

# A PRECISÃO POSSÍVEL COM GPS L1/CA EM GEORREFERENCIAMENTO: O DESAFIO DO MULTICAMINHO – ANÁLISE DE UM RECEPTOR

*Analysis of the feasible GPS L1/CA receiver precision under the challenger of  
multipath*

JULIO CESAR FARRET  
MARCELO CARVALHO DOS SANTOS  
ENO DARCI SAATKAMP  
EVANDRO PALMA

Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Departamento de Engenharia Rural  
Setor de Geodésia

Programa de Pós-Graduação em Geomática  
( jcfarret@smail.ufsm.br , msantos@unb.ca , enosaat@hotmail.com ,  
evandropalma@yahoo.com.br )

## RESUMO

Desde a criação do sistema Navstar/GPS, várias fontes de erros nas observáveis foram sendo identificadas e estudadas, tais como o atraso ionosférico e o não sincronismo de relógios. O erro causado pelo multicaminho, no entanto, persiste como um desafio, especialmente para aplicações que exigem maior acurácia. No caso do Brasil, com a promulgação da Lei 10267 que institui o Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR), este desafio passou a ter uma conotação específica, pois influencia a aplicabilidade do novo sistema cadastral. As empresas fabricantes de receptores GPS tem feito grandes investimentos em pesquisa em nível de projeto dos seus receptores. A presente pesquisa busca estudar as tecnologias aplicadas no receptores GPS Ashtech Promark2, bem como analisar o desempenho dessas tecnologias em condições de campo de extrema dificuldade para o rastreamento do sinal provocadas por cobertura vegetal, como é comum em georreferenciamento para o CNIR. Os resultados mostram grande potencial de uso desse receptor para trabalhos de certificação junto ao INCRA, bem como evidenciam situações limites em que o emprego do mesmo fica prejudicado.

**Palavras-chave:** GPS, multicaminho, DLL, PLL.

### ABSTRACT

Since the creation of the NAVSTAR/GPS several sources of observational errors have been identified and studied. They include, among others, ionospheric delay and clock offsets. The error caused by multipath, however, persists as a challenge, especially for applications that demand high accuracy. In Brazil, with the promulgation of Law 10267/2001 creating the National Cadastre of Rural Properties (CNIR), this challenge assumes a specific feature since it influences the applicability of the new cadastral system. The GPS receiver manufacturing companies have been making large investments in research to deal with multipath, especially at receiver design level. This work performs an analysis of the applied technologies involved in the Ashtech Promark 2 GPS receiver in field conditions as realistic as possible similar to the ones encountered in geodetic surveys satisfying CNIR's specifications. The results show the potential of using such receivers to certification works by the Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA). It also makes evident their limitations.

**Keywords:** GPS, multipath, Delay Lock Loop, Phase Lock Loop.

## 1. INTRODUÇÃO

Pode-se relacionar os erros nas medidas GPS às suas fontes, como no caso dos erros relacionados aos satélites (erros de órbita e relógio) e erros relacionados à propagação do sinal e à estação receptora (refração troposférica e ionosférica, perdas de ciclos, rotação da Terra e multicaminho). Pesquisadores e empresas fabricantes de receptores GPS vêm empenhando-se em apresentar soluções para a atenuação e/ou eliminação desses erros, sendo que a maioria já não representa problemas para a obtenção de grandes precisões com o uso do GPS. Esse não é o caso do erro devido ao multicaminho (FARRET, 2000) pois, apesar de alguns avanços nas técnicas de atenuação, ainda se trata de uma das últimas fronteiras para obtenção de elevada precisão e acurácia, como necessário em levantamentos cadastrais legais, como é o caso do Cadastro Nacional de Imóveis Rurais (CNIR).

Objetivando dar maior competitividade comercial aos seus produtos, as empresas têm financiado estudos e pesquisas com o intuito de criar técnicas capazes de, pelo menos, atenuar esse problema. Devido às peculiaridades do multicaminho, principalmente relacionadas às características de diversidade e não estaticidade dos ambientes, esses investimentos têm se concentrado no aperfeiçoamento do projeto interno dos receptores, ou seja, no tratamento do problema de rastreamento do sinal e, mais especificamente, na função de correlação do sinal vindo do satélite com a réplica gerada internamente no receptor. Desses estudos resultaram técnicas de processamento como: *Narrow Correlator* - receptores Novatel (FENTON et. al., 1991), *Strobe Correlator*, *Edge Correlator* e *Enhanced Strobe Correlator* –

receptores Ashtech (GARIN et al., 1996), *Multipath Estimating Delay Lock Loop – MEDLL* (VAN NEE, 1994), *Gated Correlator* (BRAASH & McGRAW, 1999), *Multipath Mitigation Correlator - MM Correlat*, e *Smoothing* - receptores Leica (HATCH, 1982 e LACHAPELLE et al., 1986) dentre outras. Estas e outras técnicas de processamento de sinal estão atualmente introduzidas sob a forma de algoritmos em diferentes tipos de receptores GPS disponíveis no mercado. Elas proporcionaram melhoras efetivas no desempenho dos receptores GPS? Qual o desempenho desses receptores nas condições de campo impostas pela nova Lei 10.267/2001 do CNIR? O presente trabalho procura subsidiar os usuários do receptor GPS Ashtech Promark2, especialmente aqueles que se dedicam ao georreferenciamento de imóveis rurais, fazendo-se uma análise do seu desempenho em um cenário quase sempre encontrado por esses profissionais nesse tipo de trabalho, ou seja, a intensa cobertura por folhagem e proximidade de rede elétrica. Nessas situações o profissional precisa conhecer a capacidade de resposta do aparelho, o que nem sempre é feito no nível dos testes de quando mesmo é projetado, o que é feito em condições de rastreio adequadas ou sintéticas. Procurou-se usar um ambiente desafiador em termos de densidade de folhagem e altura das árvores (cerca de 25 metros) na tentativa de representar situações realmente extremas. Atendendo à recomendação da Norma Técnica para o Georreferenciamento de Imóveis Rurais (INCRA, 2003), no âmbito deste trabalho denominada de Norma Técnica, o receptor foi utilizado conforme a recomendação da própria empresa fabricante. Os resultados apontam para o uso satisfatório desse instrumento para o georreferenciamento no CNIR.

