

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE APARELHOS
RECEPTORES GPS**

AUGUSTO CESAR DA SILVEIRA
Engº Agrimensor

CAMPINAS
JANEIRO DE 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO APARELHOS
RECEPTORES GPS**

Dissertação submetida à banca examinadora para
obtenção do título de Mestre em Engenharia
Agrícola na área de concentração em Máquinas
Agrícolas.

AUGUSTO CESAR DA SILVEIRA

ORIENTADOR: Prof. Dr. NELSON LUIS CAPPELLI

CAMPINAS
JANEIRO DE 2004

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si39a Silveira, Augusto Cesar da
 Avaliação de desempenho de aparelhos receptores
GPS / Augusto Cesar da Silveira. --Campinas, SP: [s.n.],
2004.

 Orientador: Nelson Luis Cappelli
 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

 1. Sistema de Posicionamento Global. 2.
Desempenho. I. Cappelli, Nelson Luis. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Evaluation of acting of GPS receivers

Palavras-chave em Inglês: Global positioning systems, GPS, Evaluation of
acting, Precision, Accuracy

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Giovanni Francisco Rabelo, Paulo Sérgio Graziano
Magalhães

Data da defesa: 20/02/2004

“Na paz, preparar-se para a guerra; na guerra, preparar-se para a paz. A arte da guerra é de importância vital para o Estado. É uma questão de vida ou morte, um caminho tanto para a segurança com para a ruína. Assim, em nenhuma circunstância deve ser descuidada...”

SUN TZU

*“Aos meus pais Sylvio Avelino da Silveira
e Silene Rodrigues da Silveira e Sophia
Silveira, minha filha.”*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho, e em especial:

- *A Deus, acima de tudo.*
- *A minha namorada Alessandra Fuster Santos pelo apoio incondicional ao longo desses anos;*
- *Ao meu Orientador Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli;*
- *Aos amigos da Pós-Graduação: Angel, Cláudio Umezu, Gilmar da Silva, pelo companheirismo e amizade;*
- *Aos funcionários da FEAGRI: Ana, Marta e Rosângela;*
- *A Mirian Tomazetto pelo incentivo;*
- *Aos colegas da ETEVAV: Diógenes, Walter, Wanderley, Facheris e Márcia pelo incentivo e amizade.*
- *Aos colegas da FEAP: Antônio Moacir Rodrigues Nogueira e Sônia pelo incentivo e amizade;*

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
RESUMO	1
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Geodésia	6
3.2 Sistema de posicionamento global NAVSTAR-GPS.....	11
3.3 Fontes de erros no posicionamento GPS	21
3.3.1 Erro do relógio.....	22
3.3.2 Ionosfera	22
3.3.3 Troposfera.....	23
3.3.4 DOP	23
3.3.5 Cut Off Angle.....	24
3.3.6 Multicaminhamento.....	24
3.3.7 Perda de ciclos.....	26
3.3.8 Antispoofing – A/S.....	27
3.3.9 Selective Availability – S/A	28
3.3.10 Centro de fase da antena.....	29
3.4 Sistemas de referência	29
3.5 Sistemas de coordenadas	30
3.6 Tipos de equipamentos GPS.....	37
3.6.1 Navegação	38
3.6.2 DGPS.....	38
3.6.3 Cadastrais	39
3.6.4 Topográficos.....	39
3.6.5 Geodésicos.....	39
3.7 Métodos de medição com GPS.....	40
3.7.1 Método estático	40
3.7.2 Método Rápido Estático	41
3.7.3 Método de Reocupação	42
3.7.4 Método “Stop and Go”	43
3.7.5 Método Cinemático	44
3.8 Erros em receptores GPS.....	45
3.8.1 Classes de erros	45
3.8.1.1 Erros grosseiros	46
3.8.1.2 Erros sistemáticos.....	46

3.8.1.3	Erros aleatórios.....	47
3.8.2	Precisão e acurácia.....	47
3.8.3	Acurácia absoluta e acurácia relativa	49
3.8.4	Erros unidimensionais	50
3.8.4.1	Erros lineares	50
3.8.4.2	Aplicação da função densidade de probabilidade aos erros aleatórios.....	51
3.8.4.3	Índices de precisão.....	55
3.8.5	Erros bidimensionais (elípticos e circulares).....	58
3.8.5.1	Erros elípticos.....	60
3.8.5.2	Erros circulares.....	61
3.8.6	Índices de precisão circular	62
3.8.6.1	Discussão sobre erros circulares.....	68
3.9	Agricultura de precisão.....	70
4.	MATERIAL E MÉTODOS.....	77
4.1	Material.....	77
4.1.1	Geo-referenciamento dos marcos	77
4.1.2	Receptores de sinal GPS avaliados.....	78
4.1.3	Aparelhos de recepção de sinal GPS utilizados como base.....	83
4.1.4	Computador e programas computacionais	85
4.2	Métodos	86
4.2.1	Local para a realização das avaliações	86
4.2.2	Geo-referenciamento dos marcos	90
4.2.3	Tomada de dados.....	93
4.2.3.1	Sem correção diferencial	93
4.2.3.2	Com correção diferencial.....	94
4.2.4	Processamento dos dados	95
4.2.4.1	Transferência para o computador.....	95
4.2.4.2	Transformação dos sistemas de coordenadas	96
4.2.4.3	Cálculo da coordenada média.....	96
4.2.4.4	Índices de acurácia.....	97
4.2.4.4.1	Erro radial de posicionamento.....	97
4.2.4.4.2	Erro absoluto de posicionamento	98
4.2.4.5	Índices de precisão circular	98
4.2.4.5.1	Erro circular padrão (σ_c)	99
4.2.4.5.2	Erro circular provável (CEP).....	100
4.2.4.5.3	Acurácia circular padrão de mapa (CMAS).....	100
4.2.4.5.4	Erro $3,5\sigma_c$	101
4.2.4.6	Análises estatísticas	101
4.2.4.6.1	Comparação de desempenho de cada um dos aparelhos operando com e sem correção diferencial.....	101
4.2.4.6.2	Comparação do desempenho dos aparelhos em um mesmo modo de operação	102
4.2.4.7	Índices de comparação.....	103
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	104
5.1	Marcos geo-referenciados.....	104

5.2	Desempenho sem correção diferencial	105
5.2.1	AgGPS 132 operando sem correção	106
5.2.1.1	Dados experimentais	106
5.2.1.2	Erros bidimensionais de posicionamento	107
5.2.2	eTrex operando sem correção	110
5.2.2.1	Dados experimentais	110
5.2.2.2	Erros bidimensionais de posicionamento	112
5.2.3	III Plus operando sem correção	114
5.2.3.1	Dados experimentais	114
5.2.3.2	Erros bidimensionais de posicionamento	116
5.2.4	ProMark2 operando sem antena e sem correção	118
5.2.4.1	Dados experimentais	118
5.2.4.2	Erros bidimensionais de posicionamento	120
5.2.5	ProMark2 operando com antena e sem correção	122
5.2.5.1	Dados experimentais	123
5.2.5.2	Erros bidimensionais de posicionamento	124
5.2.6	Comparação de desempenho sem correção diferencial	126
5.2.6.1	Comparação dos índices de desempenho	127
5.2.6.2	Análise de variância do erro radial de posicionamento	129
5.2.6.3	Comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento	129
5.3	Desempenho com correção diferencial	130
5.3.1	AgGPS 132	131
5.3.1.1	Dados experimentais	131
5.3.1.2	Erros bidimensionais de posicionamento	132
5.3.2	eTrex	135
5.3.2.1	Dados experimentais	135
5.3.2.2	Erros bidimensionais de posicionamento	137
5.3.3	III Plus	139
5.3.3.1	Dados experimentais	139
5.3.3.2	Erros bidimensionais de posicionamento	141
5.3.4	ProMark2	143
5.3.4.1	Dados experimentais	143
5.3.4.2	Erros bidimensionais de posicionamento	145
5.3.5	Comparação de desempenho com correção diferencial	147
5.3.5.1	Comparação dos índices de desempenho	148
5.3.5.2	Análise de variância do erro radial de posicionamento	149
5.3.5.3	Comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento	150
5.4	Comparação de desempenho dos aparelhos operando com e sem correção diferencial	151
5.5	Comparação geral de desempenho	152
5.6	Comparação dos custos	153
6.	CONCLUSÕES	159
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Superfícies consideradas na mensuração. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).	11
Figura 2 – Satélite do sistema NAVSTAR. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.htm	12
Figura 3 – Constelação GPS. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html	12
Figura 4 – Sinais GPS. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	13
Figura 5 – Estações de monitoramento do sistema NAVSTAR. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html	14
Figura 6 – Posicionamento absoluto. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	16
Figura 7 – Posicionamento relativo. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	16
Figura 8 – Posicionamento pela fase da portadora. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	17
Figura 9 – Sistema DGPS. Fonte: adaptado de BLITZKOW (1991).	19
Figura 10 – Simples diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	20
Figura 11 – Dupla de diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	20
Figura 12 – Tripla diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	21
Figura 13– DOP. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	24
Figura 14 – CUT OFF ANGLE. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	24
Figura 15 – Representação de Multicaminhamento. Fonte: adaptado de SEGANTINE (1995).	25
Figura 16 – Sistema de coordenadas Geográficas / Geodésicas .Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	32
Figura 17 – Sistema de coordenadas Cartesianas.Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001). ...	33
Figura 18 – Sistema de coordenadas Retangulares.Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001)..	34
Figura 19 – Sistema de coordenadas Plano Retangular na Agrimensura.Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).	35
Figura 20 – Sistema de coordenadas Plano retangular UTM. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).	36
Figura 21 – Sistema de coordenadas Polares.Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).	37

Figura 22 – Método Estático.Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	41
Figura 23 – Método Rápido Estático.Fonte: adaptado de ROCHA (2000).....	42
Figura 24 – Reocupação.Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	43
Figura 25 – Stop and Go.Fonte: adaptado de ROCHA (2000).....	44
Figura 26 – Cinemático.Fonte: adaptado de ROCHA (2000).	45
Figura 27 – Diferença entre precisão e acurácia.....	48
Figura 28 – Curva de densidade de probabilidade normal de valores observados.....	52
Figura 29 – Curva de densidade de probabilidade normal dos erros.....	54
Figura 30 – Distribuição linear normal.....	56
Figura 31 – Distribuição circular normal.	63
Figura 32 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo AgGPS 132, marca Trimble.	79
Figura 33 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo eTrex, marca Garmin.	80
Figura 34 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo III Plus, marca Garmin.	81
Figura 35 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo ProMark 2, marca Thales Navigation.	82
Figura 36 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo AG122, marca Trimble.....	84
Figura 37 – Marcação dos marcos para o geo-referenciamento.....	87
Figura 38 - Detalhe da identificação dos marcos geo-referenciados.....	87
Figura 39 – Disposição dos marcos geo-referenciados.	88
Figura 40 – Alocação das bases.....	88
Figura 41 – Alocação dos aparelhos sob análise nos marcos geo-referenciados.	89
Figura 42 – Instalação do equipamento Z-Xtreme no marco da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas.....	91
Figura 43 – Antena do equipamento Z-Xtreme instalada no marco da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas.....	91
Figura 44 – Equipamento de GPS Z-Xtreme.....	91
Figura 45 – Geo-referenciamento dos marcos.....	92
Figura 46 –Detalhe do de um dos marcos geo-referenciados.....	93
Figura 47 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.....	108

Figura 48 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.	109
Figura 49 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.	110
Figura 50 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando sem correção diferencial.	112
Figura 51 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.	113
Figura 52 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando sem correção diferencial.	114
Figura 53 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando sem correção diferencial.	116
Figura 54 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.	117
Figura 55 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando sem correção diferencial.	118
Figura 56 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.	120
Figura 57 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial.	121
Figura 58 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.	122
Figura 59 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial.	125
Figura 60 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial.	125
Figura 61 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial.	126
Figura 62 – Comparação do desempenho dos aparelhos testados sem correção diferencial.	128

Figura 63 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.	133
Figura 64 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.....	134
Figura 65 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.	135
Figura 66 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.	137
Figura 67 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.....	138
Figura 68 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.....	139
Figura 69 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.....	141
Figura 70 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.	142
Figura 71 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real. ...	143
Figura 72 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.....	145
Figura 73 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.	146
Figura 74 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.	147
Figura 75 – Comparação do desempenho dos aparelhos testados com correção diferencial. .	149
Figura 76 – Comparação do desempenho geral dos aparelhos.....	152
Figura 77 - Custo em função do erro absoluto para os aparelhos operando sem correção diferencial.	153

Figura 78 - Custo em função do erro absoluto para os aparelhos operando com correção diferencial.	154
Figura 79 - Custo em função do erro circular padrão para os aparelhos operando sem correção diferencial.	155
Figura 80 - Custo em função do erro circular padrão para os aparelhos operando com correção diferencial.	155
Figura 81 – Índice IEA para os aparelhos operando sem e com correção diferencial.	156
Figura 82 – Índice $I\sigma_c$ para os aparelhos operando sem e com correção diferencial.	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do Elipsóide WGS-84.....	30
Tabela 2 – Nível de probabilidade e cálculo dos índices de precisão circular.	69
Tabela 3 – Fatores de conversão de erros circulares.	70
Tabela 4 – Alocação dos aparelhos nos marcos.	89
Tabela 5 – Marcos geo-referenciados no sistema de coordenadas geodésicas (WGS/84).	104
Tabela 6 – Marcos geo-referenciados em coordenadas plano-retangulares no sistema de projeção UTM (WGS/84).	105
Tabela 7 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando sem correção diferencial.	106
Tabela 8 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.	111
Tabela 9 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.	114
Tabela 10 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial.	119
Tabela 11 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial.	123
Tabela 12 – Parâmetros para comparação dos aparelhos receptores de sinal GPS operando sem correção diferencial.	127
Tabela 13 – Análise de variância do erro radial de posicionamento.	129
Tabela 14 – Teste de Tukey (5%.) para os erros radiais de posicionamento.	130
Tabela 15 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando com correção diferencial em tempo real.....	131
Tabela 16 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando com correção diferencial em tempo real.....	136
Tabela 17 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando com correção diferencial em tempo real.....	140

Tabela 18 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e com correção diferencial pós-processada.	144
Tabela 19 – Parâmetros para comparação dos aparelhos receptores de sinal GPS operando com correção diferencial.	148
Tabela 20 – Análise de variância dos erros radiais de posicionamento.	149
Tabela 21 – Teste de Tukey (5%.) para os erros radiais de posicionamento.	150
Tabela 22 - Resultados do teste “t” (5%) para comparação do ERM em função do modo de operação.....	151

RESUMO

Este trabalho teve como principais objetivos: avaliar, comparar e analisar os diferentes aparelhos de GPS, levando-se em conta as diversas categorias, seus desempenhos com respeito a seus índices de acurácia e precisão, podendo assim, analisar os custos dos aparelhos em função dos índices de desempenho nos diversos modos de operação. Levando-se em conta que o sistema de posicionamento global por satélites (GPS) tem se tornado padrão no segmento da agricultura, baseou-se na significativa diferença de custo, acurácia e precisão entre os receptores GPS das categorias de navegação e de mapeamento e a imediatamente superior. A motivação deste trabalho deu-se, com a possibilidade de aumento do número de usuários no segmento agrícola, por meio da redução do custo dos sistemas de posicionamento e na necessidade de se conhecer a real acurácia e precisão dos receptores GPS em diversos modos de operação.

Palavras chave: aparelho GPS; avaliação de desempenho; acurácia; precisão.

ABSTRACT

This work had as main objectives: evaluate, compare and analyze the different GPS devices, taking into account the several categories, their performance related to their accuracy and precision indicators, and in this way it may analyze the costs of devices in function of the performance indicators in the several ways of operation. Taking into account that the system of global position by satellites (GPS) has become a standard in the agriculture segment, it has been based in the significance cost, accuracy and precision differences among the GPS receptors of the navigation and the mapping categories and their immediate superior ones. The motivation of this work has been provided with the possibility of an increase of number of users in the agriculture segment through the reduction of costs of the mapping systems and the need to know the real accuracy and precision of the GPS receptors in the several ways of operation.

Key words: GPS device; performance evaluation; accuracy; precision.

1. INTRODUÇÃO

O sistema de posicionamento global por meio de satélites (GPS) teve seu desenvolvimento iniciado na década de 60 com a finalidade inicial de uso exclusivamente militar. Somente em 1993 o sistema foi liberado sua operação para uso civil. Daí em diante houve uma enorme expansão em sua utilização. Grandes investimentos foram feitos, tanto no meio científico quanto no empresarial, para tornar viável a utilização deste sistema de posicionamento nos mais diversos segmentos, inclusive na agricultura.

Até primeiro de maio de 2000 o sistema ainda era protegido por um código de segurança (Selective Availability - SA) que limitava sua precisão de posicionamento. A partir desta data o Departamento de Defesa Norte-Americano – DoD, gerenciador do sistema NAVSTAR / GPS, desabilitou o código de segurança, incrementando significativamente a acurácia de posicionamento.

A categoria de equipamentos receptores de sinais GPS que mais se beneficiou com a liberação do SA, no que diz respeito à melhoria de exatidão, foi a dos receptores portáteis de navegação, já que sua exatidão foi melhorada numa ordem de dez vezes.

Desta forma e aliado ao seu baixo custo, os receptores portáteis de navegação tiveram sua utilização amplamente diversificada, não mais ficando restrita somente à utilização em navegação e recreação.

No segmento da agricultura o sistema de posicionamento por satélites tem se tornado padrão. Neste segmento, a utilização do GPS tem sido feita em uma ampla gama de atividades, tais como: mapeamento cadastral; mapeamento topográfico; amostragem de solo; demarcações; geo-referenciamento de imagens aéreas e orbitais; auxilia na implementação e manutenção de bancos de dados para sistemas de informações geográficas – SIG; localização de infestações de pragas e ervas daninhas; mapeamento de produtividade; localização de equipamentos de aplicação de insumos a taxas variáveis, entre outras.

Algumas destas atividades podem fazer uso diretamente dos receptores de navegação, pois não exigem acurácias elevadas, outras, podem fazer uso destes receptores

por meio de correções posteriores ou em tempo real do seu posicionamento. Outras atividades agrícolas podem fazer uso de receptores de mapeamento com correção diferencial pós-processada.

Diversas marcas e modelos de receptores GPS estão atualmente disponíveis no mercado. Cada um possui suas próprias características construtivas e técnicas, funções operacionais, desempenhos em termos de acurácia de posicionamento e custos.

As características de desempenho quanto a acurácia e a precisão dos aparelhos GPS são normalmente fornecidas pelos respectivos fabricantes. No entanto, observa-se que as definições das características de desempenho são ambíguas e a metodologia adotada para a obtenção destas características são distintas. Isto inviabiliza uma comparação imediata do desempenho dos aparelhos GPS.

A motivação deste estudo baseia-se: na significativa diferença de custo, acurácia e precisão entre os receptores GPS das categorias de navegação e de mapeamento e a imediatamente superior; na possibilidade de aumento do número de usuários no segmento agrícola por meio da redução do custo dos sistemas de posicionamento e, na necessidade de se conhecer a real acurácia e precisão dos receptores GPS em diversos modos de operação.

2. OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram:

- determinar e comparar as características de desempenho de aparelhos de GPS de diversas categorias, com respeito a seus índices de acurácia e precisão, em diferentes modos de operação;
- comparar as características de desempenho de aparelhos de GPS de diversas categorias, com respeito a seus índices de acurácia e precisão, em diferentes modos de operação;
- Comparar e analisar os custos dos aparelhos em função dos índices de desempenho nos diversos modos de operação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Geodésia

Segundo SILVA et. al. (2001) a Geodésia (do grego geo = terra, daiein = dividir) é uma ciência que tem por finalidade a determinação da forma e as dimensões da Terra. A ciência geodésica compreende o estudo das operações ou medições, levantamentos geodésicos, assim como os métodos de cálculos aplicados para determinar a forma e as dimensões da Terra e o seu campo gravitacional.

A Geodésia conforme BLITZKOW (1991) é definida classicamente como a ciência que estuda a forma e as dimensões da Terra. A palavra geodésia em si é de origem grega e significa “particionando a Terra”.

Fundamentalmente, quando se fala em forma da Terra, devem-se distinguir dois conceitos:

- a forma da Terra como um todo, que simplifiadamente é assimilada a uma esfera ligeiramente achatada nos pólos, também designada de elipsóide de revolução;
- as irregularidades da superfície, formada pelas cadeias de montanhas, vales, campos, fossas oceânicas, pântanos, etc.

Apesar da superfície terrestre ser bastante irregular, devido a presença de grandes elevações e depressões, em muitos casos, para simplicidade e facilidade de cálculo, ela é considerada como tendo uma forma regular. A justificativa para isso advém do fato de que as irregularidades da superfície física (topográfica) são muito pequenas quando comparadas com o raio médio terrestre. Nesse sentido, estudo da forma da Terra como um todo é o objeto de estudo da Geodésia, enquanto que as irregularidades da superfície são objetos de estudo da Topografia e da Hidrografia.

Através da Geodésia, procura-se uma formulação matemática capaz de representar da melhor maneira possível, a forma da Terra. Na prática, o trabalho do geodesta¹ consiste em:

- definir um Sistema de Referência sobre o qual mede-se e descreve-se a superfície da Terra. Entre outros, determinar os valores numéricos dos parâmetros de transformação para as expressões matemáticas utilizadas para as relações entre diferentes “*data*”²;
- fixar e materializar (de maneira durável), sobre a superfície terrestre, marcos de coordenadas bem definidas e precisas (Coordenadas Geográficas Geodésicas). Estes marcos devem fazer parte de uma rede suficientemente densa para que, em seu interior, seja possível efetuar trabalhos geométricos sem a necessidade de considerar a curvatura do sistema de referência.

A Geodésia baseia-se nas medições angulares e de distâncias, nas medições astronômicas, nas medições gravimétricas, feitas sobre a superfície terrestre e nas medições a partir de informações emitidas por satélites artificiais. Em função do tipo de medição e da aplicação, a Geodésia é classificada em três áreas de estudo: Geodésia Geométrica; Geodésia Espacial³; Geodésia Física.

A Geodésia Geométrica combina as observações em relação a objetos exteriores à Terra (as estrelas, o Sol, a Lua e mais recentemente os satélites artificiais) com as medições entre dois pontos conhecidos sobre a Terra e as utiliza para determinar a forma e as dimensões de nosso planeta, de acordo com SILVA et. al. (2001).

Não é recente a preocupação e o interesse do homem em conhecer a forma da Terra. Documentos históricos comprovam que a determinação da forma e do tamanho da Terra advém de antes da era cristã, desde Pitágoras (580-500 A.C.), Aristóteles (384-322 A.C.) e comprovada por Erastóstenes (276-195 A.C.) atribuindo ao planeta o modelo esférico.

A idéia da Terra esférica durou até fins do século XVII, quando Christian Huygens (1629-1695) e depois Isaac Newton (1642-1727) afirmaram que ela possuía forma de elipsóide de revolução achatado nos pólos.

¹ A palavra geodesta não consta nos dicionários da língua portuguesa, porém, é citada no Dicionário de Cartografia.

² Data, de origem grega, é o plural da palavra Datum.

³ A Geodésia Espacial também é designada por vários autores como sendo Geodésia Celeste ou Geodésia por Satélites ou Geodésia Satelital.

SILVA et. al. (2001) descreve que no início do Século XX, o geodesta americano John Fillmore Hayford (1828-1925) preconizou o uso do Método das Áreas para a estimativa do arco de meridiano. Segundo ele, ao invés de se medir o comprimento de arcos e suas amplitudes, é preferencial comparar diretamente as coordenadas geográficas astronômicas, com as coordenadas dos mesmos pontos, calculados a partir de medições terrestres sobre uma superfície de referência a priori escolhida. Os parâmetros da superfície de referência são então modificados até que as diferenças entre as coordenadas geográficas astronômicas e as coordenadas geográficas geodésicas tornem-se mínimas. Ele aplicou esse método sobre 270 pontos de triangulação sobre o Continente Americano e criou assim o Elipsóide de Hayford, o qual foi referendado pelo Congresso da Associação Internacional de Geodésia de 1924 como sendo o primeiro Elipsóide Internacional⁴. Esse elipsóide embora não seja mais oficial ainda é utilizado em algumas cartas de regiões do Brasil, conhecidas como “cartas referenciadas ao Córrego Alegre”.

A Geodésia Espacial se deu com o lançamento dos satélites artificiais a partir de 1957, sendo que estes passaram a ser mais um aliado para determinação de posições sobre a superfície terrestre, baseando-se no princípio da trilateração espacial. Esse método consiste em medir através de ondas eletromagnéticas, e pelo tempo de ida e volta das mesmas, a distância entre uma base terrestre e um satélite. As distâncias medidas permitem estabelecer uma trilateração espacial a partir de pontos conhecidos sobre a superfície terrestre.

Segundo SILVA et. al. (2001) conhecendo-se a posição dos satélites é possível determinar a posição de qualquer ponto sobre a superfície terrestre. Basta, nesse caso, realizar também uma trilateração espacial, porém, agora medindo as distâncias a partir dos satélites. A primeira técnica para o posicionamento de pontos sobre a superfície terrestre foi baseada no efeito Doppler.

Nesse caso, um satélite com posição conhecida emite, a cada instante, uma onda eletromagnética de frequência constante. Essa frequência, captada por uma estação terrestre é modificada devido ao movimento do satélite. Ela aumenta à medida que o satélite se aproxima da antena receptora e diminui à medida que ele se afasta. A essa variação dá-se o nome de Efeito Doppler. Medindo-se o Efeito Doppler, em vários instantes, é possível

⁴ O Elipsóide Internacional é também conhecido como sendo o Elipsóide de Hayford, Elipsóide Intenacional de Hayford, Elipsóide IAG-1924.

calcular a posição da antena receptora referenciada a um sistema de coordenadas geocêntrico.

Esse método foi posto em prática pela primeira vez, em 1964 através da criação do Sistema TRANSIT de posicionamento por satélites, o qual foi disponibilizado para o usuário civil a partir de 1967.

O segundo sistema de posicionamento por satélite teve início em meados dos anos 80 e substituiu o Sistema TRANSIT com grande sucesso. Trata-se do sistema de posicionamento global NAVSTAR (NAVigation System Using Time And Ranging Global Positioning System), também conhecido por Sistema GPS.

Este sistema foi desenvolvido pelo Departamento de Defesa Americano (DOD). Inicialmente, ele foi projetado para a navegação com propósito militar e somente com a descoberta do grande potencial de precisão do sistema e com o aumento da eficiência dos receptores é que ele passou a ser também utilizado pela comunidade civil.

A Geodésia Física conforme SILVA et. al. (2001) não funciona como os métodos geodésicos descritos até aqui, que são puramente geométricos auxiliares, mas sim como uma massa em movimento sobre o campo de atração gravitacional da Terra, a análise das perturbações de suas trajetórias e o tratamento das medições permitirão obter não apenas as coordenadas das estações terrestres, mas também o campo gravitacional da Terra, ou seja, a forma geométrica da superfície de nível desse campo e, portanto, a forma da Terra.

No século XIX deu-se início às medições gravimétricas e no início do século XX a concordância entre os valores dos parâmetros terrestres obtidos por medições gravimétricas se mostrava confiável. Mesmo assim, restavam ainda algumas divergências difíceis de serem explicadas apenas pelas imprecisões das medições. Descobriu-se que as dispersões existentes eram devidas as anomalias da gravidade e devido ao desvio da vertical. Todas essas imperfeições provêm da repartição irregular das massas e das suas densidades na crosta terrestre. Devido a isso, ficou latente a necessidade de se criar um modelo mais elaborado para a forma da Terra, o qual foi proposto por Friedrich Robert Helmert (1843-1917), em 1880, e ao qual deu-se o nome de Geóide. Esse novo termo designa, simplificadamente, a forma geral da Terra, representada pela superfície média de nível dos mares, em equilíbrio, e pelos seus prolongamentos estimados sob os continentes.

Fisicamente, o geóide é a superfície de nível do campo gravitacional terrestre. Esta superfície é, portanto, gerada pela perpendicular à vertical em cada ponto da superfície terrestre na altitude média do nível dos mares. Assim sendo, ela é uma superfície sem definição matemática rigorosa, já que a sua forma é completamente irregular. Essa forma irregular é sem dúvida o grande paradoxo da geodésia atual. Atualmente são criados modelos geoidais através de medições gravimétricas e caracterizadas pelos mapas geoidais que representam as diferenças de altitudes entre o geóide e elipsóide de referência, que recebe o nome altura geoidal.

Quanto às altitudes, é importante salientar que existem vários conceitos diferentes. O primeiro conceito de altitude importante é aquele que considera a superfície de referência de nível como sendo uma superfície gerada por um elipsóide de revolução. Este conceito é puramente geométrico e não tem nenhum significado físico. Esta altitude é determinada pela distância, sobre a linha normal ⁵ do ponto (Figura 1), entre a superfície topográfica e a superfície elipsoidal. Esta distância é denominada de altitude geométrica ou matemática ou elipsoidal. Este conceito de altitude é utilizado, por exemplo, pelo sistema NAVSTAR-GPS.

O segundo conceito da altitude importante é aquele que considera como superfície de referência de nível, o nível médio dos mares. Este conceito apresenta significado físico, pois define o potencial gravimétrico do ponto. Esta altitude é determinada pela distância, sobre a vertical do lugar ⁶ (Figura 1), entre a superfície topográfica e a superfície geoidal. Esta distância é denominada simplesmente de altitude ou de altitude ortométrica.

⁵ Linha normal ou Normal do lugar é definida como sendo a reta que passa pelo ponto, na superfície topográfica, e que é perpendicular a superfície elipsoidal.

⁶ A vertical do lugar é definida pela reta tangente à linha de força gravitacional que passa pelo ponto na superfície topográfica e que é perpendicular a superfície geoidal.

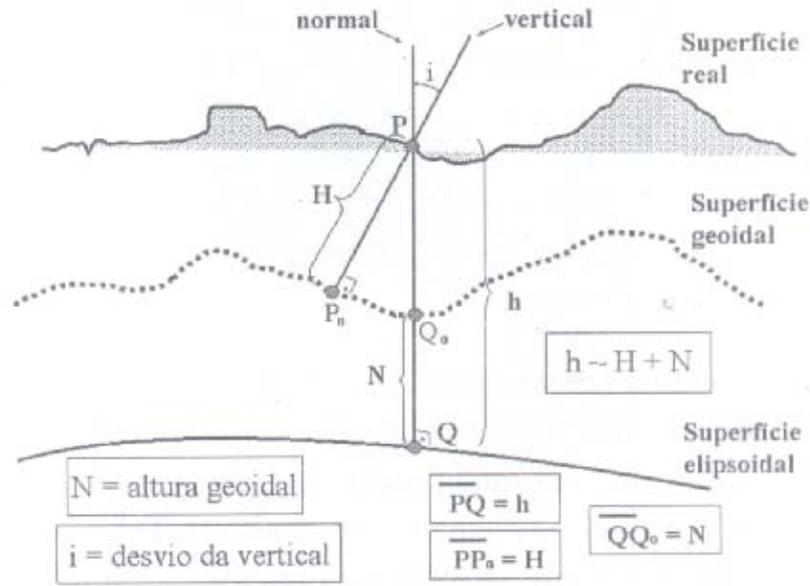


Figura 1 – Superfícies consideradas na mensuração. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

3.2 Sistema de posicionamento global NAVSTAR-GPS

O sistema de posicionamento global por satélites, NAVSTAR-GPS (Navigation System Using Time and Ranging e Global Positioning System), foi projetado pelo departamento de defesa dos EUA (DOD - Department of Defense) no início dos anos 60 e dado como operacional em 08 de Dezembro de 1993, com o objetivo de fornecer uma cobertura global, vinte e quatro horas e informando a posição de tropas militares e posteriormente à comunidade civil. Este sistema é constituído por três segmentos: espacial; de controle; do usuário.

O segmento espacial consiste, atualmente de 24 satélites conforme representado na Figura 2 a cerca de 20.200 km acima da Terra, distribuídos em seis órbitas planas. Essas órbitas estão inclinadas em 55° em relação ao Equador, (Figura 3).

Com esta configuração em qualquer ponto sobre a superfície ou próximo a ela haverá um mínimo de quatro satélites acima do horizonte fazendo com que cada satélite tenha um período de 12 horas siderais como duração de uma volta ao redor da Terra.

Esses satélites têm como funções manter uma escala de tempo bem precisa, por isso cada satélite possui dois relógios de Césio e dois de Rubídio. Emitir sinais ultra-estáveis em uma frequência fundamental de 10,23 MHz, modulados em fase através de códigos pseudo-aleatórios, sobre as duas frequências específicas do sistema:

- $L1 = 154 \times 10,23 = 1575,42 \text{ MHz}$
- $L2 = 120 \times 10,23 = 1227,60 \text{ MHz}$

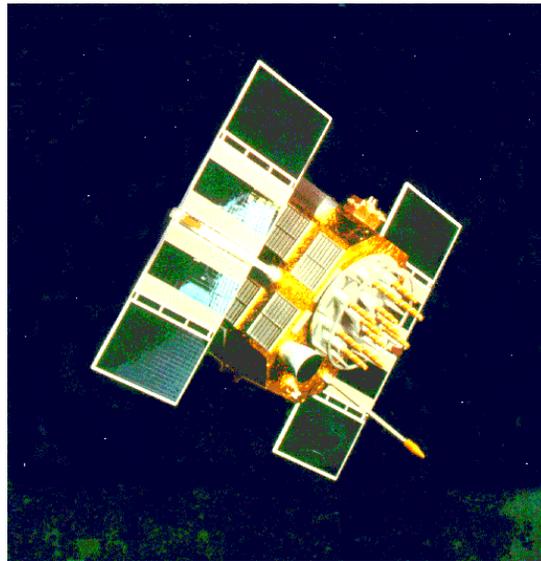


Figura 2 – Satélite do sistema NAVSTAR. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.htm

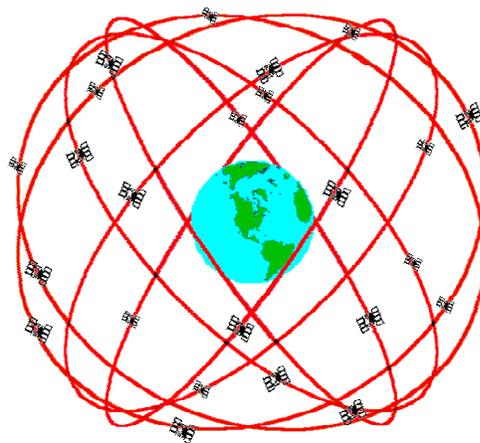


Figura 3 – Constelação GPS. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html.

Essas duas ondas portadoras correspondem a comprimentos de onda de 0,19m e 0,24m, respectivamente.

Sobre as portadoras são modulados dois códigos denominados códigos pseudo-aleatórios. Sobre a portadora L1, modula-se o código C/A (Clear Access ou Coarse Aquisition) e sobre as portadoras L1 e L2, modula-se o código P (Precise Code). O código P é uma série de + 1 e - 1 com uma frequência de 10,23 megabits por segundo e um período de 267 dias. Esse código pode ser alterado pelo controle, sempre que o governo americano desejar; diz-se, nesse caso, que o código está encriptado. O código C/A é uma série de + 1 e - 1 com uma frequência de 1,023 megabits por segundo e um período de um milissegundo (Figura 4).

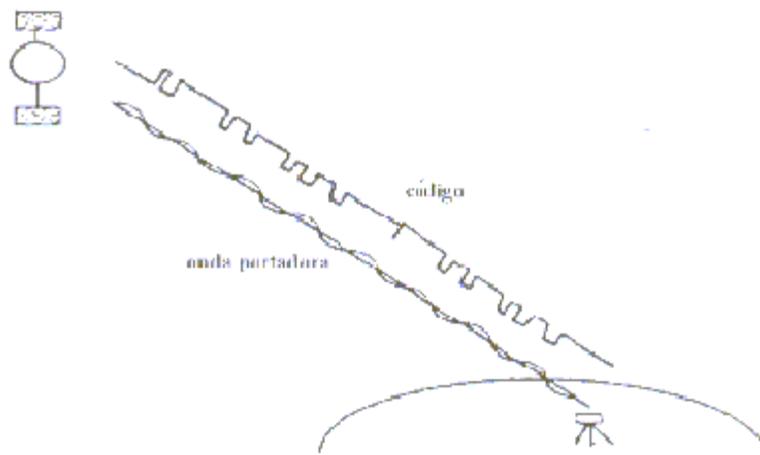


Figura 4 – Sinais GPS. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

Ambos os sinais transmitem ainda uma série de mensagens de navegação, tais como efemérides, correções dos relógios dos satélites, saúde dos satélites e outras, que são processadas pelos receptores.

Existe previsão de acréscimo de mais dois novos sinais no GPS. O primeiro será realizado pela modulação do código C/A sobre a portadora L2 (atualmente tem disponível só para código P). O segundo código será modulado sobre uma nova portadora L5, com frequência dez vezes maior que o código C/A melhorando muito a precisão do GPS.

Além de emitir estes sinais os satélites também recebem e armazenam as informações enviadas pelo segmento de controle, efetuam cálculos, manobras orbitais para

guardar sua posição ou para substituir outro satélite em caso de defeito e retransmitir informações a Terra.

O segmento de controle é constituído por um grupo de cinco estações terrestres que registram os sinais dos satélites, efetuam medidas meteorológicas e enviam os dados a uma estação principal, que calcula as efemérides (informações sobre as órbitas) dos satélites, bem como os coeficientes de correção dos relógios e os transmite para as estações de transmissão.

As estações de controle estão localizadas em Colorado Springs – EUA (estação principal), Ascension Island no Atlântico Sul, Hawaii, Diego Garcia no Atlântico Sul, Kwajalein no Pacífico Norte (Figura 5).



Figura 5 – Estações de monitoramento do sistema NAVSTAR. Fonte: adaptado de http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html.

O segmento do usuário compreende o conjunto de usuários militares e civis do sistema, tratando-se fundamentalmente dos receptores que possuem a capacidade de registrar os sinais transmitidos pelos satélites. Estes receptores são utilizados nos mais variados segmentos profissionais.

