação dos pontos.

### 4.3. Cálculos de volume dos Modelos Digitais do Terreno

De posse das nuvens de pontos levantadas em campo por cada um dos métodos avaliados, foi criado, individualmente, no *software* ArcGIS, MDT's por triangulação de *Delaunay*, com estrutura de malha irregular, também conhecido como *Triangular Irregular Network* (TIN). Nesta estrutura, os pontos cotados na superfície da parede correspondem aos nós da malha do tipo vetorial, que representa a superfície por meio de um conjunto de faces triangulares interligadas Silva, (2015). A partir do MDT, gerado para cada metodologia de levantamento, criou-se um polígono base com área comum a todos os modelos, que serviu como molde para o corte das superfícies deixando-as com a mesma área plana, o que possibilitou a comparação do volume obtido pelos quatro métodos avaliados e também calculado no *software* ArcGIS. Segundo Júnior (2011), para a cubagem do volume sobre uma dada superfície precisa-se confrontar o MDT gerado a partir de pontos cotados sobre a pilha com o modelo digital da superfície original do terreno, sendo que na indisponibilidade de tal informação foi considerado o fato de que a parede está disposta ao longo de uma vertente gerada pela interpolação dos pontos de perímetro cotado segundo cada modelo. Neste contexto, o cálculo de volume da parede é representado conforme a Equação 1.

$$V_p = MDT_p - MDT_v \quad (1)$$

Onde:

$V_p$  = Volume da parede

$MDT_p$  = MDT da parede

$MDT_v$  = MDT da vertente

#### 4.4. Acurácia e precisão dos Modelos Digitais do Terreno

Na avaliação da acurácia altimétrica dos quatro métodos de levantamento, foi realizada a distinção entre os efeitos sistemáticos e aleatórios dos erros nas medições, classificando os resultados conforme limites estabelecidos pelo PEC-PCD, com todos parâmetros adotados conforme tolerâncias estabelecidas pela DSG (2011), na Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), de modo que o modelo é considerado acurado quando estatisticamente preciso e livre de tendências, para uma determinada escala.

Inicialmente foi realizada uma análise descritiva dos dados como cálculos de médias (Equação 2) e desvio padrão (Equação 3), a partir das discrepâncias entre as coordenadas observadas no produto avaliado e suas homólogas coletadas em campo como referência.

$$\overline{\Delta z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta z_i \quad (2)$$

$$S_{\Delta z} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta z_i - \overline{\Delta z})^2} \quad (3)$$

Onde:

$n$  = número pontos amostrados

$\Delta z_i$  = discrepância entre a altimetria observada no produto avaliado e nos pontos de referência

Em seguida foi realizada análise de tendência para avaliação da acurácia altimétrica utilizando o método proposto por Galo (1994) de teste de hipótese baseada na distribuição t de *Student*, para avaliar se os erros sistemáticos exercem uma influência significativa sobre os dados obtidos. Nesta análise são avaliadas as hipóteses:  $H_0: \overline{\Delta z} = 0$ , contra,  $H_1: \overline{\Delta z} \neq 0$ . Para este teste, o valor calculado da estatística amostral  $t_z$  (Equação 4) deve ser inferior ao valor tabelado  $t_{n-1, \alpha/2}$ , dentro do intervalo de confiança de 90% (Equação 5).

$$t_z = \frac{\overline{\Delta z}}{S_{\Delta z}} \sqrt{n} \quad (4)$$

$$|t_z| < t_{n-1, \alpha/2} \quad (5)$$

A precisão altimétrica, foi realizada utilizando o teste Qui-quadrado, obedecendo aos valores do Erro Padrão (EP) estabelecidos na Tabela 4. Onde inicialmente é calculado o erro padrão esperado para a altimetria de cada modelo conforme a (Equação 6), Em seguida, aplica-se um teste de hipótese, comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o erro padrão esperado para a classe a qual se deseja testar  $H_0: S_{\Delta z}^2 = \sigma_z^2$ , contra,  $H_1: S_{\Delta z}^2 > \sigma_z^2$ . Para atender a precisão de uma determinada classe do PEC-PCD, o valor do teste Qui-quadrado calculado  $\chi_x^2$  (Equação 7) deve ser inferior ao Qui-quadrado tabelado  $\chi_{n-1, \alpha}^2$ , dentro do intervalo de confiança de 90 %, permitindo definir a classe PEC-PCD do produto (Equação 8).

$$\sigma_z = EP_z \times \text{Eq. Curvas de Nível} \quad (6)$$

Onde:

$EP_z$  = Erro Padrão descrito na norma.

Eq. Curvas de Nível = Equidistância das curvas de nível obtida para o MDT

$$\chi_x^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta z}^2}{\sigma_z^2} \quad (7)$$

$$\chi_x^2 \leq \chi_{n-1, \alpha}^2 \quad (8)$$

Tabela 4 - Tolerâncias utilizadas para avaliação da acurácia conforme PEC-PCD e PEC.

