

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

Departamento de Transportes

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço: 10.1.03.103.

Ass.: *Kauas Au*

A INFLUÊNCIA DA IONOSFERA NO
POSICIONAMENTO GPS POR PONTO
SIMPLES

Rodrigo Figueiredo Leandro

DEDALUS - Acervo - EESC



31100043059

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil - Transportes.

Orientador: Prof. Associado. Paulo César Lima Segantine

São Carlos


2003



FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **RODRIGO FIGUEIREDO LEANDRO**

Dissertação defendida e julgada em 08-01-2003 perante a Comissão Julgadora:



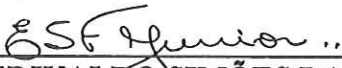
Prof. Assoc. **PAULO CÉSAR LIMA SEGANTINE (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



Prof. Dra. **EMÍLIA CORREIA**
(Universidade Presbiteriana Mackenzie)

Aprovado



Prof. Dr. **EDIVALDO SIMÕES DA FONSECA JÚNIOR**
(Escola Politécnica/USP)

APROVADO



Prof. Assoc. **JOSÉ REYNALDO ANSELMO SETTI**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes



Prof. Assoc. **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

DEDICATÓRIA

À minha filha Camila,
à minha esposa Iví,
à minha irmã Luciana e
aos meus pais Cristina e José Paulo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	<i>i</i>
LISTA DE TABELAS.....	<i>iii</i>
RESUMO.....	<i>iv</i>
ABSTRACT.....	<i>v</i>
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Justificativa	3
1.4 Apresentação do trabalho	4
2 Revisão Bibliográfica	6
2.1 Sistemas de Posicionamento por Satélites.....	6
2.1.1 Histórico.....	6
2.1.2 GPS e GLONASS.....	7
2.2 NAVSTAR/GPS	8
2.2.1 Origem.....	8
2.2.2 Características.....	8
2.2.3 Características do Sinal GPS.....	9
2.3 Posicionamento Absoluto.....	10

2.4	Atmosfera Terrestre.....	14
2.4.1	A Ionosfera e os sinais GPS.....	14
2.4.2	A Troposfera e os Sinais GPS	27
3	O Programa MARGEO	37
4	Metodologia	43
4.1	Dados	43
4.2	Análises.....	46
5	Resultados.....	47
5.1	Considerações Iniciais	47
5.2	Resultados do Caso 1	49
5.2.1	Desvio Plano (Caso 1)	49
5.2.2	Desvio Espacial (Caso 1)	51
5.3	Resultados do Caso 2	53
5.3.1	Desvio Plano (Caso 2)	53
5.3.2	Desvio Espacial (Caso 2)	55
5.4	Resultados do Caso 3	57
5.4.1	Desvio Plano (Caso 3)	57
5.4.2	Desvio Espacial (Caso 3)	59
5.5	Resultados do Caso 4	61
5.5.1	Desvio Plano (Caso 4)	61
5.5.2	Desvio Espacial (Caso 4)	63
5.6	Resultados do Caso 5	65
5.6.1	Desvio Plano (Caso 5)	65
5.6.2	Desvio Espacial (Caso 5)	67
5.7	Resultados do Caso 6	69
5.7.1	Desvio Plano (Caso 6)	69
5.7.2	Desvio Espacial (Caso 6)	71
5.8	Análises.....	72
6	Conclusões e Recomendações.....	75
7	Referências Bibliográficas.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Posicionamento Absoluto	10
Figura 2 – Formação de elétrons livres na camada ionosférica. Adaptado de http://w3.nrl.navy.mil/projects/haarp/ion1.html	15
Figura 3 – Densidade de elétrons das diferentes regiões da ionosfera. Adaptado de www.icsl.ucla.edu/~cbiswas/nov97isl/index.htm	16
Figura 4 – Ângulo do satélite em relação ao centro da Terra	20
Figura 5 – Ponto Ionosférico – Adaptado de HOFMANN-WELLENHOF (2001).....	26
Figura 6 - Modelo de atmosfera (camada politrópica única) utilizado por Hopfield. Adaptado de HOFMANN-WELLENHOF (2001).	31
Figura 7 – Tela inicial do programa MARGEO.	37
Figura 8 – Leitura do arquivo de observação.	38
Figura 9 – Leitura do arquivo de navegação.	39
Figura 10 – Leitura do arquivo de efemérides precisas.	39
Figura 11 – Escolha do modelo troposférico, modelo ionosférico e efemérides que serão utilizados no processamento.	40
Figura 12 – Apresentação dos resultados.	41
Figura 13 – Apresentação dos resultados.	42
Figura 14 - Gráfico dos valores médios mensais de temperatura, umidade e pressão para a estação de Brasília. Adaptado de www.inmet.gov.br	43
Figura 15 - Distribuição no Território Nacional das Estações RBMC que poderiam ser utilizadas.	44
Figura 16 - Gráfico de fluxo de raios X. Adaptado de http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html	45
Figura 17 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 1	49
Figura 18 – Desvio plano para o Caso 1 (Estação BRAZ).....	49
Figura 19 - Desvio plano para o Caso 1 (Estação FORT)	50
Figura 20 – Desvio plano para o Caso 1 (Estação PARA)	50