## 2. AMPARO CONCEITUAL E MATEMÁTICO

### 2.1 O Georreferenciamento no Cadastro Nacional de Imóveis Rurais

A obediência rigorosa aos procedimentos contidos na Norma Técnica não garante a acurácia final estabelecida pela Lei 10267. Isso se deve, principalmente, ao multicaminho, pois ele não é um fenômeno plenamente detectável e controlável pelos receptores GPS, embora alguns parâmetros indicadores da qualidade do levantamento possam indicar a presença de multicaminho em maior ou menor grau como, por exemplo, dificuldade de fixação de ambigüidades, baixo valor da taxa *ratio* (relação entre a melhor e a segunda melhor solução estimada para o valor das ambigüidades inteiras) e elevado desvio-padrão. É por esse motivo que essa norma, como em geral todas as demais, não apresentam indicações de valores e parâmetros seguros que tratem de forma adequada o problema do multicaminho nos levantamentos, mas apenas sugestões preventivas, como a localização adequada das antenas, por exemplo.

## 2.2 Técnicas de Atenuação do Multicaminho

Sendo o multicaminho causado por reflexões do sinal direto em objetos mais ou menos próximos da antena, os seus efeitos podem ser dirimidos através de técnicas que, de um ponto de vista geral, podem ser divididas em técnicas externas ao receptor e técnicas internas a ele. As técnicas externas são de natureza primária e consistem de técnicas baseadas em antenas e no tratamento de sinais em nível de pós-processamento. As técnicas internas ao receptor compreendem melhoras nas tecnologias de recepção (*tracking*) ou no processamento interno do sinal, ou seja, atuam no projeto dos receptores, pressupondo sofisticação tecnológica. Os recursos disponíveis neste nível são, basicamente, a extensão da banda do sinal (*bandwidth*), o tempo de integração da pré-deteccção e o intervalo entre os correlacionadores. Detalhes sobre estes tópicos podem ser vistos, por exemplo, em KAPLAN et. al. (2006).

As técnicas baseadas em antena levam em conta a geometria dos sinais ao redor da mesma e compreendem a sua localização adequada, o uso de antenas especiais e o uso de múltiplas antenas. Se encaixam aqui o uso de plano-terra, *choke-ring* (WEILL, 1997) ou antenas com capacidade de rejeitar a polarização à esquerda (LHCP – *Left-Hand Circular Polarized*), que é a polarização do sinal refletido, ao contrário da polarização circular para direita (RHCP – *Right-Hand Circular Polarized*), como é o caso do sinal direto (BRAASH, 1996 e MONICO, 2000). A eficiência dessa técnica é parcial, uma vez que somente partes dos sinais polarizados à esquerda são atenuados. Isso faz com que essa técnica deva ser utilizada em conjunto com outras, especialmente as técnicas internas ao receptor, como ocorre com o Promark2, conforme a empresa fabricante informa nos documentos referentes a seus produtos, o que também é analisado no presente trabalho. Esse tipo de antena apresenta respostas mínimas a sinais com ângulos de elevação muito baixos, ou seja, aqueles com maior potencial de multicaminho e ruído. Pode-se ainda reduzir os efeitos do multicaminho adotando o desenvolvimento de múltiplas antenas, como em RAY et. al. (1998) e FARRET (2000) ou o conjunto de múltiplas estações de referência proposto por LACHAPELLE et. al. (1986).

Com relação às técnicas baseadas no tratamento de sinais em nível de pós-processamento, cita-se o uso da alta correlação do sinal em antenas próximas (FARRET, 2000 e RAY et. al., 1998), a técnica de multirresolução baseada em integrais *wavelets* (SOUZA & MONICO, 2003) e a variação da geometria das reflexões causada pela movimentação angular dos satélites no tempo (WEILL, 1997).

Com relação às técnicas internas ao receptor, elas apresentam grande atratividade comercial, pois possibilitam atenuar o multicaminho em condições de navegação em tempo real, com constantes mudanças de cenário. Essas técnicas atuam no rastreamento do sinal pelo receptor (medida direta de tempo) ou na própria

forma de cálculo da distância receptor-satélite. As técnicas internas ao receptor são o enfoque precípuo deste trabalho.

As técnicas baseadas no rastreamento do sinal atuam na determinação do tempo que gera as distâncias receptor-satélite, básicas para a determinação das coordenadas desejadas com GPS. Os receptores também usam as medidas da fase das ondas portadoras para obter essa distância com maior acurácia (WEILL, 1997) através do produto entre o número de ciclos existentes desde a antena do receptor até o satélite e o comprimento de onda da portadora utilizada (L1 e/ou L2). A estimativa de tempo é feita através da correlação (alinhamento) entre o sinal que chega e sua réplica, calculado através do grau desse alinhamento entre os dois sinais pela chamada Função de Correlação (ou de Auto-Correlação), cuja sugestão de modelo matemático pode ser vista em WEILL (1997). É na Função de Correlação que atuam as técnicas de atenuação do multicaminho baseadas no *tracking* do sinal, logo, para uma boa precisão nas medidas de pseudodistâncias e fases, quanto mais agudo for o pico da Função de Correlação Cruzada, melhor.