Classe PEC	Classe PEC-PCD	Planimétricas		Altimétrica	
		PEC (mm)	EP (mm)	PEC (mm)	EP (mm)
-	A	0,28	0,17	0,27	0,17
A	B	0,5	0,3	0,50	0,33
B	C	0,8	0,5	0,60	0,40
C	D	1,0	0,6	0,75	0,50

Fonte: Silva (2015)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. Processamento dos dados

A partir dos pontos levantados, para cada metodologia utilizada, foi gerado um MDT (Figura 12), com uma densidade de pontos proporcional à taxa de aquisição do método de levantamento, sendo que o número de pontos coletados em um levantamento é diretamente proporcional à quantidade de arestas triangulares de representação do TIN (Tabela 5), que não necessariamente está relacionado com a qualidade representativa do modelo, uma vez que além da quantidade, este atributo também depende da distribuição e comprimento das faces triangulares ao longo da superfície.

Tabela 5- Nuvem de pontos e TIN gerados, utilizando os diferentes métodos de levantamento.

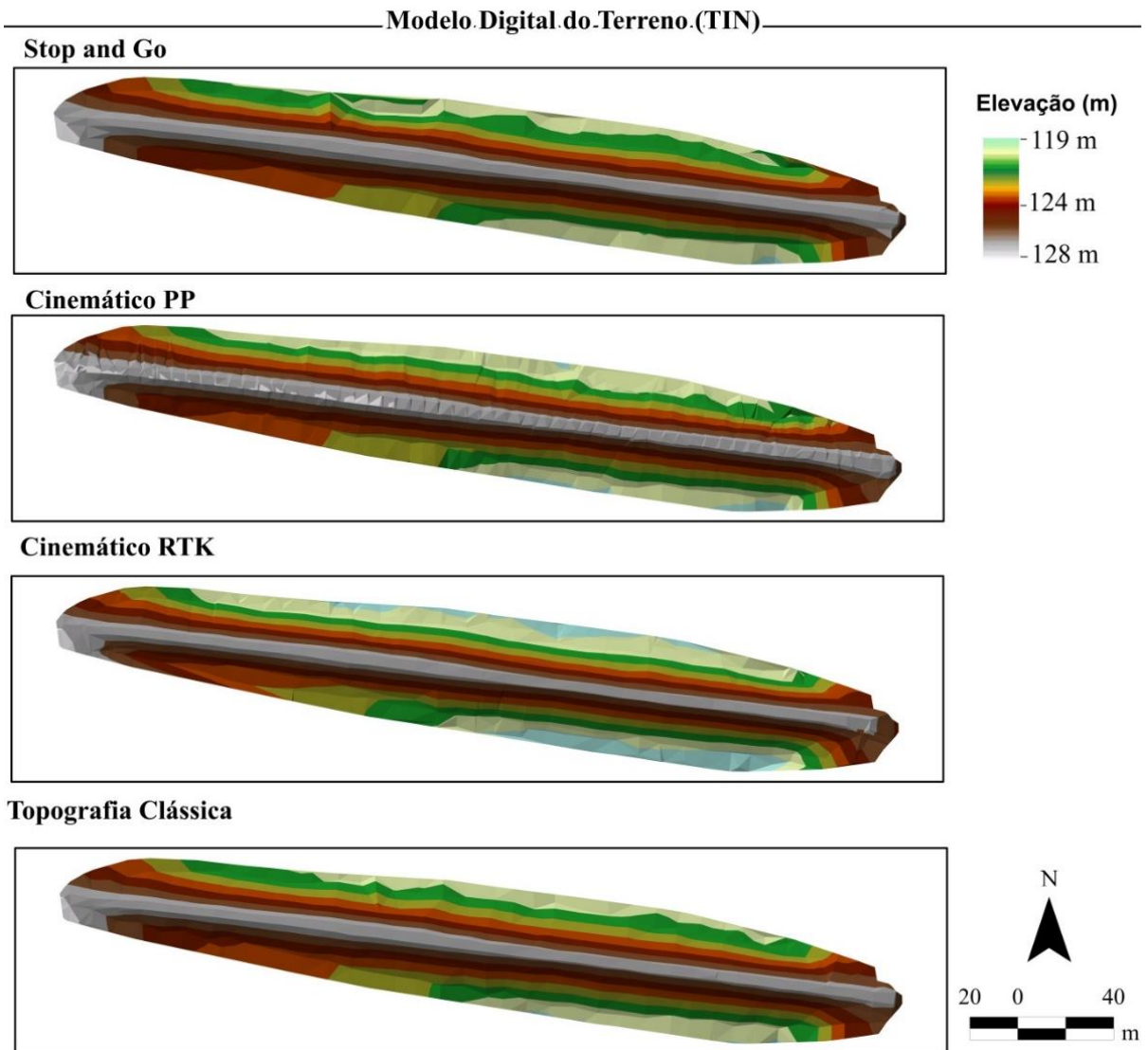
	<i>Stop and Go</i> (Trimble R6-PP)	Cinemático (Trimble R6-PP)	Cinemático (Trimble R4- RTK)	Topografia clássica (Topcon GTS 102N)
Nuvem de pontos	396	1110	525	419
Densidade dos pontos (pontos/m <sup>2</sup> )	0,016	0,05	0,02	0,014
Número de faces dos triângulos (TIN)	633	1884	880	634