Figura 21 – Desvio espacial para o Caso 1 (Estação BRAZ)	51
Figura 22 – Desvio espacial para o Caso 1 (Estação FORT)	51
Figura 23 – Desvio espacial para o Caso 1(Estação PARA)	52
Figura 24 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 2.....	53
Figura 25 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação BRAZ).....	53
Figura 26 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação FORT)	54
Figura 27 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação PARA)	54
Figura 28 – Desvio espacial para o Caso 2 (Estação BRAZ)	55
Figura 29 – Desvio espacial para o Caso 2 (estação FORT).....	55
Figura 30 – Desvio espacial para o Caso 2 (Estação PARA)	56
Figura 31 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 3.....	57
Figura 32 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação BRAZ).....	57
Figura 33 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação FORT)	58
Figura 34 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação PARA)	58
Figura 35 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação BRAZ)	59
Figura 36 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação FORT)	59
Figura 37 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação PARA)	60
Figura 38 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 4.....	61
Figura 39 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação BRAZ).....	61
Figura 40 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação FORT)	62
Figura 41 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação PARA)	62
Figura 42 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação BRAZ)	63
Figura 43 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação FORT)	63
Figura 44 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação PARA)	64
Figura 45 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 5.....	65
Figura 46 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação BRAZ).....	65
Figura 47 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação FORT)	66
Figura 48 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação PARA)	66
Figura 49 – Desvio espacial para o Caso 5 (estação BRAZ).....	67
Figura 50 – Desvio espacial para o Caso 5 (Estação FORT)	67
Figura 51 – Desvio espacial para o Caso 5 (Estação PARA)	68
Figura 52 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 6.....	69
Figura 53 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação BRAZ).....	69
Figura 54 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação FORT)	70
Figura 55 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação PARA)	70
Figura 56 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação BRAZ)	71
Figura 57 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação FORT)	71
Figura 58 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação PARA)	72
Figura 59 – Resultados do modelo de Klobuchar na estação BRAZ para os seis casos.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das regiões ionosféricas, SILVA (2000).	17
Tabela 2 – Desvio médio para cada um dos modelos analisados	73

RESUMO

LEANDRO, R. F. A influência da ionosfera no Posicionamento GPS Por Ponto Simples. São Carlos, 2003, 80p, Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A determinação das coordenadas de um ponto através do sistema GPS pode ser feita utilizando-se os métodos de posicionamento por ponto simples ou de posicionamento diferencial. No caso do posicionamento diferencial, devido à escassez de marcos geodésicos no território nacional, as linhas de base são em sua maioria extensas. Nessas duas situações os usuários de receptores de simples frequência ficam sujeitos à utilização de modelos ionosféricos para estimativa da influência da ionosfera nos sinais e conseqüentemente na precisão da posição de pontos. Sendo assim, a escolha adequada de tal modelo vem a ser um importante fator a ser considerado durante o processamento dos dados. Neste trabalho foi feita a comparação de resultados de processamento de dados GPS obtidos com a utilização de diferentes modelos ionosféricos a partir de posicionamento por ponto simples, verificando a eficácia de cada um deles em função da latitude do ponto, da atividade solar e do horário do dia, a fim de determinar qual modelo é mais eficiente em cada situação. Para isto foi desenvolvido um programa para posicionamento por ponto simples em linguagem Visual Basic versão 5.0.

Palavras-chave: GPS; ionosfera, ponto simples.

ABSTRACT

LEANDRO, R. F. The influence of ionosphere in the GPS single point positioning. São Carlos, 2003, 80p. Dissertation (Master's degree) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo.

The determination of point coordinates, through GPS system, could be made by methods of single point positioning or relative positioning. In this last case, due to geodetic landmarks scarcity in national territory, the baselines are, in its majority, extensive. In these two situations, the users of single frequency receivers are submitted to the use of ionospheric models to estimate the influence of the ionosphere in the signs. Being thus, the adequate choice of such model comes to be an important factor to be considered during the data processing. In this paper was made a matching of results of GPS data processing with the use of different ionospheric models through single point positioning, verifying the efficiency of each model to point latitude, solar activity and time, to determinate each model is efficientier at each situation. To this it was developed a single point positioning program in Visual Basic version 5.0.