FENTON et. al. (1991) e VAN DIERENDONCK et. al. (1992) introduziram pela primeira vez a técnica chamada de Correlacionadores Estreitos - *Narrow Correlators*. Esta técnica se baseia na diminuição nos intervalos originalmente utilizados na concepção do sistema GPS para correlação entre o sinal original e sua réplica, buscando uma diminuição das interferências de sinais adjacentes ao pico dessa função, como o multicaminho. A técnica *Narrow Correlator* oferece uma significativa melhora na atenuação dos efeitos do multicaminho em comparação com o obtido com a correlação padrão original (WEILL, 1997) e precedeu a criação de outros métodos, como: *MEDLL - Multipath Estimating Delay Locked Loop* (TOWNSEND et. al., 1995); *Strobe Correlator* (GARIN et al., 1996); *MRDLL - Modified Rake DLL* (LAXTON, 1996); *RDLL - Rake Delay Locked Loop* (SHEEN & STUBER, 1995); *n-MRDL - n - Multipath Reflections DLL* (LAXTON, 1996) e  $\alpha$  - *Deploying Estimator* (GADALLAH et al., 1998). O *Narrow Correlator* padrão utiliza espaçamentos de 0,1 segmento (*chip*) do código C/A para realizar a Função de Correlação, o que ocorre dentro do *DLL - Delay Locked Loop* (GADALLAH et. al., 1998).

Em relação às técnicas baseadas na forma de determinação da distância receptor-satélite, a forma mais consagrada baseia-se no fato de usar a quantificação precisa da variação da pseudodistância determinada através das medidas da fase da portadora para gerar medidas de pseudodistâncias receptor-satélite bem mais precisas que aquelas derivadas de código simples. A grande vantagem desta técnica é a operacionalidade, pois não depende da resolução de ambigüidades. A forma original foi proposta por HATCH (1982) e foi aperfeiçoada posteriormente por LACHAPPELLE et. al. (1986) e WESTROP et. al. (1990). Segundo SEBBER (2003), a técnica passou a apresentar melhores resultados após a desativação do SA em 1º de maio de 2000. Segundo BISNATH (2002), posicionamentos absolutos são possíveis com alta precisão usando-se uma combinação de código suavizado com

órbitas precisas. O desenvolvimento matemático dessa técnica pode ser encontrado, por exemplo, em HOFMANN-WELLENHOF (2001), SEEBER (2003) e FARRET (2003), o que não é explicitado aqui por não ter sido identificada como parte das técnicas implementadas no receptor em estudo.

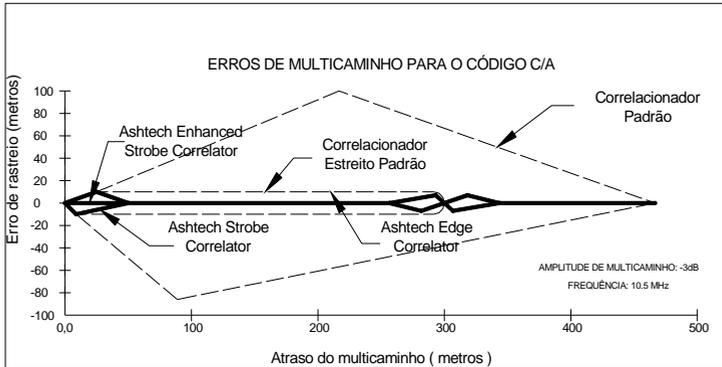
### 2.3 A Atenuação do Multicaminho no Receptor Ashtech Promark2

GARIN & ROUSSEAU (1997) propuseram as tecnologias conhecidas como “*Edge Correlator*” e “*Strobe Correlator*”. Implementadas em receptores da marca Ashtech, elas buscam reduzir os efeitos do multicaminho nas medidas por código. Mais modernamente, esses mesmos autores propuseram a tecnologia conhecida como “*Enhanced Strobe Correlator*” (ESC), também implementada em receptores Ashtech, como o ProMark2, e evoluída para reduzir o multicaminho não somente nas medidas de código como também nas de fase das portadoras, num trabalho intitulado “*Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code and Carrier*”. Essa tecnologia é uma evolução da “*Strobe Correlator*” que está baseada na combinação de dois correlacionadores de espaçamento reduzido formando uma combinação linear, com resposta para atraso do multicaminho próxima a zero quando a correlação for máxima (GARIN et. al., 1997). A tecnologia “*Ashtech Strobe Correlator*” agrupa diferentes combinações lineares de correlacionadores de espaçamento reduzido e estão cobertos por patentes comerciais pela Ashtech, ou seja, múltiplos correlacionadores, o que é uma diferença característica em relação a outras formas.

As figuras 1 e 2 mostram um diagrama de erros de multicaminho no código C/A com o uso dessas técnicas em comparação com os correlacionadores padrão. A figura 2 apresenta o diagrama com a *Ashtech Enhanced Strobe Correlator* em comparação com as demais técnicas Ashtech e com os correlacionadores padrão, mostrando os erros de rastreamento do código para atrasos curtos, ou seja, que envolvem segmentos pequenos do código. De acordo com essa figura, o erro devido ao multicaminho é de aproximadamente 24 metros (80 ns) com erro de rastreamento de 3,5 metros na pseudodistância, apresentando um desempenho, para a técnica *Enhanced Strobe Correlator*, melhor que aqueles obtidos pelo código P/Y (GARIN et al., 1997).

GARIN ET AL. (1997) mostra que, com a técnica *Enhanced Strobe Correlator*, os erros devidos ao multicaminho no rastreamento da portadora tendem a zero para atrasos maiores que 40 metros, como mostrado na figura 3.

Figura 1: Erros de multicaminho no rastreamento do código com a tecnologia Ashtech de rejeição de multicaminho comparado com correlacionadores padrão.

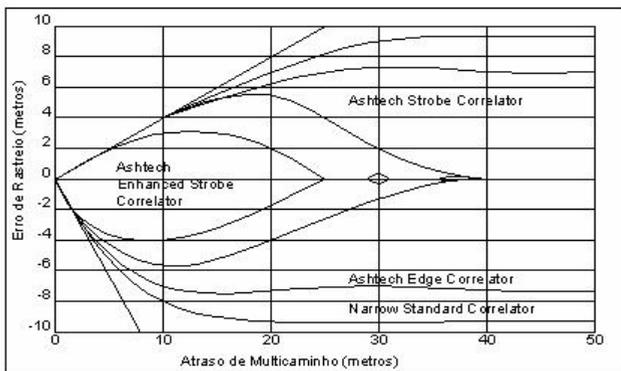


Fonte: GARIN et al. (1997).