Fonte: Elaborada pelo autor

Neste contexto, o levantamento em modo cinemático foi o que gerou a maior densidade de pontos, com uma densidade média de 0,05 pontos/m<sup>2</sup>, porém com uma maior concentração em locais de mais difícil mobilidade, ou em locais em que era mais fácil manter constante a velocidade de deslocamento, possibilitando a formação de uma malha mais regular, chegando a uma faixa de 0,25 a 6 pontos/m<sup>2</sup>. Já o levantamento feito por topografia clássica e pelo método *Stop and Go* resultaram em uma densidade de pontos semelhante, de aproximadamente 0,015 pontos/m<sup>2</sup>, uma vez que a taxa de coleta não é constante com o tempo, e o trabalho exige mais do operador, tendo em vista que no método *Stop and Go*, tem-se um período de rastreamento no ponto de coleta e na topografia clássica exige que o topógrafo esteja atento para proceder com as visadas no prisma a cada novo ponto levantado,

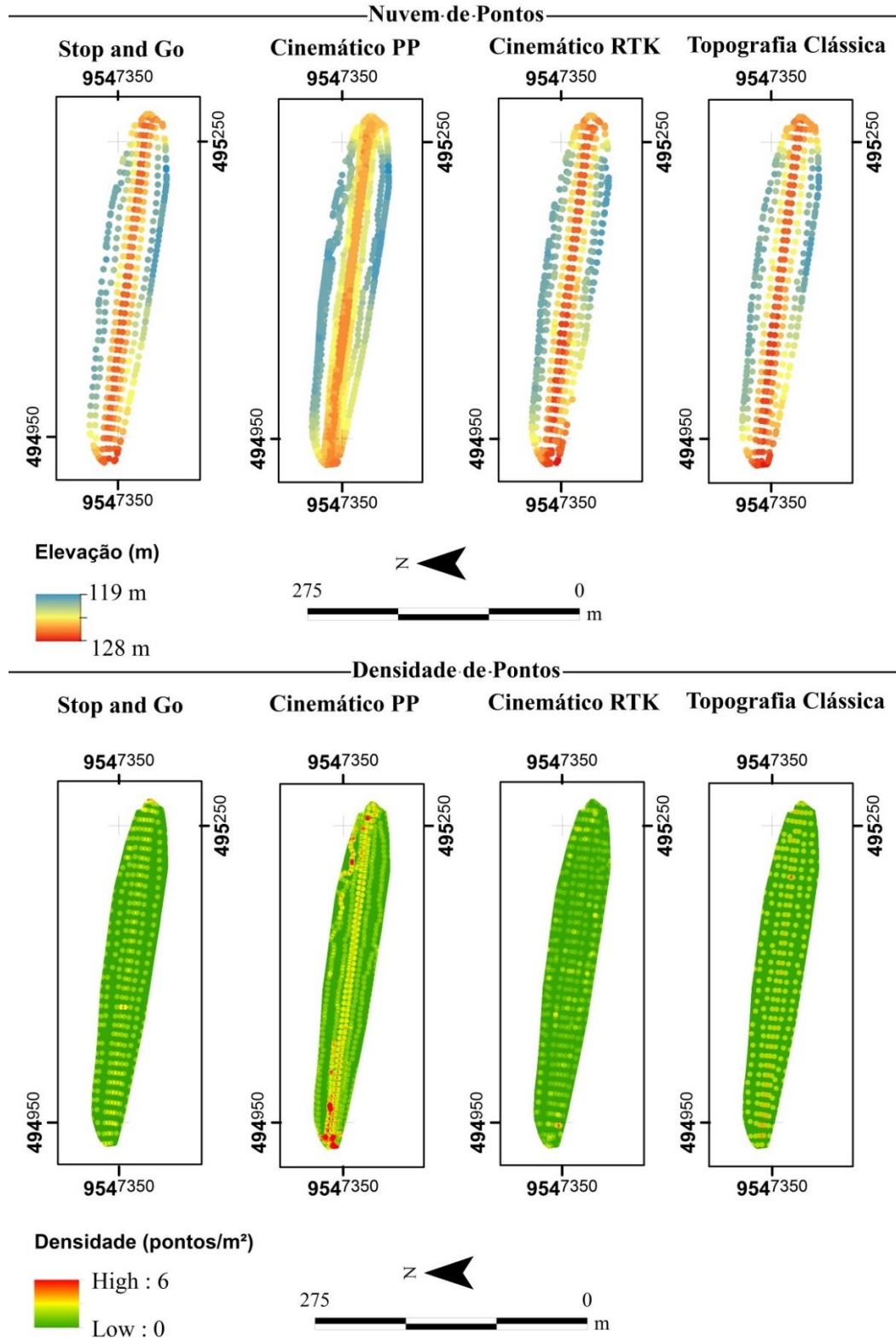
diferentemente do levantamento em RTK, cuja a coleta é obtida por meio de um comando com processamento do ponto em tempo real, o que viabiliza o levantamento com uma maior taxa de dados, alcançando uma densidade de 0,02 pontos/m<sup>2</sup>, e a maior uniformidade de distribuição, entre os quatro métodos (Figura 13).