Keywords: GPS; ionosphere, single point.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Generalidades

Hoje milhões de cidadãos pelo mundo inteiro utilizam tecnologias avançadas, como telefones celulares, televisores digitais e redes de computadores, todas apoiadas em sistemas de satélites. O mesmo ocorre com os sistemas de posicionamento, genericamente chamados de Sistemas Globais de Navegação e Posicionamento por Satélites (GNSS - *Global Navigation Satellite Systems*).

Existem atualmente dois sistemas operacionais deste tipo: um americano (NAVSTAR/GPS - *Navigation System using Time And Ranging/Global Positioning System*) e outro russo (GLONASS - *Global Navigation Satellite System*). Ambos foram concebidos para fins militares e posteriormente abertos para a comunidade civil, porém sob severas restrições quanto à acuracidade.

O Sistema de Posicionamento Global (GPS) foi desenvolvido e é mantido pelo Departamento de Defesa Norte-Americano (DoD) como um recurso de navegação e posicionamento global, para uso militar e civil. Pode ser usado sob quaisquer condições meteorológicas, para determinar, em tempo real, a posição de pontos em três dimensões (latitude, longitude e altura geométrica) e o tempo, em relação a um sistema de referência definido, para qualquer ponto sobre a superfície terrestre ou próximo a ela, LAROCCA & SEGANTINE, (2000).

Ferramenta cada vez mais popular, o GPS vem se consolidando como um sistema padrão para georreferenciamento em todo o mundo. Suas aplicações são cada vez mais diversificadas e numerosas, tendo como limite a criatividade do usuário. Entretanto, as observáveis GPS, tal como todas as outras envolvidas nos

processos de medições, estão sujeitas aos erros aleatórios, sistemáticos e grosseiros. Para obter resultados confiáveis, os modelos matemáticos estabelecidos para o processamento devem ser válidos e capazes de detectar problemas, ISHIKAWA & ITAME, (2000). Desta forma, as fontes de erros envolvidas no processo de medição devem ser bem conhecidas para que sejam modeladas o mais próximo possível da realidade.

Para tornar isso possível, os profissionais responsáveis pela utilização do GPS devem ter conhecimento amplo do seu uso como coletor de informações e principalmente como se processam os seus dados. O profissional responsável pelo processamento dos dados deve, necessariamente, conhecer o sistema GPS, o software utilizado, conceitos básicos de Estatística, Geodésia, etc.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é verificar a eficácia de diferentes modelos para correção dos efeitos ionosféricos causados no sinal GPS para o posicionamento por ponto simples, em função da latitude, do horário e da época do ano referentes às observações. Para isto foi decidido desenvolver um programa de processamento de dados GPS para posicionamento absoluto utilizando as observações do código C/A, descrevendo toda as suas rotinas, bem como implementar e testar diferentes modelos para correção de atrasos ionosféricos, visando a melhoria dos resultados de posicionamento.

Sendo assim, o principal objetivo da pesquisa é:

- Verificar a eficácia de diferentes modelos para correção dos efeitos ionosféricos causados no sinal GPS para o posicionamento por ponto simples, em função da latitude, do horário e da época do ano referentes às observações.

Os objetivos secundários são:

- Desenvolver um programa de processamento de dados GPS para posicionamento absoluto utilizando as observações do código C/A, que será utilizado para as análises já citadas;
- Implementar no software os modelos para correções troposféricas e ionosféricas;

- Descrever os passos do processamento de dados GPS executados pelo software criado, desde a sua aquisição das informações até a apresentação de resultados.

1.3 Justificativa

Um dos efeitos degradantes do sinal GPS, a Disponibilidade Seletiva – SA (*Selective Availability*), foi desativada às 4 horas (sistema universal de tempo) do dia 02 de maio de 2000. Segundo SANTOS (2000), após isso, constatou-se um aumento considerável na precisão de levantamentos GPS.

A precisão do posicionamento absoluto, quando ativada a Disponibilidade Seletiva, apresenta valores em torno dos 100 metros no plano horizontal. Entretanto, quando este efeito está desativado a precisão horizontal e vertical apresenta uma melhora de aproximadamente 85% e 82%, respectivamente, MATSUOKA et al. (2000). Esta mudança vem tornar interessante a utilização do posicionamento por ponto simples em algumas situações. Um exemplo seria a determinação das coordenadas de um ponto de referência para um levantamento topográfico, em um local onde não exista nenhum marco geodésico próximo, ou onde o marco esteja danificado.

A maioria dos softwares de processamento que disponibiliza a opção de posicionamento por ponto simples são protegidos por chave de hardware. Além disso, são programas que requerem uma quantidade grande de memória no disco rígido, o que torna seu uso em computadores de mão ("palmtops") praticamente impossível. Propõe-se neste trabalho desenvolver um programa para posicionamento absoluto, que será aberto para a utilização por qualquer usuário, e que possa ser usado em computadores com pouca capacidade de memória, como os computadores de mão.