Segundo GARIN ET AL. (1997), uma tecnologia de rejeição de multicaminho de código e fase demonstra ser mais eficiente quando combinada do que aplicadas separadamente, pois um melhor rastreamento do código se faz necessário para posicionar os correlacionadores de rastreamento da fase da portadora no ponto de desempenho ótimo.

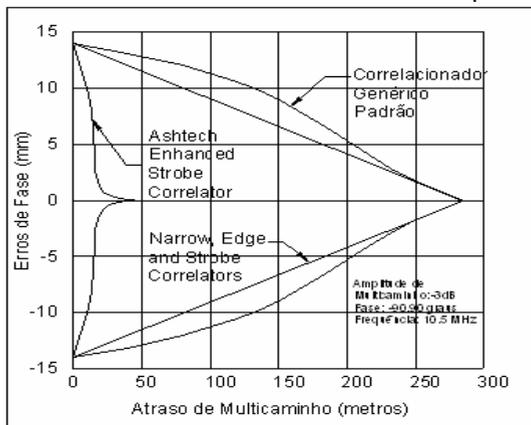
O presente trabalho analisa o desempenho da tecnologia “*Enhanced Strobe Correlator*”, implementada nos receptores Ashtech Promark2, em condições crescentes de dificuldades de rastreamento, especialmente em ambientes de campo para geomensores (mato e redes elétricas).

Figura 2: Erros de rastreamento do código para atrasos curtos.



Fonte: GARIN et al. (1997).

Figura 3: Erros de multicaminho no rastreamento da portadora.



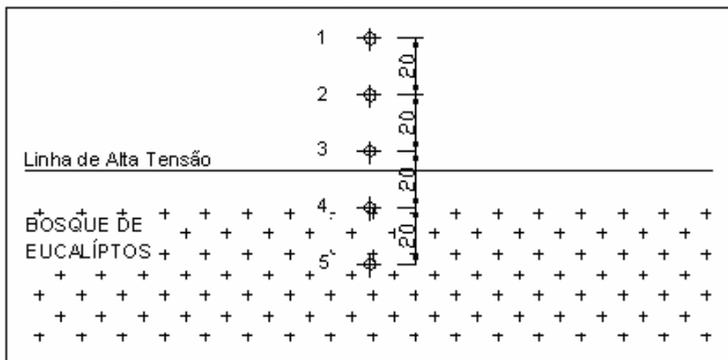
Fonte: GARIN et al. (1997).

### 3. MATERIAL E METODOLOGIA

O receptor GPS Ashtech Promark2 é um receptor de uma frequência  $L_1$ , na presente pesquisa, foi dotado de antena do tipo ProAntena<sup>TM</sup>. Segundo o manual do fabricante, a precisão horizontal (RMS) é de 0,005 metros + 1 ppm e vertical de 0,010 metros + 2 ppm para trabalhos com fase. A precisão de Navegação (RMS) é melhor que 3 metros com antena externa utilizando o sistema WAAS (*Wide Area Augmentation System*). A aparência externa desse receptor é ilustrado na figura 5.

Procurou-se utilizar o receptor Promark2 em condições representativas das condições de maior desafio em termos de multicaminho, atenuação e interferência enfrentadas pelos técnicos que trabalham sob os requisitos do CNIR. Avaliaram-se condições crescentes de dificuldade na recepção do sinal através do rastreamento de 5 pontos de teste que se aproximavam perpendicularmente de um matagal de pinus com rede elétrica com distâncias variando de 20 metros entre si e cujas árvores têm altura em torno de 25 metros. A rede elétrica de alta tensão é paralela à borda do bosque. Esse cenário é mostrado na figura 4. Essa localização configura pontos em situação de multicaminho e interferência muito baixa ou quase inexistente (pontos 1, 2 e 3) até situações onde esses fatores são bastante fortes (pontos 4 e 5).

Figura 4: Distribuição aproximada dos pontos levantados.



Fonte: Os autores.

Nessa condição de campo realizaram-se 30 repetições, possibilitando a formação da estatística para cada ponto, bem como em dois dias consecutivos, por questões de confiabilidade. Os pontos foram rastreados em semelhança de condições, isto é, o rastreamento dos pontos foi realizado em dias consecutivos mas nos mesmos horários. Procurou-se obedecer a defasagem diária de 3 minutos e 56 segundos em cada ponto para poder extrair o sinal do multicaminho pela repetibilidade diária (FARRET, 2000). Em todos os casos, a correção foi feita utilizando-se a base SMAR da RBMC, localizada a aproximadamente 300 metros da área de teste.

As coordenadas desses pontos de referência foram tomadas como verdadeiras e mostradas nos gráficos de dispersão das repetições em cada ponto, sendo utilizadas no cálculo das acurácias testadas. Elas foram determinadas a partir de medidas realizadas com a estação total Leica TC307. Tomou-se como base quatro pontos de apoio localizados no interior do *campus* da UFSM, com saída e chegada em pares distintos desses pontos, para verificação da qualidade do transporte de coordenadas, na forma de azimute, inclusive. Para o cálculo desse transporte de coordenadas no elipsóide usaram-se as fórmulas de Puissant implementadas segundos de arco para distâncias de até 100 km. Esses cálculos foram processados no programa FM Geodésico, desenvolvido no setor de Geodésia do DER/UFSM.