De acordo com SILVA (1995) e ROCHA (2000) o posicionamento pelo método GPS é baseado em dois tipos de medições diretas satélite/receptor. São elas:

- Medida baseada nos códigos (medidas das pseudodistâncias);
- Medida baseada nas ondas portadoras (medida de fase).

O posicionamento pelo código é feito conhecendo-se a duração de propagação do sinal emitido pelo satélite até o receptor, pode-se, rápida e facilmente, calcular a distância entre os dois aparelhos. Essa duração é calculada conhecendo-se os algoritmos que geram os códigos e a ligação entre eles e o tempo ao sistema GPS, ou seja, o instante em que os códigos foram gerados.

Assim, se o receptor reproduzir, em sincronia com o satélite, os códigos gerados por este, ele poderá correlacionar as informações recebidas com as informações reproduzidas e conhecer, dessa forma, a duração de propagação. Correlacionar consiste em retardar o código recebido. O tempo de retardamento coincide com a duração de propagação.

O tempo de retardamento corresponde à duração de propagação somente se os dois relógios (do satélite e do receptor) forem exatamente sincronizados. Na realidade, a sincronização não é possível e a distância medida contém, portanto, erros sistemáticos, correspondentes à diferença inevitável entre os dois relógios. Motivo pelo qual a distância calculada, dessa maneira, é denominada pseudodistância.

Os códigos diferem para cada satélite de tal maneira que é impossível correlacionar o código produzido por um receptor para um determinado satélite com o código recebido por um outro satélite. Os sinais de todos os satélites, que são visíveis simultaneamente, não podem, interferir entre eles.

Geralmente, os receptores permitem registrar as medidas de pseudodistâncias para vários satélites ao mesmo tempo.

Também o posicionamento absoluto que é dado por Medições simultâneas das distâncias entre o receptor e três satélites e conhecendo a posição atual de cada satélite, pode-se calcular, em tempo real, a posição do receptor. Trata-se simplesmente de um problema de ressecção espacial, no qual os satélites são os pontos de estação conhecidos.

Na realidade, a diferença entre os relógios do satélite e do receptor não é conhecida, o que introduz mais uma incógnita no problema, a qual poderá ser determinada a partir de um quarto satélite.

Dessa forma, para se conhecer a posição do receptor, deve-se determinar quatro parâmetros, as coordenadas do receptor em sistema global e as diferenças entre os relógios.

Este posicionamento é utilizado em navegação pelo fato de obter-se precisão em torno de 3 a 10m ou 30 a 100m dependendo da influência dos códigos P e C/A respectivamente (Figura 6).

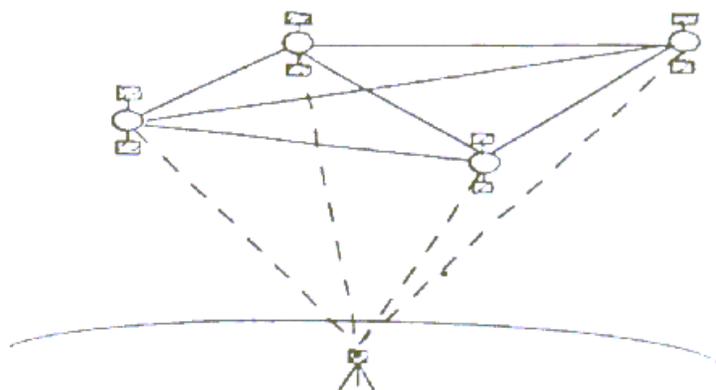


Figura 6 – Posicionamento absoluto. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

Sendo assim, se for conhecido, previamente um ponto sobre o sistema global de coordenadas, pode-se determinar, com boa precisão um outro ponto, relativamente ao primeiro. Trata-se, portanto, do chamado posicionamento relativo (Figura 7). Neste tipo de posicionamento podem-se obter precisões submétricas.

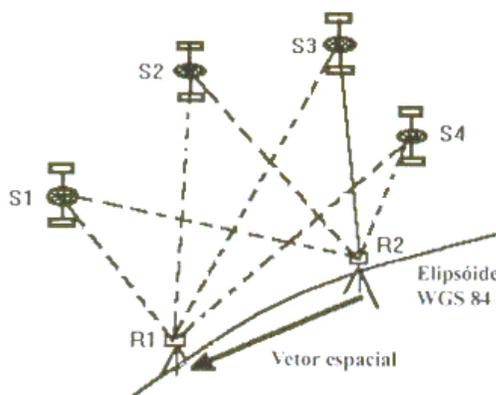


Figura 7 – Posicionamento relativo. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

No posicionamento pela fase portadora, sabe-se que os comprimentos de onda das portadoras são 19 cm e 24 cm, respectivamente, para as ondas L1 e L2. Medindo-se, a cada instante, a diferença de fase entre a onda emitida pelo satélite e a sua reprodução pelo receptor é possível obter, um outro modo de medida.

Conforme SILVA (1995) e ROCHA (2000) a maior precisão desse modo de medida decorre do fato de atualmente ser possível medir a diferença de fase com uma precisão de cerca de 1% do comprimento de onda, o que corresponde a uma precisão linear de cerca de 1 a 2mm, para o caso do GPS.

A medida de fase, entretanto, possui o inconveniente de ser ambígua, ou seja, é necessário conhecer, com precisão, também a quantidade inteira de comprimento de onda, entre o satélite receptor, por conta disto, diz-se resolver a ambigüidade do sistema. Com a movimentação do satélite (efeito Doppler), torna-se possível contar o número de ciclos observados entre duas posições do satélite, o que indica a variação da distância. Resta, porém, desconhecido o número de ciclos iniciais (ambigüidade), indicado na Figura 8.

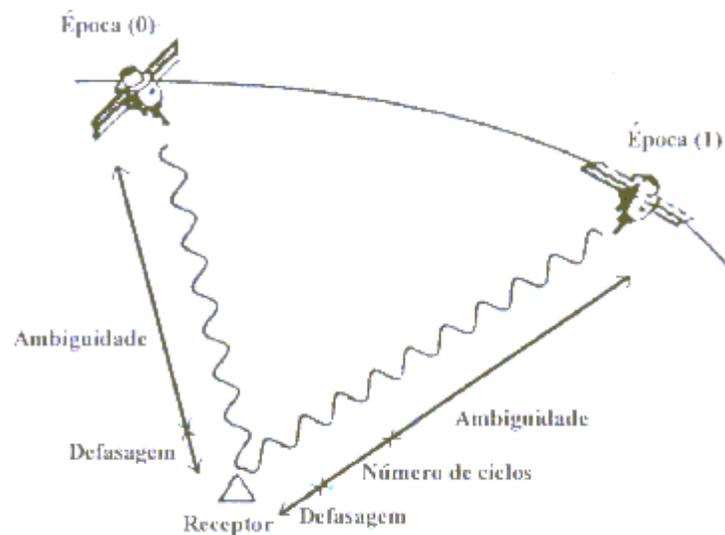


Figura 8 – Posicionamento pela fase da portadora. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

Pode-se dizer também que a chave para alcançar a precisão milimétrica desejada nas medições geodésicas é resolver a ambigüidade de cada satélite.

Segundo ROCHA (2000) o fator limitante para resolver a ambigüidade são os distúrbios ou mudanças das condições atmosféricas, as obstruções aos sinais dos satélites e outras interferências. Esses fatores corrompem os dados e reduzem a qualidade do resultado. Para melhor entendimento destas questões, tratar-se-á, no item seguinte, dos Erros no Posicionamento GPS, para depois retornar à resolução das ambigüidades.

Outro método de posicionamento é o chamado Diferencial ou DGPS “Differential Global Positioning System”. Essa técnica consiste em se ter um receptor colocado fixo num ponto com coordenadas previamente determinadas e mediante a comparação de valores obtidos pelo rastreamento dos satélites com os valores conhecidos, são obtidas correções a serem aplicadas por receptor.

Segundo BLITZKOW (1991) esse método tem como principal objetivo a eliminação dos erros sistemáticos de navegação, sobretudo devido ao código C/A. O erro típico de um receptor que usa o código C/A é de aproximadamente 30 metros. Com a alternativa do DGPS, o erro fica na ordem de 1 a 3 metros no receptor móvel. Podem ser derivadas correções para a posição ou para a distância. No primeiro caso, são comparadas as coordenadas conhecidas na estação fixa com aquelas obtidas no rastreamento dos satélites. As diferenças serão as correções a serem aplicadas ao usuário móvel. No segundo caso, são comparadas as distâncias obtidas a partir das coordenadas da estação e do satélite com as distâncias obtidas pelos rastreios. Nesse caso, são corrigidas as distâncias aos satélites rastreados simultaneamente na estação fixa e na móvel. Esta última alternativa é mais recomendável, pois as coordenadas, nas duas estações, fixa e móvel, podem não resultar do rastreamento dos mesmos satélites (Figura 9).

Quando se exige a posição em tempo real do receptor móvel é necessário que a estação – base transmita via rádio as correções, para que sejam recebidas e aplicadas. Este é o caso mais comum na navegação.

Existem iniciativas de padronização das correções transmitidas a uma taxa de 50bps pela RTCM-SC104 “Radio Technical Commission for Maritime Services- Special Committee 104”.

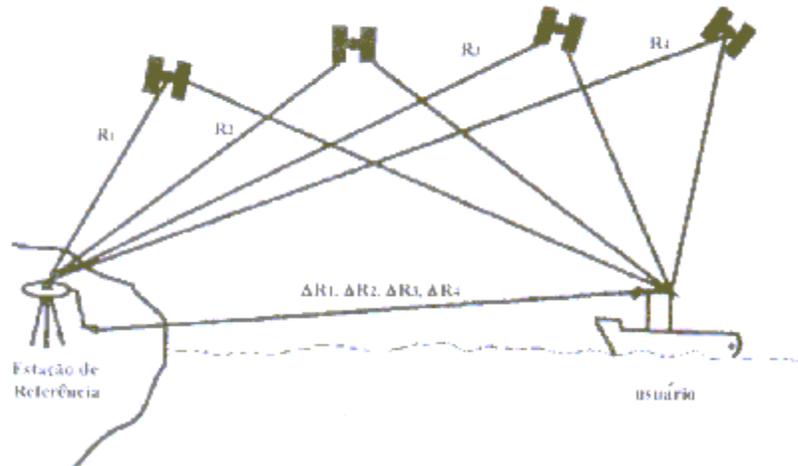


Figura 9 – Sistema DGPS. Fonte: adaptado de BLITZKOW (1991).

Este posicionamento se dá através do processamento e combinação de dados no chamado método da diferença de fase. Neste método não são determinadas as coordenadas do receptor remoto, mas o vetor, diferença entre os receptores fixo e móvel (D_x , D_y , D_z). As coordenadas são calculadas posteriormente, por irradiação geodésico, através da simples, dupla e tripla diferença de fase.

A simples diferença de fase, consiste em se calcular, a diferença entre 2 puras diferenças para o mesmo satélite, conforme Figura 10.

A dupla diferença de fase, consiste na diferença entre 2 simples diferenças de fase, tomadas para pares de satélites, com pelo menos um participando do cálculo, conforme Figura 11.

Segundo ROCHA (2000) a dupla diferença reduz os erros orbitais e de refração (quando são iguais se cancelam), não reduzindo os erros dos ruídos. Esta diferença é resolvida pelo acúmulo de épocas gravadas no receptor, sendo ideal em distâncias curtas (menor que 15km), sendo esta a solução geralmente empregada nos softwares comerciais.

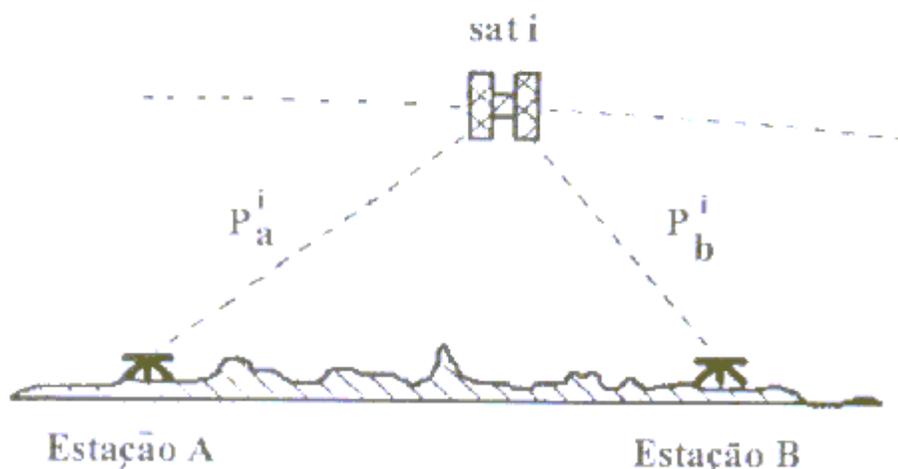


Figura 10 – Simples diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

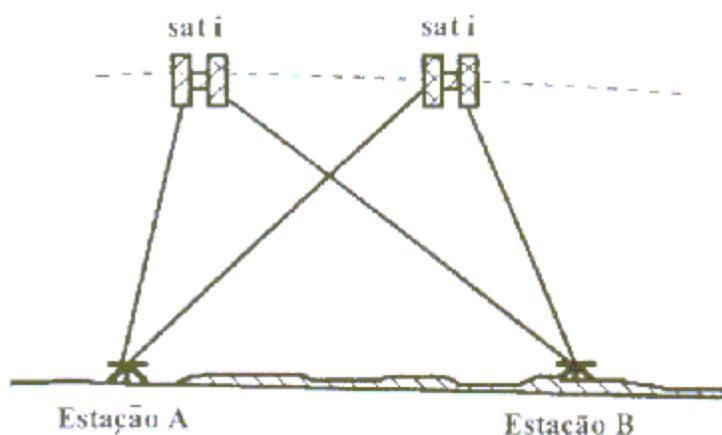


Figura 11 – Dupla de diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

A tripla diferença de fase é o resultado da diferença entre 2 observações de dupla diferença de fase, obtidas em tempos diferentes, tomando um mesmo tempo como origem para realizar os cálculos. A tripla diferença de fase (Figura 12) reduz os erros orbitais e de refração, (quando são iguais se cancelam) e elimina os erros dos relógios e dos receptores. As ambigüidades são eliminadas, sendo teoricamente a melhor solução. Esta técnica é utilizada em distâncias longas (maior que 15km).

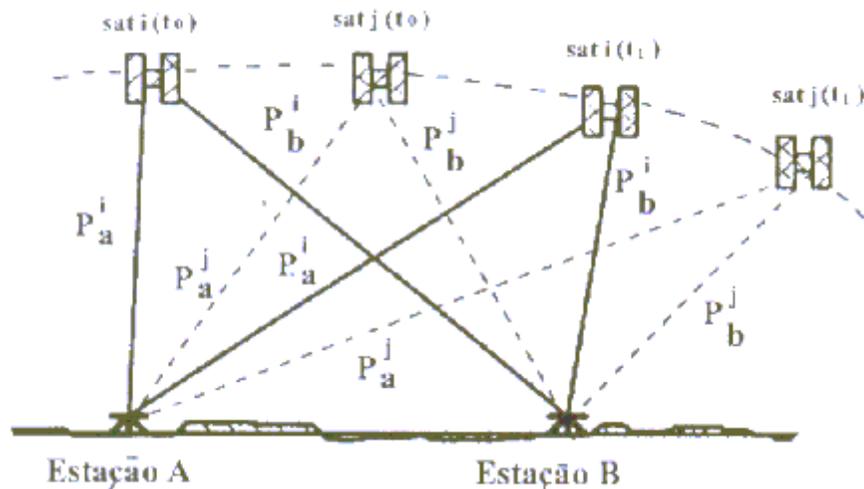


Figura 12 – Tripla diferença de fase. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

De acordo com BLITZKOW (1991) considerar a ambigüidade tornou-se a maior dificuldade do GPS para a topografia e geodésia. O fator limitante para resolvê-la são os distúrbios ou mudanças nas condições atmosféricas, as obstruções aos sinais dos satélites e outras interferências.

3.3 Fontes de erros no posicionamento GPS

Conforme SEGANTINE (1995) e ROCHA (2000) as fontes de erros estão associadas ao posicionamento de um ponto. Os erros significativos, que impedem a precisão no posicionamento com GPS, devem-se, principalmente, às imprecisões da órbita dos satélites e às influências da ionosfera e da troposfera. As informações das órbitas dos satélites são transmitidas como parte das mensagens de navegação. As efemérides transmitidas têm precisão aproximada de 1ppm e são fontes significativas de erros para o posicionamento simples. Os erros estão classificados da seguinte maneira:

- Erro do relógio;
- Ionosfera;
- Troposfera;
- DOP (Dilution Of Precision);

- Cut off angle;
- Multicaminhamento;
- Perda de ciclos;
- AS (Antispoofing);
- SA (Selective Availability);
- Centro de fase da antena.

3.3.1 Erro do relógio

De acordo com ROCHA (2000) os sinais transmitidos pelos satélites GPS são controlados por relógios atômicos, que influenciam diretamente na precisão do posicionamento, sendo assim os sinais transmitidos usam como referência o tempo GPS. O tempo GPS é gerado por todas as estações de controle GPS e pelos próprios satélites. Conforme o mesmo autor, nas equações de observações indiferenciadas da portadora, o erro do relógio do satélite é expresso por um termo resultante de compensação e alteração, enquanto que nas equações de observações da simples diferença de fase, o termo relativo ao erro do relógio é eliminado.

Segundo SEGANTINE (1995) a compensação do erro do relógio do satélite pode ser corrigida, usando-se coeficientes polinomiais transmitidos. Os termos de menor significância são negligenciados.

A dupla diferença de fase é capaz de eliminar, potencialmente, os termos dos erros dos relógios.

3.3.2 Ionosfera

A ionosfera é uma região situada entre 100 e 1000km acima da superfície terrestre, caracterizada pela presença de elétrons livres, que afetam diretamente a modulação do código P e a fase portadora, quando atravessam esta camada.

Segundo SEGANTINE (1995) para pequenas distâncias (até 10km), os efeitos ionosféricos afetam igualmente o sinal recebido pelos receptores, pois os sinais atravessam a mesma região da ionosfera e sofrem os mesmos efeitos de retardamento na modulação da portadora. Pela dupla ou tripla diferença de fases, estes erros são eliminados.

De acordo com ROCHA (2000) para linhas com distâncias superiores a 100km, torna-se necessário o uso de receptores de dupla frequência, de modo a considerar os efeitos ionosféricos, pois a frequência da portadora L2 é menor, sofrendo menos interferência desses efeitos.

3.3.3 Troposfera

A troposfera pode ser entendida como sendo uma mistura de dois gases ideais: vapores de água seca e úmida. A parte seca contribui, com aproximadamente, 90% do total da refração troposférica, e pode ser precisamente modelado com erro de 2 a 5%, usando-se medidas superficiais, tais como pressão e temperatura. Felizmente, a contribuição úmida é próxima de 10% do total da refração troposférica.

Portanto, o atraso na troposfera depende: temperatura, umidade e pressão, que variam com a altitude do local, segundo ROCHA (2000).

3.3.4 DOP

Outro fator importante para determinar a qualidade do resultado das medições GPS é o coeficiente DOP “Dilution Of Precision”, que indica, em uma escala padronizada, se a geometria espacial dos satélites pode ser considerada boa. Estes números DOP são inversamente proporcionais ao volume do corpo sólido gerado pelos satélites e o ponto a determinar. Dessa forma, quanto maior o volume, menor o DOP considera-se que a melhor disposição espacial é um satélite no zênite e outros com ângulos horizontais igualmente espaçados, o que equivale a um DOP baixo, (Figura 13).

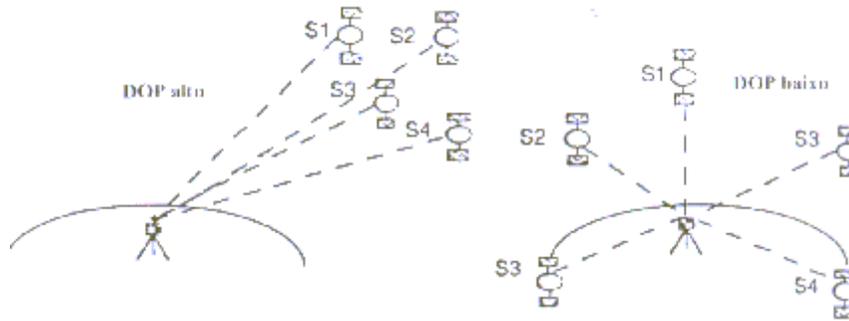


Figura 13– DOP. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.3.5 Cut Off Angle

É o parâmetro que leva em conta o posicionamento dos satélites em relação ao horizonte. O ângulo que indica esse posicionamento é denominado “*Cut off Angle*”. Este ângulo é considerado ideal de 15° acima do horizonte, como indicado na Figura 14.

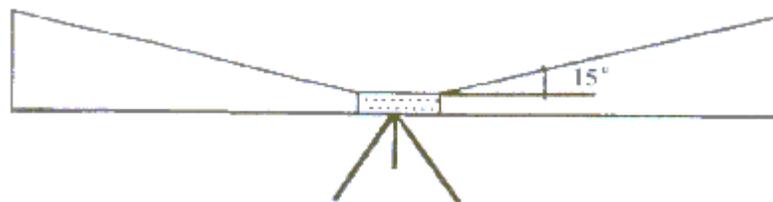


Figura 14 – CUT OFF ANGLE. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.3.6 Multicaminhamento

O erro do multicaminhamento é gerado pela reflexão indesejada do sinal GPS em superfícies próximas à antena receptora.

Estas reflexões podem ser horizontais, verticais ou inclinadas, tendo em vista que o multicaminhamento é o resultado da interferência entre o sinal direto e o sinal refletido, tendo comportamento completamente aleatório. No entanto, ele também aparece em termos de pequenos ruídos de sinais.

Não existe um modelo representativo do efeito do multicaminhamento, pois ele ocorre em situações totalmente arbitrárias afetando os códigos C/A, P e a fase portadora das

observações. Embora os sinais tenham em comum o tempo de emissão de um dado satélite, os sinais chegam com código e fase da portadora, atrasados, devido à diferença de caminhos percorridos.

Os sinais provenientes do multicaminhamento estão sempre atrasados, se comparados com os sinais que seguiram o caminho direto entre o satélite e a antena receptora, devido à maior trajetória gerada pela reflexão.(Figura 15)

HOFMANN-WELLENHOF et al. (1994) e ROCHA (2000) indicam algumas alternativas para reduzir os efeitos do multicaminhamento:

- colocar a antena diretamente sobre o terreno, sem o tripé, a fim de eliminar caminhos indiretos. Mesmo assim podem ocorrer as reflexões verticais. Recomenda-se evitar possíveis superfícies refletoras próximas dos receptores;
- selecionar antenas que usem a polarização de sinais. Os sinais GPS são polarizados, circularmente, com sentido oposto ao original;
- usar filtros digitais, antenas de banda larga e planos terrestres de rádio frequência, que reduzem a interferência dos sinais dos satélites nas condições de pequenos ângulos de elevação, que acabam causando o multicaminhamento;
- omitir, se possível, os satélites de baixa elevação, pois os efeitos do multicaminhamento são mais acentuados em satélites de pequena elevação.

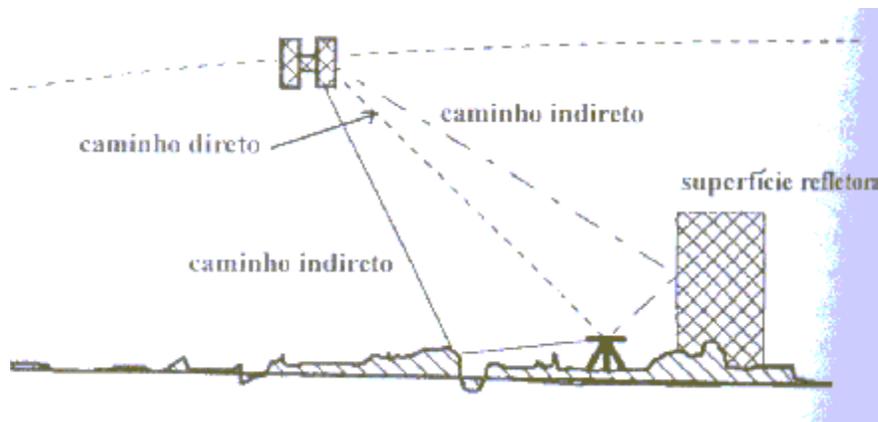


Figura 15 – Representação de Multicaminhamento. Fonte: adaptado de SEGANTINE (1995).

3.3.7 Perda de ciclos

Quando o receptor é ligado, uma fração de ciclos da portadora de fase é observada, sendo iniciado o contador de ciclos inteiros. Durante a contagem, o contador é incrementado de uma unidade, embora a fração de fase varie de 2π a 0. Então, para uma dada época, a fase acumulada observada, $\Delta\phi$, é a soma da fração de fase ϕ e o número de inteiros N . O número inicial de ciclos inteiros N , entre o satélite e o receptor, é um parâmetro desconhecido. Esta ambigüidade de N continua constante até que ocorra um dos fenômenos abaixo relacionados:

- um bloqueio temporário de sinais devido à presença de obstáculos como árvores, edifícios, pontes, montanhas, etc.;
- ocorrência de sinais fracos devido às más condições ionosféricas, multicaminhamento, deslocamentos bruscos das antenas receptoras ou satélites de baixa elevação;
- falha no programa do receptor;
- a informação enviada pelo satélite se apresentar incompleta ou incorreta;
- mau funcionamento dos osciladores dos satélites.

Se um dos fenômenos descritos acima ocorrerem, o contador de inteiros reiniciará a contagem e ocorrerá um *salto* na fase, que é chamado de perda ciclo (*cycle slips*). Isto só ocorre durante a medida da fase.

Uma perda de ciclo pode ser de apenas um ciclo ou de milhões de ciclos. A perda de ciclo apresenta a característica de que, após sua ocorrência, todas as observações se apresentam alteradas de um mesmo número de inteiros.

A perda de ciclo pode ser interpretada como sendo a variação instantânea da ambigüidade N (ciclos). Quando não ocorre a perda de ciclo, a ambigüidade mantém-se constante por todo o período de observação.

As perdas de ciclos podem ocorrer para um ou para vários satélites. Se ela ocorre para a maioria dos satélites observados, mais sério é o problema de detecção. No caso da aplicação de dados da fase da portadora em modelos matemáticos, torna-se necessário o conhecimento de uma metodologia efetiva para detecção das perdas de ciclos.

Segundo SEGANTINE (1995) um método simples é variar o peso para aquelas observações que apresentam resíduos muito grandes. Estes métodos são, geralmente, chamados de técnicas de interpolação.

Segundo o mesmo autor, outra possibilidade é aplicação do Filtro de (*Kalman*). Para uma dada época, determina-se uma função-valor, a qual, numa época seguinte, será usada como dado de entrada para se obter uma nova função-valor. Estes resultados são comparados com o valor observado de modo a detectar a existência ou não da perda de ciclo. Se a diferença entre os dois valores exceder ao ruído, então se conclui que ocorreu a perda de ciclo.

Entretanto, um dos métodos mais utilizados é a solução da tripla diferença de fase. A maior parte destes métodos tem sido desenvolvida para o caso estático, obtendo-se sucesso tanto na detecção quanto na correção da perda de ciclo para a portadora L1. A situação é um pouco mais complexa para o caso cinemático, visto que a posição da antena varia constantemente e não pode ser usada como referência para executar os cálculos matemáticos.

3.3.8 Antispoofing – A/S

Este erro consiste na criptografia do código P, transmitido pelas portadoras L1 e L2, transformando-o em código Y, que não é acessível aos usuários civis.

No projeto original do sistema GPS, existia a possibilidade de desligar o código P e invocar um código restrito Y, como um meio de alterar o acesso ao código P, sendo que o acesso ao código P correto é permitido somente aos usuários autorizados. A finalidade do AS é proteger os receptores de falsos sinais que podem ser transmitidos de rádios inimigos, objetivando o falseamento da solução de navegação.

Com o AS ativado, os receptores do código P somente poderão continuar funcionando corretamente se forem dotados de um AOC – “*Auxiliary Output Chip*”, o qual possui uma chave de decifração que consegue interpretar o código Y. Porém, este chip só é liberado para usuários autorizados pelo DoD.

A não utilização da frequência L2 implica em perda de precisão para o posicionamento da fase portadora, devido à impossibilidade de eliminar grande parte dos efeitos ionosféricos sobre o sinal. Para reduzir este efeito, aplicam-se modelos ionosféricos no processamento dos dados. Outros procedimentos tentam recuperar o código P a partir do Y (de frequência baixa – 50bps), utilizando um processo de correlação. Alguns receptores já utilizam esta técnica.

O AS foi implementado em 21 de janeiro de 1994, após o sistema ter sido declarado operacional.

3.3.9 Selective Availability – S/A

Segundo ROCHA (2000) este é a maior fonte de erro do sistema GPS provocada pelo homem. Selective Availability (SA) é uma degradação intencional imposta aos sinais GPS, que é realizada através da manipulação dos dados das efemérides transmitidas e dos relógios satélites.

Ele foi implementado, pela primeira vez, em março de 1990, mas foi desligado em agosto do mesmo ano, durante a Guerra do Golfo. Em novembro de 1991 ele foi religado, sendo novamente desligado em 01/05/2000 (Clinton, 2000).

O SA é introduzido pela combinação de duas técnicas: “epsilon”, que é a degradação de parâmetros orbitais; e “delta”, que é a degradação de um dos coeficientes de correção do relógio dos satélites. A partir daí, as coordenadas não podem ser precisamente calculadas no posicionamento absoluto. No posicionamento relativo, não há influência, uma vez que elas se anulam.

3.3.10 Centro de fase da antena

Assume-se, no sistema GPS, que as ondas eletromagnéticas geradas pelos satélites percorrem um caminho direto na atmosfera, até atingir as antenas dos receptores. Teoricamente, a posição calculada pelo receptor é o centro da antena. Mas daí surge a questão: onde/qual é o centro da antena? Pode-se afirmar que os sinais que chegam até a antena atingem o seu *centro* eletrônico ou o centro de fase.

Antenas fabricadas por um mesmo fabricante têm, usualmente, o centro de fase alocado num mesmo ponto. Em aplicações que requerem alta precisão, recomenda-se que sejam usadas antenas de um mesmo tipo e modelo, tanto nas estações fixas, quanto nas móveis. Além disso, deve-se atentar ao fato de orientá-las sempre nas mesmas direções.

3.4 Sistemas de referência

De acordo com ROCHA (2000) o princípio fundamental para o desenvolvimento de levantamentos topográficos e geodésicos no âmbito nacional de um país foi à definição, no século passado, dos elipsóides de referência. As dimensões e o posicionamento desses elipsóides de revolução foram escolhidos de maneira a se obter uma adaptação otimizada em relação à porção do geóide, recoberta pelo território do país envolvido. Por isso, cada país adotou um Datum Geodésico e um Sistema de Referência Geodésico mais adaptado à sua forma.

Além desses sistemas individuais, existe ainda um sistema de referência global, que é definido por um elipsóide de referência, com o ponto central coincidente com o centro de massa da Terra e otimizado para se adaptar ao geóide global. Esse sistema de referência é denominado WGS – World Geodetic System. O sistema GPS adota esse sistema de referência com base de suas medidas.

O sistema de referência WGS-84 possui os seguintes parâmetros, segundo a Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do Elipsóide WGS-84.

PARÂMETROS	VALORES
Semi-eixo maio	$a = 6378137,000 \text{ m}$
Achatamento geométrico	$f = 1/298,257223563$
Coefficiente zonal de segundo grau	$J_2 = 1082630 \times 10^{-9}$
Velocidade angular da terra	$\omega = 7292115 \times 10^{-11} \text{ rad s}^{-1}$
Constante gravitacional terrestre	$\mu = 3986005 \times 10^8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-2}$

Devido a essa particularidade, todas as medidas GPS deverão ser transformadas para o sistema de referência de cada país, antes de serem particularmente utilizadas e vice-versa.

3.5 Sistemas de coordenadas

Segundo SILVA et. al. (2001) calcular a posição de um ponto, em Mensuração, significa determinar as suas coordenadas. E determinar as coordenadas de um ponto significa estabelecer a posição relativa desse ponto em relação a um sistema de coordenadas previamente escolhido. O uso de um sistema de coordenadas para o estabelecimento da posição de um ponto possui várias vantagens conforme descrito a seguir.

Em primeiro lugar, o uso de um sistema de coordenadas facilita e permite a padronização dos métodos de cálculos, para que cada ponto seja definido de maneira unívoca. Deve-se também considerar que não existem propagações erros quando se calculam as coordenadas de um ponto a partir das observações de campo. Além disso, as coordenadas impedem que haja a propagação dos erros de plotagem nas representações gráficas. Finalmente, o uso de um sistema de coordenadas evita também a propagação de erros nos processos de locação de pontos sobre o terreno.

Em segundo lugar, o uso de sistemas de coordenadas permite a unificação de vários sistemas individuais em único sistema geral e simplifica a identificação e o gerenciamento dos pontos em um projeto.

Existem basicamente quatro sistemas de coordenadas utilizadas na Geodésia, Topografia e Cartografia:

- O Sistema de Coordenadas Geográficas Geodésicas;
- O Sistema de Coordenadas Cartesiano;
- O Sistema de Coordenadas Plano Retangular, e
- O Sistema de Coordenadas Polares.

3.5.1. O Sistema de Coordenadas Geodésicas

O Sistema de Coordenadas Geográficas Geodésicas ou, simplesmente, coordenadas Geodésicas é definido sobre um elipsóide de referência. Ele se baseia, fundamentalmente, no eixo médio de rotação e no plano do Equador terrestre.

As linhas desenhadas no sentido Norte/Sul são denominadas meridianos e as linhas desenhadas no sentido Leste/Oeste são denominadas paralelos. Essas linhas estabelecem o sistema de coordenadas, denominado Sistema de Coordenadas Geográficas Geodésica, cuja origem é um ponto situado sobre o meridiano que passa por Greenwich na Inglaterra e o Equador. As coordenadas definidas por esse sistema são denominadas latitudes e longitudes geodésicas.

A latitude geodésica ϕ de um ponto da superfície terrestre é o ângulo que forma a normal à superfície, nesse ponto, com o plano que contém a linha do equador.

As latitudes geodésicas são referenciadas a partir do equador de 0° a 90° , no hemisfério Norte e de 0° a -90° , no hemisfério Sul, ou simplesmente de 0° a 90° seguido da indicação da latitude Norte ou Sul.

As longitudes geodésicas são referenciadas a partir de Greenwich, de 0° a 360° , na direção leste, ou de 0° a -180° , direção Leste, e de 0° a -180° , na direção Oeste. A figura apresentada a seguir mostra a latitude e longitude de um ponto P situado sobre a superfície de referência, (Figura 16).

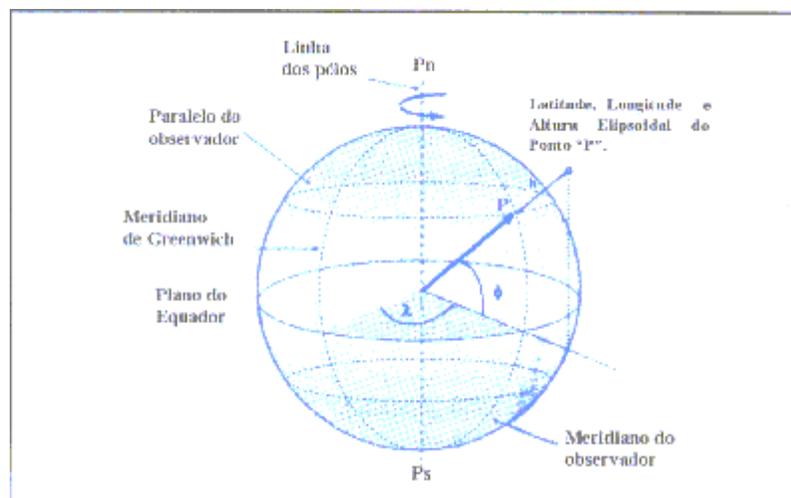


Figura 16 – Sistema de coordenadas Geográficas / Geodésicas .Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.5.2. Sistemas de Coordenadas Cartesiano Espacial

O Sistema de Coordenadas Cartesiano Espacial possui a sua origem no centro da Terra, os eixos X e Y pertencem ao plano do equador e o eixo Z coincide com o eixo médio de rotação da Terra. O eixo X passa pelo meridiano de referência. A Figura 17 apresenta graficamente, a posição do Sistema de Coordenadas Cartesiano Espacial em relação ao elipsóide de referência.

As coordenadas cartesianas são usadas no posicionamento de satélites. Para medições topográficas em geral, esse sistema não é adequado devido ao fato dele não representar convenientemente as altitudes. A coordenada **Z** é vertical em relação ao plano do equador enquanto a altura elipsoidal **h**, é normal à superfície de referência. Assim, um aumento no valor de **h** não produzirá um aumento igual em **Z**.

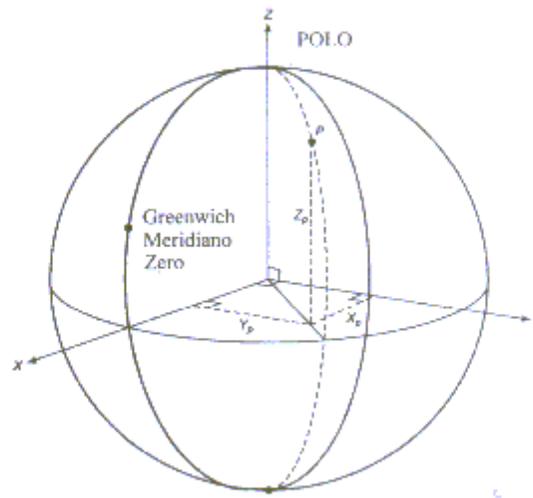


Figura 17 – Sistema de coordenadas Cartesianas. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

3.5.3 O Sistema de Coordenadas Plano Retangular

O sistema de coordenadas mais utilizado na Cartografia é o Sistema de Coordenadas Plano Retangular. Este sistema é baseado no Sistema de Coordenadas Retangular criado pelo filósofo francês, Renée Descartes (1569-1650), no século XVII. Ele é também chamado de sistema Cartesiano Plano.