Na ausência da limitação imposta aos usuários civis pelo Departamento de Defesa (DoD) dos Estados Unidos, através da disponibilidade seletiva, a ionosfera se tornou a maior fonte de erro no posicionamento com GPS, CAMARGO et al. (2000).

Os receptores de dupla frequência permitem efetuar correções do efeito da refração ionosférica, devido ao fato de que este efeito depende da frequência do sinal. Estes equipamentos permitem obter resultados que são praticamente isentos

desses efeitos. Entretanto, tais receptores são equipamentos caros, fazendo com que os de uma freqüência, a maioria de uso civil, sejam amplamente empregados para determinação de linhas de base, mesmo em condições não totalmente adequadas.

As mensagens de navegação transmitidas pelos satélites GPS trazem informações que permitem efetuar correções da ionosfera para os receptores de uma freqüência, utilizando o modelo ionosférico de Klobuchar, KLOBUCHAR (1994). Porém, vários estudos realizados mostraram que este modelo pode remover apenas algo em torno de 50% do efeito total. Existem ainda outros modelos, baseados somente nas observáveis. Como a única maneira de reduzir os efeitos da ionosfera em receptores de uma freqüência é através destes modelos, eles se tornam ferramentas de relevante importância para o processamento dos dados.

SEGANTINE (2001) concluiu que os efeitos causados pela ionosfera no sinal GPS variam em função da latitude geomagnética do ponto de observação e do horário de observação. Sendo assim, uma análise da eficácia dos diferentes modelos ionosféricos existentes para diferentes latitudes, horários e épocas do ano, é de significativa relevância para o processamento de dados GPS.

1.4 Apresentação do trabalho

No presente Capítulo o leitor pôde entender do que se trata o trabalho, conhecendo seus objetivos e a relevância do estudo que foi desenvolvido.

No capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica, englobando temas que abordam o histórico do posicionamento por satélites, sistema GPS, posicionamento absoluto e atmosfera (sua influência no posicionamento e descrição dos modelos analisados).

O capítulo 3 trata da descrição do programa desenvolvido para o processamento dos dados, o programa MARGEO.

No capítulo 4 estão apresentados os métodos utilizados para a análise proposta.

O capítulo 5 mostra os resultados obtidos e as análises feitas a partir deles.

No capítulo 6 foram colocadas as conclusões alcançadas depois de feitas as análises do capítulo anterior, e as recomendações para trabalhos futuros.

A bibliografia consultada está referenciada no capítulo 7.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Sistemas de Posicionamento por Satélites

2.1.1 Histórico

Desde os tempos mais remotos, o homem vem tentando conhecer o seu território. No início, este conhecimento se limitava à região onde vivia com sua comunidade e às proximidades desta, mas a sede do saber o levou a descobrir novos horizontes e, para que isso fosse possível, precisou aprender a se orientar, determinando direções e dimensões. No início das navegações, os astros celestes eram utilizados como referência, o que caracterizava a "navegação astronômica". Com o desenvolvimento do rádio, surgiu outra classe de navegação, a "rádio navegação", que foi precursora do posicionamento por satélites.

A técnica para se determinar as coordenadas de uma estação fixa na Terra em função de parâmetros orbitais de um satélite através de efeito Doppler foi desenvolvida na década de 50. Esta técnica foi utilizada no sistema de posicionamento americano "*Navy Navigation Satellite System (NNSS)*" também conhecido como sistema "TRANSIT", que foi liberado para uso civil a partir de 1967, SEGANTINE (1995).

Paralelamente foi desenvolvido pela então União Soviética o sistema "CICADA", similar ao "TRANSIT". Estes dois sistemas tinham duas grandes deficiências: seus satélites não eram disponíveis continuamente e a velocidade do usuário, ou seja, a velocidade de deslocamento da antena receptora utilizada pelo usuário, precisava ser conhecida, DALY & MISRA, (1995).

2.1.2 GPS e GLONASS

Conhecidos pelo título genérico de *Global Navigation Satellite Systems* (GNSS), os sistemas GPS e GLONASS foram criados respectivamente pelos Estados Unidos e pela ex-União das Repúblicas Socialistas Soviéticas (USSR), agora Comunidade dos Estados Independentes (CEI), com o objetivo de substituir os sistemas TRANSIT e CICADA, respectivamente.

Os objetivos dos EUA e da então União Soviética em criar estes novos sistemas era garantir melhor precisão, globalização, e capacidade contínua de posicionamento, utilizando satélites que transmitissem sinais em dupla frequência no espectro da banda L (1,2 e 1,6 GHz). Em contraste aos antigos sistemas em VHF, o novo princípio de navegação seria baseado numa melhor medição da distância que o efeito Doppler. Os dois sistemas foram desenvolvidos para fornecer informações de posição, velocidade e tempo com precisão, DALY & MISRA, (1995).