O uso do receptor enquadra-se nos itens 4.5.3.3 - GPS3, página 24; 4.5.3.5.1 - Posicionamento Relativo Rápido Estático (fase da portadora), página 25, e 4.5.3.5.2 - Posicionamento Relativo Pseudo-estático (fase da Portadora), página 25, na Norma Técnica, tanto de forma estática como na forma de cadeia cinemática, mas sempre utilizando a fase das portadoras como observável básica, condição para obtenção da acurácia nominal. No presente trabalho o mesmo foi testado numa condição de rastreamento que atende aos itens 4.5.3.3 e 4.5.3.5.1 uma vez que, segundo o fabricante (<http://professional.magellangps.com/en/products/>), o receptor possui

processador de sinais com capacidade para obter a acurácia nominal com tempo de rastreo bem inferior aos 5 minutos exigidos no último item sem exigir a reocupação de pontos. A inicialização (pré-condição para a solução das ambigüidades como inteiras) pode ser feita através da ocupação de dois pontos de coordenadas conhecidas (o aparelho é acompanhado de uma barra para fixação das duas antenas) ou inicialização estática de cerca de 22 (vinte) minutos para linhas de base de até 5 km (aumentando esse tempo com o aumento da linha de base ou poucos satélites). No presente trabalho usou-se esta última opção por ser mais ágil em nível de campo, a qual foi feita no ponto 1. Os demais pontos foram ocupados por 2,5 minutos.

Para o processamento dos dados brutos obtidos com o Promark2 (correções relativas), usou-se um programa comercial específico do equipamento utilizado na pesquisa, ou seja, o Ashtech Solutions.

O ângulo de corte foi de  $15^\circ$ , com PDOP variando de 1,5 a 5,0 à medida que as condições do rastreo pioravam, havendo casos de perda de rastreo do número mínimo de 4 satélites.

Para identificação das medidas em cada um dos 5 (cinco) pontos, nos 2 (dois) dias em seqüência, utilizou-se a nomenclatura como PM1 para referir as medidas com o Promark2 no ponto 1, MRE para referir-se ao mata e à rede elétrica e 1D para identificar o primeiro dia, ficando esse ponto identificado como PM1MRE1D, e assim sucessivamente.

Figura 5: Receptor Ashtech ProMark2 com antena do tipo ProAntena.



Fonte: Thales Navigation (2004).

O desenvolvimento da estatística utilizada pode ser encontrada em GEMAEL (1994), sendo que a acurácia para cada ponto é dada em função de sua coordenada verdadeira e é expressa da seguinte forma, para amostras grandes, como é o caso do presente trabalho (COSTA NETO, 1977, p. 73-75):

$$\sigma_{E_v} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (E_i - E_v)^2}, \quad (1)$$

$$\sigma_{N_v} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (N_i - N_v)^2}, \quad (2)$$

onde  $E_v$  e  $N_v$  são as coordenadas verdadeiras do ponto considerado.

A acurácia da posição é dada por

$$\sigma_p = \sqrt{(\sigma_{E_v})^2 + (\sigma_{N_v})^2} \quad (3)$$

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Na tabela 1 é apresentada a estatística de cada ponto, tendo as mesmas sido calculadas a partir das coordenada UTM em SAD69 tendo-se utilizado as expressões (1), (2) e (3).

Figura 7: Estatística dos pontos de teste.

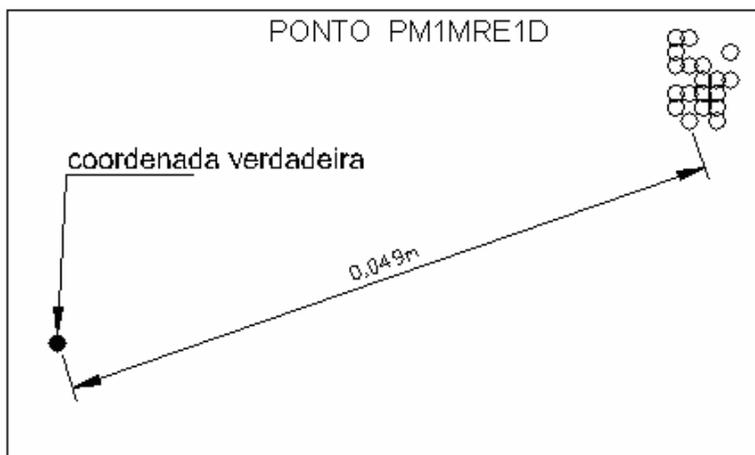
Pontos	Precisão $\sigma_E$ (m)	Precisão $\sigma_N$ (m)	Precisão $\Sigma_P$ (m)	Acurácia $\sigma_{E_v}$ (m)	Acurácia $\sigma_{N_v}$ (m)	Acurácia $\sigma_p$ (m)
M1MRE1D	0,0014	0,0016	0,0021	0,0472	0,0195	0,0511
M1MRE2D	0,0021	0,0021	0,0030	0,0435	0,0235	0,0494
M2MRE1D	0,0013	0,0025	0,0028	0,05	0,0218	0,0545
M2MRE2D	0,0027	0,0033	0,0043	0,0622	0,0377	0,0727
M3MRE1D	0,0067	0,0071	0,0098	0,0537	0,0384	0,066
M3MRE2D	0,0131	0,0088	0,0158	0,0479	0,0384	0,0614
M4MRE1D	3,8983	0,9199	4,0054	4,8252	0,9905	4,9258
M4MRE2D	2,3449	1,8727	3,0009	3,5715	1,9515	4,0699
M5MRE1D	11,4597	15,4184	19,2107	11,9448	15,8298	19,8308
M5MRE2D	9,5196	11,8835	15,2263	9,9966	12,7602	16,2097

Fonte: Os autores.