Figura 12 - Modelo Digital do Terreno em malha triangular (TIN) para cada metodologia de levantamento.



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 13 - Representação da densidade e da nuvem de pontos obtidas pelos diferentes métodos de levantamento.



Fonte: Elaborada pelo autor

## 5.2. Estatística descritiva dos modelos

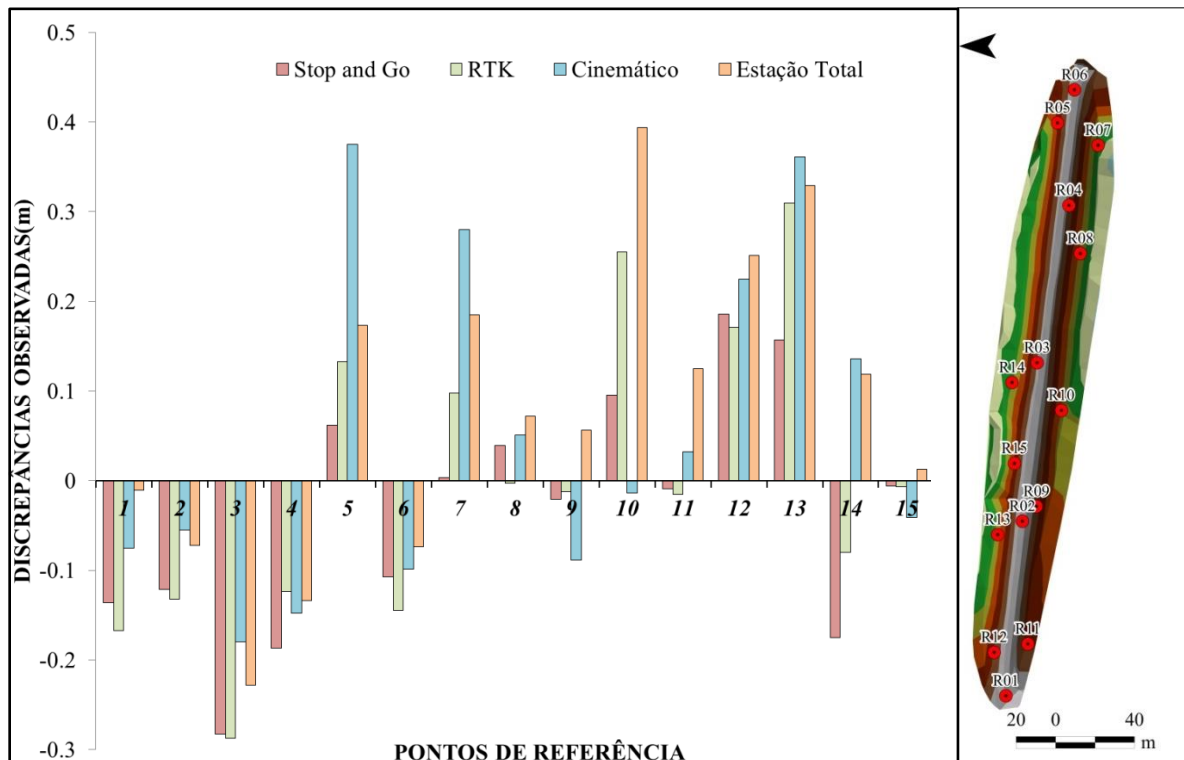
A partir dos resultados obtidos nos cálculos de tendência central e desvio de média altimétricos dos quatro MDT's em relação aos pontos de referência distribuídos na área (Tabela 6) pode-se inferir que todos estão dentro da classe A, conforme as disposições do Decreto-lei 89.817/84 e segundo a análise estatística utilizando a porcentagem da amostra e o desvio padrão (BARROS, 2011), utilizando o desvio padrão da amostra (SANTOS, 2009) ou utilizando critérios de erro linear (PARADELLA, 2005). Todavia, estas análises não fazem distinção entre erros sistemáticos e erros aleatórios, classificando o modelo segundo a discrepância média entre as coordenadas da modelagem realizada e suas homólogas nos pontos de referência (Figura 14)