Em setembro de 1991, o conceito de GNSS foi adotado contando com futuras necessidades da navegação aérea. A noção de GNSS abrangia GPS, GLONASS, e outros sistemas alternativos como os satélites geoestacionários Immarsat-3.

Atualmente a União Européia está desenvolvendo um novo sistema, chamado GALILEO, com operacionalidade prevista para 2008. Este sistema tem como característica principal o fato de estar sendo totalmente desenvolvido e controlado pela comunidade européia e possibilitar a participação da comunidade civil internacional.

Na prática, simples considerações geométricas nos possibilitam deduzir que, quando totalmente operacionais, os três sistemas (GPS, GLONASS e GALILEO) juntos podem dar acesso ao triplo do número de satélites disponíveis para cada sistema separadamente na maior parte do dia, oferecendo uma maior independência aos usuários, ressaltando as aplicações globais do GNSS.

Neste trabalho utilizou-se somente observações do sistema GPS, uma vez que os receptores utilizados para o estudo em questão só coletam dados deste sistema. A seguir serão descritas algumas de suas características básicas.

2.2 NAVSTAR/GPS

2.2.1 Origem

Em 1973, o JPO (*Joint Program Office*) foi incumbido pelo Departamento de Defesa Americano (DoD) a estabelecer, desenvolver, testar e controlar um sistema de posicionamento espacial, HOFMANN-WELLENHOF (2001). O sistema NAVSTAR/GPS é o resultado deste programa.

Os objetivos iniciais do sistema NAVSTAR/GPS eram a determinação instantânea da posição e velocidade, e uma coordenação precisa do tempo. No meio literário já é comum a substituição e uso do termo "Sistema NAVSTAR/GPS" por "Sistema GPS" ou simplesmente "GPS", o qual pode ser definido da seguinte forma:

"O Sistema de posicionamento Global (GPS) é um sistema espacial de navegação, que foi desenvolvido e é mantido pelo Departamento de Defesa dos EUA, usado em quaisquer condições meteorológicas para satisfazer as necessidades das forças militares e de entidades civis, de modo a determinar posição, velocidade e tempo em relação a um sistema de referência definido para qualquer ponto sobre ou próximo da superfície da Terra."

É importante citar que inicialmente o sistema foi desenvolvido estritamente para o uso militar americano, porém logo depois foi aberto à comunidade civil, com algumas restrições. Após seu uso ter sido aberto à comunidade civil, desencadeou-se uma grande disseminação da sua utilização, pois mostrou-se um grande instrumento para o estabelecimento de redes geodésicas de alta precisão, HOFMANN-WELLENHOF (2001). Hoje, com a sua popularização, é utilizado em praticamente todas as atividades que requeiram algum tipo de posicionamento.

2.2.2 Características

O sistema GPS apresenta dois tipos de serviços para o posicionamento: o SPS e o PPS. O SPS é o serviço de posicionamento padrão, sendo a posição do ponto obtida através de observações do código C/A. Está disponível continuamente a todos os usuários de receptores portadores de uma frequência. O

PPS está disponível apenas a usuários militares americanos ou a quem por eles for autorizado. A sua precisão é maior que a do SPS, pois é baseado nas informações do código P (mais preciso que o código C/A).

Segundo MONICO (2000), as principais fontes de erros sistemáticos que afetam o posicionamento GPS estão associadas a:

- satélite (órbita, relógio, relatividade);
- propagação do sinal (refração troposférica e ionosférica, interrupção do sinal, multicaminhamento);
- ao receptor/antena (relógio, canais, centro de fase da antena);
- a estação (coordenadas, marés terrestres e oceânicas, movimento do polo.).

Parte destes erros podem ser modelados ou reduzidos, se técnicas adequadas de rastreamento e processamento forem adotadas.

2.2.3 Características do Sinal GPS

Os satélites GPS transmitem os sinais em duas frequências, designadas por $L1 = 1575,4$ MHz e $L2 = 1227,6$ MHz. Estas portadoras são moduladas com dois tipos de códigos e com uma mensagem de navegação. Os dois códigos (seqüências de números binários que transmitem informações) são o código C/A e o código P.

As observáveis do GPS incluem três grandezas fundamentais: o tempo, a fase e a pseudodistância.

O tempo é a exata hora, referenciada no sistema de tempo GPS, em que os sinais são recebidos na antena do receptor. É idêntico para as medições de fase da portadora e para pseudodistância de todos os satélites observados à mesma época, SILVA, (2000).