A solução com fase foi possível até o ponto 3, com acurácias no nível do centímetro. No movimento do receptor do ponto 3 para o ponto 4 começaram a ocorrer quedas de ciclos nas medidas de fase que não permitiram essa solução para os pontos 4 e 5, tendo-se que ficar tempo adicional no ponto para completar o tempo de rastreo. Nestas situações, em que não é possível obtenção de solução com fase para a posição, o sistema de pós-processamento Ashtech Solutions não retorna a solução diferencial baseada somente nas medidas com código, motivo pelo qual os resultados para os pontos 4 e 5 estão no nível de vários metros, ou seja, trata-se de uma posição sem qualquer correção. Em ambos os casos, a comparação do desvio padrão da posição estimada para cada ponto (coluna 4) com a respectiva acurácia (coluna 7) demonstram valores sistematicamente maiores para essas últimas em todos os pontos, o que indica a presença de efeitos sistemáticos nas medidas que podem ser atribuídos em grande parte ao multicaminho, pois aumentam com a aproximação dos refletores e, em menor grau, ao ruído do receptor. Esses resultados mostram claramente a diferença conceitual entre precisão e acurácia. Uma indicação segura da magnitude desses efeitos sobre as coordenadas estimadas pode ser dada pela distância entre a posição média do ponto e o valor verdadeiro. Usando valores médios entre as posições estimadas nos dois dias de levantamento, o valor desta distância para os pontos 1 à 5 são, respectivamente: 4,9 cm, 5,4 cm, 6,2 cm, 14,81 m e 77,69 m. Esses dados confirmam a presença do efeito sistemático com a aproximação dos refletores. Observa-se também que, a aproximação das situações limitantes de levantamento analisadas no presente trabalho, causaram não somente deslocamentos sistemáticos como também dispersão aleatória nas coordenadas estimadas. Outro forte indicativo da presença do multicaminho nas medidas é a incapacidade de fixação de ambigüidades em distâncias menores que 20 metros do mato de pinus. Até o ponto 3 o número de satélites rastreado esteve entre 8 e 9, baixando para 3 a 6 nos pontos 4 e 5, com condiderável aumento no tempo de rastreo. O PDOP se manteve em torno de 2 nos pontos 1, 2 e 3 piorando para valores entre 3 e 7 nos pontos 4 e 5.

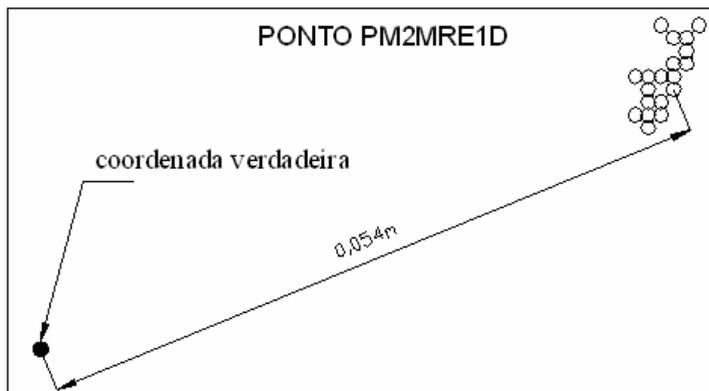
A dispersão dos valores de coordenadas estimados relativamente ao valor verdadeiro, e tendo em vista o limite de 0,5 m imposto pela Lei 10267/2001, é mostrada nas figuras a seguir para os pontos de teste no primeiro dia de levantamento.

Figura 6: Dispersão das coordenadas no ponto PM1MRE1D.



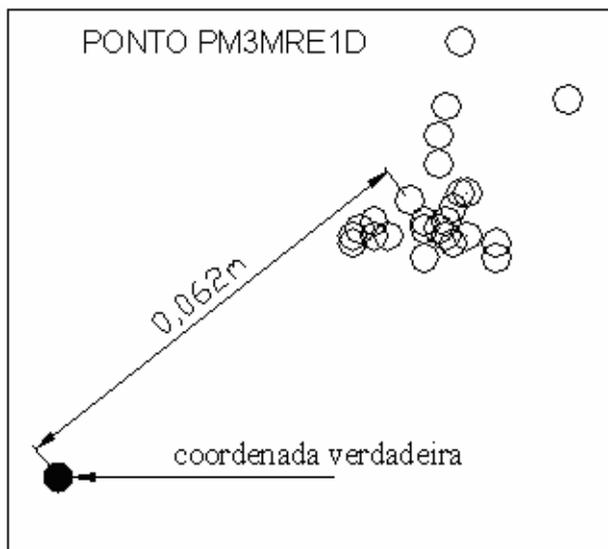
Fonte: Os autores.

Figura 7: Dispersão das coordenadas no ponto PM2MRE1D.



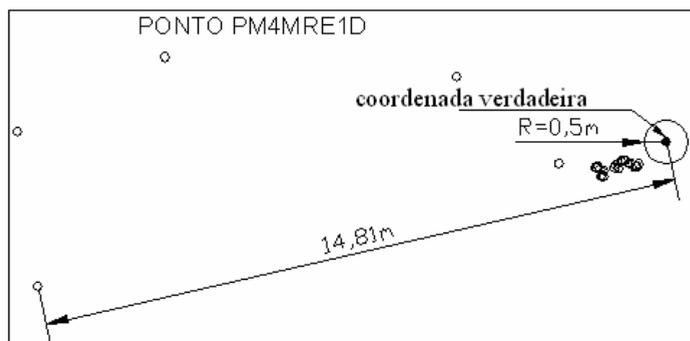
Fonte: Os autores.

Figura 8: Dispersão das coordenadas no ponto PM3MRE1D.



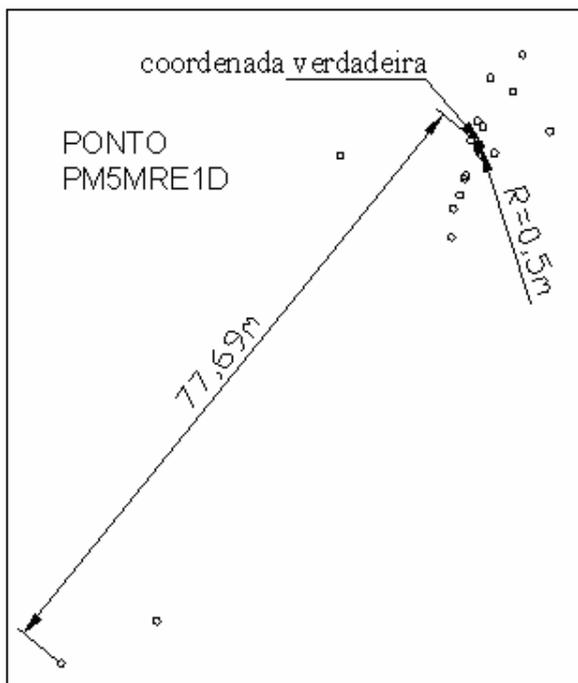
Fonte: Os autores.