O Sistema de Coordenadas Retangular consiste de dois eixos geométricos, localizados num mesmo plano, perpendiculares entre si. O cruzamento dos dois eixos é a origem do sistema. O eixo primário é denominado abscissa X, no sentido horizontal. O eixo secundário é definido por uma rotação anti-horária de um ângulo de 90° em relação ao eixo das abscissas e é denominado, ordenada Y. Os dois eixos são igualmente graduados de acordo com a escala definida para o sistema. O eixo Y é positivo da origem “para Cima” e o eixo X é positivo da origem “para a direita”. As coordenadas retangulares de um ponto são dadas por dois números que correspondem à projeção deste ponto sobre o eixo das abscissas e a projeção do ponto sobre o eixo das ordenadas. Os ângulos são contados a partir da abscissa X (ou suas paralelas) no sentido anti-horário, (Figura 18).

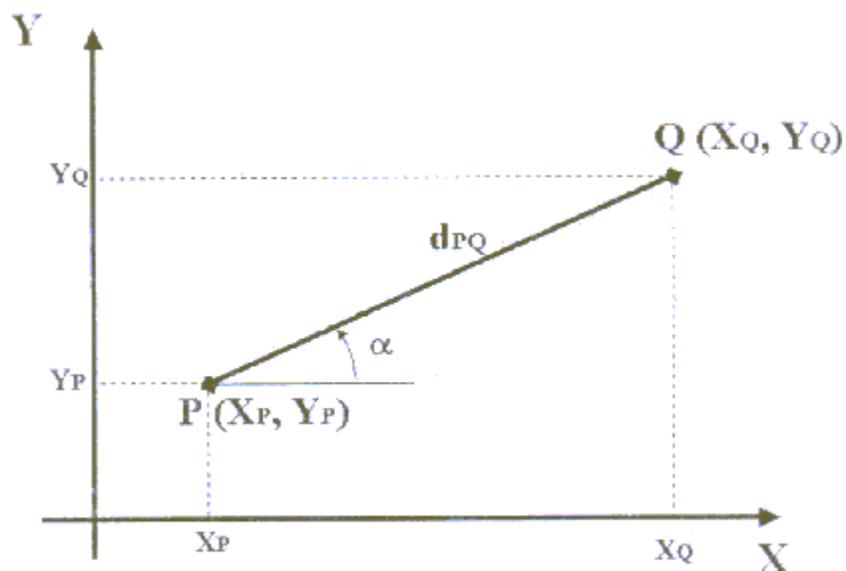


Figura 18 – Sistema de coordenadas Retangulares. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

Uma modificação básica foi feita nesse sistema para o seu uso na Geomática. Trata-se da inversão do sentido da leitura angular. Para a Geomática os ângulos são medidos no sentido horário, em conformidade com o sentido da graduação do limbo na maioria dos instrumentos topográficos mecânicos. No Brasil mantém-se a direção das ordenadas e das abscissas. Nos países da Europa, porém, inverte-se também o sentido dos eixos das ordenadas e das abscissas, ou seja, o eixo das ordenadas (Y) torna-se o eixo horizontal e o eixo das abscissas (X) torna-se o eixo vertical, (Figura 19).

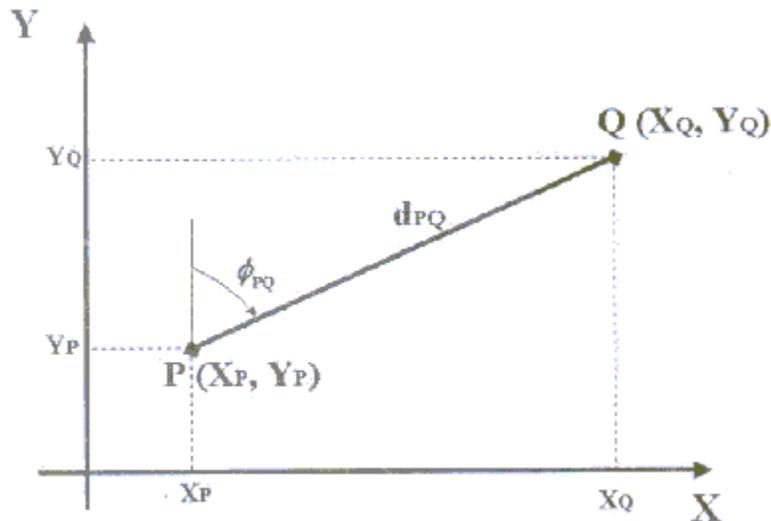


Figura 19 – Sistema de coordenadas Plano Retangular na Agrimensura. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

Para a determinação das coordenadas de um ponto no sistema de Coordenadas Plano Retangular é necessário conhecer as coordenadas de um ponto de origem, a orientação e a distância entre essa origem e o ponto a ser determinado.

Da Figura 19, tem-se:

$$X_Q = X_P + d_{PQ} \text{ sen } \phi_{PQ}$$

$$Y_Q = Y_P + d_{PQ} \text{ cós } \phi_{PQ}$$

O uso do Sistema de Coordenadas Plano Retangular na Geomática não pode ser feito sem algumas considerações especiais. Devido a esfericidade da Terra, não é possível representar pontos da sua superfície nesse sistema sem que haja algum tipo de deformação na figura representada. Deformação, neste caso, significa deformação dos ângulos entre as direções representadas e/ou deformação das distâncias representadas ou deformação da superfície. Para resolver esse problema existem duas soluções: a primeira consiste em utilizar uma **Projeção Cartográfica**, através da qual se estabelece uma relação matemática pontual e biunívoca entre a superfície de referência (elipsoidal) e a superfície plana,

convenientemente posicionada em relação a superfície elipsoidal de referência. A deformação gráfica não é suprimida, porém, ela é conhecida através da relação matemática estabelecida para a transformação. Existem vários tipos de projeções cartográficas, cada uma com suas peculiaridades e vantagens. A maioria delas não é plano retangular. No Brasil, utiliza-se a Projeção Cartográfica Plano Retangular denominada **Projeção Universal Transversa de Mercator – UTM**, que no passado também foi denominada **Projeção de Gauss-Krüger**. Na projeção cartográfica UTM, adota-se a letra E para a abscissa, ao invés de X e adota-se a letra N para a ordenada, ao invés de Y.(Figura 20)

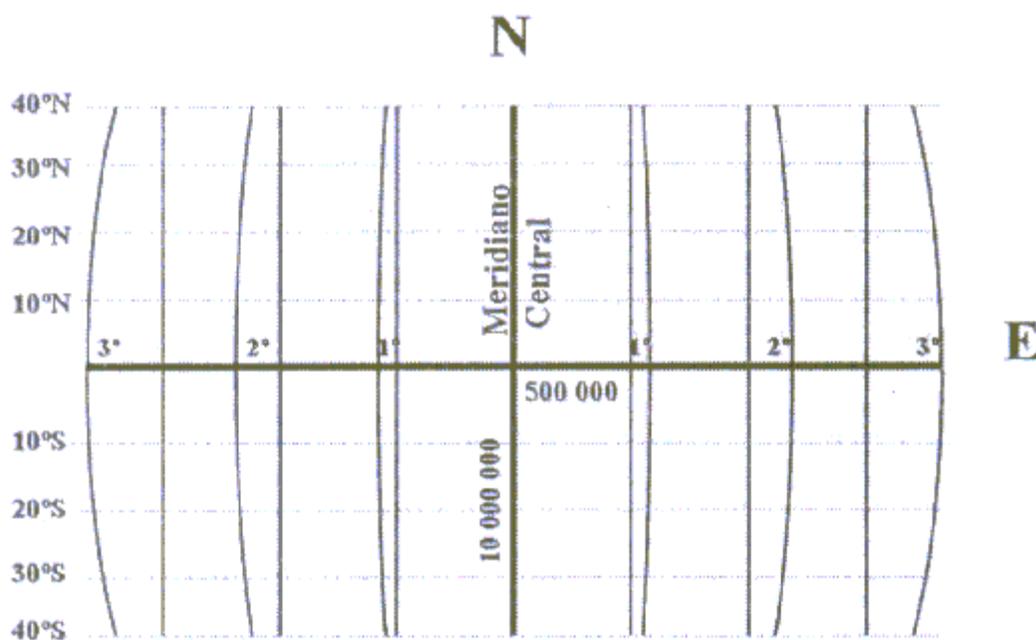


Figura 20 – Sistema de coordenadas Plano retangular UTM. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

Uma outra solução consiste em representar diretamente os pontos medidos sobre o Sistema de Coordenadas Plano Retangular sem que se aplique algum tipo de relação matemática de transformação entre a superfície elipsoidal e a superfície plana. Neste caso, visto que a superfície terrestre é esférica, é preciso restringir as distâncias a serem representadas em função do nível de precisão que se deseja obter. A esses dois tipos de representações gráficas dá-se o nome genérico de Sistema de Coordenadas Plano Retangular.

3.5.4. O Sistema de Coordenadas Polares

O Sistema de Coordenadas Polares é determinado por um ponto fixo O, denominado origem ou pólo, e por uma direção ou eixo passando por esse pólo, sobre o qual se representa as distâncias. A posição de um ponto é então definida através da medida de um ângulo β e uma distância d , tomados a partir da origem (pólo). As coordenadas do ponto obtidas a partir deste procedimento, denominam-se *coordenadas polares*, (Figura 21).

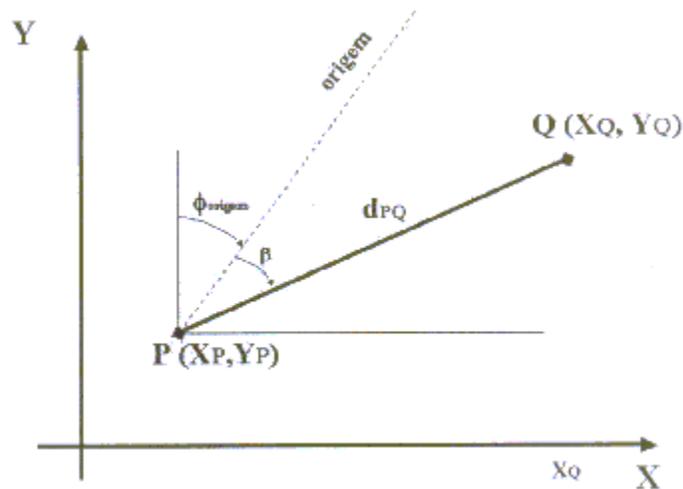


Figura 21 – Sistema de coordenadas Polares. Fonte: adaptado de SILVA et. al. (2001).

3.6 Tipos de equipamentos GPS

O objetivo deste item é esclarecer os diversos tipos de equipamento GPS com as exatidões alcançadas fornecidas pelos fabricantes. Evidentemente, alguns vendedores ansiosos por venderem seus produtos, costumam superestimar a capacidade de suas mercadorias. Contudo, o usuário deve ficar atento para não adquirir o equipamento errado.

Segundo SEGANTINE (1995) e ROCHA (2000) numa tentativa de classificar, em alguns casos com pequenas diferenças, podem-se dividir os equipamentos que recebem os

sinais do sistema NAVSTAR-GPS em seis grupos, segundo os objetivos de precisão e investimento a saber:

- Navegação;
- Topográficos;
- DGPS;
- Geodésicos;
- Cadastrais;

Esta classificação não é rígida, podendo alguns instrumentos pertencer a mais de uma classe, conforme detalhamento a seguir.

3.6.1 Navegação

Os equipamentos de navegação são aqueles que fornecem o posicionamento em tempo real, baseado no código C/A ou P. eles trabalham com a pseudodistância, obtendo-se precisão com o código C/A da ordem de 30 a 100 m e precisão com o código P da ordem de 3 a 10 m. Contudo, os aparelhos de código P estão restritos, ao uso das forças armadas americanas ou usuários autorizados.

3.6.2 DGPS

Os aparelhos de DGPS são semelhantes ao de navegação, diferindo por possuírem um link de rádio, utilizado para receber as correções diferenciais provenientes de uma estação base. Através dessas correções em tempo real, consegue-se eliminar o maior erro do GPS que é o AS, obtendo-se precisões da ordem de 1 a 3m.

Existe também o DGPS pós-processado, que dispensa o link de rádio, realizando o processamento em escritório, através de software.

3.6.3 Cadastrais

Esta classe inclui os aparelhos que trabalham com o código C/A e com a fase da portadora L1 (o código C/A é modulado sobre ela), através da resolução da ambigüidade de cada satélite. O pós-processamento é executado em escritório ou no campo, através da utilização de um software específico.

Esses equipamentos são muito utilizados na coleta de dados GIS/SIG. A grande diferença deste equipamento é a sua capacidade de aquisição e armazenamento de dados alfanuméricos associados às feições espaciais levantadas (ponto, linha e área), permitindo realizar cadastros para SIG. Dependendo do método e do aparelho utilizado, conseguem-se precisões de 10 cm a 1 m.

Há necessidade de dois receptores ou de uma estação base que forneça os arquivos via INTERNET.

3.6.4 Topográficos

Estes equipamentos poderiam ser considerados iguais aos cadastrais, ou seja, também trabalham com a fase L1 (e código C/A), com pós-processamento dos dados. Contudo, possuem evoluções tecnológicas no próprio aparelho, nos softwares de pós-processamento, além de acessórios de fábrica, como tripés e bastões com níveis de calagem, que acarretam numa melhora de precisão para ordem de até 1 cm. Por isso, são considerados topográficos.

3.6.5 Geodésicos

São aparelhos de dupla frequência, recebendo a frequência L1 (e código C/A) e a frequência L2 (código C/A ou P). Quando somente o código C/A é usado num receptor de dupla frequência, a portadora L2 é quadrada para remover a modulação desconhecida do código P, resultando num comprimento efetivo de onda para a L2 de 12 cm. Os receptores

de dupla frequência, que fornecem o acesso ao código P, realizam esta tarefa através de correlação do código, permitindo, assim, um comprimento de onda cheio da portadora L2 de 24 cm.

Como já foi colocado, os receptores de dupla frequência sofrem interferências da ionosfera. Utilizando-se esses equipamentos, com seus sofisticados recursos eletrônicos, consegue-se resolver mais rapidamente as ambigüidades, chegando-se a precisões diferenciais pós-processada da ordem de 5 mm + 1 ppm, com a metade do tempo que levaria um GPS topográfico.

São indicados para trabalhos geodésicos como transporte de coordenadas e controle de redes.

3.7 Métodos de medição com GPS

Existem, basicamente, seis métodos de medições com GPS:

- Método Estático;
- Método Rápido Estático;
- Método de Reocupação;
- Método Stop and Go;
- Método Cinemático;

3.7.1 Método estático

O método estático é a técnica tradicional de medição GPS. Cada estação é ocupada até que uma quantidade suficiente de dados tenha sido coletada para quatro ou mais satélites. O tempo de observação varia conforme a quantidade de satélites, as condições atmosféricas, o tipo de receptor e o comprimento da linha base. As experiências com o GPS Geodésico mostram que esse método exige de 1 a 4 horas. Se for usado o GPS topográfico, esse tempo dobra.

dessa rede. Nela se observa que o ponto A é uma estação fixa e os demais pontos são pontos de medição rápida.

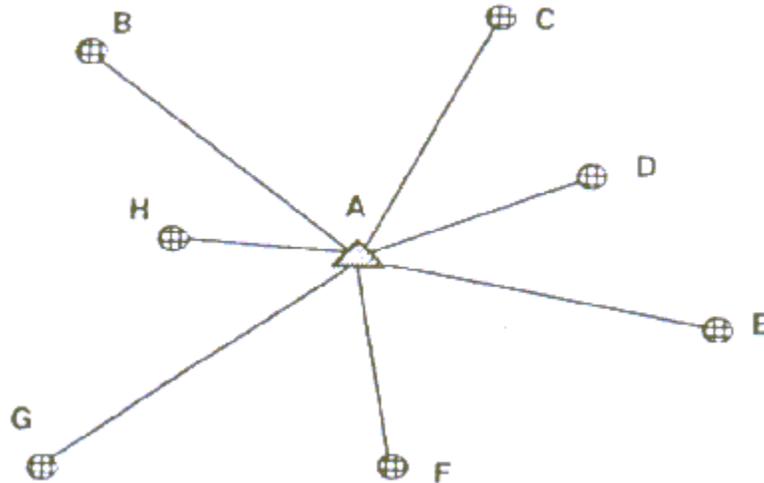


Figura 23 – Método Rápido Estático. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.7.3 Método de Reocupação

O método de reocupação é uma outra variação do método estático. Trata-se de um método especialmente desenvolvido para situações em que se tem menos de 4 satélites disponíveis. O método consiste em ocupar as mesmas estações várias vezes e utilizar todos os dados coletados para calcular as coordenadas das estações. Se, por exemplo, em uma dada situação, na primeira etapa de medição, houver apenas 3 satélites disponíveis e, na segunda etapa, também houver apenas 3 satélites, o processamento será realizado como se tivessem sido observados 6 satélites. O tempo recomendado para reocupar uma mesma estação é no mínimo 1 hora após a ocupação precedente.

O método reocupação é ideal para levantamentos em situações em que se tem uma configuração pouco privilegiada para a operação de um sistema GPS.

A configuração da rede de observação do método reocupação é semelhante a da rede de observação do método estático. A Figura 24 mostra a configuração dessa rede. Na

figura, o ponto A é uma estação fixa e os demais pontos são pontos de medição com reocupação.

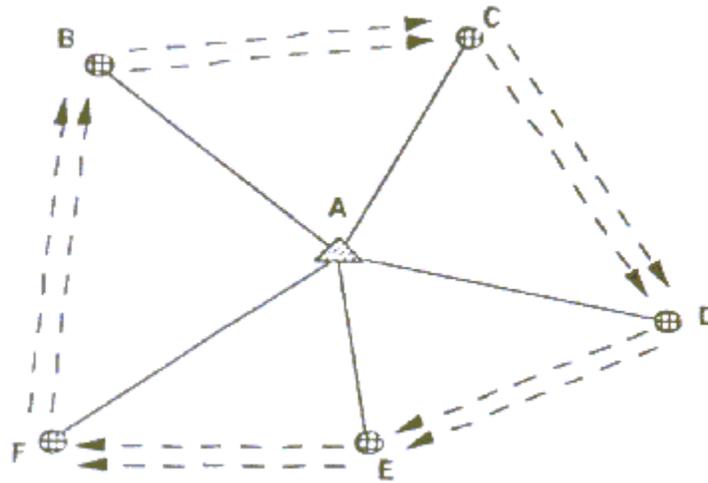


Figura 24 – Reocupação. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.7.4 Método “Stop and Go”

No método “*Stop and Go*” as ambigüidades são primeiramente resolvidas com um tempo de 10 a 20 minutos. Em seguida, movimenta-se um dos receptores, mantendo-se o outro em estação fixa. O método exige que se mantenha a comunicação em modo contínuo com os satélites durante todo o processo de medição. Os GPSs topográficos e cadastrais indicam que esse método exige um tempo de medição da ordem de 10 a 20 segundos para cada estação.

A maior limitação do método é a exigência de se manter uma comunicação em modo contínuo com os satélites, enquanto se movimenta o receptor. Assim, cada vez que ocorre um “*cycle slips*”, é necessário permanecer no próximo ponto até que a ambigüidade seja novamente resolvida (cerca de 2 minutos), segundo ROCHA (2000).

O método “*Stop and Go*” é ideal para ser utilizado em cadastros e serviços topográficos rotineiros, áreas com poucas obstruções. A configuração da rede de observação neste método está representada na Figura 25. Onde, o ponto A é uma estação

fixa e os demais pontos de medição (cadastro). O ponto B é o ponto onde o receptor ficou estacionado até resolver a ambigüidade do sistema.

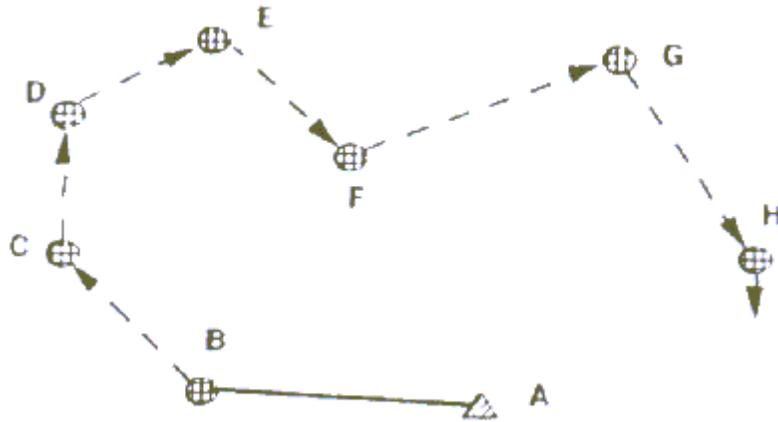


Figura 25 – Stop and Go. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.7.5 Método Cinemático

O método cinemático pode ser tratado como um caso especial do método “*Stop and Go*”. Neste método, mede-se a posição relativa dos pontos levantados em um intervalo tempo pré-definido pelo usuário, com o receptor deslocando-se continuamente (no “*Stop and Go*”, mede-se apenas nos pontos escolhidos pelo operador). No caso da ocorrência de “*cycle slips*”, deve-se proceder da mesma forma que no método anterior.

Alguns autores ainda consideram uma variação deste método, denominada “*Cinemático em Tempo Real*”. A diferença é que o GPS seria equipado com um link de rádio VHF ou UHF, de modo a resolver as ambigüidades em tempo real. Se houver interrupção do sinal, pode-se resolver a ambigüidade com reinicialização em movimento “*On the fly*” (OTF) ou reinicialização estática. Devido a estes recursos, estes aparelhos têm um custo bem alto.

A maior aplicação do método cinemático é para determinação da trajetória de objetos em movimento. Ele pode também ser utilizado para o levantamento de perfis, determinação da posição de barcos e aviões. A configuração da rede de observação do

método cinemático está representada na Figura 26. Na figura, o ponto A é de uma estação fixa e os demais pontos são pontos de medição. O ponto B é o ponto onde o receptor ficou estacionado até resolver a ambigüidade.

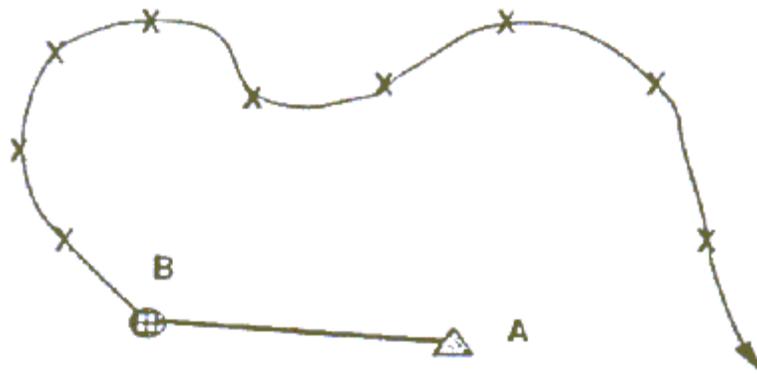


Figura 26 – Cinemático. Fonte: adaptado de ROCHA (2000).

3.8 Erros em receptores GPS

Segundo DMA (1991) os erros em aparelhos receptores GPS podem ser definidos conforme descrito nos itens a seguir.

3.8.1 Classes de erros

Os erros podem ser separados em três classes gerais categorizadas de acordo com sua origem, ou seja, os erros podem ser classificados como erros grosseiros (blunders), como erros sistemáticos (systematic errors) ou como erros aleatórios (random errors).

3.8.1.1 Erros grosseiros

Os erros grosseiros podem ser causados por leitura errada dos instrumentos, erro na transcrição de números, equipamentos danificados, entre outros. São geralmente de grande magnitude, sendo facilmente detectados.

Sob o ponto de vista estatístico os erros grosseiros não podem ser considerados como parte dos dados amostrados. Desta forma deve-se evitar ao máximo os erros grosseiros nas tomadas de dados.

Como os erros grosseiros são considerados fora da população, devem ser estudados e identificados suas causas antes de serem eliminados. Se não houver evidência de distúrbios na observação ou no conjunto de dados, os valores observados não devem ser eliminados somente baseando-se na magnitude dos seus erros.

Normalmente, quando a análise é realizada considerando-se a média das observações, os valores observados que ultrapassam três vezes o desvio padrão são rejeitados. Quando a avaliação da acurácia está sendo realizada baseando-se em um conjunto de dados, a eliminação de erros grosseiros não deve ser realizada de forma automática.

3.8.1.2 Erros sistemáticos

Os erros sistemáticos afetam a observação sempre da mesma maneira e, portanto, são difíceis de serem detectados em observações repetidas. Podem ter o mesmo sinal e valores e são também chamados de *erro constante* ou “*bias*”.

Os erros sistemáticos podem seguir algum padrão, tais como uma refração ou distorção devido à curvatura da terra.

Em aplicações cartográficas, os erros sistemáticos podem ocorrer devido a fatores instrumentais. O método de compensação dos erros sistemáticos baseia-se na sua modelagem matemática. O modelo teórico das observações deve tentar matematicamente compensar todos os erros sistemáticos conhecidos. O erro deve ser removido das observações se seu efeito não estiver incluído no modelo teórico.

3.8.1.3 Erros aleatórios

Segundo DMA (1991) os erros aleatórios provêm de uma combinação acidental e desconhecida de causas fora do controle do observador. São caracterizados por: erros positivos e negativos que ocorrem com igual freqüência; ocorrerem pequenos erros com maior freqüência do que grandes erros; ocorrerem raramente erros extremamente grandes.

Os erros aleatórios são os erros que permanecem após os erros grosseiros e os sistemáticos terem sido removidos. Este tipo de erro, devido à sua característica imprevisível, não pode ser eliminado dos dados observados. Por causa dos erros aleatórios é impossível medir o valor “real” de uma observação.

Ainda que seja impossível prever os erros aleatórios, esses erros possuem características que podem ser expressas matematicamente. Os erros aleatórios de uma observação repetida usualmente apresentam uma distribuição normal de freqüência e, portanto, podem ser descritos pela função de distribuição normal.

Assumindo-se que todos os erros sejam independentes e aleatórios (de acordo com a função de distribuição normal), sua análise possibilita que sejam extraídas informações precisas sobre suas observações. Portanto, a probabilidade de que o erro aleatório não excederá uma certa magnitude pode ser inferida por meio de uma análise da distribuição normal de freqüência deste erro.

3.8.2 Precisão e acurácia

Apesar dos termos *precisão* e *acurácia* serem indistintamente utilizados, há uma diferença conceitual importante entre ambos.

O termo *precisão* relaciona-se com a variação do valor - medido repetidamente sob mesmas condições experimentais - em torno do valor médio observado, enquanto que o termo *acurácia* refere-se à exatidão da medida, ou seja, refere-se a quão próximo está o valor medido do valor real.

A precisão é afetada somente pelos erros aleatórios no processo de medição, enquanto a acurácia é afetada pela precisão, bem como, pela existência de erros desconhecidos ou erros sistemáticos. A diferença entre a precisão e a acurácia está apresentada graficamente na Figura 27.

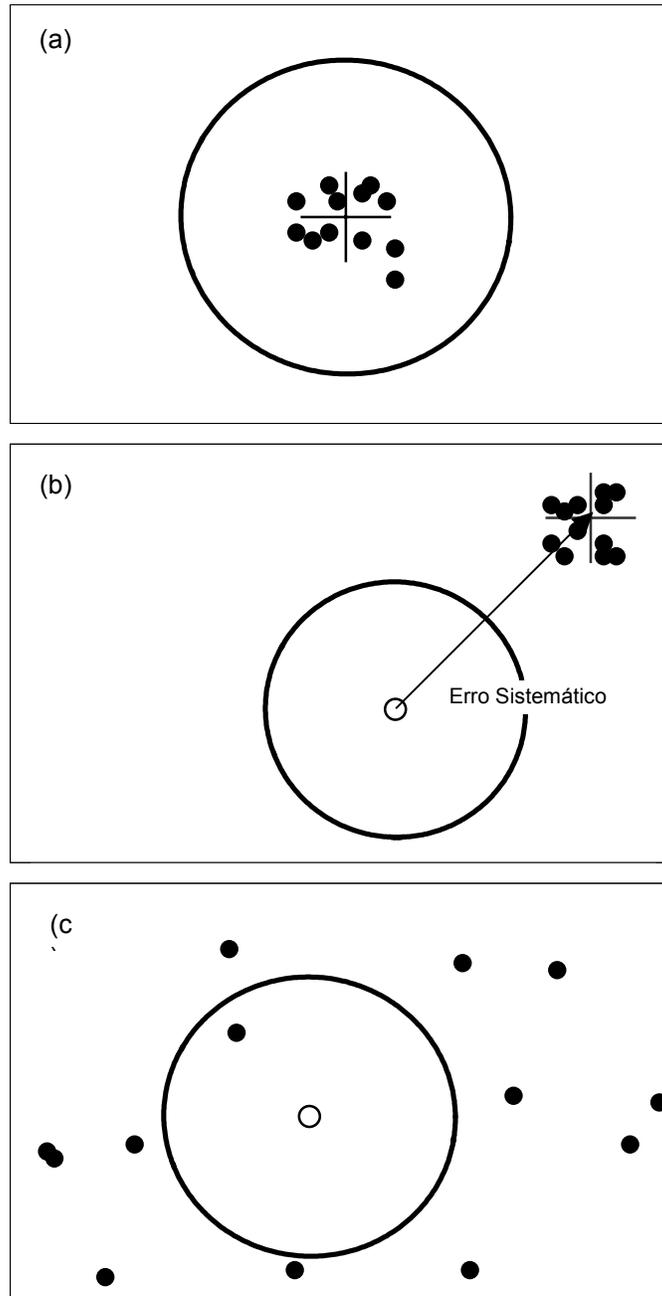


Figura 27 – Diferença entre precisão e acurácia.

A Figura 27(a) mostra que os pontos medidos estão agrupados próximos uns dos outros e, portanto, a medida pode ser tida como altamente precisa. No entanto, a medida também é altamente acurada, pois o centro do grupo de medidas coincide com o centro do círculo (valor real).

Na Figura 27(b) nota-se uma medida com alta precisão, porém de baixa acurácia, já que não está centrada em torno do valor real (centro do círculo), ao invés disso, a média dos valores observados está deslocada por um erro sistemático, ou “*bias*”.

A Figura 27(c) mostra medidas com alta dispersão e longe do valor real sendo, portanto, de baixa precisão e acurácia.

As medidas podem ser precisas e não acuradas ao mesmo tempo, mas só podem ser acuradas se também forem precisas.

A definição básica de uma distribuição de erros assume que os erros sistemáticos e os grosseiros tenham sido removidos e que somente os erros aleatórios permaneçam no conjunto de dados. Contudo, os erros sistemáticos não podem ser removidos a menos que exista uma forma para sua detecção, tal como a comparação do dado com uma informação de controle.

3.8.3 Acurácia absoluta e acurácia relativa

Os termos *acurácia absoluta* e *acurácia relativa* as vezes são usados para a discussão da acurácia de posicionamento vertical e horizontal.

A acurácia absoluta tem o mesmo significado da acurácia em si, ou seja, relaciona-se a quão bem os pontos medidos se compara ao valor real. É determinada pela comparação de um ponto obtido por meio de um produto (mapa, carta ou equipamento) com um ponto de posição conhecida em um sistema geodésico de referência.

O DMA (1991) define *acurácia absoluta horizontal* (absolute horizontal accuracy) como sendo a avaliação estatística de todos os erros aleatórios e sistemáticos encontrados na determinação da posição horizontal de um ponto, com respeito a um sistema geodésico de referência especificado. A acurácia absoluta horizontal é expressa como um erro circular a um nível de 90% de probabilidade.

O erro absoluto inclui todas as incertezas e erros sistemáticos associados ao produto com o sistema de referência adotado.

O DMA (1991) define ”*acurácia relativa horizontal*“ (relative horizontal accuracy) – ponto-a-ponto como sendo a avaliação estatística de todos os erros aleatórios encontrados na determinação da posição horizontal de um ponto com respeito a outro. A acurácia relativa horizontal é expressa como um erro linear sobre uma distância especificada, a um nível de 90% de probabilidade. Observa-se que a acurácia relativa não pode ser traduzida em acurácia absoluta.

Devido à sua natureza, os erros relativos são menores que os absolutos.

3.8.4 Erros unidimensionais

3.8.4.1 Erros lineares

Em um processo de medição o erro é definido como sendo a diferença entre o valor real e o valor medido. O valor real, no entanto, pode nunca ser determinado devido a limitações dos instrumentos ou à falibilidade humana, mas pode ser estimado tomando um número suficientemente grande de medidas. Na determinação do valor de uma quantidade, somente uma medida pode ser necessária quando for suficiente o valor aproximado da quantidade medida. Se, no entanto, a medição da quantidade medida precisar ser mais acurada, deve-se fazer várias repetições da medição. Desta forma, existirá uma certa variação nos valores obtidos nas medições. Aplicando-se a teoria da distribuição normal a essas medidas, o “melhor” valor para a quantidade medida é a média de todos os valores medidos. As diferenças entre a média (μ) e os valores observados são os erros aparentes ou resíduos os quais são usados para estimar a qualidade do processo de medição. Quando os erros residuais (valor medido menos a média dos valores medidos), denotados por x , são aleatoriamente distribuídos em torno da média, a precisão da medição é expressa por um único termo, o desvio padrão (σ). O quadrado do desvio padrão (σ^2) é chamado de variância. Para uma distribuição linear, o desvio padrão é calculado por:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum x^2}{(n-1)}} \quad (1)$$

onde: x = erro residual;

n = número de erros residuais.

3.8.4.2 *Aplicação da função densidade de probabilidade aos erros aleatórios*

A curva de densidade de probabilidade normal (Figura 28) de um número infinito de medidas de uma quantidade desconhecida X é expressa por:

$$p(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(X_i - \mu_x)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

onde: X_i = inésima variável aleatória;

μ_x = média dos valores observados de X

e o desvio padrão,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2}{n}} \quad (3)$$

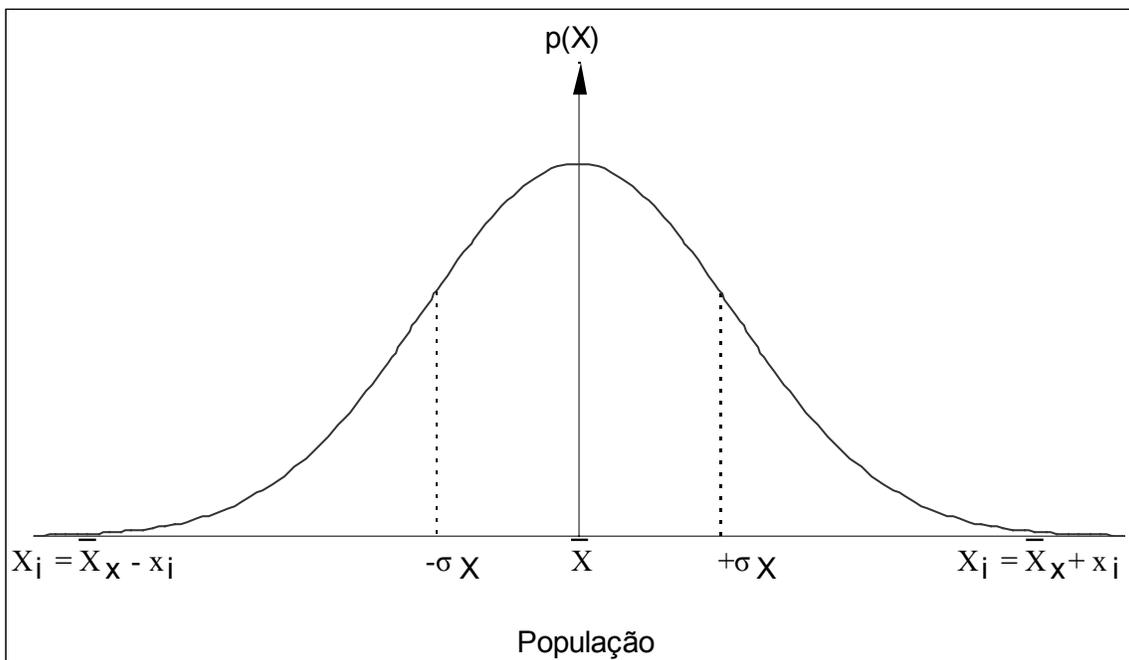
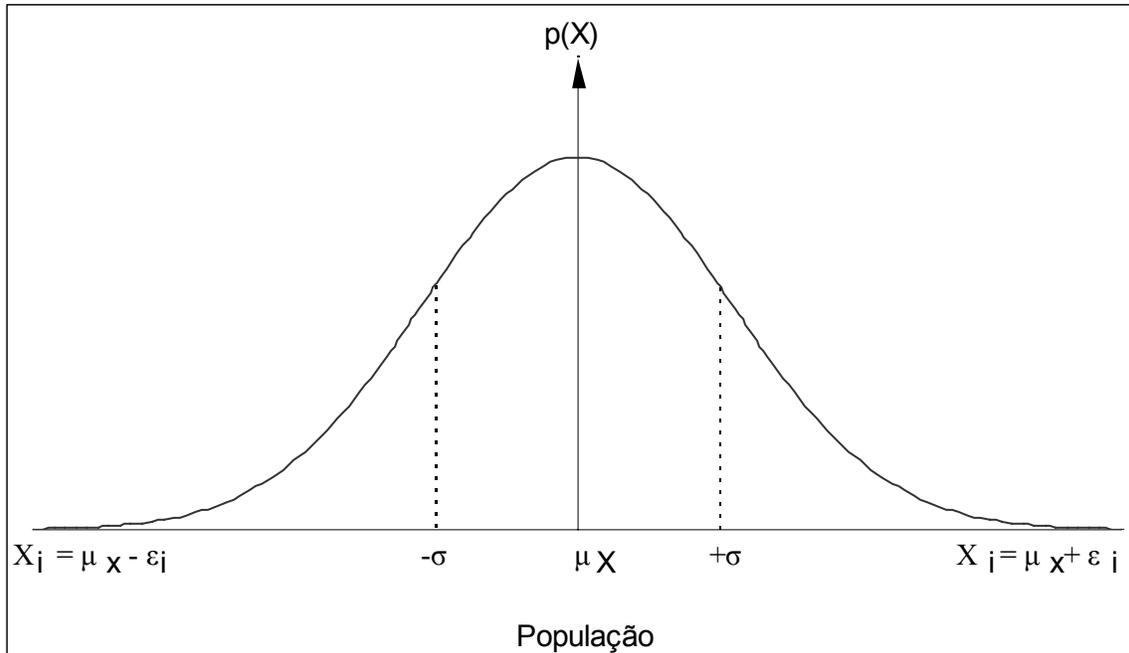


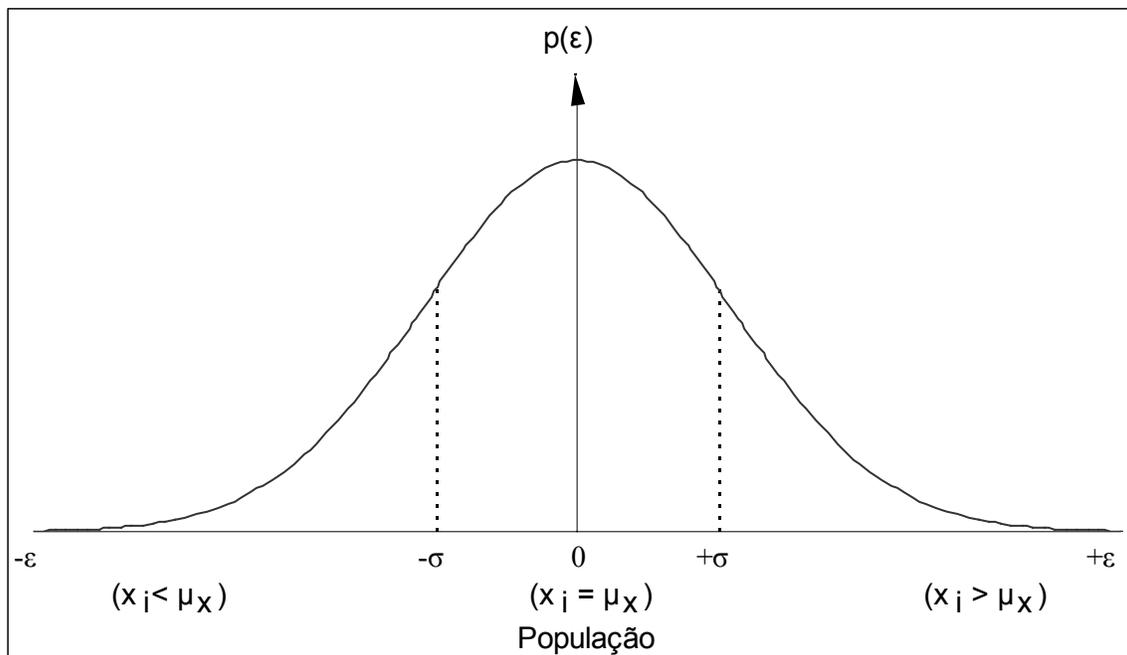
Figura 28 – Curva de densidade de probabilidade normal de valores observados.