A pseudodistância é definida com sendo a distância entre as antenas do receptor e do satélite, acrescida dos atrasos atmosféricos e dos erros de relógio dos satélites e do receptor. Ela reflete o comportamento instantâneo dos relógios do receptor e dos satélites.

A grandeza observável designada fase é definida com sendo a diferença em ciclos entre a fase transmitida pela antena do satélite, recebida na antena de um dado receptor GPS, e a fase gerada internamente pelo VCO (*Voltage Controlled Oscillator*), que é um dispositivo eletrônico do receptor que faz a comparação entre as duas. Quando comparado com o comprimento de onda do sinal, a fase da portadora representa uma diferença de medida entre as antenas do satélite e do receptor, sendo que uma grande porção da medida está relacionada com um certo número inteiro de ciclos do sinal. Este número inteiro de ciclos usualmente é chamado de ambigüidade da portadora, SEGANTINE (1995).

Determinadas as posições espaciais de no mínimo quatro satélites, é possível então calcular a posição da antena do receptor e o seu erro de relógio.

2.3 Posicionamento Absoluto

O posicionamento absoluto é o único tipo possível de posicionamento quando se dispõe de apenas um receptor. Pode ser baseado nas medições de fase da portadora ou de pseudodistância. Conhecido também por Posicionamento Por Ponto Simples, este tipo de levantamento é caracterizado por um único receptor medindo a distância entre sua antena e as antenas dos satélites observados à uma mesma época, conforme a Figura 1.

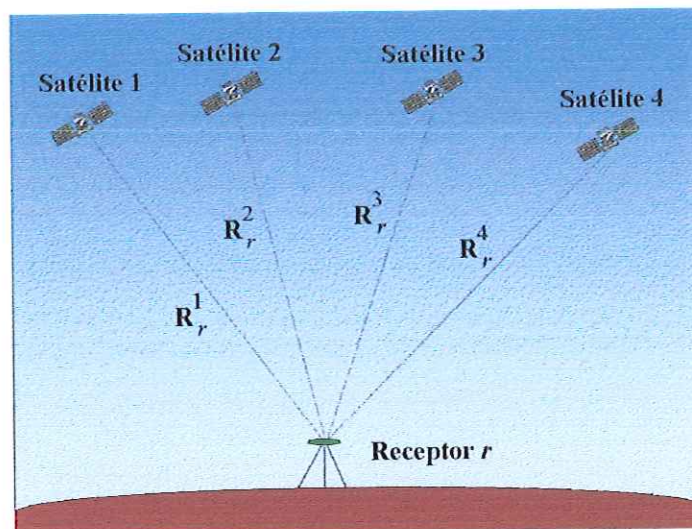


Figura 1 – Posicionamento Absoluto

Neste tipo de posicionamento a estimativa da posição pode ser feita com apenas uma época de observação com o mínimo de quatro satélites, a partir da observável pseudodistância, representada na Equação 1:

$$R_r^s = \rho_r^s + c \cdot \delta^s - c \cdot \delta_r + \Delta^{TROPO} + \Delta^{IONO}$$

Equação 1

onde:

R_r^s representa a pseudodistância entre as antenas do satélite s e do receptor r , em metros;

ρ_r^s representa a distância geométrica entre as antenas do satélite s e do receptor r , em metros;

c representa a velocidade da luz, em metros por segundo;

δ^s representa o erro de relógio do satélite s , em segundos;

δ_r representa o erro de relógio do receptor r , em segundos;

Δ^{TROPO} representa o atraso causado pela troposfera, em metros;

Δ^{IONO} representa o atraso causado pela ionosfera, em metros.

A distância geométrica entre as antenas do satélite e do receptor (ρ_r^s) é função de suas coordenadas cartesianas, de acordo com a seguinte equação:

$$\rho_r^s = \sqrt{(X^s - X_r)^2 + (Y^s - Y_r)^2 + (Z^s - Z_r)^2}$$

Equação 2

onde:

X^s, Y^s e Z^s representam as coordenadas cartesianas do satélite s , em metros;

X_r, Y_r e Z_r representam as coordenadas cartesianas do receptor r , em metros.

Os atrasos causados pela ionosfera e pela troposfera podem ser estimados através de modelos matemáticos, que são descritos no Capítulo 6 deste trabalho.

De acordo com HOFMANN-WELLENHOF (2001), a equação 1 pode ser linearizada, resultando em:

$$R_r^s = \rho_{r,0}^s - \frac{X^s - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta X - \frac{Y^s - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta Y - \frac{Z^s - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta Z + c \cdot \delta^s - c \cdot \delta_r + \Delta^{TROP} + \Delta^{IONO}$$

Equação 3

onde:

X^s, Y^s e Z^s representam as coordenadas cartesianas do satélite s , em metros;

$X_{r,0}, Y_{r,0}$ e $Z_{r,0}$ representam as coordenadas a priori da antena do receptor r , em metros;

$\rho_{r,0}^s$ representa a distância a priori entre as antenas do satélite s e do receptor r , em metros;

$\Delta X, \Delta Y$ e ΔZ representam as correções a serem aplicadas nas coordenadas a priori da antena do receptor, a fim de obter a posição real, em metros.