Figura 9: Dispersão das coordenadas no ponto PM4MRE1D.



Fonte: Os autores.

Figura 10: Dispersão das coordenadas no ponto PM5MRE1D.



Fonte: Os autores.

Pequenos efeitos de atenuação pura do sinal não foram considerados como prejudiciais à qualidade da posição, uma vez que a mesma tenha sido obtida pois, nesses casos, o receptor deve ter estado com níveis de ruído compatíveis com *tracking threshold* para o qual foi projetado (caso contrário o rastreamento não teria sido possível) e em condições de realizar a acurácia nominal do sistema, a menos que haja multicaminho ou, em menor grau, outra interferência, o que é estudado aqui, e que pode ser verificado, por exemplo, em KAPLAN et. al. (2006).

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Do ponto de vista do usuário, os resultados confirmam a indicação do fabricante, o qual preconiza somente trabalhos com fase em georreferenciamento pelo CNIR. Nesses casos o receptor apresentou excelente desempenho nas condições indicadas, com inicialização em torno de 22 minutos e fixando as ambigüidades como valores inteiros com o tempo de ocupação estudado até o ponto 3, ou seja, 20 metros do mato de pinus e um pouco menos da rede elétrica. Com a

realização da solução fase o total dos efeitos aleatórios e sistemáticos sobre os valores estimados ficou no nível de poucos centímetros. Como isso se repetiu em ambos os dias de levantamentos, há motivos para os usuários terem segurança no uso do receptor dentro destas condições para trabalhos de georreferenciamento. Houve baixíssimo índice de falhas na fixação das ambigüidades, o que é uma característica interessante por que a verificação somente é possível no pós-processamento, quando eventuais falhas exigem o retorno a campo. Houve situações, principalmente nas proximidades dos refletores principais, em que o sistema retorna do processamento um tipo de solução o qual chama “parcial”. Não foi possível verificar o significado desta solução, mas ela é muito próxima da solução com ambigüidades fixadas como valores inteiros, o que leva a crer tratar-se de ambigüidades com valor real (fracionário), ou seja, em que por algum motivo não foi possível ao sistema calcular o valor inteiro. Trata-se de uma excelente alternativa para várias aplicações fora do CNIR, uma vez que a Norma Técnica determina fixação das ambigüidades. Nas situações fora da solução fase também não é possível trabalhar ao abrigo da Lei 10267/2001 pela indisponibilidade da solução de suavização do código pela portadora. Esta alternativa está presente na nova versão deste receptor, o Promark3, cuja análise de desempenho fica como sugestão para trabalhos futuros. Como o sistema não retorna outro tipo de solução além de fase, uma possível solução diferencial não foi analisada no presente trabalho. Nos trabalhos com fase, e para o caso de haver necessidade de distâncias menores que 20 metros, recomenda-se a prévia desobstrução da cobertura vegetal, utilização de bastões com altura superior a essa ou a realização de vértices virtuais, conforme admitido na Norma Técnica. Como o efeito do multicaminho se refletiu fortemente também no desvio-padrão, além da, um bom indicativo da presença dele é dado por um desvio-padrão alto. Dessa forma sugere-se, pelo menos nos locais com maior potencial de haver limitação por multicaminho, fazer uma repetição (série) de observações e verificar a dispersão dos mesmos.

Do ponto de vista do receptor, a presença de alguns pontos muito distantes dos demais, como nos pontos próximos ou abaixo dos refletores (figuras 9 e 10), evidenciam picos periódicos máximos de multicaminho no valor de aproximadamente  $\frac{1}{4}$  de sua fase, que é de aproximadamente 74 metros, que deterioram bastante a precisão e a acurácia da posição estimada, como é característico do multicaminho, especialmente os causados por refletores próximos, ou seja, até 30 metros (FARRET, 2000). Em relação à tecnologia “*Enhanced Strobe Correlator*” de processamento de sinal do receptor, aqui analisada, observou-se mérito na efetiva diminuição da distância possível de trabalho em relação a refletores significativos com a manutenção das medidas de fase, embora ainda continue o problema da dificuldade do trabalho sob as coberturas vegetais densas, devido a perda de fase. Talvez essa carência seja pelo fato dos múltiplos correlacionadores não melhorarem o erro de *tracking* ou o *tracking threshold* devido ao ruído termal (KAPLAN et. al., 2006). Infelizmente não foram

encontrados dados do fabricante realizados em condições semelhantes ao do presente trabalho que pudessem servir para uma análise comparativa.

Do ponto de vista dos desdobramentos futuros do presente trabalho, pretende-se um melhor estudo na busca do tempo ideal de rastreamento com relação ao rendimento de campo e à segurança na fixação das ambigüidades, uma vez que o tempo de 2,5 minutos adotado na presente pesquisa se baseou em dados de pesquisas preliminares (FARRET et al. 2005) bem como a análise da nova versão do receptor com código suavizado. Pretende-se também fazer uma melhor análise do erro em nível de *DLL*, especialmente em função dos níveis de ruído, levando em conta os valores de espaçamento entre os correlacionadores e “bandwidth” (KAPLAN et. al., 2006). Da mesma forma, o estudo dos efeitos dos refletores vegetais e das redes elétricas de forma separada.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores apresentam seus agradecimentos a empresa All Comp & Cia. Ltda., representante de produtos Ashtech, pela cedência de equipamentos e material técnico que possibilitaram a presente pesquisa.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BISNATH, S.; BERAN, T.; LANGLEY, R. *Precise Platform Positioning with a Single GPS Receiver*. *GPS World*, 2002. Disponível em <http://gpsworld.com/gpsworld/article/articleDetail.jsp?id=15110>. Acesso em: 23 nov 2004.
- BRAASCH, M. S.; MCGRAW, G. *GNSS Multipath Mitigation Using Gated and High Resolution Correlator Concepts*. Proceedings... Institute of Navigation National Technical Meeting, San Diego, CA, Jan, 1999.
- BRAASH, M. S. *Multipath Effects*. In: PARKINSON, B. W. e SPILKER, J. J. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Cambridge: American Institute and Aeronautics, 1996, VII, p.547-568.
- BRASIL. *Lei 10.267/2001*. Altera dispositivos de Leis anteriores e cria o CNIR. Brasília, ed DOU, 2001.
- FARRET, J. C. *O Efeito do Multicaminho Estático nas Medidas da Fase das Portadoras GPS*. Curitiba, 2000. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, 2000.
- FARRET, J. C. et al. *Correlação SNR e Multicaminho na Fase das Portadoras GPS*. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, 2003 Curitiba. Anais... Curitiba: UFPR, 2003. 1 CD-ROM.
- FENTON, P. et al., *Novatel's GPS Receiver: The High Performance OEM Sensor of the Future*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 1991, Albuquerque. Proceedings... Washington, p. 49-58, 1991.