A curva de densidade de probabilidade dos erros tem a média zero e é idêntica na forma àquela dos dados observados (Figura 29). A curva é descrita pela função:

$$p(\varepsilon) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

onde: ε = erro real ($\varepsilon = X_i - \mu_X$);

$$\sigma = \text{desvio padrão dos erros} \left(\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \right).$$



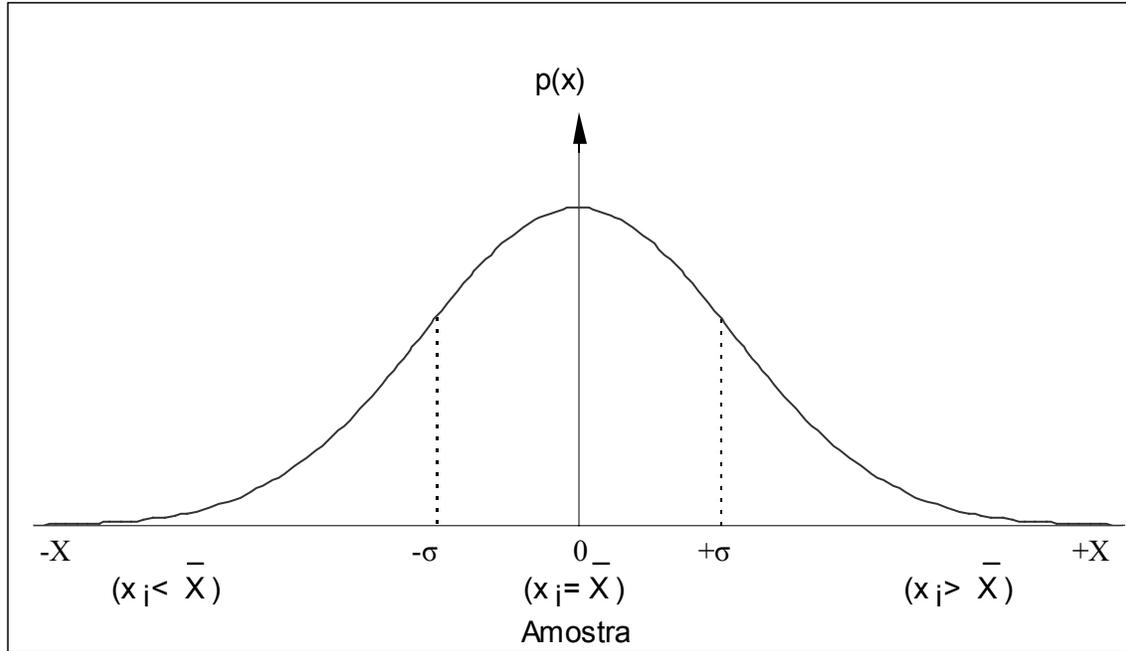


Figura 29 – Curva de densidade de probabilidade normal dos erros.

Como o valor real de uma quantidade não pode ser medido e um número infinito de medidas é impraticável, os valores estimados de um número finito de medidas ou amostras devem ser usados em lugar do valor real e dos parâmetros da função densidade. A confiabilidade da estimativa aumenta com o aumento do número de medidas, em geral, 30 medidas possibilita uma estimativa adequada. O valor mais provável (\bar{X}) aproxima-se do valor real e é determinado pela média aritmética dos valores observados.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (5)$$

O erro real é aproximado pelo resíduo “ x ”, daqui por diante designado por *erro* e definido como a diferença entre o valor observado e o valor mais provável:

$$x = X_i - \bar{X} \quad (6)$$

O desvio padrão calculado de uma amostra (σ_x) é identificado pelo subscrito e calculado por:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}} \quad (7)$$

Este termo às vezes é referido como sendo um erro padrão. A função densidade de probabilidade normal dos erros torna-se:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \quad (8)$$

3.8.4.3 Índices de precisão

Um índice de precisão revela como os erros estão dispersos ou espalhados em torno do zero e reflete a magnitude limite do erro para várias probabilidades. Por exemplo: 50% de todos os erros em uma série de medidas não excedem $\pm 20\text{m}$; 90% não excedem $\pm 49\text{m}$. Apesar de que diferentes erros terem sido apresentados, cada um expressa a mesma precisão do processo de medição (Figura 30). O desvio padrão e o erro médio são dois índices com derivações teóricas. Na prática, têm-se incluído três níveis adicionais de probabilidade os quais são, de fato, índices de precisão:

- erro provável (probable error - PE);
- acurácia padrão de mapa (map accuracy standard- MAS);
- erro três sigmas (three sigma error - 3σ).

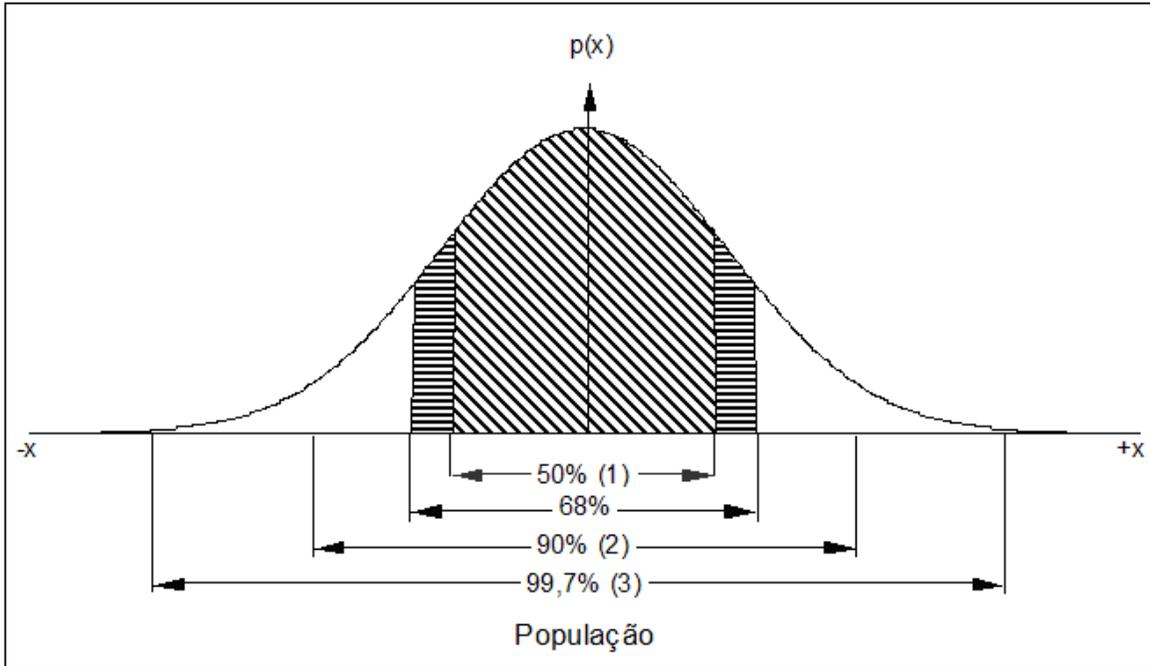


Figura 30 – Distribuição linear normal.

O **desvio padrão** é o mais importante dos índices e tem a probabilidade de:

$$P(x) = \int_{-\sigma_x}^{+\sigma_x} p(x) dx = 0,6827 \quad (9)$$

Ou seja, 68,27% de todos os erros ocorrerá dentro dos limites $\pm \sigma_x$.

O **erro médio** é definido como a média da soma dos valores absolutos de todos os erros:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})}{n} = \frac{\sum |x|}{n} \quad (10)$$

A probabilidade representada pelo erro médio é 0,5751, ou 57,51%. O erro médio é facilmente calculado por meio do desvio padrão por:

$$\eta = 0,7979 \sigma_x \quad (11)$$

O **erro provável** é o erro em uma distribuição linear que não excederá 50% de todos os erros. Especificamente, é igualmente provável que o erro real será maior ou menor que o erro provável. Matematicamente é expresso por:

$$PE = \int_a^b p(x) dx = 0,50 \quad (12)$$

O erro provável pode ser calculado por meio do desvio padrão dado por:

$$PE = 0,6745 \sqrt{\frac{\sum x^2}{n-1}} = 0,6745 \sigma_x \quad (13)$$

A **acurácia padrão de mapa** é comumente interpretada como sendo uma limitação no tamanho do erro, ou seja, 90% dos erros unidimensionais não excederão um dado valor limite. É calculado por:

$$MAS = \int_{a'}^{b'} p(x) dx = 0,90 \quad (14)$$

ou por;

$$MAS = 1,6449 \sigma_x \quad (15)$$

O erro 3σ , como o próprio nome indica, é um erro com três vezes a magnitude do desvio padrão. O erro 3σ é usado, pois se aproxima da certeza – 0,9973 ou 99,73% de probabilidade. Se a probabilidade de um erro linear aleatório estiver fora deste limite, pode-se considerar tal erro como sendo “grosseiro” (blunder).

O significado do desvio padrão com respeito à função de distribuição normal está ilustrado na Figura 30. O eixo vertical ($p(x)$) representa o valor médio da quantidade medida. A função de distribuição do erro normal em torno da média é expressa em unidades de σ , centrada na média. As propriedades da curva de distribuição são:

- a área total sob a curva de distribuição é igual à unidade;
- a área sob a curva entre os limites x_1 e x_2 é igual à probabilidade de um erro ocorrer entre estes limites.

A área sob a curva entre os limites $x_1 = \sigma$ e $x_2 = -\sigma$ é 68,27% da área total. Supondo-se que os erros são normalmente distribuídos, isto significa que há 68,27% de probabilidade de que os erros em uma medição futura, sob as mesmas condições, não excederão o desvio padrão.

O desvio padrão não indica a probabilidade de que um erro de um certo valor irá ocorrer, somente indica que aproximadamente 68% dos erros estarão entre os limites de mais ou menos um sigma.

3.8.5 Erros bidimensionais (elípticos e circulares)

O erro bidimensional é o erro de medição de uma quantidade definida por duas variáveis aleatórias. Considerando-se a posição geográfica real de um ponto referenciado aos eixos coordenados X e Y, cada observação das coordenadas X e Y conterà erros “x” e “y”. Se os erros forem assumidos como *aleatórios* e *independentes* cada erro tem a distribuição densidade de probabilidade de:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}} \quad (16)$$

e;

$$p(y) = \frac{1}{\sigma_y \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}} \quad (17)$$

Considerando-se que a probabilidade de dois eventos independentes ocorrendo simultaneamente é igual ao produto de suas probabilidades individuais, a função densidade de probabilidade bidimensional torna-se:

$$p(x, y) = \frac{1}{2\pi \sigma_x \sigma_y} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right)} \quad (18)$$

re-arranjando os termos;

$$p(x, y) 2\pi \sigma_x \sigma_y = e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \right)} \quad (19)$$

e, portanto;

$$-2 \ln [p(x, y) 2\pi \sigma_x \sigma_y] = \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \quad (20)$$

Para um dado valor de $p(x, y)$, o lado esquerdo da Equação (20) é uma constante K^2 , então:

$$K^2 = \frac{x^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} \quad (21)$$

Para valores de $p(x, y)$ variando entre zero e infinito, tem-se uma família de elipses de mesma densidade de probabilidade formada com os eixos $K \sigma_x$ e $K \sigma_y$.

Quando $\sigma_x = \sigma_y$, a Equação (20) torna-se:

$$-2 \ln[p(x, y) 2\pi \sigma_x \sigma_y] = x^2 + y^2 \quad (22)$$

Para um dado valor de $p(x, y)$, o lado esquerdo da Equação (22) é uma constante que é o quadrado do raio de um círculo de mesma densidade de probabilidade.

A função densidade de probabilidade integrada sobre uma determinada região torna-se a função *distribuição* de probabilidade que fornece a probabilidade de que x e y ocorrerão *simultaneamente* dentro daquela região, ou:

$$P(x, y) = \iint p(x, y) dx dy \quad (23)$$

Contudo, desde que os valores positivos e negativos de “ x ” e “ y ” ocorrerão com igual frequência, os erros podem ser considerados como sendo radiais e designados por “ r ”, onde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$.

3.8.5.1 Erros elípticos

A probabilidade de uma elipse é dada pela função de distribuição:

$$P(x, y) = 1 - e^{-\frac{K^2}{2}} \quad (24)$$

O uso da elipse de erro é dificultado devido a orientação dos eixos e pela propagação dos erros elípticos. Geralmente a elipse é substituída por uma aproximação circular que é de fácil entendimento e uso.

3.8.5.2 Erros circulares

A função distribuição de probabilidade do erro radial expressa a probabilidade que “ r ” seja igual ou menor que o raio R , ou ainda, a probabilidade de que o ponto (x, y) esteja contido num círculo de raio R . Pode ser escrita como:

$$P(R) = \frac{1}{\sigma_x \sigma_y} \int_0^R r e^{-\frac{r^2}{4\sigma_y^2} \left[1 + \frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} \right]} I_0 \left[\frac{r^2}{4\sigma_y^2} \left(\frac{\sigma_y^2}{\sigma_x^2} - 1 \right) \right] dr \quad (25)$$

onde I_0 é uma Função Bessel de ordem zero.

Um caso especial da função $P(R)$ é formado quando $r=R$ e $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_r = \sigma_c$, ou seja:

$$P(R) = P_c = 1 - e^{-\frac{R^2}{2\sigma_c^2}} \quad (26)$$

onde: P_c = função distribuição de probabilidade circular (caso especial de $P(R)$);

R = raio do círculo de probabilidade;

σ_c = erro padrão circular (caso especial de σ_r quando $\sigma_r = \sigma_x = \sigma_y$).

Quando σ_x e σ_y não são iguais, a função $P(R)$ é modificada fazendo-se “a” igual a razão $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, onde σ_x é o menor erro padrão dos dois, então:

$$P(R) = \frac{2a}{1+a^2} \int_0^x e^{-v} I_0(vk) dv \quad (27)$$

onde:

$$x = \frac{R^2}{4\sigma_y^2} \left(\frac{1+a^2}{a^2} \right) \quad (28)$$

$$v = \frac{r^2}{4\sigma_y^2} \left(\frac{1+a^2}{a^2} \right) \quad (29)$$

$$k = \frac{1-a^2}{1+a^2} \quad (30)$$

A Equação (25) pode ser resolvida para diferentes probabilidades ou valores de $P(R)$, representando os índices de precisão da distribuição de erros.

3.8.6 Índices de precisão circular

Os índices de precisão apresentados na Figura 31 são medidas da dispersão dos erros em uma distribuição e representam o erro que é improvável de ser excedido em um

determinado nível de probabilidade. Os índices de precisão circular, consistentes com os índices usados na distribuição linear, preferidos são:

- erro circular padrão (circular standard error - σ_c);
- erro circular provável (circular error probable – CEP)
- erro de posicionamento médio quadrático (mean square positional error – MSPE);
- erro 2drms;
- acurácia circular padrão de mapa (circular map accuracy standard- CMAS);
- erro $3,5\sigma$ (circular near-certainty error - $3,5\sigma$).

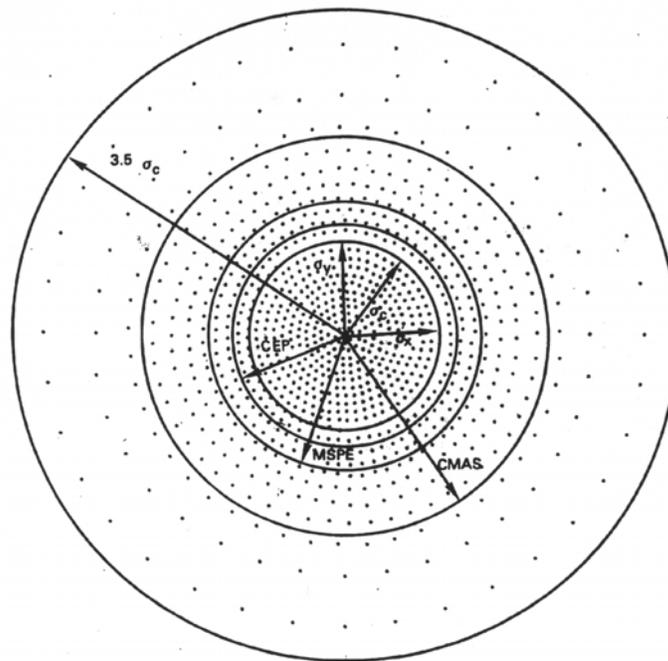


Figura 31 – Distribuição circular normal.

O **erro circular padrão** é obtido resolvendo-se a Equação (31) para P_c quando $\sigma_c = R$, então:

$$P_c = 1 - e^{-\frac{\sigma_c^2}{2\sigma_c^2}} \quad (31)$$

e, portanto,

$$P_c = 0,3935$$

Isto é, espera-se que 39,35% de todos os erros, em uma distribuição circular, não excederá o erro padrão circular.

Para uma distribuição verdadeiramente circular, os erros padrões lineares são iguais e idêntico ao erro padrão circular ($\sigma_x = \sigma_y = \sigma_c$). Quando σ_x e σ_y não forem iguais, a distribuição de erro circular normal pode ser substituída pela distribuição elíptica. A substituição é satisfatória para análise de erros dentro de razões de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ especificadas. O conceito circular deve ser usado com cuidado devido à distorção na distribuição de erros para baixas razões de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$.

O erro padrão circular aproximado é determinado pela Equação (25) tomando-se $P(R)=39,35\%$ e $R=\sigma_c$. Para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,6, o erro padrão circular σ_c pode ser calculado por:

$$\sigma_c \approx (0,5222\sigma_{\min} + 0,4778\sigma_{\max}) \quad (32)$$

ou, aproximando-se ainda mais, por:

$$\sigma_c \approx 0,5000(\sigma_x + \sigma_y) \quad (33)$$

O erro padrão circular, calculado por meio da Equação (33), pode ser convertido para outros índices de precisão circular por um fator de conversão constante dentro da faixa de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,2 e é, então, o método preferido para a obtenção aproximada do erro padrão circular.

O **erro circular provável** é o erro circular que 50% de todos os erros em uma distribuição circular não excederão, ou o valor de R na Equação (23) que torna $P_c=0,5$. O erro circular provável em uma distribuição verdadeiramente circular ($\sigma_x=\sigma_y=\sigma_c$) é calculado por:

$$0,5=1-e^{-\frac{R^2}{2\sigma_c^2}};$$

$$1-0,5=e^{-\frac{R^2}{2\sigma_c^2}};$$

$$\ln 0,5=-\frac{R^2}{2\sigma_c^2};$$

$$R^2=0,69315(2\sigma_c^2);$$

$$R=1,1774\sigma_c; \text{ ou } CEP=1,1774\sigma_c$$

Quando σ_x e σ_y não forem iguais, um CEP aproximado pode ser determinado por meio da Equação (27), tomando-se $P(R)=50\%$ e $R=CEP$.

Para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,3, o CEP pode ser calculado por:

$$CEP \approx (0,6142\sigma_{\min} + 0,5632\sigma_{\max}) \quad (34)$$

Para valores de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 3,0 e 0,2, o CEP pode ser calculado por:

$$CEP \approx (0,4263\sigma_{\min} + 0,6196\sigma_{\max}) \quad (35)$$

O CEP pode ser aproximado, no intervalo de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,2, para:

$$CEP \approx 0,5887(\sigma_x + \sigma_y) \quad (36)$$

Calculado desta forma, o CEP é compatível com o erro padrão circular calculado pela Equação (33) e é, então, o método preferido para a aproximação do erro circular provável dentro do limite especificado.

Embora o conceito de erro circular não ser recomendado para razões de $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ menores que 0,2, pode-se calcular o CEP para razões inferiores por:

Para $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 0,2 e 0,1:

$$CEP \approx (0,2141\sigma_{\min} + 0,6621\sigma_{\max}) \quad (37)$$

Para $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 0,1 e 0,0:

$$CEP \approx (0,0900\sigma_{\min} + 0,6745\sigma_{\max}) \quad (38)$$

Para $\sigma_{\min} = 0,0$:

$$CEP \approx 0,6745\sigma_{\max} \quad (39)$$

O **erro de posicionamento médio quadrático - MSPE** é definido como o raio do círculo de erro igual a $1,4142\sigma_c$ e tem pouca significância em uma distribuição

verdadeiramente circular. No entanto, quando σ_x e σ_y forem aproximadamente iguais, o valor MSPE define o erro no posicionamento geográfico e é calculado por:

Para $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre 1,0 e 0,8:

$$MSPE = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (40)$$

A probabilidade representada pelo MSPE pode ser encontrada resolvendo-se a Equação (27) para P_c , quando $R = MSPE$ e σ_c for aproximado pela Equação (33), então para:

- $\sigma_x = \sigma_y$, $P_c = 63,21\%$;
- $\sigma_x \neq \sigma_y$, $P_c = 64\%$ para $\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,8$;
- $\sigma_x \neq \sigma_y$, $P_c = 77\%$ para $\sigma_{\min}/\sigma_{\max} = 0,3$.

Devido às variações na probabilidade, o MSPE não é recomendado para uso como um índice de precisão quando σ_x e σ_y não são iguais.

O índice **2drms** foi sugerido para uso em navegação e é definido por:

$$2drms = 2\sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (41)$$

Portanto, terá um raio de duas vezes o valor MSPE. O nível percentual para 2drms é de 95,4%. Assim como o MSPE, o índice 2drms varia na probabilidade e pode ser distorcido por grandes erros.

$$2drms = 2,99 \sigma_c \quad (42)$$

para $\sigma_x = \sigma_y$,

A **acurácia circular padrão de mapa** – CMAS é baseada no nível de porcentagem em uso pelo National Map Accuracy Standards, segundo DMA, 1991, que especifica, que não mais do que 10% dos pontos de um mapa excederá um dado erro. Os padrões são geralmente interpretados como sendo um limite no tamanho do erro que não será excedido em 90% dos pontos. Portanto, o índice CMAS é representado pelo valor de R na Equação (27) quando $P_c = 0,90$ e é calculado por:

$$CMAS = 2,1460 \sigma_c \quad (43)$$

ou por;

$$CMAS = 1,8227 CEP \quad (44)$$

O erro $3,5\sigma$ representa a probabilidade circular de 99,78% e, portanto, aproxima-se da certeza em uma distribuição circular. Tem a magnitude de três vezes e meia o erro padrão circular, ou seja:

$$3,5\sigma = 3,5\sigma_c \quad (45)$$

3.8.6.1 *Discussão sobre erros circulares*

A distribuição normal do erro circular é derivada da distribuição bidimensional dos erros. Para aplicações típicas, as variáveis x e y são erros aleatórios definidos como, por exemplo, latitude e longitude convertidas para a unidade métrica. É raro que estes erros

sejam não correlacionados e que seus erros padrão sejam iguais. Como tal, referem-se a uma distribuição elíptica. Para simplificar o cálculo da probabilidade, a distribuição elíptica é convertida para uma distribuição circular equivalente aplicando-se a Equação (46). Esta transformação é adequada para o caso onde o maior erro padrão não exceda a cinco vezes o menor.

$$\sigma_c = 0,5(\sigma_x + \sigma_y) \quad (46)$$

A quantidade (σ_c) é definida como o erro padrão circular e é o parâmetro estatístico básico para uso na estimativa de probabilidade baseada na distribuição circular normal (Tabela 2).

Tabela 2 – Nível de probabilidade e cálculo dos índices de precisão circular.

Símbolo	Probabilidade	Cálculo
σ_c	0,3935	$1,0000\sigma_c$
CEP	0,5000	$1,1774\sigma_c$
MSPE	0,6321	$1,4142\sigma_c$
CMAS	0,9000	$2,1460\sigma_c$
$3,5\sigma_c$	0,9978	$3,5000\sigma_c$

A probabilidade associada ao erro circular é usada da mesma maneira que para os erros lineares. Contudo, ao invés da área sobre a curva de distribuição normal, a probabilidade em uma distribuição circular é função do raio do círculo centrado na média da distribuição do erro (Figura 31).

Um círculo com um raio igual ao erro padrão circular representa 39,35% de probabilidade em uma distribuição circular.

Outros níveis de probabilidades podem ser definidos pelos círculos de raios maiores. Por exemplo, um círculo com raio de 1,1774 vezes o erro padrão circular representa 50% de probabilidade e é conhecido como sendo o erro circular provável (CEP).

O raio pode ser aumentado para descrever um círculo que representa 90% de probabilidade, Este raio, que é aproximadamente duas vezes o erro padrão circular (ou $2,1460\sigma_c$), é conhecido como sendo a acurácia circular padrão de mapa (CMAS).

As probabilidades da distribuição circular podem ser convertidas de um nível a outro por meio dos fatores apresentados na Tabela 3. Por exemplo, a uma posição geográfica é atribuída uma CMAS de 50 metros. O CEP (50% de probabilidade) da posição é estimado pela multiplicação de 50 metros pelo fator 0,5486 e vale 27,4 metros. Isto não significa que há 50% de probabilidade que o erro de 27,4 metros irá ocorrer, mas sim que há uma probabilidade de 50% que o erro não será maior do que 24,7 metros.

Tabela 3 – Fatores de conversão de erros circulares.

	para				
de	39,35%	50,00%	63,21%	90,00%	99,78%
39,35%	1,0000	1,1774	1,4142	2,1460	3,5000
50,00%	0,8493	1,0000	1,2011	1,8227	2,9726
63,21%	0,7071	0,8325	1,0000	1,5174	2,4749
90,00%	0,4660	0,5486	0,6590	1,0000	1,6309
99,78%	0,2857	0,3364	0,4040	0,6131	1,0000

3.9 Agricultura de precisão

De acordo com CAPPELLI (2000) a prática da agricultura de precisão não é recente. Na verdade, conceitualmente, sua utilização é anterior à agricultura hoje praticada, onde a busca do aumento da capacidade de trabalho do homem levou à mecanização e à agricultura em grande escala. A solução hoje utilizada é a de focar grandes áreas e

entendê-las como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação dos insumos - fertilizantes, defensivos, água, etc. O que faz com que, por exemplo, a mesma formulação e/ou quantidade do fertilizante seja utilizada para toda a área, atendendo apenas às necessidades médias e não considerando, dessa forma, as necessidades específicas de cada parte do campo.

O mesmo acontece para os demais insumos, causando como resultado uma lavoura com produtividade não uniforme.

Ao contrário da agricultura tradicional, a chamada agricultura de precisão tenta focar a variabilidade espacial e temporal dos requerimentos de aplicação de insumos durante todo o processo produtivo. Para que ela tenha sucesso é necessário, a utilização de tecnologias avançadas na obtenção e interpretação, da maior quantidade de informações possível sobre o processo.

Sabe-se, que o aumento da eficiência de um sistema, depende da tecnologia utilizada e que, por sua vez, seu bom aproveitamento, depende da quantidade de informação disponível para guiar e sincronizar a aplicação de cada um dos recursos existentes. Pode-se ainda esperar que a eficiência de um processo altamente organizado tenda a aumentar com o decorrer do tempo e à medida que mais informações sobre o mesmo sejam agregadas.

Destacam-se duas motivações que induzem à agricultura de precisão. Uma diz respeito à preservação do meio ambiente, onde deseja-se, que cada vez mais se reduzam as quantidades de fertilizantes e agroquímicos. A outra diz respeito à margem de lucro cada vez menor, que induz a uma diminuição da quantidade de insumos principalmente fertilizantes, agroquímicos e combustíveis necessários ao processo produtivo.

A agricultura de precisão é, sobretudo, uma questão de gestão, ou seja, está apoiada no planejamento e no acompanhamento contínuo do processo produtivo e, principalmente, na disponibilidade de informação para a tomada de decisão.

Ainda não há uma solução única, em qualquer lugar do mundo, que possa ser aplicada a todos os casos. Soluções particulares são necessárias para cada campo e cultura. Isso abre espaço para serviços de consultoria, que devem ter informações acumuladas as quais conduzam à tomada correta de decisões. A questão que surge imediatamente é onde

estas informações estão disponíveis para o nosso sistema de produção e se as mesmas encontram-se disponíveis.

O fiel da balança para a adoção da agricultura de precisão está naturalmente na análise econômica, ou seja, na hipótese da redução dos insumos acompanhada do aumento de produtividade compensará os investimentos tecnológicos e os demais custos que acompanham sua implantação. Respostas a estas questões demandam um grande esforço dos pesquisadores das Universidades e das instituições que compõem o Sistema Nacional de Pesquisa Agropecuária e, ainda, do apoio efetivo dos órgãos de fomento à pesquisa.

As técnicas de agricultura de precisão possibilitam um melhor conhecimento do campo de produção, permitindo, dessa forma, tomada de decisões melhor embasadas. Com isso tem-se uma maior capacidade e flexibilidade para a distribuição dos insumos naqueles locais e no tempo em que são mais necessários, minimizando os custos de produção.

A uniformidade na produtividade é alcançada pela correção dos fatores que contribuem para sua variabilidade obtendo-se, o que resulta em aumento global da produtividade.

A aplicação, localizada dos insumos necessários para sustentar uma alta produtividade contribuem com a preservação do meio ambiente, já que esses insumos são aplicados somente nos locais, quantidades e no tempo necessário.

Diversas são as abordagens possíveis para a implantação da agricultura de precisão. Uma primeira seria a que se baseia, resumidamente, no mapa de produção, na identificação dos fatores causadores da variabilidade da produção e na correção destes fatores através da aplicação dosada e localizada de insumos. Essa abordagem viabiliza-se com a tecnologia do sistema chamado Sistema de Posicionamento Global – GPS, utilizado em tempo real, com correção diferencial ou pós-processada.

Uma segunda abordagem é a da identificação da variabilidade na produção, através de sensoriamento remoto durante o desenvolvimento da cultura, da identificação das causas, através de sensoriamento remoto ou local, e de sua eliminação, através da utilização de máquinas dotadas de sistemas de controle baseados em sensores em tempo real. Nesta abordagem o uso do GPS não é necessariamente obrigatório.

Nenhuma destas correntes são absolutas, ou mesmo, possuem suas tecnologias totalmente dominadas, de forma que combinações podem ser adotadas. A forma de adoção

de agricultura de precisão depende das condições locais, da tecnologia disponível e de seu custo.

O mapa de produção de uma determinada cultura mostra a quantidade do produto colhida a cada ponto georeferenciado da lavoura e visa, primariamente, a determinação da variabilidade espacial da produção.

Hoje, isso é possível graças à disponibilidade da tecnologia do GPS associado a sensores instalados nas colhedoras que determinam a quantidade de grãos colhidos. Apesar do GPS ser considerado um sistema de localização apropriado para a agricultura de precisão, outras tecnologias podem ser utilizadas, tais como: sistemas de posicionamento por rádio, por microondas e a laser. A variabilidade da produção também pode ser conhecida através da interpretação de imagens obtidas por sensoriamento remoto.

O mapa de produção é apenas uma etapa de todo o processo que envolve a agricultura de precisão e representa o efeito combinado de diversas fontes de variabilidade espacial e temporal. Uma parte desta variabilidade pode ser atribuída a fatores que são constantes ou variam lentamente, enquanto outros fatores são transitórios, mudando em sua importância e distribuição espacial e temporal de uma safra para outra.

Ao interpretar um mapa de produção com a finalidade do futuro gerenciamento do campo, deve-se levar em conta principalmente as causas consistentes de variabilidade, já que para as que não persistem no tempo pode-se ter pouco ou nenhum controle. Aqui aparece uma das primeiras dificuldades que consiste na identificação e na separação de cada uma das classes de variabilidade. A próxima dificuldade encontra-se na investigação das causas consistentes. Estas causas só podem ser compreendidas acompanhando-se e analisando-se os possíveis fatores que influenciam na variabilidade durante safras seguidas. Com esta metodologia espera-se resultados a partir da terceira safra e resolução do problema da uniformidade da produção possivelmente após a quinta colheita.

A interpretação do mapa de produtividade é imprescindível para a correção dos fatores de produção que persistem ao longo do tempo, tais como, variação do tipo de solo na área plantada, acidez do solo em locais específicos, deficiência de fertilizantes, ou mesmo, formulação inadequada de N-P-K, locais com falta ou excesso de água, etc. Neste campo a pesquisa tem, ainda, que fornecer muitas respostas.

Segundo LAMPARELLI et. al. (2001) o princípio básico da agricultura de precisão é otimizar a produtividade com menor impacto ambiental possível.

Os principais problemas ambientais da agricultura envolvem a água, o ar, a qualidade do alimento e a depreciação de recursos naturais. Aplicações convencionais de fertilizantes significam aplicações excessivas em algumas áreas do campo e insuficientes em outras, pois uma área nunca é totalmente uniforme, por menor que seja. O acompanhamento e o gerenciamento de um grande volume de informações que variam no espaço e no tempo são fundamentais para se atingir o máximo de rendimento de acordo com as potencialidades do solo e com o mínimo de degradação.

O princípio do manejo localizado de culturas, visando a uma melhor uniformização da produtividade e maior aproveitamento dos recursos na agricultura, vem sendo objeto de estudos há algum tempo. No entanto, somente com a recente disponibilidade de tecnologias que permitem esse gerenciamento localizado é que princípio passou a ser viável. Dentre essas tecnologias, destacam-se os avanços da eletrônica e informática, bem como aquelas ligadas ao geoprocessamento, as chamadas geotecnológicas.

Agricultura de precisão é um termo utilizado para descrever a busca do crescimento em eficiência através do gerenciamento localizado da agricultura. A agricultura de precisão visa a uma otimização na produção, através de aplicação localizada de insumos, reduzindo a contaminação da água e dos alimentos e proporcionando uma melhor cobertura contra a erosão.

Esta tecnologia baseia-se na medição do rendimento, determinação das condições do solo e da cultura, estudo da topografia e de outras informações ambientais, associando-as a uma localização exata. Uma vez georeferenciadas, essas informações podem ser expressas na forma de mapas digitais. As informações contidas nesses mapas podem ser processadas para se determinar, por exemplo, a quantidade de insumos que deve ser aplicada em um determinado local, buscando-se, dessa forma, uma maior uniformização do rendimento da cultura.

A tecnologia envolvida na agricultura de precisão compreende o uso das chamadas geotecnologias, como sistemas de posicionamento global (GPS – Global Positioning System), sistemas informatizados de coleta de dados, sensores remotos locais, orbitais e não-orbitais, programas para tratamento e mapeamento desses dados (Sistemas de

Informação Geográficas – SIG) e sistemas eletrônicos de acionamento e controle de máquinas agrícolas.

Entender e modelar a variabilidade espacial da produtividade das culturas, das propriedades do solo e de qualquer outro parâmetro que possa estar correlacionado com a produtividade é uma das etapas mais importantes para se estabelecer um processo de gerenciamento localizado de insumos.

MOLIN (1997b) menciona que a agricultura de precisão tem como premissa a aplicação localizada dos insumos na dose correta. Para tanto, é imprescindível a correta localização do equipamento de campo para a coleta de dados em tempo real como; produtividade, características físico-químicas do solo ou coleta de amostras para posterior análise. Dessa forma, a determinação da localização do aplicador é crítica para a deposição da correta dose de fertilizantes, corretivos, sementes e defensivos.

MOLIN (1997b), Schueller (1992) apud apresenta os sistemas de localização divididos em três grupos:

- direção e distância;
- triangulação de ondas eletromagnéticas, e
- satélite.