Colocando os termos de incógnitas do lado direito da equação teremos:

$$R_r^s - \rho_{r,0}^s + c \cdot \delta^s - \Delta^{TROP} - \Delta^{IONO} = - \frac{X^s - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta X - \frac{Y^s - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta Y - \frac{Z^s - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^s} \cdot \Delta Z + c \cdot \delta_r$$

Equação 4

Sendo assim, existem quatro incógnitas no modelo: as três correções de coordenadas e o erro de relógio do receptor. Como cada satélite rastreado fornece uma equação, um mínimo de quatro satélites é requerido para a solução do sistema linear. Estabelecendo as matrizes, teremos:

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{X^1 - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^1} & -\frac{Y^1 - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^1} & -\frac{Z^1 - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^1} & c \\ -\frac{X^2 - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^2} & -\frac{Y^2 - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^2} & -\frac{Z^2 - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^2} & c \\ -\frac{X^3 - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^3} & -\frac{Y^3 - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^3} & -\frac{Z^3 - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^3} & c \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ -\frac{X^n - X_{r,0}}{\rho_{r,0}^n} & -\frac{Y^n - Y_{r,0}}{\rho_{r,0}^n} & -\frac{Z^n - Z_{r,0}}{\rho_{r,0}^n} & c \end{bmatrix}$$

Equação 5

$$l = \begin{bmatrix} R_r^1 - \rho_{r,0}^1 + c \cdot \delta^1 - \Delta^{TROPO,1} - \Delta^{IONO,1} \\ R_r^2 - \rho_{r,0}^2 + c \cdot \delta^2 - \Delta^{TROPO,2} - \Delta^{IONO,2} \\ R_r^3 - \rho_{r,0}^3 + c \cdot \delta^3 - \Delta^{TROPO,3} - \Delta^{IONO,3} \\ \vdots \\ R_r^n - \rho_{r,0}^n + c \cdot \delta^n - \Delta^{TROPO,n} - \Delta^{IONO,n} \end{bmatrix}$$

Equação 6

$$x = \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \\ \delta_r \end{bmatrix}$$

Equação 7

De modo que resolvendo o sistema linear $A \cdot x = l$ pelo método dos mínimos quadrados (MMQ) podemos obter as coordenadas da estação a partir das seguintes equações:

$$X_r = X_{r,0} + \Delta X$$

$$Y_r = Y_{r,0} + \Delta Y$$

$$Z_r = Z_{r,0} + \Delta Z$$

Equação 8

MATSUOKA et. Al. (2000) concluiu que a acurácia horizontal e vertical para o posicionamento por ponto a partir do código C/A é de aproximadamente 6 e 22 m, respectivamente.

2.4 Atmosfera Terrestre

A atmosfera pode ser considerada, para a maioria dos propósitos práticos, como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à Terra. A estrutura da atmosfera terrestre está relacionada com diversos parâmetros (térmicos, químicos, eletromagnéticos), cujos valores, geralmente combinados, podem variar sensivelmente, em função da hora, da época do ano, da altitude, da latitude, e da atividade solar.

Normalmente é conveniente dividir a atmosfera, com respeito à propagação de sinais, em troposfera e ionosfera, porque as condições particulares de propagação são bem diferentes. As camadas mais baixas da atmosfera terrestre, compreendida entre a superfície da Terra até, aproximadamente, 50 km, recebem o nome de Troposfera. Esta camada constitui a zona neutra da atmosfera e a propagação do sinal depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da pressão do ar e da temperatura da camada atmosférica. Neste caso, a refração independe da frequência do sinal transmitido através dela, desde que a mesma seja abaixo de 30 GHz, Leick, (1995).

A parte superior, estendendo-se aproximadamente entre 50 km e 1000 km, recebe o nome de Ionosfera. É formada por partículas livres carregadas, ou seja, por partículas ionizadas. Nesta camada, a propagação do sinal depende da frequência.

As partículas carregadas na atmosfera terrestre desempenham um papel fundamental em uma ampla gama de fenômenos geofísicos, incluindo auroras, reflexão de ondas, flutuações no campo geomagnético e a manutenção do campo elétrico temporal entre a superfície terrestre e a atmosfera superior, WANNINGER, (1991).

2.4.1 A Ionosfera e os sinais GPS

Os sinais emitidos pelas antenas dos satélites GPS iniciam sua trajetória no espaço, que é essencialmente vácuo na cobertura atmosférica terrestre. A ionosfera é a primeira camada relevante encontrada pelos sinais GPS em sua propagação, BRUNNER & WELSCH (1993).