Tabela 6 - Estatística das discrepâncias

MDT		Nº pontos de Referência	Média (m)	Desvio Padrão (m)	RMSE (m)	LE90 (m)
<i>Stop and Go</i>	$\Delta z$	15	-0,0335	0,1330	0,1374	0,2261
RTK	$\Delta z$	15	-0,0003	0,1666	0,1666	0,2740
Cinemático	$\Delta z$	15	0,0506	0,1825	0,1899	0,3123
Estação Total	$\Delta z$	15	0,0799	0,1720	0,1908	0,3138

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 14 - Gráfico das discrepâncias altimétricas em relação aos pontos de referência



### 5.3. Avaliação da precisão e da acurácia dos modelos

Na análise de tendência (Tabela 7) verificou-se que o  $t$  amostral calculado para a altimetria do MDT gerado pelo método de topografia clássica (Equação 4), não estava dentro da margem de aceitação considerando um nível de confiança  $(1 - \alpha)$  igual a 90% ( $\alpha = 0,10$ ), que neste estudo de caso, considerando os 15 pontos de referência utilizados na análise obtém-se o valor limite de  $t_{10\%}$  igual a 1,345, neste contexto, foi possível observar a existência de tendência, indicando a presença de erros sistemáticos significativos embutimos nos valores das medições da altimetria.

Tabela 7 - Valores para a análise de tendência

MDT	$ t_z $	$ t_{calc} $	$t_{10\%(14)}$	Resultado
Stop and Go	$ t_z $	0,9766	1,345	Não existe tendência
RTK	$ t_z $	0,0077		Não existe tendência
Cinemático	$ t_z $	1,0739		Não existe tendência
Estação Total	$ t_z $	1,7989		Existe tendência

Fonte: Elaborada pelo autor



Referente à precisão, os MDT's gerados por dados obtidos a partir dos levantamentos geodésico em modo *Stop and Go*, RTK e cinemático foram todos compatíveis com a classe A do PEC-PCD para equidistância vertical de 0,64 m, 0,80 m e 0,88 m respectivamente. Já o levantamento feito por topografia clássica, realizado com a estação total, não obteve classificação uma vez que não foi considerada livre de tendência. Porém sua precisão para equidistância vertical foi de 0,83 m. Para tanto, foi considerando o erro padrão esperado ( $\sigma$ ) de 1/6 da equidistância vertical avaliada, limite tabelado de  $\chi^2$  de 21,064 considerando uma amostra (n) de tamanho 15, nível de significância de 10% e 14 graus de liberdade (Tabela 8). Apesar de apresentar tendência, a precisão do levantamento por topografia clássica foi tão boa quanto a do levantamento por GNSS em modo cinemático PP, o que indica que para o cálculo do volume estes erros podem não ser tão significativos no resultado final, uma vez que quando analisado por outras metodologias, como as de inferência descritiva, o MDT gerado pelo levantamento feito com a estação pode facilmente ser enquadrada na classificação do PEC-PCD, ou então, caso fossem mensurados os erros sistemáticos (bias) estes poderiam ser retirados do levantamento.

Tabela 8 - Valores para a análise de precisão

MDT	Variância esperada ( $\sigma$ )		$\chi^2$ Calculado		$\chi^2_{10\% (14)}$	Classe PEC-PCD
	$\sigma_z$		$\chi_z^2$			
<i>Stop and Go</i>	$\sigma_z$	0,109	$\chi_z^2$	20,917	21,064	Classe A Equidistância vertical 0,64 m
RTK	$\sigma_z$	0,136	$\chi_z^2$	21,008		Classe A Equidistância vertical 0,80 m
Cinemático	$\sigma_z$	0,150	$\chi_z^2$	20,833		Classe A Equidistância vertical 0,88 m
Estação Total	$\sigma_z$	0,141	$\chi_z^2$	20,792		Sem Classificação Equidistância vertical 0,83 m

Fonte: Elaborada pelo autor

#### 5.4. Cálculo de Volume

Os resultados para o volume segundo as metodologias adotadas neste estudo de caso (tabela 9) mostrou que a acurácia do MDT é inversamente proporcional ao volume calculado. Este fato pode ser parcialmente explicado mediante a simplificação mais grosseira da superfície por métodos menos acurado, fazendo com que sejam cubadas áreas inexistentes

na superfície do material. Contudo vale ressaltar com base em relatos práticos que um dos motivos da tendência à superestimação e não a subestimação do volume refere-se a localização dos pontos notáveis coletados no levantamento estarem em áreas mais elevadas da paisagem, mais facilmente observados pelo topógrafo, o que resulta em cubagem de áreas entre amontoados.

A diferença entre o volume calculado a partir do MDT gerado pelo levantamento usando o modo *Stop and Go* (melhor resultado na avaliação de acurácia) e o modelo gerado pelo receptor GNSS em modo cinemático (pior resultado na avaliação de acurácia), foi de 1.783,94 m<sup>3</sup>, o equivalente a uma diferença de 5.36 %. Quando comparamos o volume do modelo gerado pelo levantamento usando o modo *Stop and Go* com o modelo obtido a partir dos dados coletados por topografia clássica e com o receptor GNSS em modo cinemático com correção em tempo real (RTK), esta diferença cai para 774.97 m<sup>3</sup> (2,4 %) e 623.34 m<sup>3</sup> (1.9 %) respectivamente.