MOLIN (1997b), Shropshire et. al. (1993) e Schueller (1992) consideram hoje o sistema GPS o mais adequado para aplicações agrícolas. O sistema já oferece precisão abaixo de 1 metro em alguns conjuntos de equipamentos e, de maneira geral, na ordem de 1 a 5 metros, com o uso de GPS diferencial, o que é considerado suficiente na maioria das aplicações em agricultura de precisão.

MOLIN (1997a) afirma que a expansão da agricultura de precisão só está sendo possível graças ao surgimento do GPS e do GPS diferencial (DGPS) que permite a administração e o tratamento das áreas dentro de uma propriedade com a individualidade de alguns metros quadrados.

No entanto, MOLIN (1997b) afirma que a prática de agricultura de precisão implica em assumir novos custos com investimentos em equipamentos e instrumentação e que tais equipamentos possuem uma evolução muito rápida, e sua obsolescência pode representar um custo adicional importante.

Pode-se concluir, portanto, que a adoção das técnicas de agricultura de precisão e a utilização dos equipamentos GPS devem ser feitas de forma a não onerar o lucro. Para tanto, deve-se utilizar equipamentos GPS compatíveis com as atividades a serem realizadas no que diz respeito aos custos e precisão de tais equipamentos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

Os principais equipamentos e programas computacionais¹ utilizados neste trabalho estão relacionados nos itens que se seguem.

4.1.1 Geo-referenciamento dos marcos

Os equipamentos utilizados para o geo-referenciamento dos marcos foram:

- Dois receptores geodésicos de dupla frequência, modelo ZxTREME, marca THALES NAVIGATION / ASHTECH, cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 12 canais paralelos de recepção de sinais GPS;
 - 16 Mb de memória em cartão PCMCIA;
 - precisão pós-processada horizontal de 5mm + 1ppm e vertical de 10mm + 1ppm, operando nos métodos estático e rápido-estático;
 - precisão pós processada horizontal de 1cm + 1ppm e vertical de 2cm + 1ppm, operando no método cinemático;
 - saída serial RS-232;
 - aquisição de dados com taxa de 1s; das frequências L1 e L2, bem como os códigos C/A e P.
 - Custo= US\$ 30.000,00

¹ A citação de marcas e modelos de aparelhos, bem como, de softwares e suas versões, não significa necessariamente recomendação por parte do autor.

- Uma estação total, modelo 3305 DR, marca TRIMBLE ZEISS, cujas principais especificações técnicas são:
 - precisão angular: 5'';
 - leitura angular mínima de 1'';
 - precisão linear: 2mm + 1ppm;
 - alcance de medição: 3000m com 1 prisma, 7000m com 3 primas;
 - coletor de memória interna com capacidade de 1500 pontos;
 - saída serial RS-232;
 - bateria interna com autonomia de 9 horas de trabalho contínuo.
 - Custo= US\$ 10.000,00

4.1.2 Receptores de sinal GPS avaliados

Os receptores de sinal GPS escolhidos para serem avaliados foram:

- um GPS Rover, constituído por um receptor modelo AgGPS 132, marca TRIMBLE (Figura 32), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 12 canais paralelos;
 - categoria: mapeamento;
 - precisão submétrica;
 - taxa de coleta de dados de até 10 pontos por segundo;
 - permite transmitir correções diferenciais tipo RTCM-SC 104;
 - receptor e antenas selados;
 - processamento de informações em tempo real;
 - duas portas padrão RS-232;
 - preço FOB U\$ 4.990,00.



Figura 32 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo AgGPS 132, marca Trimble.

O aparelho receptor GPS AgGPS 132 foi incluído entre os aparelhos avaliados, apesar de não ser classificado como de navegação, por ser específico para uso em operações voltadas à área agrícola.

- Um receptor GPS, modelo e-Trex, marca GARMIN (Figura 33), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 12 canais de recepção de sinais GPS;
 - categoria: navegação;
 - memória interna para 500 pontos coletados (*waypoints*);
 - antena interna, não compatível com antena externa;
 - visor de cristal líquido vertical;
 - saída serial RS-232;
 - recebe correção diferencial RTCM / NEMEA;
 - precisão métrica;

— preço FOB US\$ 150,00.



Figura 33 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo eTrex, marca Garmin.

- Um receptor GPS, modelo III Plus, marca GARMIN (Figura 34), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 12 canais de recepção de sinais GPS;
 - categoria: navegação;
 - memória interna para 500 pontos coletados (waypoints);
 - antena articulada e removível, compatível com antena externa;

- visor de cristal líquido com possibilidade de trabalhar na horizontal e vertical;
- saída serial RS-232;
- base cartográfica mundial;
- recebe correção diferencial RTCM / NEMEA;
- precisão métrica;
- preço FOB U\$ 290,00.



Figura 34 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo III Plus, marca Garmin.

- Dois receptores GPS, modelo ProMark 2, marca THALES NAVIGATION / ASHTECH (Figura 35), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 10 canais paralelos para recepção de sinais GPS;
 - 8Mb de memória interna;
 - categoria: topografia;

- precisão pós-processada horizontal de 5mm + 1ppm e vertical de 10mm + 1ppm, operando nos métodos estático e rápido-estático;
- precisão pós-processada horizontal menor que 30cm e vertical menor que 60cm, operando no método cinemático;
- taxa de aquisição de dados mínima de 2s para a frequência L1 e código C/A;
- bateria interna (02 pilhas AA) com autonomia de 6 horas de trabalho contínuo;
- saída serial RS-232;
- preço FOB US\$ 2.250,00.



Figura 35 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo ProMark 2, marca Thales Navigation.

4.1.3 Aparelhos de recepção de sinal GPS utilizados como base

Os aparelhos de recepção de sinal GPS utilizados como bases para a correção diferencial foram:

- GPS Base, constituído por um receptor modelo AgGPS 122 Base, marca TRIMBLE (Figura 36), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 12 canais paralelos;
 - precisão submétrica;
 - taxa de coleta de dados de até 10 pontos por segundo;
 - permite transmitir correções diferenciais tipo RTCM-SC 104;
 - receptor e antenas selados;
 - processamento de informações em tempo real;
 - duas portas padrão RS-232;
 - preço FOB U\$ 3.990,00.



Figura 36 – Aparelho receptor de sinal de GPS, modelo AG122, marca Trimble.

- Um receptor GPS, modelo ProMark 2, marca THALES NAVIGATION / ASHTECH (Figura 35), cujas principais especificações comerciais fornecidas pelo fabricante são:
 - 10 canais paralelos para recepção de sinais GPS;
 - 8Mb de memória interna;
 - precisão pós-processada horizontal de 5mm + 1ppm e Vertical de 10mm + 1ppm, operando nos métodos estático e rápido-estático;
 - precisão pós-processada horizontal menor que 30cm e vertical menor que 60cm, operando no método cinemático;
 - taxa de aquisição de dados mínima de 2s para a frequência L1 e código C/A;
 - bateria interna (02 pilhas AA) com autonomia de 6 horas de trabalho contínuo;
 - saída serial RS-232;
 - preço FOB U\$ 2.250,00.

4.1.4 Computador e programas computacionais

Foram utilizados o computador e os programas computacionais abaixo relacionados:

- Microcomputador portátil, tipo *notebook*, marca Compaq, modelo Presario 1200, com as seguintes especificações:
 - Processador Celeron, frequência de *clock* de 600 MHz;
 - 128 MB de memória RAM;
 - Duas interfaces seriais USB;
 - Uma interface paralela;
 - Sistema operacional Microsoft Windows ME.
- Software DataGeosis, versão 2.3, desenvolvido pela Alezi Teodolini, utilizado para cálculos, desenhos topográficos e transformações geodésicas.
- Software MapSend, desenvolvido pela Magellan, e utilizado para receber os dados armazenados nos aparelhos receptores GPS da linha Thales Navigation.
- Software GPS TrackMaker, versão 11.6, desenvolvido por Odilon Ferreira Junior e utilizado para receber os dados armazenados nos aparelhos receptores GPS da linha Garmin.
- Software Ashtech Solutions, versão 2.6, desenvolvido pela Thales Navigation, utilizado para processamento de dados dos GPS, planejamento das missões em trabalhos de campo, exportação e importação de dados no formato RINEX e transformações de coordenadas.

4.2 Métodos

4.2.1 Local para a realização das avaliações

O local para a avaliação dos testes para a avaliação dos aparelhos selecionados foi definido procurando atender a maioria das recomendações de BUENO (1995), segundo o qual a área deve:

- possuir horizontes não obstruídos por árvores e ser favorável à utilização de equipamentos convencionais, tais como teodolitos e estações totais;
- estar afastada de estruturas que possam causar reflexão de sinais e gerar o fenômeno do multicaminhamento, tais como, automóveis, edifícios, espelhos d'água, etc;
- ter solo adequado para implantação de marcos;
- assegurar a integridade dos marcos para posteriores observações.

Neste sentido, escolheu-se como local para a alocação dos marcos um dos beirais no Posto de Informações da Unicamp, localizado próximo à Guarita 05. A escolha deste local foi devido à sua privilegiada localização, com ampla visibilidade do céu, ausência de obstáculos, existência de rede de energia elétrica e ainda pela possibilidade da instalação de equipamentos (principalmente microcomputadores) em um local protegido.

No beiral da cobertura do Posto de Informações, marcaram-se os marcos para serem geo-referenciados, num total de sete marcos. Cinco deles se encontram alinhados e distantes cerca de 0,5 metro um do outro e foram denominados PE1 a PE5. Os dois outros marcos, denominados TC1 e TC2, foram posicionados na lateral adjacente da cobertura do Posto de Informações. A finalidade destes outros dois marcos foi para o posicionamento das antenas dos equipamentos GPS base durante a realização dos testes.

A Figura 37 e a Figura 38 mostram a marcação dos marcos para serem geo-referenciados. A Figura 39 apresenta um diagrama esquemático do posicionamento dos marcos.



Figura 37 – Marcação dos marcos para o geo-referenciamento.



Figura 38 - Detalhe da identificação dos marcos geo-referenciados.

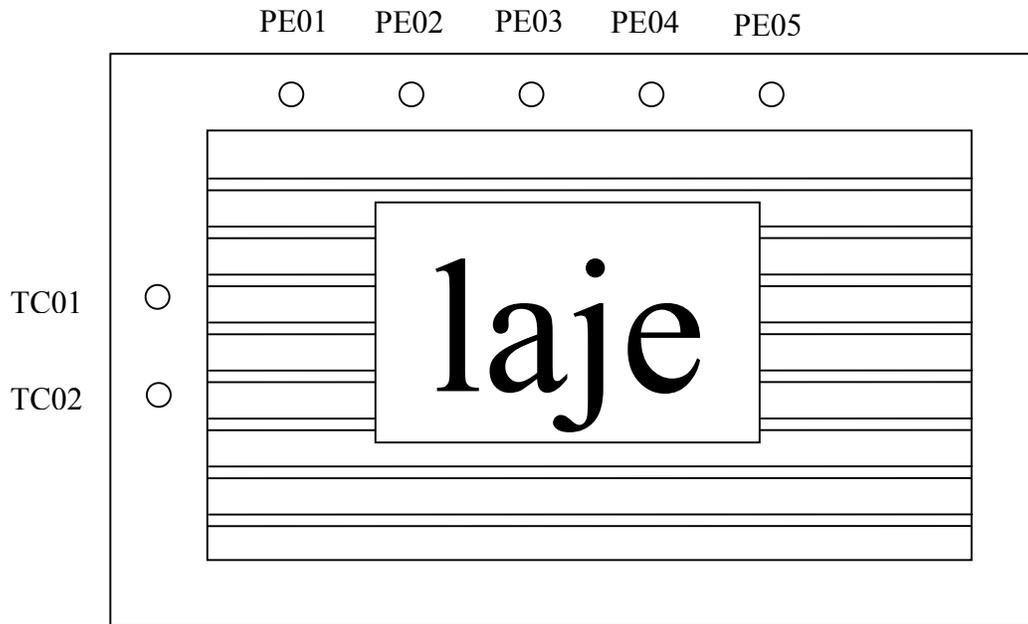


Figura 39 – Disposição dos marcos georreferenciados.

Os aparelhos alocados em cada um dos marcos estão relacionados na Tabela 4. A Figura 40 e a Figura 41 mostram, respectivamente, os aparelhos locados nas bases e os aparelhos sob avaliação locados nos marcos georreferenciados.



Figura 40 – Alocação das bases.



Figura 41 – Alocação dos aparelhos sob análise nos marcos geo-referenciados.

Tabela 4 – Alocação dos aparelhos nos marcos.

Marco	Aparelho	Modo de Operação	Nº de Série
TC01	AG 122	base	0220154551
TC02	ProMark 2	base	PM20304773
PE01	ProMark 2	sem antena e sem correção	PM20222058
PE02	ProMark 2	1 - com antena e sem correção 2 - com antena e com correção	PM20225008
PE03	III Plus	1 - sem correção 2 - com correção	92108705
PE04	eTrex	1 - sem correção 2 - com correção	Sem número
PE05	AgGPS 132	1 - sem correção 2 - com correção	0224007496

4.2.2 Geo-referenciamento dos marcos

Inicialmente fez-se um estudo visando identificar os marcos da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas e da Rede de Referência Cadastral da Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP. A Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas possui 41 marcos, sendo que dois deles se situam no interior do Campus da Unicamp (Cidade Universitária “Zeferino Vaz”). A Rede de Referência Cadastral da Unicamp é constituída por 11 marcos que foram obtidos a partir dos marcos da rede municipal.

Como o objetivo era alocar os marcos geo-referenciados com a maior precisão possível, adotou-se como estratégia, considerar como referência o marco da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas situado no “Observatório a Olho Nu” da Unicamp. Neste local foi instalado um equipamento de GPS, marca Thales Navigation, modelo Z-Xtreme, de dupla frequência, portadora L1 e L2, operando com pós-processamento. A Figura 42, Figura 43 e Figura 44 mostram, respectivamente, a instalação do equipamento, a antena, e o receptor de GPS Z-Xtreme.



Figura 42 – Instalação do equipamento Z-Xtreme no marco da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas.



Figura 43 – Antena do equipamento Z-Xtreme instalada no marco da Rede de Referência Cadastral Municipal de Campinas.



Figura 44 – Equipamento de GPS Z-Xtreme

Os marcos foram geo-referenciados utilizando-se o método “*stop and go*” com a permanência, do segundo receptor Z-Xtreme, de 20 minutos em cada marco, devidamente no prumo. Conforme ilustra a Figura 45 e a Figura 46.



Figura 45 – Geo-referenciamento dos marcos.



Figura 46 –Detalhe do de um dos marcos geo-referenciados.

4.2.3 Tomada de dados

4.2.3.1 Sem correção diferencial

A obtenção dos dados experimentais, com os aparelhos operando sem correção diferencial, foi realizada em 12 de junho de 2003.

Os dados foram tomados no período compreendido entre as 10:00 horas e as 22:00 horas com intervalos de 30 minutos entre as medições.

Durante o intervalo entre as medições os aparelhos eram desligados com o intuito de obter nova posição em relação ao novo posicionamento dos satélites disponíveis, sendo ligados 5 minutos antes da tomada de dados. Este procedimento é denominado “*hot start*”

já que os aparelhos estão próximos, ou no presente caso, na mesma posição da última tomada de dados.

As leituras de todos aparelhos foram realizadas no mesmo instante, procurando, desta forma, uma igualdade de condições experimentais.

Os dados experimentais obtidos com os aparelhos eTrex, III Plus e ProMark 2 foram inicialmente registrados em suas próprias memórias e posteriormente descarregados via software para o computador.

Os dados experimentais obtidos com o aparelho AgGPS 132 foram anotados e posteriormente inseridos no computador para processamento e análise. Este procedimento foi necessário já que o aparelho não possui capacidade para armazenamento de dados.

Para todos os aparelhos, em cada medição foi efetuada apenas uma tomada de dados de posicionamento.

4.2.3.2 Com correção diferencial

Os testes com os aparelhos operando com correção diferencial em tempo real e o aparelho com correção diferencial pós-processada foram realizados no dia 13 de junho de 2003.

Os aparelhos AgGPS 132, eTrex e III Plus operaram com correção diferencial realizada em tempo real. O sinal de correção diferencial foi transmitido via cabo entre a estação GPS base e o aparelho sob teste.

Com os aparelhos eTrex e III Plus, a cada medição foi registrado, nas respectivas memórias, apenas um valor corrigido. No caso do aparelho AgGPS 132 apenas um valor a cada medição já corrigida foi anotado.

Com respeito ao aparelho ProMark 2, que se utilizou da técnica “*stop and go*”, cada tomada de dados durava 15 segundos sobre o marco, a um intervalo de gravação igual a 1 segundo, ou seja, a cada medição foram registrados 15 valores, que posteriormente foram utilizados no software de pós processamento. Este software “*Ashtech Solutions*” utiliza do método de diferenciação para eliminar os erros dos sistema GPS.

4.2.4 Processamento dos dados

A etapa correspondente ao processamento dos dados contempla sua transferência para o computador, a transformação dos sistemas de coordenadas, o cálculo dos índices de precisão e acurácia e a análise estatística dos resultados.

4.2.4.1 Transferência para o computador

Para a transferência dos dados experimentais dos aparelhos modelos e-Trex e III Plus para o computador foi utilizado o software *Track Maker*. Os aparelhos foram conectados ao microcomputador por meio de cabos seriais.

A utilização de um software para transferência dos dados foi necessária para obtenção de uma maior resolução nos dados de posicionamento, alcançando-se a resolução de milésimos de segundo para os valores registrados nas memórias dos aparelhos, dado que, nos indicadores dos aparelhos, os valores eram visualizados com a resolução de apenas um décimo de segundo, conforme o fabricante.

Para o modelo ProMark 2, operando no modo absoluto (sem correção diferencial), foi usado o software *MapSend* para transferência, através de cabo serial, dos dados de posicionamento para o microcomputador. Também neste caso, a utilização de um software para transferência dos dados permitiu uma melhora na resolução dos dados, passando de uma resolução de segundos de graus, no indicador do aparelho, para uma resolução de décimos de segundo.

Para o aparelho ProMark 2, operando no modo diferencial pós-processado, conforme informado pelo fabricante, foi utilizado o software “*Ashtech Solutions*” para transferência, através de cabo serial, dos dados de posicionamento para o microcomputador. A utilização deste software permite, após o processamento das correções diferenciais, a obtenção das coordenadas com resolução de milésimos de segundo de grau.

4.2.4.2 Transformação dos sistemas de coordenadas

Os dados experimentais foram coletados na forma de coordenadas geodésicas (latitudes e longitudes), tomando como referência o sistema WGS-84 e, transferidos para o microcomputador sem qualquer transformação de coordenadas.

As coordenadas geodésicas normalmente não são utilizadas para representações gráficas, por se tratarem de coordenadas curvilíneas, sendo assim, utilizou-se o software *DataGeosis*, para se transformar as coordenadas geodésicas em coordenadas plano retangulares (N,E), no sistema de projeção denominado UTM (Universal Transversa de Mercator). Nestas transformações, manteve-se o referencial WGS-84, possibilitando assim a representação gráfica dos pontos experimentais. Os dados representados nas coordenadas planas, no sistema UTM, apresentam resolução na ordem de milímetros.

4.2.4.3 Cálculo da coordenada média

A coordenada média plano-retangular no sistema de projeção UTM (WGS/84) foi calculada por meio da Equação 1 e da Equação 2.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad \text{Equação 1}$$

Onde: \bar{X} = média do valor Este da coordenada [m];
 X_i = inésima medição do valor Este da coordenada [m];
 n = número total de medições.

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n} \quad \text{Equação 2}$$

Onde: \bar{Y} = média do valor Norte da coordenada [m];
 Y_i = inésima medição do valor Norte da coordenada [m];
 n = número total de medições.

4.2.4.4 Índices de acurácia

A definição básica de uma distribuição de erros assume que os erros sistemáticos e os grosseiros tenham sido removidos e que somente os erros aleatórios permaneçam no conjunto de dados. Contudo, os erros sistemáticos não podem ser removidos a menos que exista uma forma para sua detecção, tal como a comparação do dado com uma informação de controle. Uma forma alternativa para a obtenção da distribuição de erros é realizar o cálculo da distribuição em torno do valor médio dos erros.

O erro absoluto tem o mesmo significado da acurácia em si, ou seja, relaciona-se a quão bem as coordenadas medidas de um ponto se comparam ao seu real valor. O erro absoluto é determinado pela comparação das coordenadas medidas de um ponto, obtida por meio de um aparelho GPS, com as coordenadas reais deste mesmo ponto, em um sistema geodésico de referência.

De acordo com o apresentado no item 3.8.2 a acurácia de posicionamento Este e Norte foi calculada e apresentada como um erro de posicionamento em cada uma destas direções. Os erros de posicionamento Este e Norte, bem como o erro radial resultante foram definidos e calculados conforme o item 4.2.4.4.1.

A combinação destes erros em um único erro absoluto de posicionamento define o índice de acurácia e está definido e calculado conforme o item 4.2.4.4.2.

4.2.4.4.1 Erro radial de posicionamento

Os erros radiais de posicionamento (Equação 5) foram obtidos a partir dos erros de posicionamento referente aos valores Este e Norte da coordenada, calculados em relação ao valor da coordenada média, de acordo com a Equação 3 e a Equação 4.

$$x = X_i - \bar{X} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: x = diferença entre a i -ésima medição do valor Este da coordenada e a média do valor Este da coordenada [m].

$$y = Y_i - \bar{Y} \quad \text{Equação 4}$$

Onde: y = diferença entre a inésima medição do valor Norte da coordenada e a média do valor Norte da coordenada [m].

$$ER = \sqrt{x^2 + y^2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde: ER = Erro Radial de posicionamento [m].

4.2.4.4.2 Erro absoluto de posicionamento

O erro absoluto de posicionamento foi obtido calculando-se a distância entre o marco geo-referenciado e a média das coordenadas medidas, de acordo com a Equação 6.

$$EA = \sqrt{(X_r - \bar{X})^2 + (Y_r - \bar{Y})^2} \quad \text{Equação 6}$$

Onde: EA = Erro absoluto de posicionamento [m].

4.2.4.5 Índices de precisão circular

Como já foi visto no item 3.8.6, os índices de precisão são medidas da dispersão dos erros em uma distribuição e representam o erro que é improvável de ser excedido em um determinado nível de probabilidade. Os índices de precisão circular, consistentes com os índices usados na distribuição linear, preferidos são:

- erro circular padrão (σ_c);
- erro circular provável (CEP)
- erro de posicionamento médio quadrático (MSPE);
- erro 2drms;
- acurácia circular padrão de mapa (CMAS);
- erro $3,5\sigma$ ($3,5\sigma$).

O erro de posicionamento médio quadrático (MSPE) e o erro 2drms não são adequados para serem utilizados como índices de precisão para fins de comparação quando

apresentarem uma variação na relação $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, ou seja quando os erros se afastarem de uma distribuição circular, dado que o nível de probabilidade, neste caso, apresenta uma faixa muito ampla de variação.

Desvio padrão linear

Para a obtenção dos índices de precisão foi necessário o cálculo prévio do desvio padrão dos valores medidos Este e Norte do par coordenado.

O desvio padrão calculado a partir das medições dos valores Este da coordenada foi obtido por meio da Equação 7, enquanto o desvio padrão das medições dos valores Norte da coordenada foi obtido por meio da Equação 8.

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: σ_x = desvio padrão linear do valor Este da coordenada [m].

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde: σ_y = desvio padrão linear do valor Norte da coordenada [m].

4.2.4.5.1 Erro circular padrão (σ_c)

O erro circular padrão, cujo valor espera-se que 39,35% de todos os erros em uma distribuição circular não exceda, foi aproximado por meio da Equação 10.

Para que este cálculo pudesse ser realizado, inicialmente foi verificada a relação apresentada na Equação 9. Esta relação deve permanecer entre 0,2 e 1,0 para que o erro padrão circular possa ser convertido em outros índices de precisão circular por um fator de conversão constante.

$$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$$

Equação 9

Onde: σ_{\min} = menor valor obtido entre σ_x e σ_y ;

σ_{\max} = maior valor obtido entre σ_x e σ_y .

$$\sigma_c \approx 0,5000(\sigma_x + \sigma_y)$$

Equação 10

4.2.4.5.2 Erro circular provável (CEP)

O erro circular provável indica o valor para o qual 50% de todos os erros em uma distribuição circular não deverão exceder. Pode ser aproximado, no intervalo de $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ entre 0,2 e 1,0 pela Equação 11.

O CEP foi obtido por meio da Equação 11, já que calculado desta forma é compatível com o erro padrão circular calculado pela Equação 10.

$$CEP = 1,1774 \sigma_c$$

Equação 11

4.2.4.5.3 Acurácia circular padrão de mapa (CMAS)

A acurácia circular padrão de mapa, cujo termo traduzido da língua inglesa possui a palavra “acurácia” no nome, na verdade é um índice de precisão e não de acurácia já que é proveniente de uma medida de dispersão em torno de um valor médio.

A acurácia padrão de mapa, comumente interpretada como sendo uma limitação no tamanho do erro, ou seja, 90% dos erros unidimensional não excederão um dado valor limite, foi calculada por meio da Equação 12.

$$CMAS = 2,1460 \sigma_c$$

Equação 12

4.2.4.5.4 Erro $3,5\sigma_c$

O erro $3,5\sigma$, como foi visto no item 3.8.6, representa a probabilidade circular de 99,78% e, portanto, aproxima-se da certeza em uma distribuição circular. Tem a magnitude de três vezes e meia o erro padrão circular e foi calculado por meio da Equação 13

$$3,5000\sigma_c$$

Equação 13

4.2.4.6 *Análises estatísticas*

Calculado o erro radial de posicionamento de cada aparelho sob avaliação, realizaram-se testes estatísticos de hipóteses, segundo LEVIN (1997), para avaliar diferenças no desempenho dos aparelhos.

4.2.4.6.1 Comparação de desempenho de cada um dos aparelhos operando com e sem correção diferencial

A comparação do desempenho de cada aparelho operando sem correção diferencial e com correção diferencial, no que diz respeito ao erro radial médio, foi realizada por meio do teste de comparação de médias denominado teste “t”, de acordo com LEVIN (1997).

Os testes foram realizados adotando-se um nível de significância estatística de 5% e as hipóteses estabelecidas foram:

Hipótese nula: não há diferença entre as médias dos erros radiais de posicionamento obtidas com os aparelhos operando sem e com correção diferencial.

Hipótese experimental: há diferença entre as médias dos erros radiais de posicionamento obtidas com os aparelhos operando sem e com correção diferencial.

A hipótese nula foi rejeitada em favor da hipótese experimental sempre que o valor da estatística “t” calculada foi maior do que a estatística “t” tabelada ao nível de 5%.

Para a realização destes testes estatísticos foi utilizada a planilha eletrônica *Excel* e o software *WinSTAT for Excel* versão de demonstração.

4.2.4.6.2 Comparação do desempenho dos aparelhos em um mesmo modo de operação

Com a intenção de identificar diferenças de desempenho estatisticamente significativas entre os aparelhos em um mesmo modo de operação, realizaram-se análises de variância segundo LEVIN (1997).

Esta análise foi realizada com os aparelhos sob avaliação operando sem correção diferencial e com os aparelhos operando com correção diferencial. Em ambos os casos as análises foram realizadas considerando-se os erros radiais de posicionamento.

Para a realização das análises de variância consideraram-se as seguintes hipóteses:

Hipótese nula: não há diferença entre as médias dos erros radiais de posicionamento obtidas com os aparelhos testados.

Hipótese experimental: há diferença entre as médias dos erros radiais de posicionamento obtidas com os aparelhos testados.

A hipótese nula só pode ser rejeitada em favor da hipótese experimental nos casos em que a estatística “F”, obtida a partir dos dados experimentais, for maior ou igual à tabelada em função dos graus de liberdade do experimento e do nível de significância adotado. Para decidir se a diferença amostral obtida foi estatisticamente significativa – resultado de uma real diferença entre as populações e não apenas de erro amostral – estabeleceu-se um nível de significância de 5%, ou seja, estabeleceu-se o nível de 5% de probabilidade para que a hipótese nula pudesse ser rejeitada com confiança.

De acordo com LEVIN (1997), no caso onde a hipótese nula foi rejeitada, para comparação múltipla das médias, aplicou-se o teste de Tukey com a finalidade de identificar onde se situam as diferenças.

O teste de Tukey foi aplicado para um nível de significância estatística de 5%.

Para a realização destas análises foi utilizada a planilha eletrônica *Excel* e o software *WinSTAT for Excel* versão de demonstração.

Este procedimento foi utilizado tanto para os aparelhos operando sem correção diferencial, quanto para os aparelhos operando com correção diferencial.

4.2.4.7 Índices de comparação

Para facilitar a tomada de decisão quanto à escolha dos equipamentos e do modo de operação, a ser utilizado em uma determinada aplicação, foram criados dois índices baseados no custo e no desempenho apresentados pelos aparelhos.

O primeiro índice, denominado IEA, foi estabelecido como sendo o produto do custo pelo erro absoluto, apresentado por cada um dos aparelhos operando sem e com correção diferencial. Desta forma, quanto maior o custo ou maior o erro, maior o índice e, portanto, pior a classificação do respectivo aparelho.

O erro absoluto foi escolhido para a composição do IEA devido ao fato de estar associado à acurácia apresentada pelos aparelhos. Ressalta-se que quanto maior for o erro absoluto, menor será a acurácia e vice-versa.

O segundo índice, denominado $I\sigma_c$, foi estabelecido como sendo o produto do custo pelo erro circular padrão, apresentado por cada um dos aparelhos operando sem e com correção diferencial. Desta forma, quanto maior o custo ou maior o erro, maior o índice e, portanto, pior a classificação do respectivo aparelho.

O erro circular padrão foi escolhido para a composição do $I\sigma_c$ devido a estar associado à precisão apresentada pelos aparelhos. Ressalta-se que quanto maior for o erro circular padrão, menor será a precisão e vice-versa.

No caso dos aparelhos operando com correção diferencial, tanto em tempo real, quanto pós-processada, não foram computados nos custos do aparelho os equipamentos utilizados como base, nem os equipamentos utilizados para transmissão dos sinais de correção.

Deve-se observar, ainda, que os índices aqui estabelecidos não devem ser considerados como os únicos parâmetros para a definição da escolha de um aparelho em função da aplicação pretendida. Outras características devem ser levadas em consideração no processo da escolha do aparelho adequado, tais como: funcionalidade, portabilidade, operação com baterias, memórias para armazenamento de dados, entre outras.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Marcos geo-referenciados

Os marcos geo-referenciados apresentados na Tabela 5, foram obtidos no dia 11 de junho de 2003, conforme a metodologia apresentada no item 4.2.2.

Os valores das coordenadas dos marcos geo-referenciados estão apresentados na Tabela 5 e estão representados com o sinal negativo indicando, respectivamente, a latitude sul e a longitude oeste.

Tabela 5 – Marcos geo-referenciados no sistema de coordenadas geodésicas (WGS/84).

MARCOS	COORDENADAS GEODÉSICAS	
	Latitude	Longitude
BAOB	- 22° 48' 54,14760''	- 47° 03' 27,65470''
TC01	- 22° 50' 02,10629''	- 47° 03' 29,19054''
TC02	- 22° 50' 02,09963''	- 47° 03' 29,20300''
PE01	- 22° 50' 02,15197''	- 47° 03' 29,14288''
PE02	- 22° 50' 02,16966''	- 47° 03' 29,15375''
PE03	- 22° 50' 02,18763''	- 47° 03' 29,16483''
PE04	- 22° 50' 02,20334''	- 47° 03' 29,17402''
PE05	- 22° 50' 02,22011''	- 47° 03' 29,18459''

A Tabela 6 apresenta os marcos geo-referenciados em coordenadas plano-retangulares no sistema de projeção UTM, segundo o referencial geodésico WGS/84.

Tabela 6 – Marcos geo-referenciados em coordenadas plano-retangulares no sistema de projeção UTM (WGS/84).

MARCOS	COORDENADAS UTM	
	E [m]	N [m]
BAOB	288807,438	7475483,975
TC01	288792,781	7473392,738
TC02	288792,423	7473392,938
PE01	288794,160	7473391,351
PE02	288793,858	7473390,803
PE03	288793,549	7473390,246
PE04	288793,294	7473389,759
PE05	288793,000	7473389,239

5.2 Desempenho sem correção diferencial

A obtenção dos dados experimentais, com os aparelhos operando sem correção diferencial, foi realizada em 12 de junho de 2003, de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2.3.

A transformação de coordenadas, os testes estatísticos e o cálculo dos índices de desempenho dos aparelhos foram realizados de acordo com a metodologia apresentada no item 4.2.4.

Para melhor caracterização dos erros radiais de posicionamentos, obtidos com os aparelhos receptores de sinal GPS operando sem correção diferencial, foram elaborados gráficos que os representam em função do horário de sua obtenção.

Com a finalidade de visualizar a dispersão dos erros radiais de posicionamento em função do horário de sua obtenção e poder realizar uma comparação visual com os índices de precisão, foram elaborados gráficos polares para cada um dos aparelhos avaliados.

Para uma visualização simultânea da dispersão dos pontos em torno de seu valor médio e da magnitude do erro absoluto foram elaborados gráficos cartesianos para cada um dos aparelhos avaliados. Nestes gráficos as escalas dos eixos foram mantidas inalteradas para possibilitar uma comparação visual.

5.2.1 AgGPS 132 operando sem correção

5.2.1.1 *Dados experimentais*

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132 foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE05, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 7 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando sem correção diferencial.

Tabela 7 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando sem correção diferencial.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:00	-22°50'02,2566''	-47°03'29,1437''	288794,179	7473388,132
10:30	-22°50'02,2578''	-47°03'29,1504''	288793,991	7473388,093
11:00	-22°50'02,2619''	-47°03'29,1582''	288793,770	7473387,961
11:30	-22°50'02,2709''	-47°03'29,1630''	288793,637	7473387,682
12:00	-22°50'02,2763''	-47°03'29,1702''	288793,434	7473387,513
12:30	-22°50'02,2853''	-47°03'29,1785''	288793,199	7473387,233
13:00	-22°50'02,2883''	-47°03'29,1851''	288793,012	7473387,138
13:30	-22°50'02,2896''	-47°03'29,1894''	288792,892	7473387,099

14:00	-22°50'02,3064''	-47°03'29,1768''	288793,259	7473386,587
14:30	-22°50'02,3129''	-47°03'29,1630''	288793,655	7473386,390
15:00	-22°50'02,3406''	-47°03'29,1636''	288793,650	7473385,540
15:30	-22°50'02,3544''	-47°03'29,1624''	288793,690	7473385,116
16:00	-22°50'02,3525''	-47°03'29,1528''	288793,963	7473385,176
16:30	-22°50'02,3544''	-47°03'29,1371''	288794,409	7473385,126
17:00	-22°50'02,3418''	-47°03'29,1575''	288793,822	7473385,506
17:30	-22°50'02,3298''	-47°03'29,1671''	288793,543	7473385,871
18:00	-22°50'02,3339''	-47°03'29,1756''	288793,305	7473385,739
18:30	-22°50'02,1930''	-47°03'29,1102''	288795,109	7473390,102
19:00	-22°50'02,2013''	-47°03'29,1335''	288794,446	7473389,835
19:30	-22°50'02,2080''	-47°03'29,1491''	288794,004	7473389,625
20:00	-22°50'02,2097''	-47°03'29,1624''	288793,628	7473389,565
20:30	-22°50'02,2116''	-47°03'29,1648''	288793,560	7473389,508
21:00	-22°50'02,2170''	-47°03'29,1653''	288793,546	7473389,342
21:30	-22°50'02,2158''	-47°03'29,1648''	288793,562	7473389,379
22:00	-22°50'02,2128''	-47°03'29,1654''	288793,544	7473389,471

5.2.1.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 47 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando sem correção diferencial.

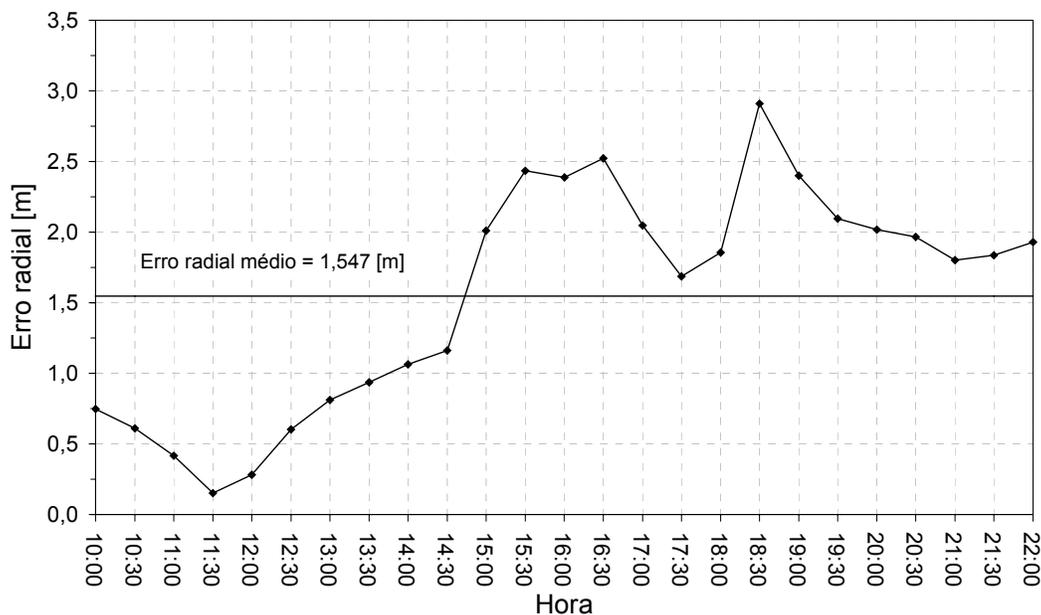
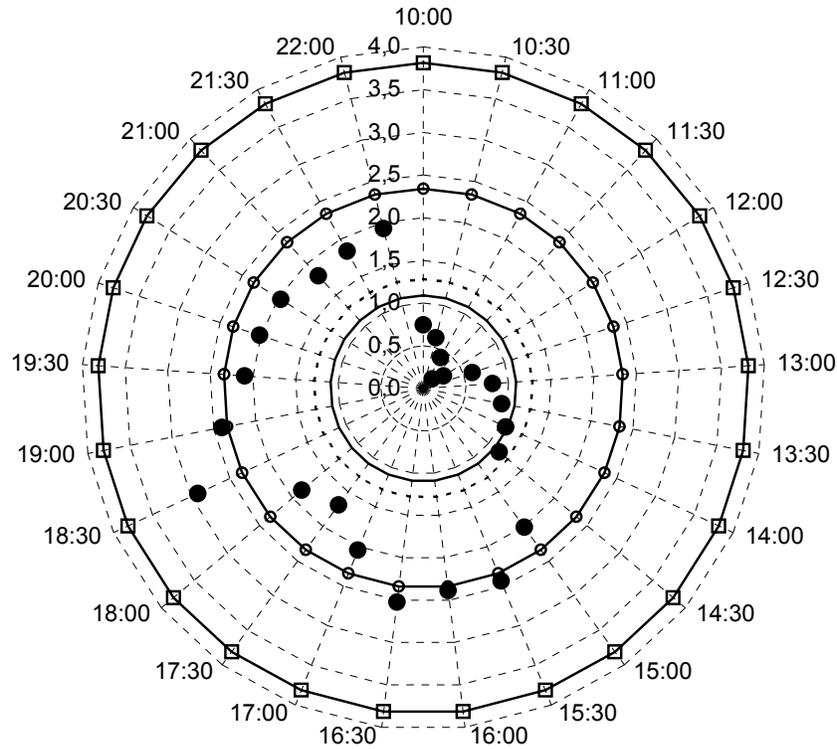


Figura 47 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.