- GADALLAH, E.S.; PACTER, M.; DeVILIBISS, S. *Design of GPS Receiver Code and Carrier Tracking Loops for Multipath Mitigation*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11., 1998 Nashville. Proceedings... Nashville: THE SATELLITE DIVISION OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION, 1998.
- GARIN, L.; Van DIGGELEN, F. e ROUSSEAU, J. M. *Strobe & Edge Correlator – Multipath Mitigation for Code*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 9, 1996, Kansas City. Proceedings... Kansas City: The Satellite Division of the Institute of Navigation, 1996. p. 657-664.
- GARIN, L.; ROUSSEAU, J. M. *Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 10, 1997, Kansas City. Proceedings... Kansas City: The Satellite Division of the Institute of Navigation, 1997. p. 559-567.
- GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações – Aplicações Geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994.
- HATCH, R. R. et al. *Code and Phase Multipath Mitigation Techniques*. GPS Directory, 1986.
- HATCH, R. R. *The Synergism of GPS Code and Carrier Measurement*. In: International Geodetic Symposium on Satellite Doppler Positioning, 3., 1982, Washington. *Proceedings...* Washington: 1982.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; COLLINS, J. *Global Positioning System Theory and practice*. 5.ed Wien: Springer, 2001.
- INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA (Brasil). Ministério do Desenvolvimento Agrário. Norma Técnica para Georreferenciamento de Imóveis Rurais. Aplicada à Lei 10.267, de 28 de agosto de 2001 e do Decreto 4.449, de 30 de outubro de 2002. Brasília, DF, nov, 2003. Disponível em: <http://200.252.80.5/Cartografia/download/Norma%20Técnica.pdf>. Acesso em: 10 jul 2004.
- KAPLAN, E. D.; HEGARTY, C. J. *Understanding GPS Principles and Applications*. 2.ed Boston/London: Artech House, 2006.
- LACHAPELLE, G. et al. *GPS Land Kinematic Positioning Experiments*. Proceedings 4<sup>th</sup> Int. Geod. Symp. On Satellite Positioning, Austin, v. 2. 1986, p. 1327-1344.
- LAXTON, M. C. *Analysis and Simulation a New Code Tracking Loop For GPS Multipath Mitigation*. WPAFB, Ohio: Master Thesis, Air Force Institute of Technology, 1996.
- MAGGELAN CORPORATION, San Dimas, CA, USA. Disponível em: <http://professional.magellangps.com/en/products>
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo NAVSTAR – GPS: Descrição, Fundamentos e Aplicações*. São Paulo: UNESP, 2000.

- RAY, J.K.; CANNON, M.E.; FENTON, P. *Mitigation of Static Carrier Phase Multipath Effects Using Multiple Closely-Spaced Antennas*. In: INTERNATIONAL TECHNICAL MEETING, 11, 1998, Nashville. Proceedings... The Satellite Division of the Institute of Navigation, p. 1025-1034. 1998.
- SEEBER, G. *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*. Berlin: W. de Gruyter, 2003.
- SHEEN, W. H.; STUBER, G. L. *A coherent tracking loop for direct sequence spread spectrum systems on frequency selective fading channels*. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, Seattle, Washington. p. 1364-1368, jun, 1995.
- SOUZA, E. M.; MONICO, J. G. *Efeito de Multicaminho nas Medidas de Fase e Pseudodistância GPS: Detecção e Atenuação Utilizando Wavelets*. In: COLÓQUIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, 3, Curitiba. Novos Desenvolvimentos em Ciências Geodésicas: Anais. Curitiba: UFPR, 2003. 1 CD-ROM.
- TOWSEND, B. R.; FENTON, P.; VAN NEE, D. J. R.; VAN DIERENDONCK, A. J. *Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop*. In: NATIONAL TECHNICAL MEETING, 01. 1995, Anaheim. Proceedings... Anaheim: INSTITUTE OF NAVIGATION, 1995.
- VAN DIERENDONCK, A. J.; FENTON, P.; FORD, T. *Theory and performance of Narrow Correlator Technology in GPS Receiver*. Journal of The Institute of Navigation, USA, v. 39, n. 3. 1992, p. 265-283.
- VAN NEE, R. D. J.; SIEREYELD, J.; FENTON, P. C.; TOWNSEND, B. R. *The Multipath Estimating Delay Lock Loop Approaching Theoretical Accuracy Limits*. IEEE Position: Location and Navigation Symposium, Las Vegas, 1994.
- WEILL, L. R. *Conquering Multipath: The GPS Accuracy Battle*. GPS World, v. 8, p. 59-66, 1997.
- WESTROP, J., Napier, M., Ashkenazi, V. *The Use of Phase for Kinematic Positioning by GPS*. In: Book, Leppard (eds), p. 334-339, 1990.

(Recebido em abril de 2006. Aceito em dezembro de 2006).