Tabela 9 - Volume calculado na pilha segundo cada metodologia adotada

MDT	Volume (m <sup>3</sup> )
<i>Stop and Go</i>	31.509,79158
RTK	30.886,4437
Cinemático	33.293,73299
Estação Total	32.284,76091

Fonte: Elaborada pelo autor

Os resultados obtidos no experimento não levaram em consideração a inter-relação entre os planos cartográficos utilizados por referência no receptor GNSS e o plano topográfico que é utilizado na estação total, uma vez que a parede do açude Alto Alegre, objeto de estudo deste experimento, apresenta uma extensão de cerca de 300 metros, onde discrepâncias entre estes referenciais são irrisórias para o objetivo principal que é o cálculo de volume. Porém estes resultados não podem ser generalizadas para obra de maiores extensões como construções de estrada, linha de transmissão, etc., onde esta inter conversão torna-se fundamental.

A estação total mesmo apresentando tendência teve melhores resultados na análise de precisão altimétrica do que o levantamento em modo cinemático, sendo que esta tendência não foi tão preponderante no resultado final do volume, para este estudo de caso, acarretando uma diferença de apenas 2,4 % em relação ao método de levantamento mais preciso, em

modo *Stop and Go*. E uma vez utilizado outros métodos estatísticos indicado por autores como Barros (2011), Santos (2009) e Paradella (2005) o levantamento por topografia clássica se enquadrava na classe A do PEC do Decreto Lei nº 89.817/1984. O fato do MDT gerado pela estação não obter classificação para o PEC-PCD segundo o método proposto por Galo (1994), pode ser em virtude de erros sistemáticos ocasionados pelo deslocamento horizontal sofrido por este modelo.

Os resultados obtidos com este experimento não especifica a acurácia dos métodos de levantamento, mas do estudo de caso realizado com cada um destes métodos, onde os pontos altimétricos avaliados foram obtidos a partir da interpolação dos pontos de levantamento coletados em campo.

## 6. CONCLUSÕES

O nível de acurácia altimétrica alcançado pelo método *Stop and Go* e RTK possibilita sua utilização em diversas aplicações práticas que exijam coordenadas precisas pós-processadas ou em tempo real. Porém para levantamentos desse caráter onde geralmente as precisões exigidas encontram-se aquém das atingidas por esses métodos, eles não se tornam os mais indicados, devido à alta relação custo/benefício, sendo melhor o uso de levantamentos mais baratos e rápidos como é o caso do levantamento em modo cinemático pós-processado, tendo em vista que uma diferença de 5% para este material não é tão expressiva e o tempo gasto na execução deste levantamento com o método cinemático pós-processado foi de aproximadamente 1/3 do tempo utilizando nos demais métodos de levantamento.

Os métodos de posicionamento dependem, ainda diretamente, de alguns fatores como a distância de base (distância entre o receptor base e o *rover*) e a extensão da área levantada, que no caso da utilização de topografia clássica em áreas de grande extensão, deve-se realizar a correção do plano de referência topográfica para o plano cartográfico UTM. Assim posto recomenda-se para trabalhos futuros que estas avaliações sejam realizadas com distâncias de base maiores bem como em áreas de maior extensão.

Pelo fato deste trabalho ter sido realizado em uma parede de açude, onde a topografia é mais regular com topo plano e taludes acentuados, os resultados podem se mostrar característicos a este relevo mais regular, portanto recomenda-se para trabalhos futuros estas avaliações em áreas de topografia mais irregular.

No experimento foram usados 15 pontos de referência para a análise de discrepância com cada um dos modelos. Porém esse valor foi estimado com base em outros trabalhos desta natureza, já desenvolvidos, pelo fato de não possuir nenhuma metodologia que relate como se obter tal resultado a partir de levantamentos topográficos diretos, muito menos possui alguma especificação ou padrão dentro do PEC-PCD para procedimentos de amostragem, de maneira que instiga-se para pesquisas futuras a definição do número de amostragens para pontos de controle segundo condições de levantamento.

## 7. REFERÊNCIAS

ABREU, M. R. B. S. Mapeamento dos parâmetros florísticos e estruturais de floresta de mangue com dados LiDAR e SRTM. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós Graduação em Geologia Química, Universidade Federal do Pará. Belém, 2014.

ARANA, J.M.; ISHIKAWA, M.I.; MONICO, J.F.G. **Influência do tempo de rastreo e PDOP na coleta de dados GPS.** In: Seminário de Impacto das Novas Tecnologias na Engenharia Cartográfica / ENGENHARIA CARTOGRÁFICA, 20., FCT/UNESP, 1997, Presidente Prudente. *Anais...Presidente Prudente*: UNESP, 1997. v.1. p.109-114.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) - NBR 13.133. Execução de levantamento topográfico. Rio de Janeiro, 1994. 35p.