A Figura 47 mostra que o erro radial médio foi de 1,547 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,153 m a 2,910 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 70,41 %.

A Figura 48 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho AgGPS 132 operando sem correção diferencial, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 12. Sendo que estes erros aceitáveis.



— σ_c [m] - - - - - CEP [m] —○— CMAS [m] —□— $3,5\sigma_c$ [m] ● Erro radial [m]

Figura 48 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.

O gráfico da Figura 49 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

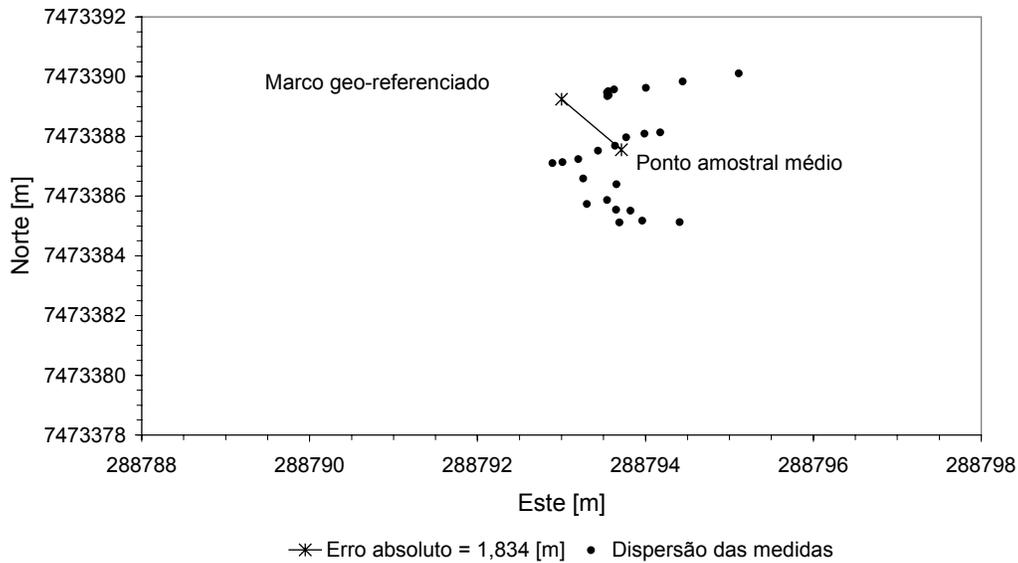


Figura 49 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando sem correção diferencial.

Nota-se que houve em alguns casos uma magnitude do erro radial superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 1,834 m e o erro radial médio de 1,547 m.

A alta dispersão dos dados denota uma baixa precisão na medição das coordenadas do marco.

5.2.2 eTrex operando sem correção

5.2.2.1 Dados experimentais

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE04, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 8 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.

Tabela 8 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288794,153	7473387,946
10:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,005	7473391,310
11:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,528	7473385,848
11:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,991	7473386,635
12:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288792,647	7473385,502
12:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,952	7473387,154
13:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,153	7473386,837
13:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,3''	288789,759	7473384,580
14:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,981	7473388,682
14:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288794,243	7473382,739
15:00	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,391	7473382,764
15:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,171	7473383,727
16:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,668	7473387,290
16:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,406	7473384,092
17:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,298	7473386,282
17:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288794,960	7473384,411
18:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,940	7473389,382
18:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,829	7473388,963
19:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,070	7473388,994
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,228	7473389,493
20:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,192	7473389,107

20:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,484	7473389,404
21:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,474	7473388,512
21:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,990	7473391,124
22:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288794,625	7473388,055

5.2.2.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 50 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.

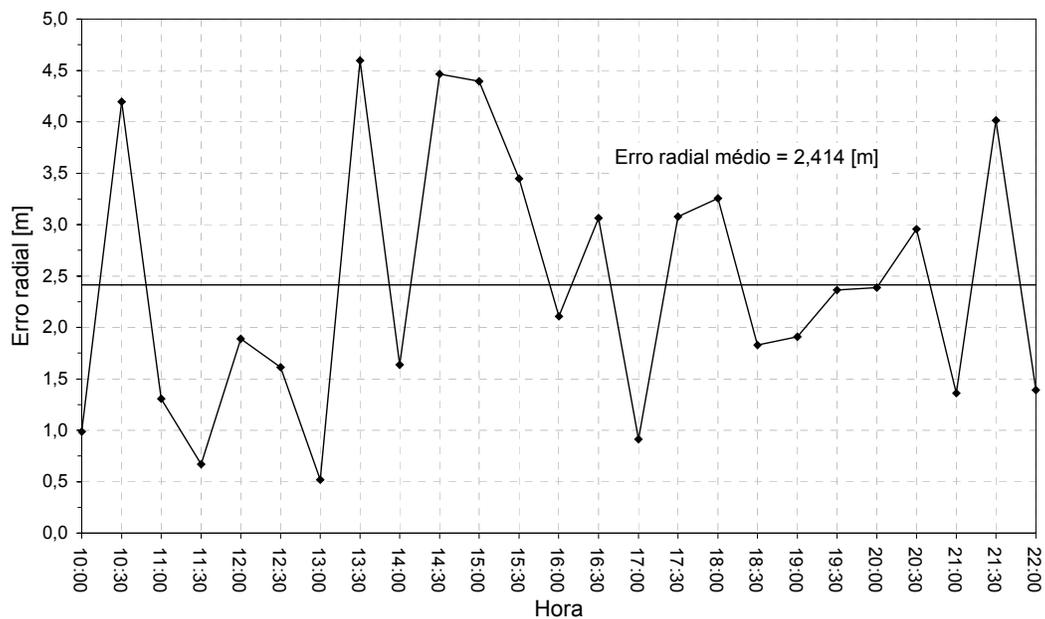


Figura 50 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando sem correção diferencial.

A Figura 50 mostra que o erro radial médio foi de 2,414 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,520 m a 4,595 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 77,35 %.

A Figura 51 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho eTrex operando sem correção diferencial, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 12.

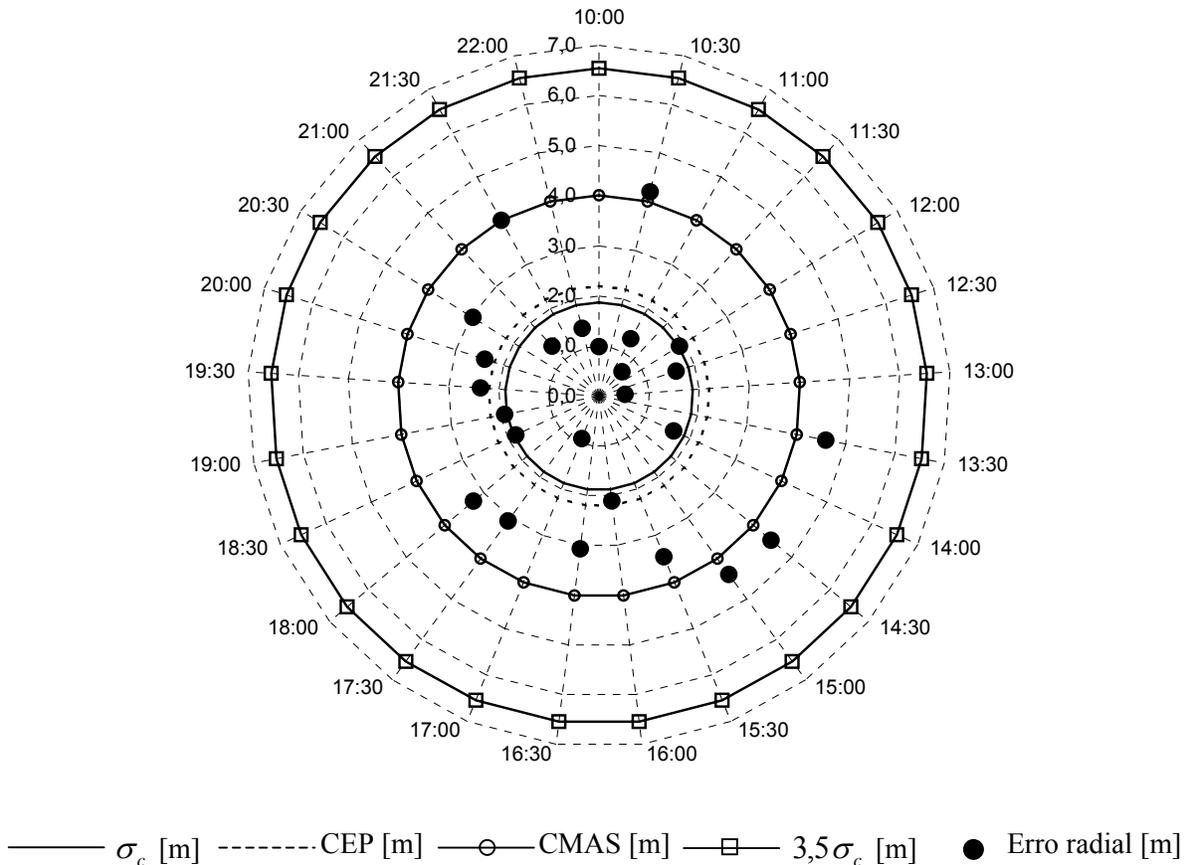


Figura 51 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex, operando sem correção diferencial.

O gráfico da Figura 52 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

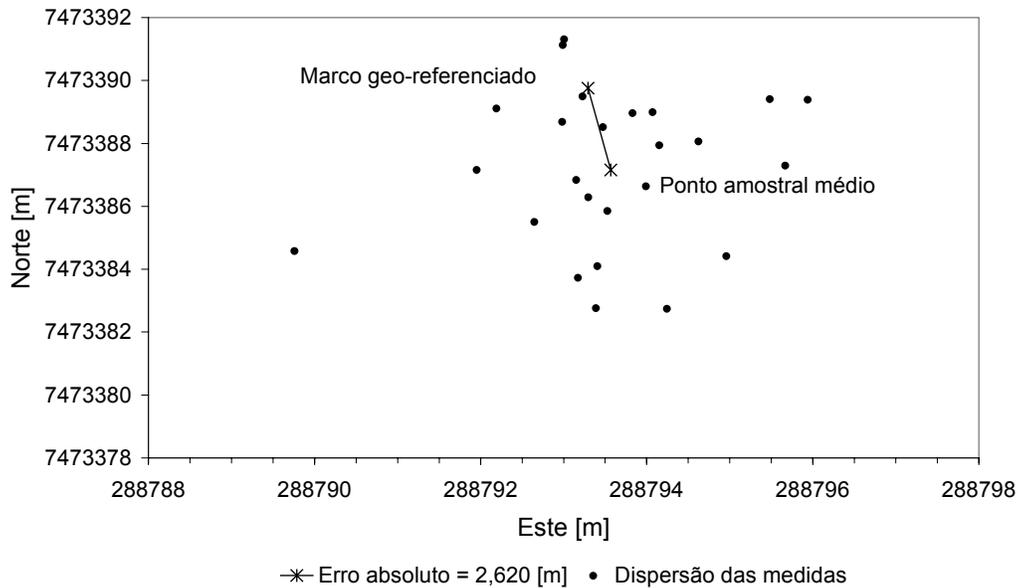


Figura 52 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando sem correção diferencial.

Nota-se que houve em alguns casos uma magnitude do erro radial superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 2,620 m e o erro radial médio de 2,414 m.

5.2.3 III Plus operando sem correção

5.2.3.1 Dados experimentais

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE03, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 9 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.

Tabela 9 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288794,067	7473387,936
10:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,541	7473386,146
11:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,541	7473386,146
11:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288794,676	7473383,785
12:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,347	7473385,521
12:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,881	7473386,717
13:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,873	7473387,311
13:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288792,974	7473387,326
14:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288794,100	7473385,559
14:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,260	7473381,416
15:00	-22°50'02,5''	-47°03'29,2''	288793,583	7473383,175
15:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288794,076	7473387,342
16:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288796,870	7473384,410
16:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288795,752	7473385,582
17:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,550	7473385,552
17:30	-22°50'02,6''	-47°03'29,1''	288794,742	7473379,032
18:00	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,007	7473384,950
18:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,686	7473390,335
19:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,177	7473387,357
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288796,245	7473389,749
20:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,492	7473389,710
20:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,593	7473389,726
21:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,593	7473389,726

21:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,585	7473390,320
22:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,941	7473389,703

5.2.3.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 53 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.

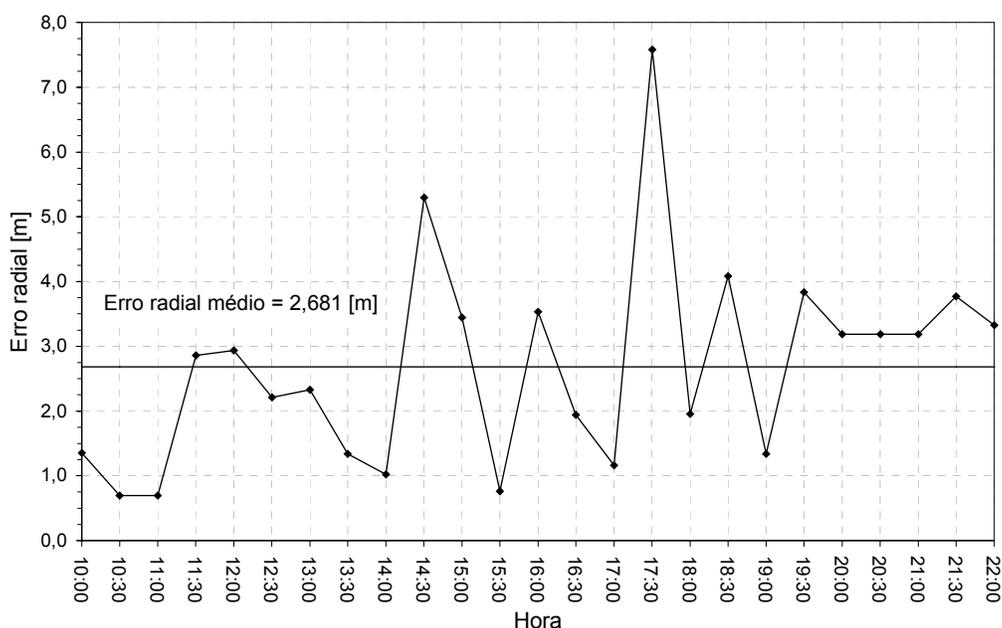
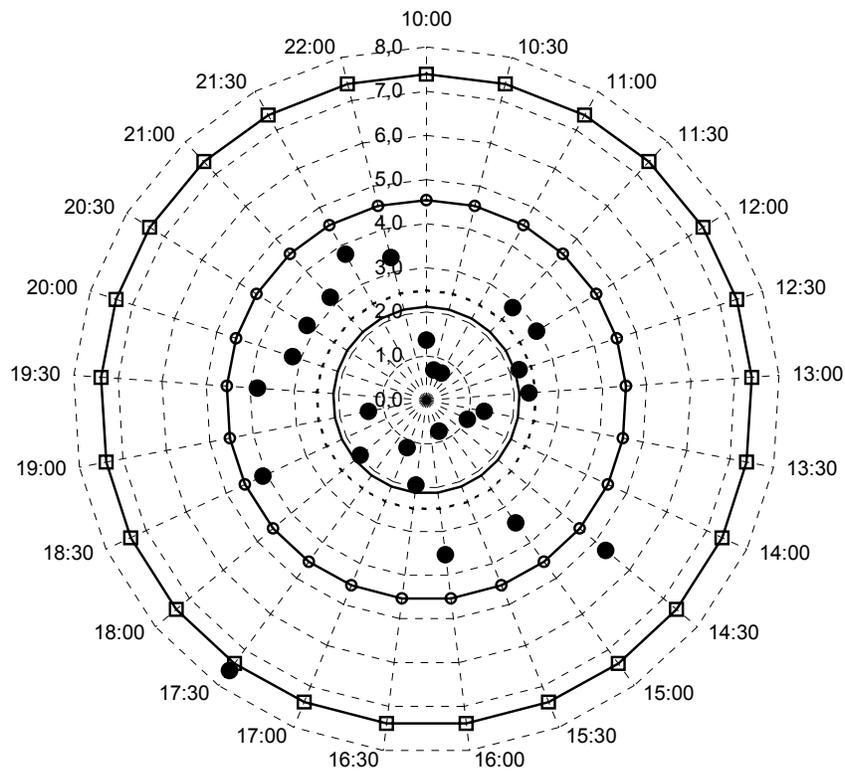


Figura 53 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando sem correção diferencial.

A Figura 53 mostra que o erro radial médio foi de 2,681 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,698 m a 7,578 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 78,73 %.

A Figura 54 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho III Plus operando sem correção diferencial, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 12.



———— σ_c [m] - - - - - CEP [m] —○— CMAS [m] —□— $3,5\sigma_c$ [m] ● Erro radial [m]

Figura 54 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus, operando sem correção diferencial.

O gráfico da Figura 55 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

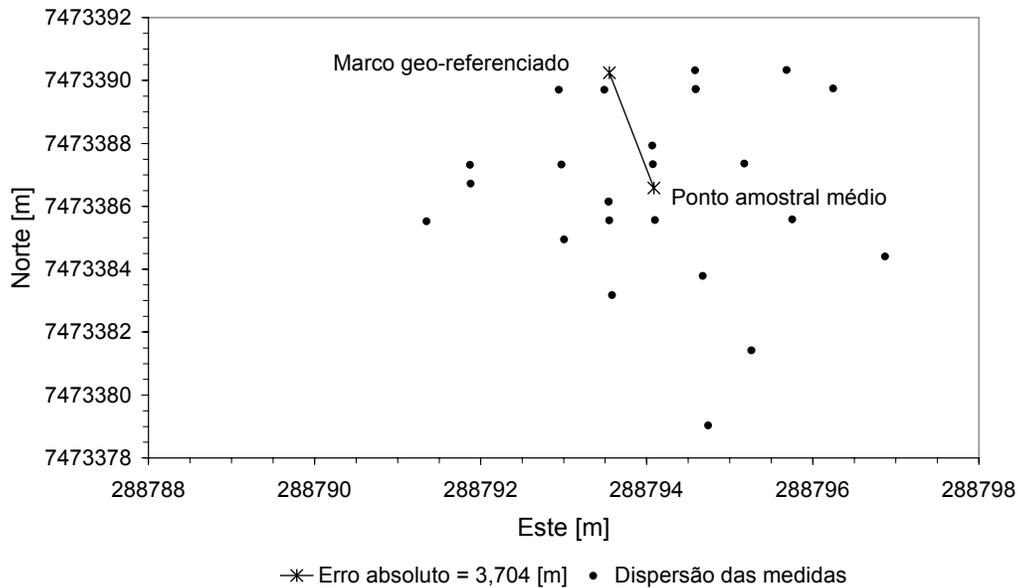


Figura 55 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando sem correção diferencial.

Nota-se que houve em alguns casos uma magnitude do erro radial superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 3,704 m e o erro radial médio de 2,681 m.

5.2.4 ProMark2 operando sem antena e sem correção

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial, foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE01, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

5.2.4.1 Dados experimentais

A Tabela 10 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial.

Tabela 10 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
09:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,675	7473391,098
10:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,701	7473389,252
10:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,701	7473389,252
11:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,463	7473385,584
11:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
12:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
12:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,752	7473385,560
13:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
13:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,0''	288797,123	7473389,300
14:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
14:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,0''	288797,200	7473383,762
15:00	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,778	7473383,715
15:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,463	7473385,584
16:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,0''	288797,148	7473387,454
16:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,438	7473387,430
17:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,438	7473387,430
17:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,778	7473383,715
18:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,0''	288797,123	7473389,300
18:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,0''	288797,097	7473391,145
19:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,0''	288797,123	7473389,300
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122

20:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122
20:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122
21:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122
21:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122
22:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122

5.2.4.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 56 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.

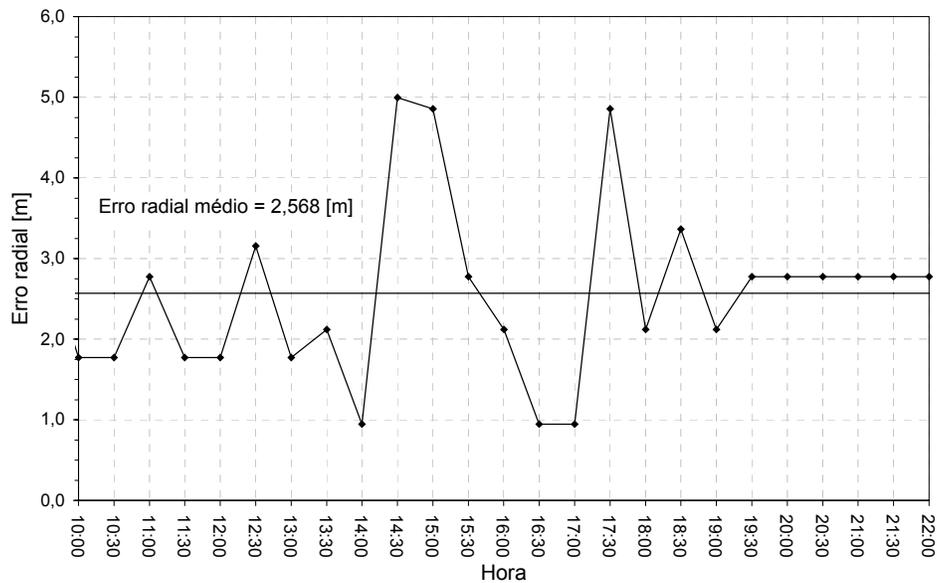


Figura 56 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.

A Figura 56 mostra que o erro radial médio foi de 2,568 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,944 m a 4,994 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 74,46 %.

A Figura 57 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 12.

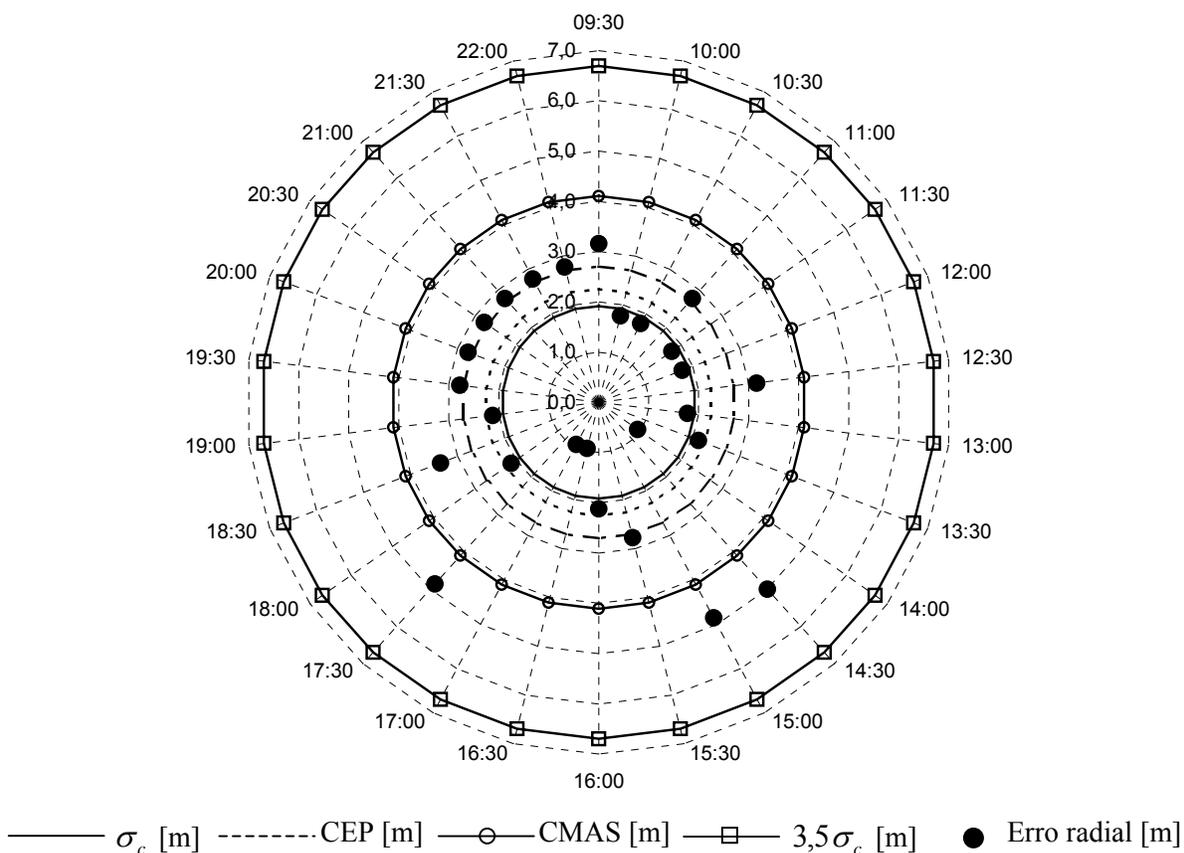


Figura 57 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2, operando sem antena e sem correção diferencial.

O gráfico da Figura 58 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

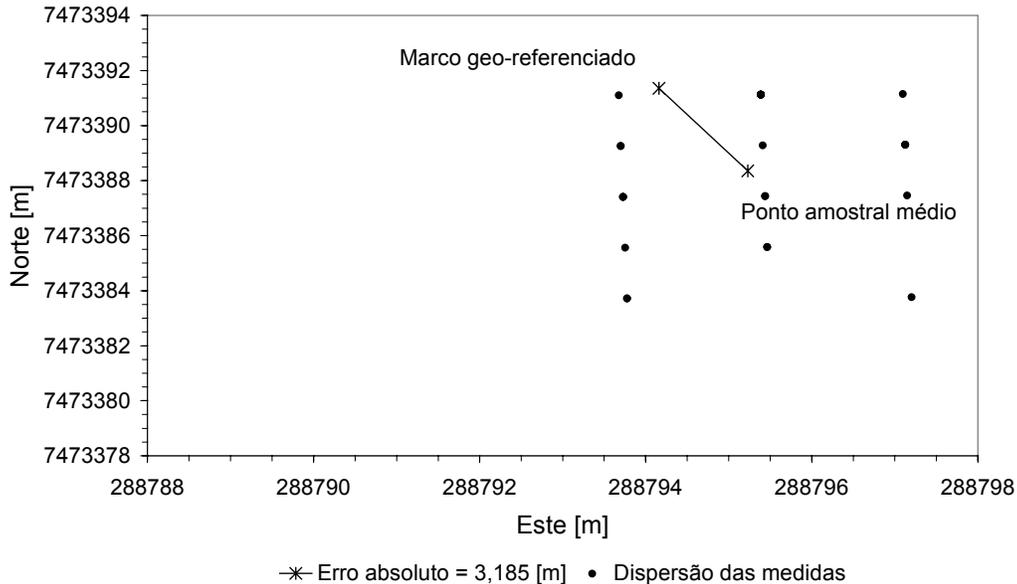


Figura 58 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.

Nota-se que houve em alguns casos uma magnitude do erro radial superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 3,185 m e o erro radial médio de 2,568 m.

O padrão em forma de grade apresentado pela dispersão dos erros radiais em torno de seu valor médio deu-se devido à baixa resolução (décimo de segundos) apresentada pelo aparelho ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.

5.2.5 ProMark2 operando com antena e sem correção

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial, foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE02, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

5.2.5.1 *Dados experimentais*

A Tabela 11 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial.

Tabela 11 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
09:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
10:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
10:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,701	7473389,252
11:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
11:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
12:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
12:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288792,016	7473387,382
13:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
13:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,727	7473387,406
14:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288795,438	7473387,430
14:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288795,489	7473383,738
15:00	-22°50'02,4''	-47°03'29,1''	288795,489	7473383,738
15:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,438	7473387,430
16:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,438	7473387,430
16:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288795,438	7473387,430
17:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,1''	288793,752	7473385,560
17:30	-22°50'02,4''	-47°03'29,2''	288793,778	7473383,715

18:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,701	7473389,252
18:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288795,386	7473391,122
19:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288793,675	7473391,098
20:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288795,386	7473391,122
20:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
21:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,412	7473389,276
21:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122
22:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288795,386	7473391,122

5.2.5.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 59 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial.

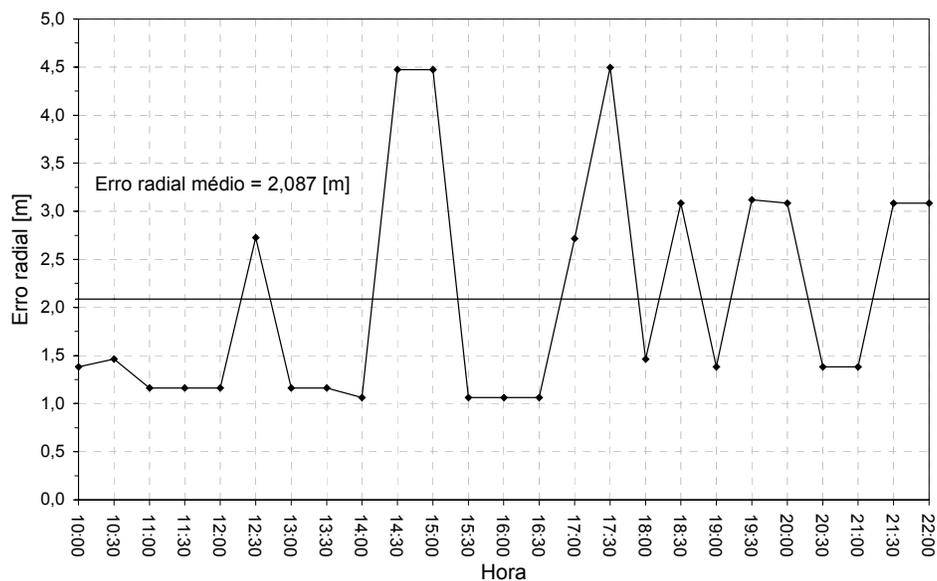


Figura 59 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial.

A Figura 59 mostra que o erro radial médio foi de 2,087 m, sendo que os valores variaram na faixa de 1,062 m a 4,497 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 76,97 %.

A Figura 60 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 12.

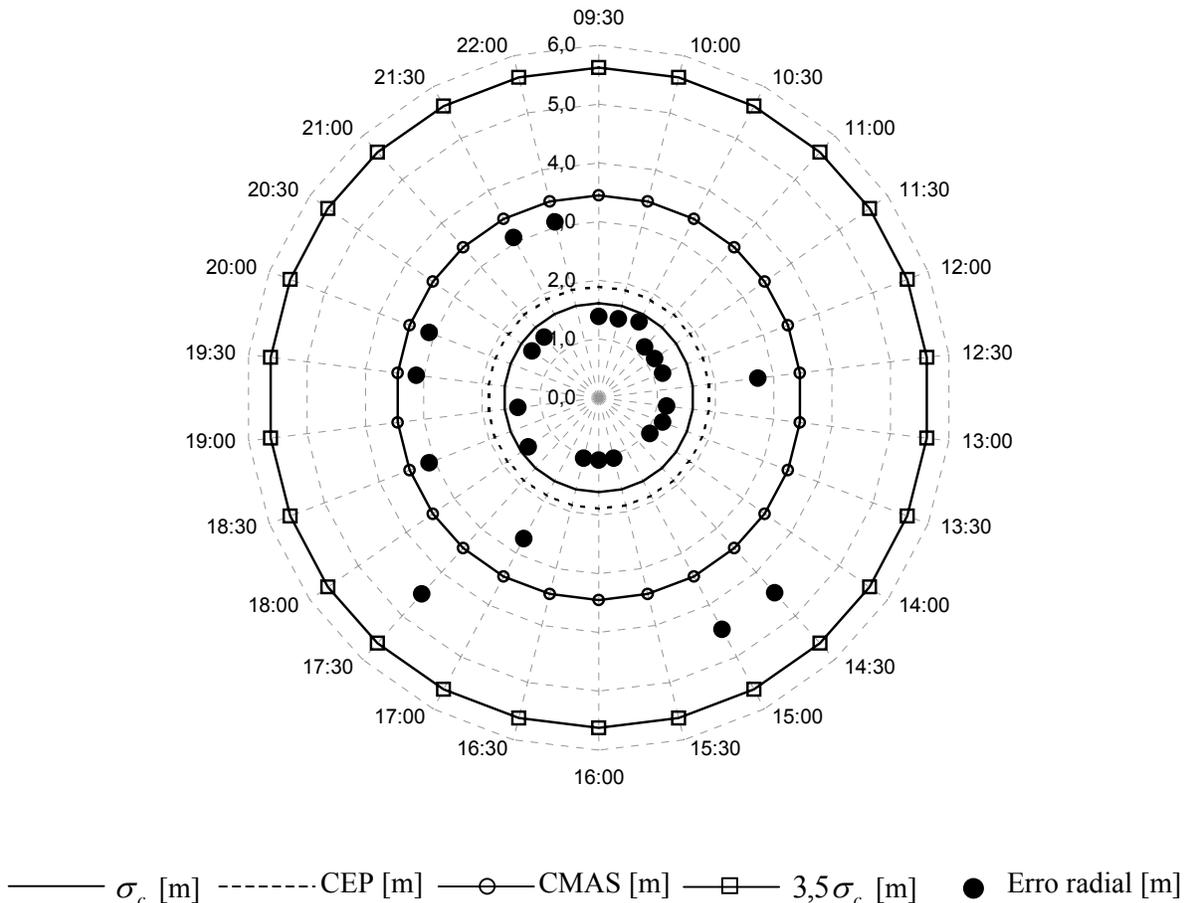


Figura 60 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2, operando com antena e sem correção diferencial.

O gráfico da Figura 61 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

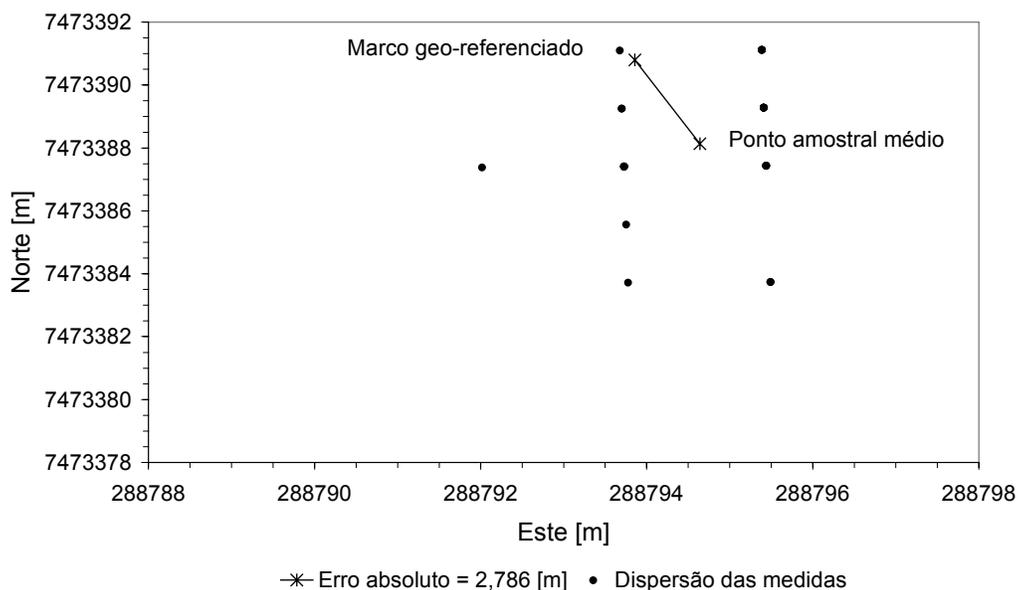


Figura 61 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com antena e sem correção diferencial.

Nota-se que houve em alguns casos uma magnitude do erro radial superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 2,786 m e o erro radial médio de 2,087 m.

O padrão em forma de grade apresentado pela dispersão dos erros radiais em torno de seu valor médio deu-se pelo mesmo motivo do ocorrido com o aparelho ProMark 2 operando sem antena e sem correção diferencial.

5.2.6 Comparação de desempenho sem correção diferencial

Em todos os casos dos aparelhos operando sem correção diferencial, o erro absoluto foi maior do que o erro radial médio.

O coeficiente de variação, com respeito ao erro radial médio dos aparelhos avaliados sem correção diferencial, variou entre 70,41 % a 78,43 %, sendo que o maior foi obtido com o aparelho III Plus e o menor com o aparelho AgGPS 132.

5.2.6.1 Comparação dos índices de desempenho

A Tabela 12 apresenta como parâmetros para comparação dos aparelhos operando sem correção diferencial, o erro absoluto – EA e o erro radial médio - ERM calculado de acordo com o item 4.2.4.4, para cada um dos aparelhos testados. A apresenta, ainda, os índices de precisão, σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, calculados de acordo com 4.2.4.5.

Tabela 12 – Parâmetros para comparação dos aparelhos receptores de sinal GPS operando sem correção diferencial.