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; MENDEL, G. C.; SANTOS, R. H. L.; RABACO, L. M. L. **Avaliação planialtimétrica de um par estereoscópico Cartosat1: Estudo de caso em São Sebastião, SP.** In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2011, Curitiba. *Anais... Curitiba*: INPE, 2011. p. 2460-2467.

BORGES, G. M. **Introdução ao Sistema de Posicionamento Global GPS.** Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2015. 44 p. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/introducao-ao-sistema-de-posicionamento-global-gps.html>>. Acesso em: 25 dez. 2015.

CHINA SATELLITE NAVIGATION SYSTEM COMMITTEE. **Beidou System Introduction.** 2015. Disponível em: <<http://en.beidou.gov.cn/introduction.html>>. Acesso em: 30 dez. 2015.

CORRÊA, D. C.; MARINHO, D. P.; FERREIRA DA SILVA, L. F. C. **GPS como Ferramenta para SIG.** In: 19º Congresso Brasileiro de Cartografia, 1999, Recife. CD ROM - Comissão VII - Trabalho 20 - 6 p. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Cartografia, 1999.

DALMOLIN, Q.; LEAL, E. da M. **Análise da qualidade posicional em bases cartográficas geradas em CAD.** In: Boletim de Ciências Geodésicas, 1., 2001, Curitiba. Anais.... Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2001. v. 7, p. 21 - 40.

Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS). **Barragens construídas para o programa de açudagem pública.** 2015.

Disponível em: <[http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/acudes\\_publicos.htm](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/barragens/Barragem%20do%20Ceara/acudes_publicos.htm)>. Acesso em: 30 dez. 2015.

Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV). 2ª ed. versão 2.1.3, 2011.

EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Galileo: a Constellation of 30 Navigation Satellites.** 2015. Disponível em: <[http://www.esa.int/Our\\_Activities/Navigation/The\\_future\\_-\\_Galileo/Galileo\\_a\\_constellation\\_of\\_30\\_navigation\\_satellites](http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/Galileo_a_constellation_of_30_navigation_satellites)>. Acesso em: 30 dez. 2015.

FELGUEIRAS, C. A. **Modelagem Numérica de Terreno.** In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Orgs.) Introdução à Ciência da Geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2004. p. 7-1 - 7-36. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/cap7-mnt.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2016.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. **Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas.** In: **1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário.** Tomo II, p. 41-48, Florianópolis – Brasil, 1994

Government. Official.U.S. **Information about the Global Positioning System (GPS) and related topics.** 2015. Disponível em: <<http://www.gps.gov/systems/gps/space/>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

Guzzetti, F.; Reichenbach, P.; Cardinali, M.; Galli, M.; Ardizzone, F. **Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale.** *Geomorphology*, v.72, p.272-299, 2005.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. **GPS theory and practice**. 4. ed. Viena: Springer-verlag, 1997. 389 p.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Recomendações para Levantamento Relativo Estático – GPS**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2008. 20 p. Disponível em: <[http://www.inde.gov.br/images/inde/recom\\_gps\\_internet.pdf](http://www.inde.gov.br/images/inde/recom_gps_internet.pdf)>. Acesso em: 21 dez. 2015.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Manual do Usuário Aplicativo Online IBGE-PPP**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2013. 33 p. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodésia/ppp/manual\\_ppp.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodésia/ppp/manual_ppp.pdf)>. Acesso em: 21 dez. 2015.

Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). **Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais**. 2. ed. Comitês Regionais de Certificação: Incra, 2013. 86 p. Disponível em: <<http://www.incra.gov.br/estrutura-fundiaria/regularizacao-fundiaria/certificacao-de-imoveis-rurais/file/>>. Acesso em: 25 dez. 2015.

Kheir, R. B.; Wilson, J. P.; Deng, Y. X. **Use of terrain variables for mapping gully erosion susceptibility in Lebanon**. *Earth Surface Processes and Landforms*, v.32, p.1770-1782, 2007.

KRUEGER, C. P.; NADAL, C. A.; ZANETTI, M. A. Z. **Módulo II: Normas técnicas, geodésia e posicionamento por satélite**. 2. ed. Curitiba: Universidade Federal do Paraná: Departamento Editorial, 2004. 111 p. Disponível em: <<http://docslide.com.br/search/?q=Geodésia>>. Acesso em: 25 dez. 2015.

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology**. Boca Raton, Florida: Crc Press, 2005. 323 p.

LOPEZ, F, J, A. **Calidad en la Producción Cartográfica**. Madrid: Ra-ma, 2002. 424 p.

**MARQUES, H. A. PPP EM TEMPO REAL COM ESTIMATIVA DAS CORREÇÕES DOS RELÓGIOS DOS SATÉLITES NO CONTEXTO DE REDE GNSS.** 2012. 244 f.

Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Ciências Cartográficas, Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2012.

**MANO, A. Navegação por satélite – O essencial. Torres Vedras.** 2012. Disponível em: <[http://www.academia.edu/2150523/O\\_Essencial\\_sobre\\_Sistemas\\_de\\_Navagacao\\_Globa\\_l\\_por\\_Satelite\\_GNSS\\_](http://www.academia.edu/2150523/O_Essencial_sobre_Sistemas_de_Navagacao_Globa_l_por_Satelite_GNSS_)>. Acesso em: 25 dez. 2015.

**MARINO, T. B. GPS Sistema de Posicionamento por Satélites Artificiais.** Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), 2011. 56 p. (7). Aula 7 - GPS. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/lga/tiagomarino/>>. Acesso em: 31 dez. 2015.

**MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes.** Geoderma, v.142, p.285 -293, 2007

**MONICO, J. F. G. Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações.** 2. ed. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 476 p.

**MONICO, J. F. G. et al. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada.** Boletim de Ciências Geodésicas. Curitiba, v. 15, nº 3, p.469-483, jul-set, 2009.

**PARADELLA, W. R.; CECARELLI, I. C. F.; LUIZ, S.; OLIVEIRA, C. G.; OKIDA, R. Geração de carta topográfica com estéreo-pares fine do RADARSAT-1 e dados ETM+ LANDSAT 7 em ambiente de relevo montanhoso na região amazônica (Serra dos Carajás, Pará).** Revista Brasileira de Geociências. v. 35, p. 323-332. Rio Claro, 2005.

**PEREIRA, C. Q. Modelagem Numérica do Terreno (MNT) a partir de dados Levantados com receptores GPS e estação total em área urbana sujeita a processos erosivos costeiros.** 2007. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Cartográfica, Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2007.



PERDIGÃO, T.D; SANTOS, A.P. dos. **Avaliação da acurácia a partir de diferentes tempos de rastreo utilizando a solução PPP on-line do IBGE.** In: III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 2010, Recife. *Anais...Recife-PE*, 2010. v.1. p.001-007.

RIBEIRO J, S. **Determinação de volumes em atividades de mineração utilizando ferramentas do sensoriamento remoto.** 2011. 161 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2011.

RUSSIAN FEDERAL SPACE AGENCY. **Information-Analytical Centre GLONASS.** Disponível em: <<https://www.glonass-iac.ru/en/GLONASS/>>. Acesso em: 25 dez. 2015.

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. de L.; MINASNY, B.; MONTANARELLA, L.; OKOTH, P.; PALM, C.A.; SACHS, J.D.; SHEPHERD, K.D.; VÅGEN, T. -G.; VANLAUWE, B.; WALSH, M.G.; WINOWIECKI, L.A.; ZHANG, G.-L. **Digital soil map of the world.** *Science*, v.325, p.680 -681, 2009

SANTOS, A. P.; VIEIRA, C. A. O. **Avaliação do Padrão de Exatidão Cartográfico em imagens orbitais IKONOS e CBERS-2B, na bacia do Ribeirão São Bartolomeu em Viçosa-MG.** In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 2009, Natal. *Anais... Natal: INPE*, 2009. p. 1021-1030

SANTOS, A. L. S. **Monitoramento da morfologia Costeira em setores Gda bacia potiguar sob a influência da indústria petrolífera utilizando geodésia de precisão e laser escâner terrestre.** 2014. 150f. Tese (Doutorado em Ciência e Engenharia de Petróleo) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2014.

SANTOS, A. P. dos. **Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais com o uso da estatística espacial.** 2010. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Magister Scientiae, Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: Foundations, Methods and Applications**. Berlin-new York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SEGANTINE, P. C. L. **GPS-Sistema de Posicionamento Global**. Apostila didática da Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Transportes. 1999. 181 p.

SILVA, C. A. da. **Avaliação da Acurácia dos Ortomosaicos e Modelos Digitais do Terreno Gerados por Vant e sua Aplicação no Cálculo de Volume de Pilhas de Rejeito da Pedra Cariri**. 2015. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de dissertação para a obtenção do título de Mestre em Geologia, Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-ce, 2015. Cap. 5.

SILVA, S. T. da. **Análise comparativa entre equipamentos eletrônicos (GPS) para levantamento de dados topográficos**. 2002. 40 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Geoprocessamento, Departamento de Cartografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

SILVEIRA, A. C. da. **Avaliação de desempenho de aparelhos receptores GPS**. 2004. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

WOLF, P. R. **Surveying and mapping: history, current status and future projections**. Páginas 163 a 191 do livro *Perspectives in Civil Engineering: Commemorating the 150th Anniversary of the American Society of Civil Engineers*. Editado por American Society of Civil Engineers, 2003

ZHANG, P. et al. (2005). **Navigation with imu/gps/digital compass with unscented kalman filter**. In *Mechatronics and Automation, 2005 IEEE International Conference*, v 3, 1497 – 1502 p.