Aparelho	$\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$	Índices de Desempenho					
		EA [m]	ERM [m]	σ_c [m]	CEP [M]	CMAS [M]	$3,5\sigma_c$ [m]
AgGPS 132 s/c	0,28	1,834	1,547	1,089	1,283	2,338	3,813
eTrex s/c	0,52	2,620	2,414	1,867	2,198	4,007	6,535
III Plus s/c	0,47	3,704	2,681	2,111	2,485	4,529	7,387
PM s/a s/c	0,52	3,185	2,568	1,912	2,251	4,103	6,693
PM c/a s/c	0,45	2,786	2,087	1,606	1,891	3,447	5,621

A relação $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ apresentada na Tabela 12 mostra que todos os valores estiveram entre 0,2 e 1,0, portanto, os cálculos adotados para os índices de precisão são válidos.

A variação da relação $\frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}$ entre os aparelhos sugerem níveis de probabilidade diferentes para os índices MSPE e 2drms. Devido a este fato, os índices mencionados não

são adequados para serem utilizados como parâmetro de comparação entre o desempenho dos aparelhos e, portanto, não foram calculados.

A Figura 62 apresenta uma comparação do desempenho dos aparelhos testados sem correção diferencial.

Nesta figura e nos dados apresentados na Tabela 12 pode-se observar que o melhor desempenho em termos do erro absoluto (acurácia) foi obtido com o aparelho AgGPS 132 s/c, seguido, respectivamente, pelo eTrex s/c, ProMark 2 c/a s/c, ProMark 2 s/a s/c e, finalmente, pelo III Plus s/c.

Nota-se que a utilização da antena no aparelho ProMark 2 é realmente importante, já que o desempenho apresentado pelo ProMark 2 c/a s/c foi sempre superior ao desempenho do ProMark 2 s/a s/c, tanto em relação à acurácia, quanto em relação à precisão. Isto se deve, sem dúvida, à melhor recepção do sinal devido a utilização da antena.

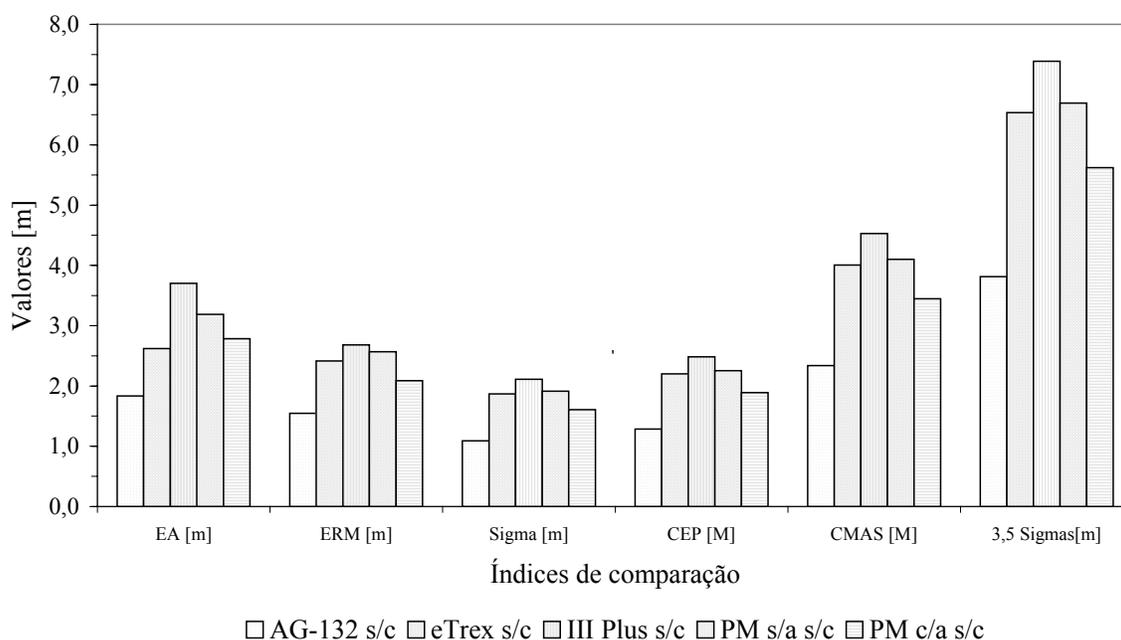


Figura 62 – Comparação do desempenho dos aparelhos testados sem correção diferencial.

Quanto aos índices relativos aos erros radiais, o aparelho que obteve o melhor desempenho foi o AgGPS 132 s/c, seguido, respectivamente, pelo ProMark 2 c/a s/c, eTrex s/c, ProMark 2 s/a s/c e, finalmente, pelo III Plus s/c.

Observa-se que embora o aparelho ProMark 2 c/a s/c tenha apresentado uma precisão maior que o aparelho eTrex s/a, este último apresentou uma maior acurácia que o primeiro.

Quanto aos demais casos, os aparelhos mantiveram a mesma tendência em termos de níveis de desempenho comparativo quanto à acurácia e à precisão.

5.2.6.2 *Análise de variância do erro radial de posicionamento*

A Tabela 13 apresenta a análise de variância dos dados, relativos aos erros radiais de posicionamento, obtidos com os aparelhos receptores de sinais GPS denominados AgGPS 132 s/c, eTrex s/c, III Plus s/c, PM s/a s/c e PM c/a s/c.

Tabela 13 – Análise de variância do erro radial de posicionamento.

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	P
Entre Grupos	20,97236	4	5,24309	3,57061	0,00863
Dentro dos Grupos	179,14506	122	1,46840		
Total	200,11742	126	1,58823		

A análise de variância resulta um valor para o Teste F superior ao valor tabelado para um nível de significância de 5%, portanto, a hipótese experimental não deve ser descartada, ou seja, há uma diferença estatisticamente significativa entre os erros radiais médios obtidos com os aparelhos receptores de sinais GPS estudados.

5.2.6.3 *Comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento*

A comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento, obtidas com os aparelhos receptores de sinais GPS operando sem correção diferencial, foi realizada por meio do teste de Tukey. A Tabela 14 apresenta o teste de Tukey, no nível estatístico de 5%.

As diferenças críticas nos ERM entre pares de grupos são apresentadas acima e à direita na tabela, enquanto as significâncias são apresentadas abaixo à esquerda.

Tabela 14 – Teste de Tukey (5%.) para os erros radiais de posicionamento.

Aparelhos	ERM [m]	Aparelhos				
		AgGPS 132 s/c	PM c/a s/c	eTrex s/c	PM s/a s/c	III Plus s/c
AgGPS 132 s/c	1,5470	----	0,93994	0,94911	0,93994	0,94911
PM c/a s/c	2,0868	não	----	0,93994	0,93068	0,93994
eTrex s/c	2,4139	não	não	----	0,93994	0,94911
PM s/a s/c	2,5680	sim	não	não	----	0,93994
III Plus s/c	2,6807	sim	não	não	não	----

O teste de Tukey realizados mostra que, quanto ao erro radial, pode-se agrupar os aparelhos em dois conjuntos. O primeiro e mais preciso, formado pelos aparelhos AgGPS 132 s/c, PM c/a s/c e eTrex s/c. O segundo e menos preciso, formado pelos aparelhos PM s/a s/c e III Plus s/c.

Nota-se que não há uma diferença estatisticamente significativa (5%) entre o erro radial médio de posicionamento do aparelho AgGPS 132 s/c em relação aos obtidos pelos aparelhos PM c/a s/c e eTrex s/c. Porém há uma diferença estatisticamente significativa (5%) entre o erro radial médio de posicionamento do aparelho AgGPS 132 s/c em relação aos obtidos pelos aparelhos PM s/a s/c e III Plus s/c.

5.3 Desempenho com correção diferencial

Os testes com os aparelhos operando com correção diferencial em tempo real e o aparelho com correção diferencial pós-processada foram realizados no dia 13 de junho de 2003.

5.3.1 AgGPS 132

5.3.1.1 *Dados experimentais*

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132 foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE05, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 15 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando com correção diferencial em tempo real.

Tabela 15 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132, operando com correção diferencial em tempo real.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:30	-22°50'02,2248''	-47°03'29,1882''	288792,899	7473389,093
11:00	-22°50'02,2074''	-47°03'29,1852''	288792,977	7473389,630
11:30	-22°50'02,2164''	-47°03'29,1834''	288793,032	7473389,353
12:00	-22°50'02,2158''	-47°03'29,1888''	288792,878	7473389,370
12:30	-22°50'02,2284''	-47°03'29,1858''	288792,969	7473388,983
13:00	-22°50'02,2152''	-47°03'29,1744''	288793,288	7473389,394
13:30	-22°50'02,2086''	-47°03'29,1786''	288793,166	7473389,595
14:00	-22°50'02,2224''	-47°03'29,1804''	288793,120	7473389,170

14:30	-22°50'02,2140''	-47°03'29,1870''	288792,928	7473389,426
15:00	-22°50'02,1966''	-47°03'29,1864''	288792,938	7473389,961
15:30	-22°50'02,2056''	-47°03'29,1558''	288793,815	7473389,697
16:00	-22°50'02,2200''	-47°03'29,1798''	288793,136	7473389,244
16:30	-22°50'02,2254''	-47°03'29,1846''	288793,002	7473389,076
17:00	-22°50'02,2194''	-47°03'29,1798''	288793,136	7473389,262
17:30	-22°50'02,1990''	-47°03'29,1846''	288792,990	7473389,888
18:00	-22°50'02,2128''	-47°03'29,1936''	288792,740	7473389,460
18:30	*	*	*	*
19:00	*	*	*	*
19:30	*	*	*	*
20:00	*	*	*	*
20:30	*	*	*	*
21:00	-22°50'02,2284''	-47°03'29,1678''	288793,482	7473388,990
21:30	-22°50'02,2242''	-47°03'29,1840''	288793,018	7473389,113
22:00	-22°50'02,2014''	-47°03'29,1792''	288793,145	7473389,816

* Dados perdidos.

As leituras referentes aos horários de 18:30hs até as 20:30hs foram perdidas e, portanto, não constam na Tabela 15.

5.3.1.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 63 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.

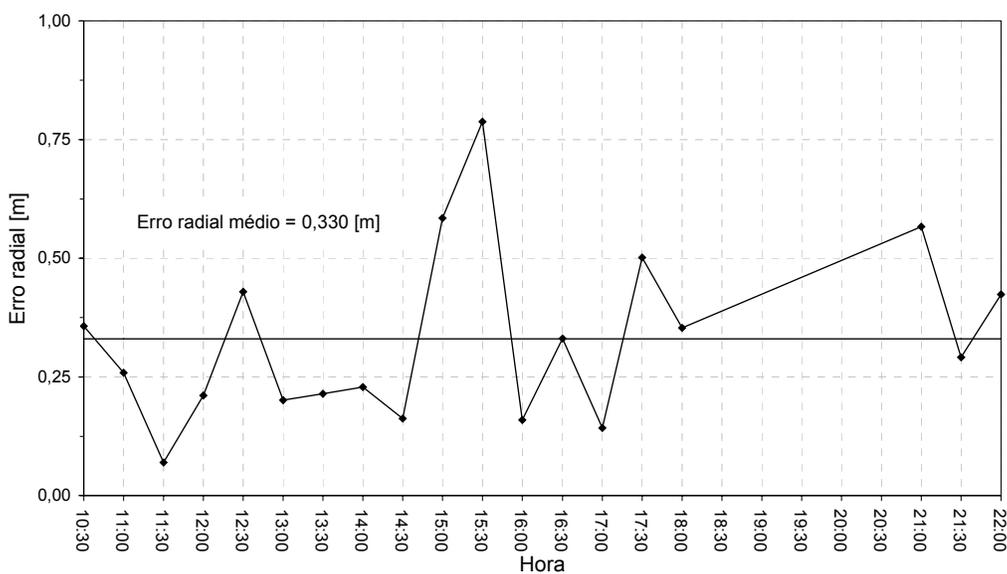
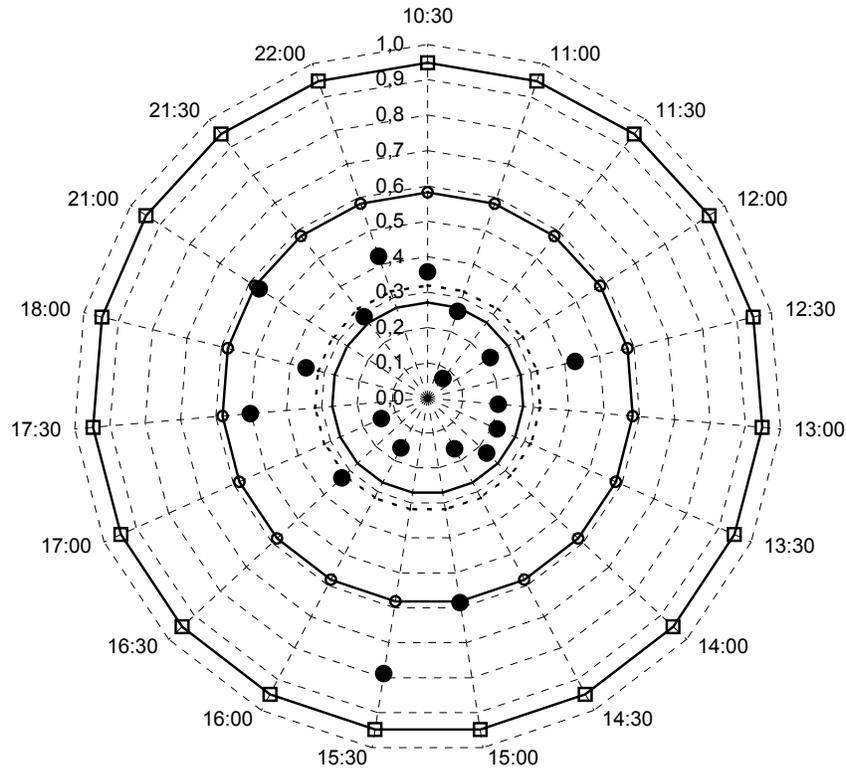


Figura 63 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.

A Figura 63 mostra que o erro radial médio foi de 0,330 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,070 m a 0,788 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 82,00 %.

A Figura 64 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 19.



— σ_c [m] - - - - - CEP [m] —○— CMAS [m] —□— $3,5\sigma_c$ [m] ● Erro radial [m]

Figura 64 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.

O gráfico da Figura 65 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

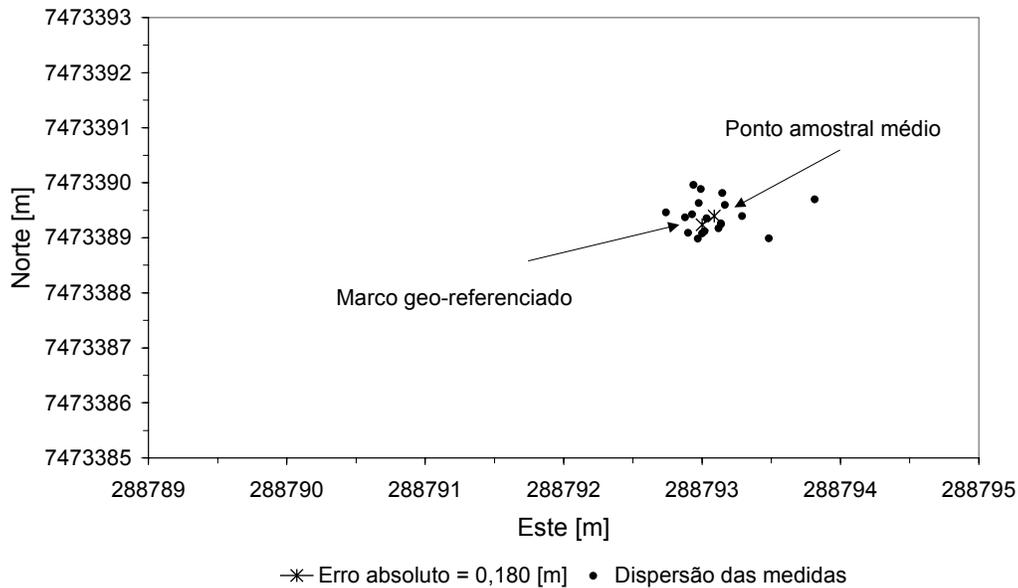


Figura 65 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo AgGPS 132 operando com correção diferencial em tempo real.

Nota-se que, ao contrário dos aparelhos operando sem correção, a maioria dos erros radiais de posicionamento observados foi superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 0,180 m e o erro radial médio de 0,330 m.

5.3.2 eTrex

5.3.2.1 Dados experimentais

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE04, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 16 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando com correção diferencial em tempo real.

Tabela 16 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex, operando com correção diferencial em tempo real.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,874	7473390,797
11:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,899	7473388,384
11:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,914	7473387,414
12:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,680	7473389,193
12:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,245	7473390,027
13:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,114	7473389,496
13:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,334	7473388,083
14:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,3''	288790,830	7473389,859
14:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288791,606	7473388,533
15:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,291	7473388,046
15:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,289	7473388,682
16:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,532	7473390,050
16:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,277	7473388,951
17:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,889	7473390,199
17:30	-22°50'02,1''	-47°03'29,2''	288793,055	7473391,422
18:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,506	7473389,409
18:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,227	7473385,501
19:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,348	7473388,929
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,673	7473389,179
20:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,558	7473388,049
20:30	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288794,006	7473387,387

21:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288793,447	7473387,992
21:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,970	7473390,706
22:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288792,532	7473388,165

5.3.2.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 66 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.

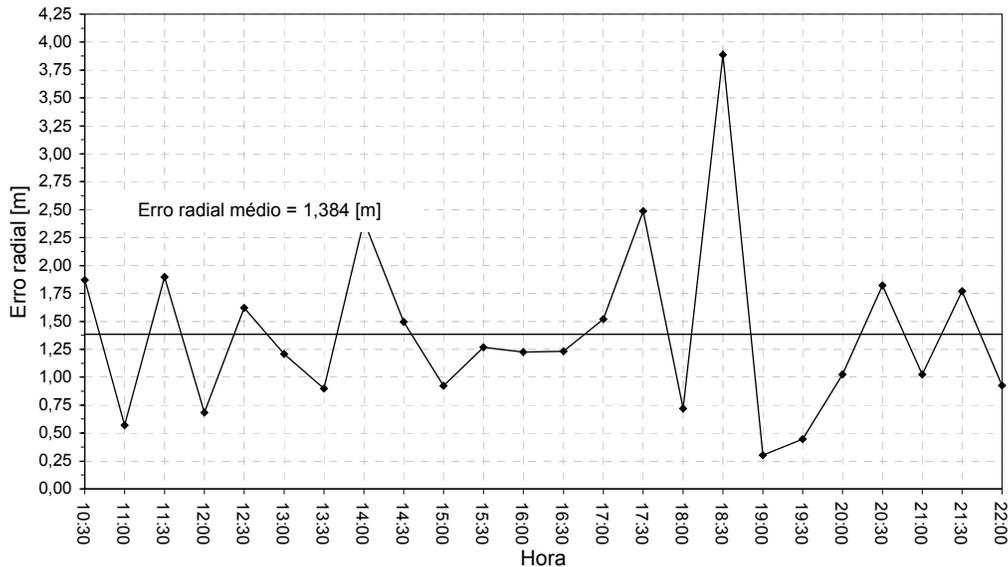
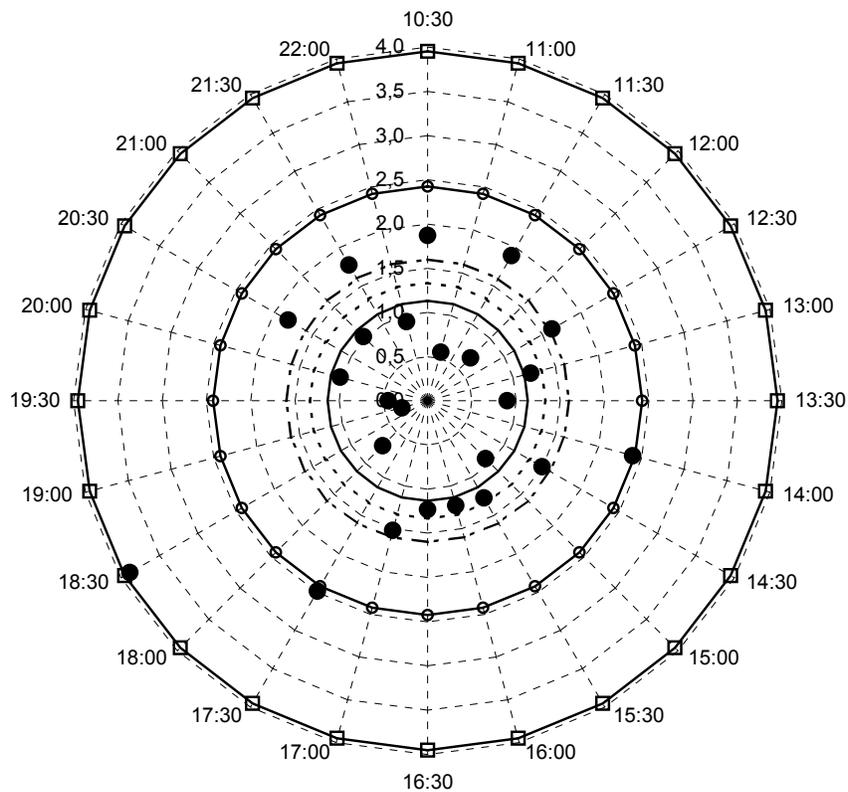


Figura 66 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.

A Figura 66 mostra que o erro radial médio foi de 1,384 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,302 m a 3,886 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 81,51 %.

A Figura 67 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho eTrex operando com correção diferencial em tempo real, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 19.



———— σ_c [m] - - - - - CEP [m] ○ — CMAS [m] □ — $3,5\sigma_c$ [m] ● Erro radial [m]

Figura 67 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.

O gráfico da Figura 68 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

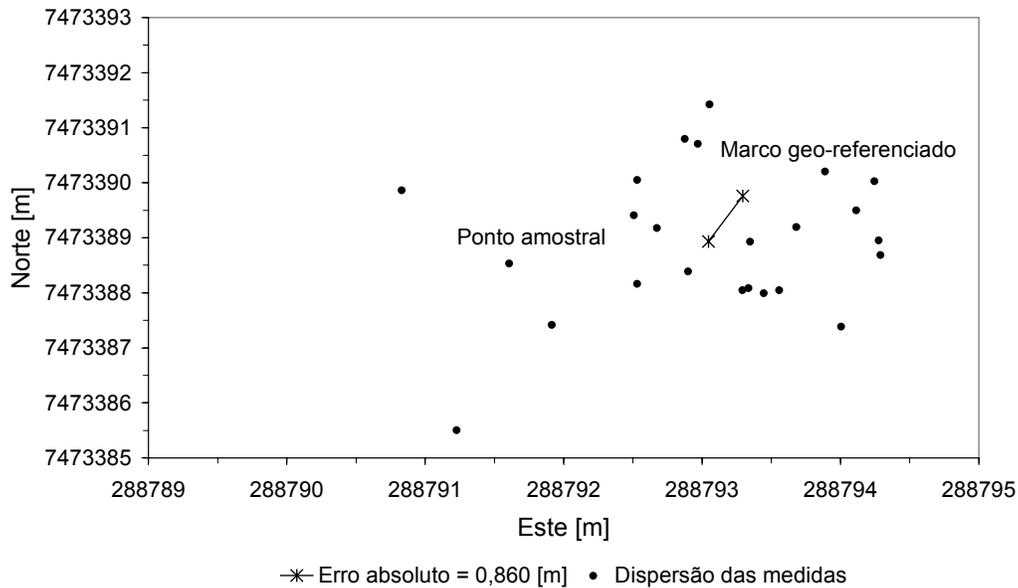


Figura 68 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo eTrex operando com correção diferencial em tempo real.

Nota-se que, ao contrário dos aparelhos operando sem correção, a maioria dos erros radiais de posicionamento observados foi superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 0,860 m e o erro radial médio de 1,384 m.

5.3.3 III Plus

5.3.3.1 *Dados experimentais*

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE03, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 17 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando com correção diferencial em tempo real.

Tabela 17 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus, operando com correção diferencial em tempo real.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288791,823	7473390,876
11:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,949	7473389,109
11:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,483	7473390,304
12:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,034	7473390,312
12:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,042	7473389,718
13:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,585	7473390,320
13:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,475	7473390,899
14:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,475	7473390,899
14:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,500	7473389,116
15:00	-22°50'02,1''	-47°03'29,1''	288794,017	7473391,500
15:30	-22°50'02,1''	-47°03'29,1''	288794,568	7473391,508
16:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,483	7473390,304
16:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,042	7473389,718
17:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,3''	288789,086	7473389,649
17:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,1''	288794,585	7473390,320
18:00	-22°50'02,3''	-47°03'29,2''	288791,339	7473386,115
18:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,941	7473389,703
19:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,475	7473390,899
19:30	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288793,475	7473390,899
20:00	-22°50'02,2''	-47°03'29,2''	288792,390	7473389,695
20:30	-22°50'02,1''	-47°03'29,2''	288792,908	7473392,079

21:00	-22°50'02,2'' -47°03'29,1''	288794,042	7473389,718
21:30	-22°50'02,2'' -47°03'29,2''	288792,924	7473390,891
22:00	-22°50'02,2'' -47°03'29,2''	288792,924	7473390,891

5.3.3.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 69 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.

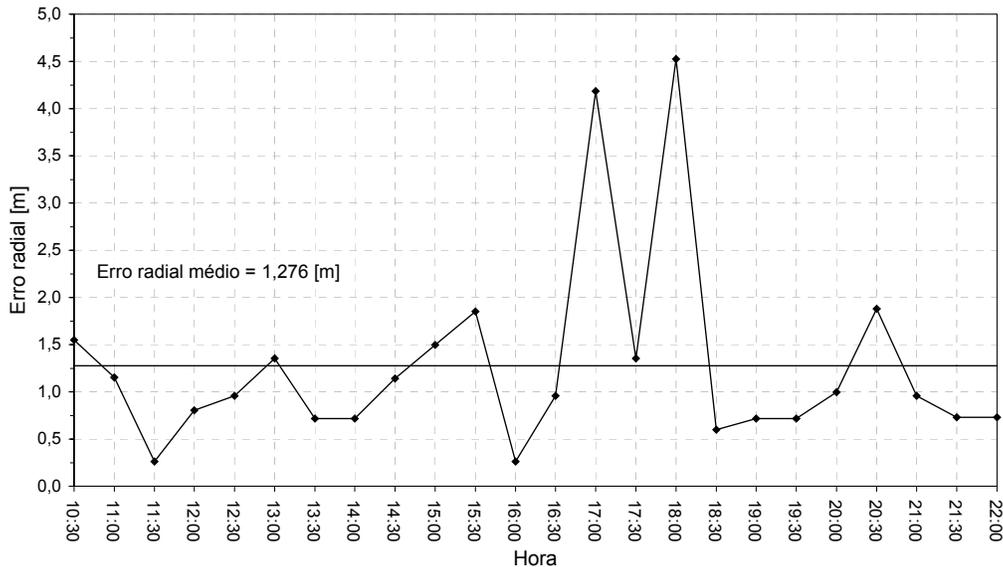
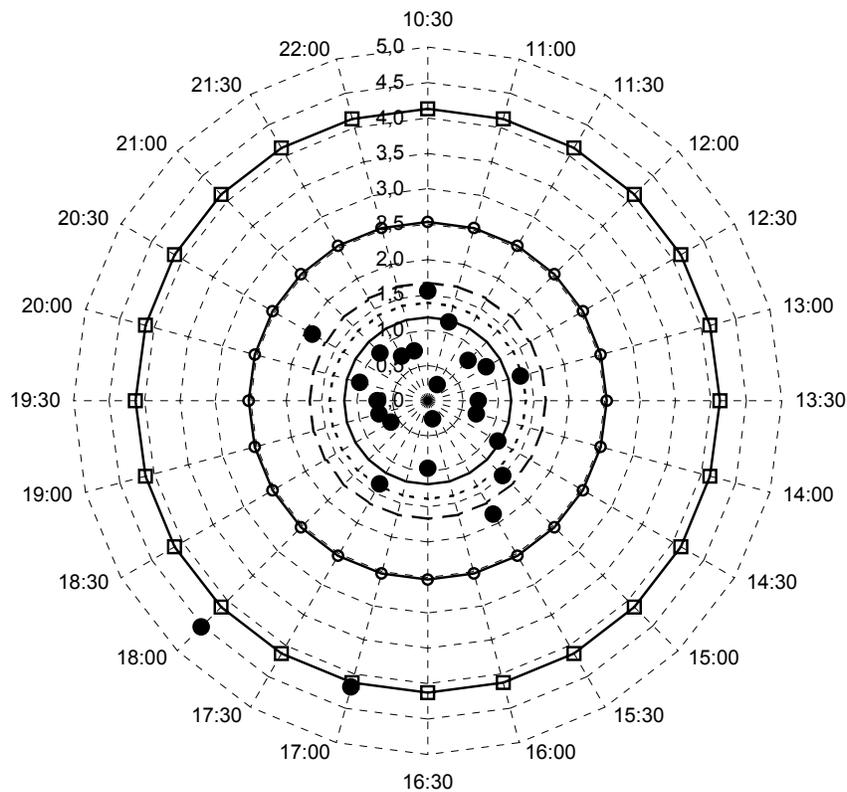


Figura 69 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.

A Figura 69 mostra que o erro radial médio foi de 1,276 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,263 m a 4,527 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 92,39 %.

A Figura 70 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho III Plus operando com correção diferencial em tempo real, em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 19.



———— σ_c [m] - - - - - CEP [m] —○— CMAS [m] —□— $3,5\sigma_c$ [m] ● Erro radial [m]

Figura 70 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.

O gráfico da Figura 71 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

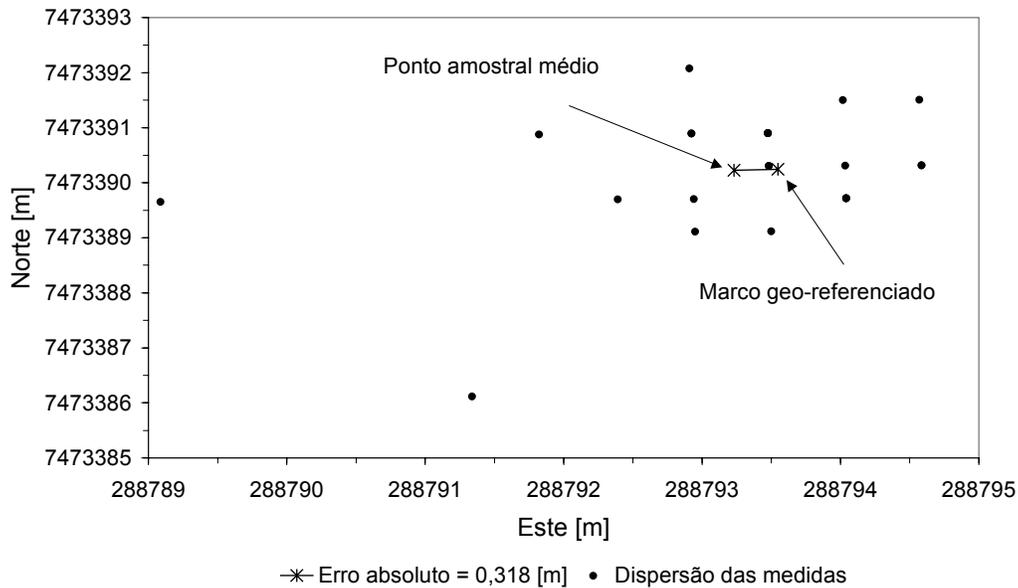


Figura 71 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo III Plus operando com correção diferencial em tempo real.

Nota-se que, ao contrário dos aparelhos operando sem correção, a maioria dos erros radiais de posicionamento observados foi superior ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 0,318 m e o erro radial médio de 1,276 m.

5.3.4 ProMark2

5.3.4.1 Dados experimentais

O aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e com correção diferencial pós-processada, foi posicionado no marco geo-referenciado denominado PE02, cujas coordenadas estão apresentadas na Tabela 5 e na Tabela 6.

A Tabela 18 apresenta os dados obtidos experimentalmente com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, com antena e com correção diferencial pós-processada.

Tabela 18 – Resultados obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2, operando com antena e com correção diferencial pós-processada.

Hora	Dados experimentais			
	Latitude	Longitude	Este [m]	Norte [m]
10:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,229	7473390,593
11:00	*	*	*	*
11:30	-22°50'02,176''	-47°03'29,141''	288794,226	7473390,604
12:00	*	*	*	*
12:30	*	*	*	*
13:00	-22°50'02,176''	-47°03'29,141''	288794,217	7473390,606
13:30	-22°50'02,176''	-47°03'29,141''	288794,219	7473390,604
14:00	-22°50'02,176''	-47°03'29,141''	288794,212	7473390,608
14:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,229	7473390,592
15:00	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,229	7473390,592
15:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,217	7473390,592
16:00	*	*	*	*
16:30	*	*	*	*
17:00	-22°50'02,176''	-47°03'29,142''	288794,196	7473390,608
17:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,215	7473390,567
18:00	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,212	7473390,582
18:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,216	7473390,585
19:00	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,219	7473390,584
19:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,219	7473390,588
20:00	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,220	7473390,578
20:30	-22°50'02,177''	-47°03'29,141''	288794,219	7473390,579

21:00	-22°50'02,176''	-47°03'29,142''	288794,194	7473390,628
21:30	-22°50'02,176''	-47°03'29,142''	288794,188	7473390,617
22:00	-22°50'02,176''	-47°03'29,142''	288794,192	7473390,625

* Dados perdidos

As leituras referentes aos horários de 11:00hs, 12:00hs, 12:30hs, 16:00hs e 16:30hs foram perdidas e, portanto, não constam na Tabela 18.

5.3.4.2 Erros bidimensionais de posicionamento

A Figura 72 apresenta os erros radiais de posicionamento obtidos com o aparelho receptor de sinal de GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.

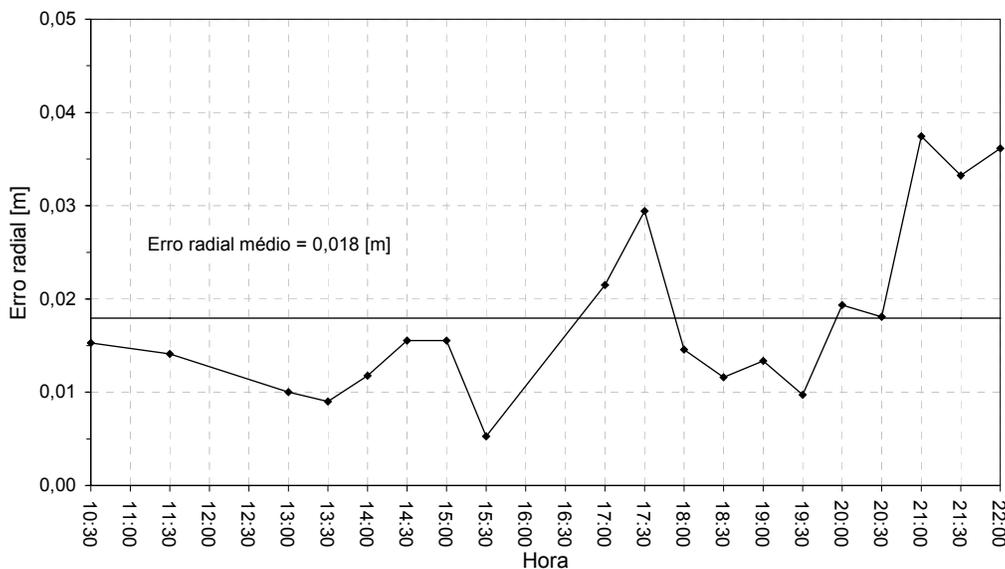


Figura 72 – Erros de posicionamentos radiais obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.

A Figura 72 mostra que o erro radial médio foi de 0,018 m, sendo que os valores variaram na faixa de 0,005 m a 0,037 m e apresentaram um coeficiente de variação calculado em relação ao erro circular padrão de 80,94 %.

A Figura 73 apresenta, na forma polar, a distribuição dos erros radiais de posicionamento, obtidos com o aparelho ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada., em função do horário de sua observação.

A mesma figura apresenta, ainda, os índices de precisão adotados. Os valores correspondentes a estes índices estão apresentados na Tabela 19.

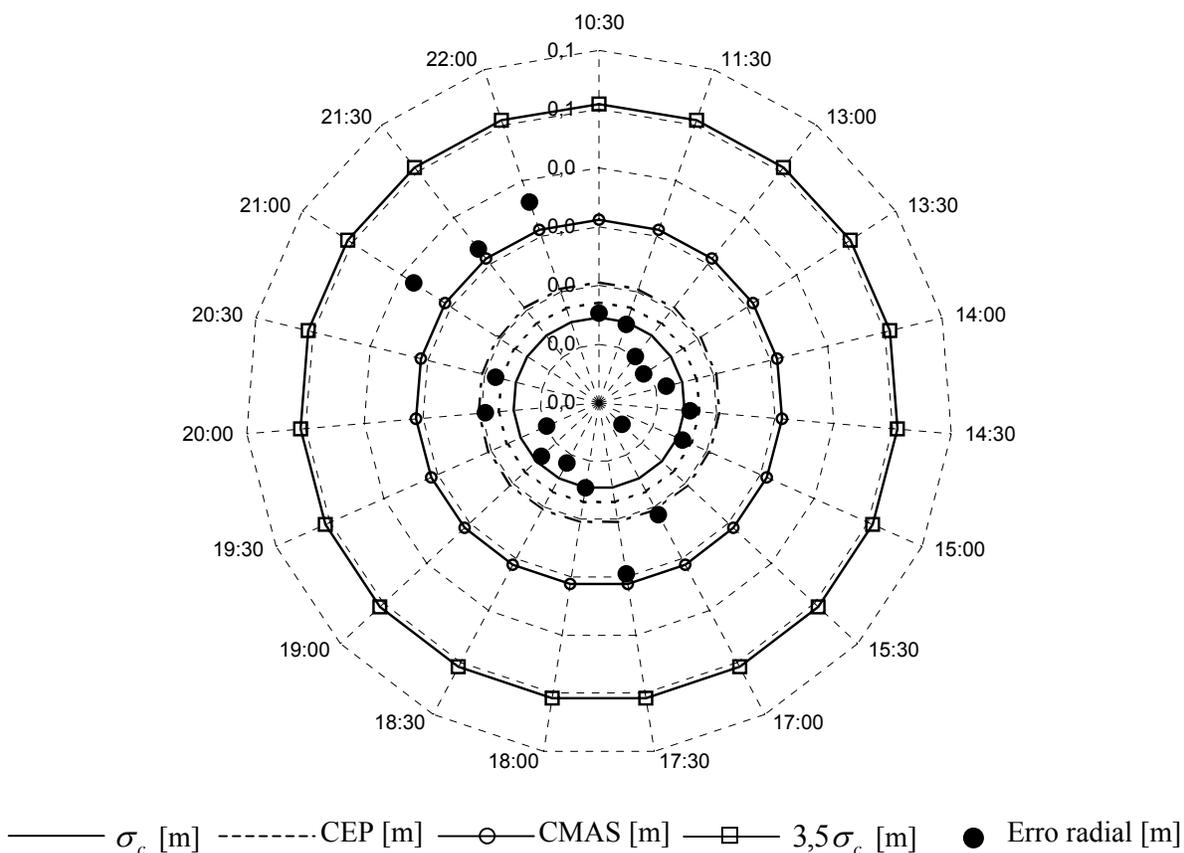


Figura 73 – Erro radial e índices: σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, obtidos com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.

O gráfico da Figura 74 ilustra a posição dos pontos obtidos experimentalmente, em coordenadas planas no sistema UTM, além do ponto amostral médio e do erro absoluto em relação ao marco geo-referenciado.

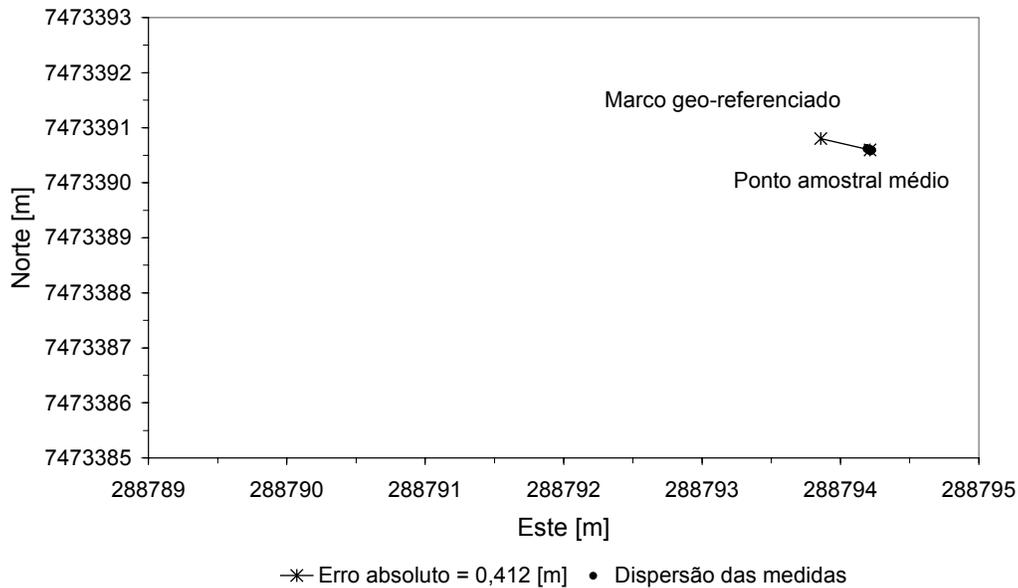


Figura 74 – Erro de posicionamento absoluto e dispersão das medidas obtidas com o aparelho receptor de sinal GPS modelo ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada.

Nota-se que, ao contrário dos demais casos dos aparelhos operando tanto sem correção, quanto com correção, os erros radiais de posicionamento observados foram superiores ao erro absoluto, sendo que o erro absoluto foi de 0,412 m e o erro radial médio de 0,018 m. Deve-se observar, contudo, que o aparelho ProMark 2, diferentemente dos outros aparelhos avaliados, opera com correção diferencial pós-processada.

5.3.5 Comparação de desempenho com correção diferencial

Na maioria dos casos dos aparelhos operando com correção diferencial, o erro absoluto foi menor do que o erro radial médio. A única exceção foi relativa ao aparelho ProMark 2, provavelmente devido à particularidades da metodologia utilizada para a correção diferencial.

O coeficiente de variação, com respeito ao erro radial médio dos aparelhos avaliados com correção diferencial, variou entre 80,94 % a 92,39 %, sendo que o maior foi obtido com o aparelho III Plus e o menor com o aparelho ProMark 2.

5.3.5.1 Comparação dos índices de desempenho

A Tabela 19 apresenta como parâmetros para comparação dos aparelhos operando com correção diferencial, o erro absoluto – EA e o erro radial médio - ERM calculado de acordo com o item 4.2.4.4, para cada um dos aparelhos testados. A apresenta, ainda, os índices de precisão, σ_c , CEP, CMAS e $3,5\sigma_c$, calculados de acordo com 4.2.4.5.

Tabela 19 – Parâmetros para comparação dos aparelhos receptores de sinal GPS operando com correção diferencial.

Aparelho	$\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	Índices de Desempenho					
		EA [m]	ERM [m]	σ_c [m]	CEP [M]	CMAS [M]	$3,5\sigma_c$ [m]
AgGPS 132 c/c	0,80	0,180	0,330	0,271	0,319	0,581	0,947
eTrex c/c	0,73	0,860	1,384	1,129	1,330	2,423	3,952
III Plus c/c	0,97	0,318	1,276	1,179	1,388	2,530	4,126
PM c/a c/c	0,77	0,412	0,018	0,015	0,017	0,031	0,051

A relação $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ apresentada na Tabela 19 mostra que todos os valores estiveram entre 0,2 e 1,0, portanto, os cálculos adotados para os índices de precisão são válidos.

Assim como ocorreu com os aparelhos operando sem correção diferencial, a variação da relação $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ entre os aparelhos sugerem níveis de probabilidade diferentes para os índices MSPE e 2drms. Devido a este fato, os índices mencionados não são adequados para serem utilizados como parâmetro de comparação entre o desempenho dos aparelhos e, portanto, não foram calculados.

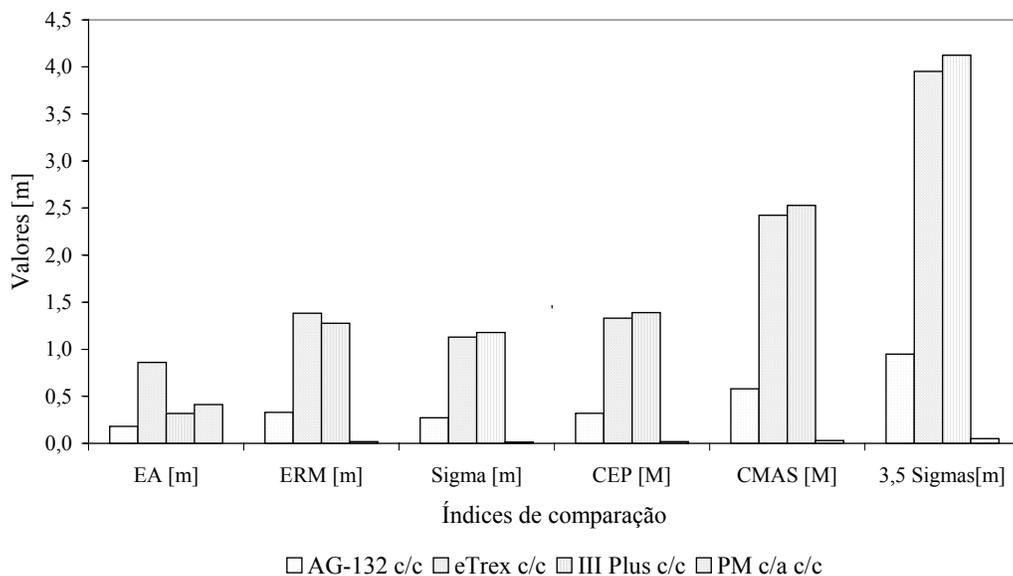


Figura 75 – Comparação do desempenho dos aparelhos testados com correção diferencial.

5.3.5.2 Análise de variância do erro radial de posicionamento

A Tabela 20 apresenta a análise de variância dos dados, relativos aos erros radiais de posicionamento, obtidos com os aparelhos receptores de sinais GPS denominados AgGPS 132 c/c, eTrex c/c, III Plus c/c e PM c/a c/c.

Tabela 20 – Análise de variância dos erros radiais de posicionamento.

	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado Médio	F	P
Entre Grupos	29,40935	3	9,80312	20,31965	6,12635E-10
Dentro dos Grupos	39,56052	82	0,48245		
Total	68,96987	85	0,81141		

A análise de variância resulta um valor para o Teste F superior ao valor tabelado para um nível de significância de 5%, portanto, a hipótese experimental não deve ser

descartada, ou seja, há uma diferença estatisticamente significativa entre os erros radiais médios obtidos com os aparelhos receptores de sinais GPS estudados.

5.3.5.3 Comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento

A comparação múltipla das médias dos erros radiais de posicionamento, obtidas com os aparelhos receptores de sinais GPS operando com correção diferencial, foi realizada por meio do teste de Tukey. A Tabela 21 apresenta o teste de Tukey, no nível estatístico de 5%.

As diferenças críticas nos ERM entre pares de grupos são apresentadas acima e à direita na tabela, enquanto as significâncias são apresentadas abaixo à esquerda.

Tabela 21 – Teste de Tukey (5%.) para os erros radiais de posicionamento.

Aparelhos	ERM [m]	Aparelhos			
		PM c/a c/c	AgGPS 132 c/c	III Plus c/c	eTrex c/c
PM c/a c/c	0,01795	----	0,59116	0,55952	0,55952
AgGPS 132 c/c	0,33012	não	----	0,55952	0,55952
III Plus c/c	1,27583	sim	sim	----	0,52599
eTrex c/c	1,38422	sim	sim	não	----

O teste de Tukey realizado mostra que, quanto ao erro radial, pode-se agrupar os aparelhos em dois conjuntos. O primeiro e mais preciso formado pelos aparelhos PM c/a c/c e AgGPS 132 c/c. O segundo e menos preciso formado pelos aparelhos III Plus c/c e eTrex c/c.

Nota-se que não há uma diferença estatisticamente significativa (5%) entre o erro radial médio de posicionamento do aparelho PM c/a c/c em relação ao obtidos pelo aparelho AgGPS 132 c/c. Porém há uma diferença estatisticamente significativa (5%) entre o erro radial médio de posicionamento do aparelho PM c/a c/c em relação aos obtidos pelos aparelhos III Plus c/c e eTrex c/c.

5.4 Comparação de desempenho dos aparelhos operando com e sem correção diferencial

A comparação do desempenho de cada um dos aparelhos, com respeito ao erro radial médio, operando no modo sem e com correção foi realizada de acordo com o item 4.2.4.6.1. Os resultados obtidos com o teste “t” em um nível de significância de 5% estão apresentados na Tabela 22.

Tabela 22 - Resultados do teste “t” (5%) para comparação do ERM em função do modo de operação

Aparelho	Modo de Operação	ERM [m]	$t_{\text{crítico}}$	$t_{\text{calculado}}$
AgGPS 132	s/c	1,54705	2,01808	6,53401
	c/c	0,33012		
eTrex	s/c	2,41393	2,01174	3,42052
	c/c	1,38422		
III Plus	s/c	2,68073	2,01174	3,63136
	c/c	1,27583		
PM 2	c/a s/c	2,08677	2,01669	7,62231
	c/a c/c	0,01795		

Nota-se que para todos os aparelhos o valor $t_{\text{calculado}}$ foi maior que o valor $t_{\text{crítico}}$, portanto pode-se rejeitar a hipótese nula em favor da experimental no nível de 5% de significância, ou seja, todos os aparelhos apresentaram ERM estatisticamente diferentes quando operados com e sem correção diferencial.

Nota-se, ainda, que em todos os casos o erro radial médio foi menor no modo de operação com correção do que no modo de operação sem correção, conforme era esperado.

5.5 Comparação geral de desempenho

A Figura 76 apresenta uma comparação geral entre o desempenho dos aparelhos. Nesta figura são apresentadas a acurácia, em termos de erro absoluto, e a precisão, em termos do desvio padrão da distribuição circular (σ_c). O índice de desempenho σ_c foi escolhido como representativo da precisão já que os demais índices de distribuição circular são calculados a partir do próprio σ_c .

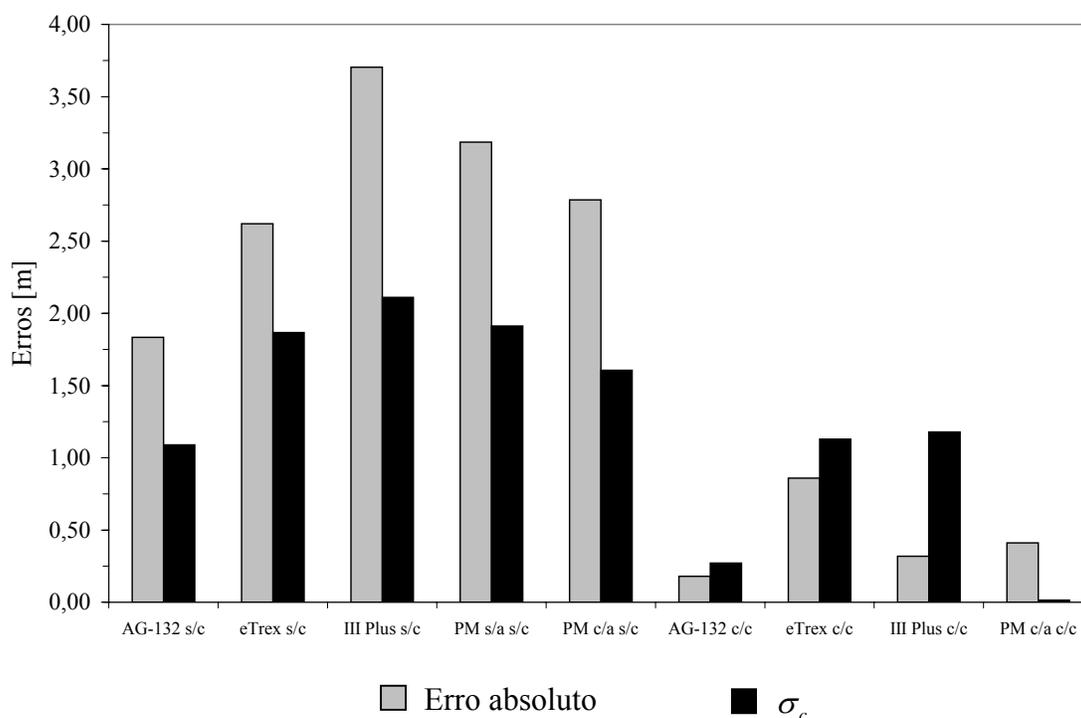


Figura 76 – Comparação do desempenho geral dos aparelhos.

Nota-se que todos os aparelhos operando sem correção diferencial apresentaram Erros Absolutos maiores que os valores adotados como padrão para a dispersão (σ_c). No entanto, no caso dos aparelhos operando com correção diferencial em tempo real os Erros Absolutos foram menores que o erro σ_c . O mesmo não ocorreu com o aparelho PM c/a c/c que operou com correção diferencial pós-processada.

Analisando-se a Figura 76 pode-se observar que a correção diferencial em tempo real reduziu consideravelmente o erro absoluto e o erro σ_c e que o efeito da correção no erro absoluto foi ainda mais significativo do que no erro σ_c . Isto se deve ao fato que a correção diferencial reduz com maior propriedade os erros sistemáticos do que os erros aleatórios do processo de medição.

No caso do aparelho ProMark 2 a correção diferencial pós-processada reduziu com mais propriedade o erro σ_c do que o erro absoluto. Isto provavelmente deve-se ao fato de que o aparelho ProMark 2 se utilizou da técnica *stop and go*, que a tomada de dados durava 15 segundo sobre o marco, sendo tomadas 15 medições do ponto durante este período e que as 15 medições foram posteriormente utilizadas no software de pós-processamento para a obtenção de um único valor corrigido.

5.6 Comparação dos custos

A comparação dos custos dos aparelhos em relação à acurácia e à precisão, para a operação sem e com correção diferencial, foi realizada de acordo com o item 4.2.4.7.

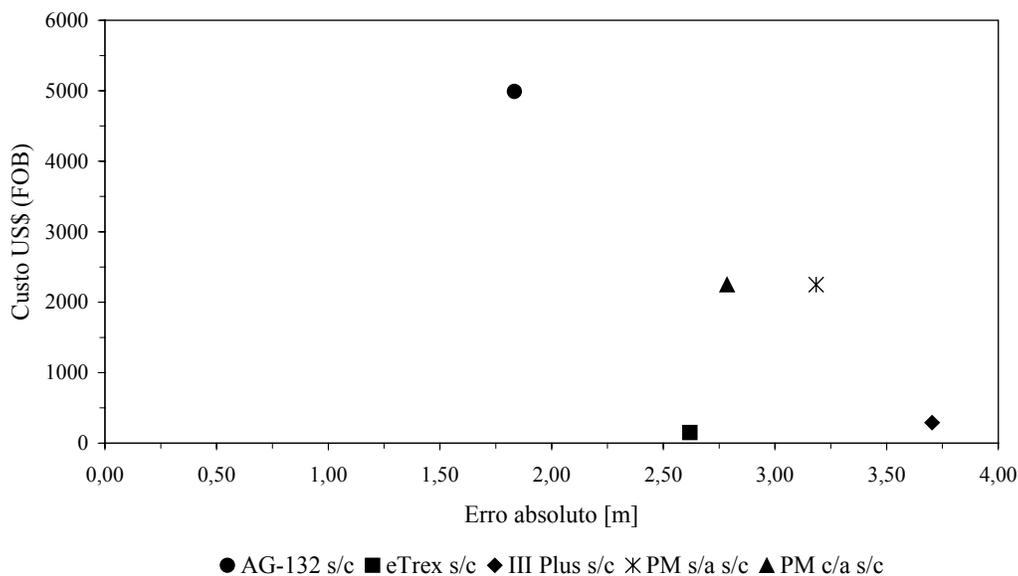


Figura 77 - Custo em função do erro absoluto para os aparelhos operando sem correção diferencial.

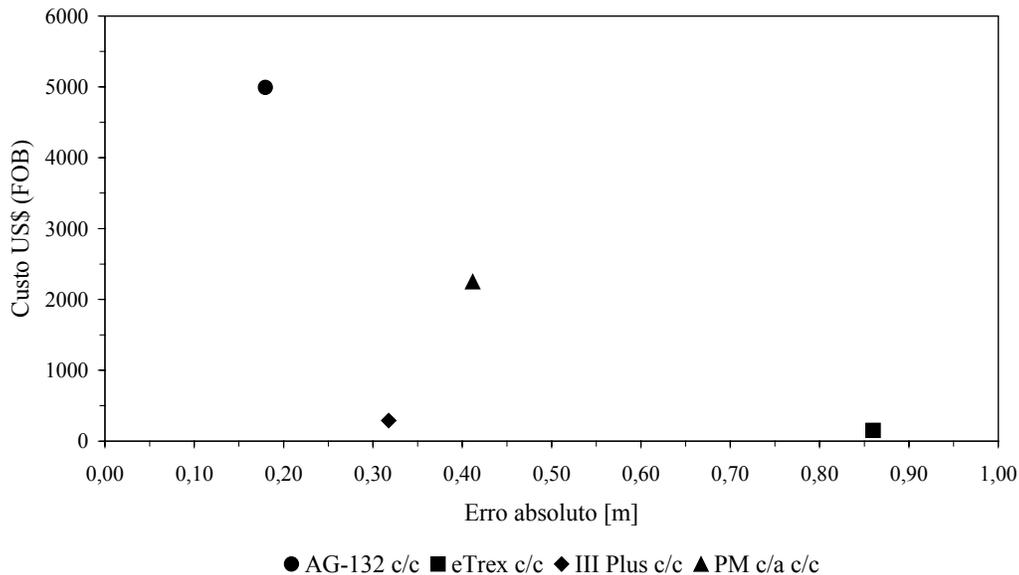


Figura 78 - Custo em função do erro absoluto para os aparelhos operando com correção diferencial.

A Figura 77 e a Figura 79 mostram o custo de cada um dos aparelhos em função da acurácia (aqui representada pelo erro absoluto) respectivamente para o modo de operação sem e com correção diferencial.

Considerando-se unicamente que a melhor situação seria aquela em que os aparelhos apresentassem menor custo e menor erro, os aparelhos situados mais próximo da origem dos eixos coordenados do gráfico seriam os preferidos para uma determinada utilização.

Nota-se pela Figura 77 que o aparelho AgGPS-132 operando sem correção possui menor erro absoluto, porém maior custo. Já o aparelho eTrex operando sem correção apresenta o menor custo, embora não tenha o menor erro absoluto. Caso a magnitude do erro absoluto fosse aceitável para uma determinada utilização sem correção diferencial, esta seria a escolha mais adequada.

A Figura 78 mostra que o aparelho AgGPS-132 operando com correção diferencial possui o menor erro absoluto, porém maior custo. Os aparelhos eTrex e III Plus operando com correção possuem os menores custos, sendo que o aparelho III Plus apresentou o menor erro absoluto.

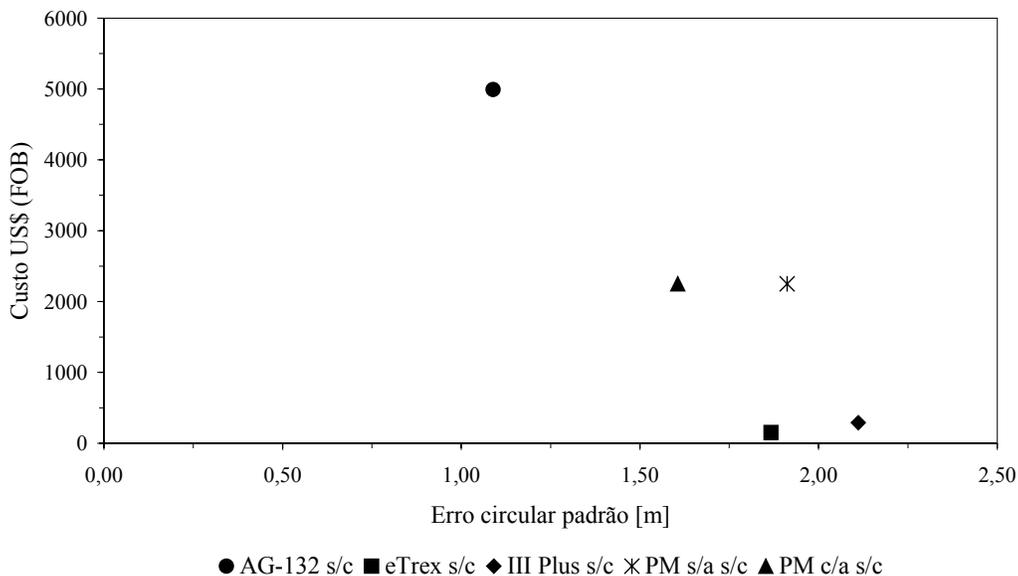


Figura 79 - Custo em função do erro circular padrão para os aparelhos operando sem correção diferencial.

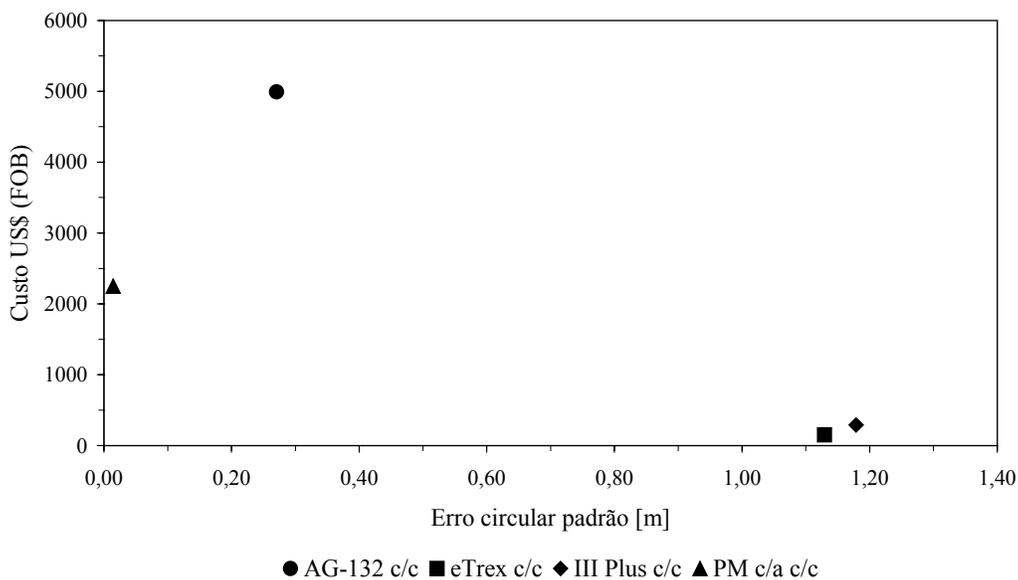


Figura 80 - Custo em função do erro circular padrão para os aparelhos operando com correção diferencial.

Com respeito à precisão (aqui representada pelo erro circular padrão) o aparelho AgGPS-132 operando sem correção apresentou o maior custo e a melhor precisão (Figura 79). Na mesma figura nota-se que o aparelho eTrex apresentou o menor custo dentre os

aparelhos avaliados, porém apresentou menor precisão do que os aparelhos AgGPS-132 e ProMark 2 no mesmo modo de operação.

Na Figura 80 nota-se que o aparelho ProMark 2 operando com correção diferencial pós-processada supera tanto em custo, quanto em precisão o aparelho AgGPS-132 operando com correção diferencial em tempo real. Os aparelhos eTrex e III Plus, operando com correção em tempo real, apresentaram níveis próximos de custos e precisão.

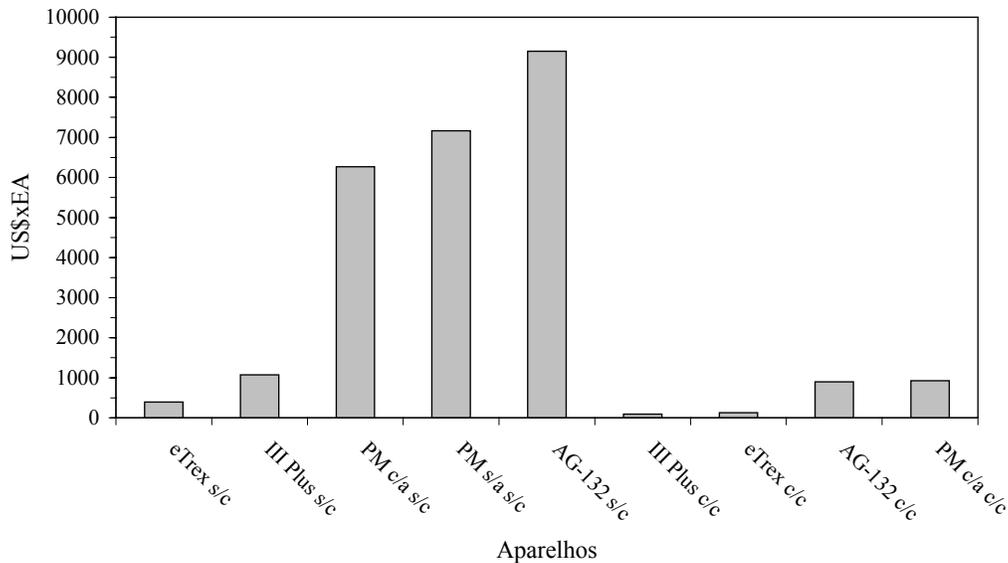


Figura 81 – Índice IEA para os aparelhos operando sem e com correção diferencial.

O índice IEA foi calculado de acordo com o item 4.2.4.7. Tem a função de auxiliar na escolha de um aparelho para uma determinada aplicação baseando-se unicamente no custo e na acurácia.

A Figura 81 mostra os índices IEA obtidos com os aparelhos avaliados operando com e sem correção diferencial. Dentre os aparelhos operando sem correção diferencial o que apresentou o melhor IEA foi o eTrex, enquanto o que apresentou o pior índice foi o aparelho AgGPS-132. Dentre os aparelhos operando com correção diferencial o que apresentou o melhor IEA foi o III Plus, enquanto os piores foram o AgGPS-132 e o ProMark 2 com índices IEA bastante próximos.

Embora os aparelhos AgGPS 132 e ProMark 2 sejam aparelhos indicados para operarem principalmente com correção diferencial, os aparelhos de mais baixo custo (eTrex

e III Plus), operando sob igual condição, apresentaram melhores índices IEA devido ao seus custos serem muito inferiores aos demais.

Deve-se observar que todos os aparelhos, operando com correção diferencial, obtiveram índices sub-métricos de desempenho com respeito à acurácia, o que abre uma gama de possibilidades para a utilização de aparelhos GPS de custos mais inferiores em aplicações que requeiram acurácia mais elevada a mais baixos custos.

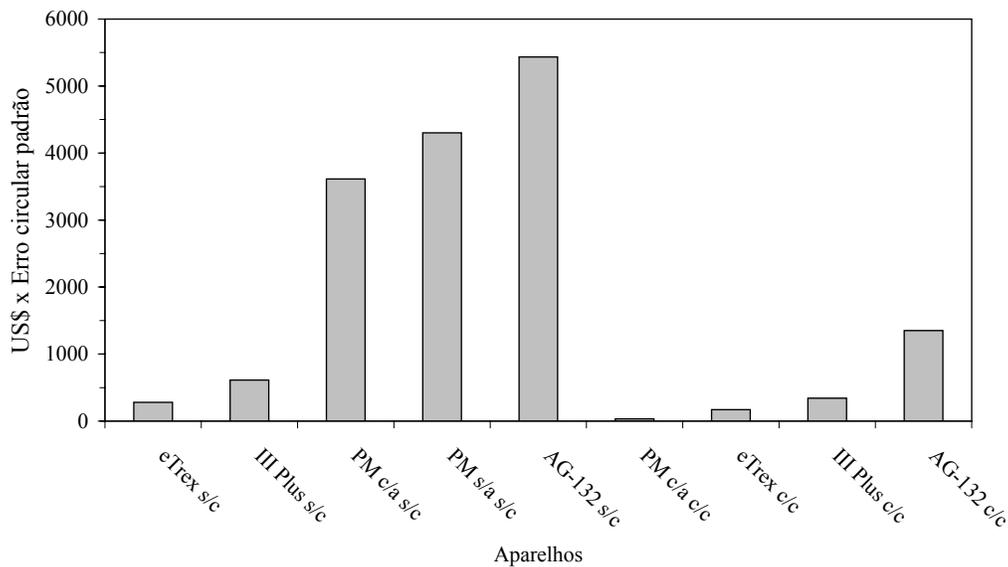


Figura 82 – Índice $I\sigma_c$ para os aparelhos operando sem e com correção diferencial.

O índice $I\sigma_c$ foi calculado de acordo com o item 4.2.4.7. Tem a função de auxiliar na escolha de um aparelho para uma determinada aplicação baseando-se unicamente no custo e na precisão.

A Figura 82 mostra os índices $I\sigma_c$ obtidos com os aparelhos avaliados operando com e sem correção diferencial. Dentre os aparelhos operando sem correção diferencial o que apresentou o melhor $I\sigma_c$ foi o eTrex, enquanto o que apresentou o pior índice foi o aparelho AgGPS-132, assim como ocorreu com o índice IEA. Dentre os aparelhos operando com correção diferencial o que apresentou o melhor $I\sigma_c$ foi o ProMark 2 (correção pós-processada), enquanto o pior foi AgGPS-132.

Embora os aparelhos AgGPS 132 e ProMark 2 possuam custos mais elevados, apresentaram piores índices $I\sigma_c$, quando operaram sem correção diferencial, do que os aparelhos de mais baixo custo (eTrex e III Plus). Isto deve-se ao fato de que os aparelhos AgGPS 132 e ProMark 2 são recomendados para operarem principalmente com correção diferencial, enquanto os aparelhos eTrex e III Plus são recomendados principalmente para operação sem correção diferencial. Não obstante, os aparelhos eTrex e III Plus, operando com correção diferencial, obtiveram índices $I\sigma_c$ melhores do que o aparelho AgGPS 132 sob igual condição.

6. CONCLUSÕES

A realização deste trabalho permitiu concluir que:

- A metodologia empregada mostrou-se adequada para a determinação das características de desempenho quanto à acurácia e à precisão dos aparelhos receptores de GPS, operando com e sem correção diferencial, para a obtenção das coordenadas de marcos fixos.
- Observaram-se diferenças significativas em desempenho de acurácia e de precisão entre os aparelhos receptores de GPS avaliados, tanto operando sem correção diferencial, quanto com correção diferencial.
- Com respeito aos aparelhos avaliados, a correção diferencial permitiu um incremento significativo da acurácia e da precisão na determinação das coordenadas dos marcos.
- A correção diferencial em tempo real reduziu com maior propriedade os erros sistemáticos do que os erros aleatórios do processo de medição.
- O método utilizado na correção diferencial pós-processada reduziu com maior propriedade os erros aleatórios do que os erros sistemáticos do processo de medição
- A definição de índices de desempenho, baseados na acurácia e na precisão em função do custo, foi importante para comparação dos aparelhos avaliados.
- Para aplicações que requeiram acurácia mais elevada, porém com restrições de custos, pode-se utilizar aparelhos GPS de custos mais reduzidos, operando com correção diferencial.

- Este trabalho apresentou uma metodologia de avaliação de aparelhos GPS, bem como, disponibilizou características de desempenho de alguns aparelhos, quanto à acurácia e à precisão, que podem auxiliar na escolha adequada em função de aplicações específicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANGULO, Rubens . **Avaliação da Exatidão de posicionamento Planimétrico de um Receptor GPS Operando sob Diferentes Condições de Cobertura Vegetal**. 180p. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo – ESALQ, Piracicaba, 2001.

BLITZKOW, Denizar. **Posicionamento por Satélite: NAVSTAR/GPS**. 36p. Apostila – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991.

BUENO, Régis Fernandes. **Avaliação do Sistema NAVSTAR/GPS**. 208p. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Universidade de São Paulo, 1995.

CAPPELLI, Nelson. L. **Agricultura de Precisão: Novas Tecnologias para o Processo Produtivo**. < <http://wwwbases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.htm>>, 05/05/2002.

DMA, **Error Theory as applied to mapping, charting, and geodesy**. 109p. Technical Report; VA, USA, 2001.

FITZ, Paulo Roberto. **Cartografia Básica**. Centro Universitario La Salle, Canoas, 2000.

GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba, PR: Editora UFPR, 1994.

GOMES, Frederico Pimentel. **Curso de estatística experimental**. 10^a ed. Piracicaba – SP. Livraria Nobel S.A. Editora – Distribuidora, 1982. 430p.

HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J.. **Global Positioning System: Theory and Practice**. 3d. Edition. Springer-Verlag Wien New York, 1994.

IBGE, **Especificações e Normas Gerais para Levantamentos GPS**: Preliminares. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Documentação Geral, Diretoria de Cartografia, Rio de Janeiro, 1994.

IBGE, **Noções Básicas de Cartografia**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Documentação Geral, Diretoria de Geociências, Departamento de Cartografia, Rio de Janeiro, 1998.

KENNEDY, J.B.; NEVILLE A.M. **Basic statistical methods for engineers & scientists**. 2nd Edition. United States of America: Harper & Row, 1976.

LAMPARELLI, Rubens A. C.; ROCHA, Jansle V.; BORGHI, Elaine. **Geoprocessamento e Agricultura de Precisão**. Editora Agropecuária, 2001.

LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Análise estatística de dados geológicos**. 1^a ed. São Paulo – SP: Fundação Editora da UNESP, 1998. 226p.

LEICK, A. **GPS Satellite Surveying**. John Wiley & Sons Inc. 1994.

LEVIN, Jack. **Estatística aplicada a ciências humanas**. 2^a ed. São Paulo – SP. Editora Harbra Ltda, 1987, 391p.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão. Parte I: O que é e estado da arte em sensoriamento. Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17,n.2, p. 97-107, dez. 1997A.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão. Parte II: Diagnóstico, aplicação localizada e considerações econômicas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.17,n.2, p. 108-121, dez. 1997B.

MONICO, J. F. **Posicionamento pelo NAVSTAR/GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora UNESP, 2000.

NETO, P.L.O.C. **Estatística**. São Paulo - SP: Edgard Blucher, 1977.

PACILÉO NETTO, Nicola. **Campo de Provas para Instrumentos de Medição e Posicionamento**. 135p. Tese (Livre Docência) – Universidade de São Paulo, 1997.

ROCHA, Cezar H. B.. **Geoprocessamento: Tecnologia Transdisciplinar**.Ed. do Autor, Juiz de Fora, 2000.

SEEBER, G. **Satellite Geodesy: foundations, methods, and applications**. New York, Walter de Gruyter, 1993.

SEGANTINE, Paulo C. L.. **GPS: Sistema de Posicionamento Global**.181p. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

SHROPSHIRE, G. J., PETERSON, G. J., FISHER, K. **Field experience with differential GPS**. St. Joseph: ASAE, 1993. 14p. (Paper 93-1073).

SHUELLER, J. K. A review and integrating analysis of Spatially-Variable Crop Control of crop production. **Fertilizer Research**, The Hague, v.33, p.1-34,1992.

SILVA, Irineu da; ERWES, Herbert; SEGANTINE, Paulo C. L.. **Introdução à Geomática**. Ed. do Autor, São Carlos, 2001.

SILVA, Irineu da; **Curso de Mensuração: The Global Position System - GPS**, Alagoas, 1995.

SILVEIRA, L. C; **Cálculos Geodésicos no Sistema UTM aplicados à Topografia**, Editora e Livraria Luana, 2ª ed.;Criciúma, SC, 1993.

WELLS, D. E. et al. **Guide to GPS Positioning. Canadian GPS Associates**, New Brunswick, Canada, 1986.