Um súbito acréscimo nas emissões de raios-X resultante de explosões solares causa um grande aumento na ionização nas camadas baixas da ionosfera, mais especificamente do lado da terra iluminado pelo sol.

Em algumas ocasiões, uma explosão solar é acompanhada pelo espalhamento de partículas energéticas (principalmente prótons e elétrons). Uma outra possibilidade é a de que as explosões solares ocorram acompanhadas pela ejeção de gigantescas nuvens de plasma. Estas nuvens viajam com o vento solar através do espaço interplanetário e algumas vezes alcançam a Terra, provocando perturbações globais e anomalias no campo magnético terrestre.

A radiação solar contém suficiente energia, para que as ondas eletromagnéticas de curto comprimento de onda causem apreciável fotoionização da atmosfera terrestre nas altas altitudes, criando, na atmosfera superior, regiões parcialmente ionizadas (Figura 2). Todavia, as partes ionizadas da atmosfera estendem-se ao espaço interplanetário e misturam-se com o vento solar e com o plasma interplanetário, com um decréscimo da densidade de elétrons em função da altitude. Durante o dia, diversas camadas ou regiões ionosféricas são reconhecidas, CAMARGO (1999).



Figura 2 – Formação de elétrons livres na camada ionosférica. Adaptado de <http://w3.nrl.navy.mil/projects/haarp/ion1.html>.

As propriedades da ionosfera variam com as coordenadas geográficas ou geomagnéticas, com a hora local, a altitude, a estação do ano, o ciclo de manchas solares e tempestades geomagnéticas, OSÓRIO (1992). A posição, hora local e

estação do ano modificam o ângulo que o Sol faz com o zênite do lugar de observação; e a energia recebida por uma dada superfície é proporcional ao cosseno do ângulo zenital. Contudo a influência da longitude, devida à não coincidência dos pólos geográficos e magnéticos, é sensível somente nas camadas ionosféricas mais altas, PICQUENARD (1974).

Nas regiões de baixas latitudes geomagnéticas (regiões próximas ao equador magnético) ainda ocorrem os eletrojetos, que são causados pela migração de elétrons na região do equador. Este efeito também influencia a atividade ionosférica.

Admite-se que a ionosfera é formada de três regiões, na seqüência em que aumenta a altitude e a concentração de íons, denominadas D, E e F respectivamente, cujas divisões não são tão distintas. Cada região contém, muitas vezes, diversas camadas. Por exemplo, a região F, para épocas de alta ionização, durante o dia, na estação de verão, divide-se em duas ou mais regiões, designadas de F1 e F2, WEBSTER (1993).

As diferentes regiões possuem densidades de elétrons distintas. A regiões D, E e a camada F1 são desprezíveis durante a noite, devido à baixa densidade de elétrons. Diferentemente, a camada F2 é considerada presente neste horário, porém possui a densidade de elétrons livres muito inferior ao período diurno (Figura 3).

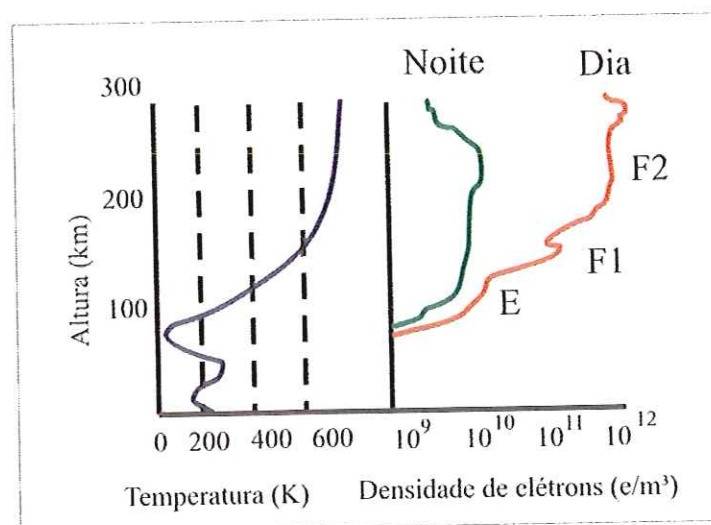


Figura 3 – Densidade de elétrons das diferentes regiões da ionosfera. Adaptado de

www.icsl.ucla.edu/~cbiswas/nov97isl/index.htm.

A Tabela 1 mostra as diferentes características de cada região da ionosfera.

Região	Características
Região D	50-90 km. Não tem efeitos quantificáveis na frequência GPS;
Região E	90-140 km. Muito esbelta e tem efeitos desprezíveis nas frequências GPS;
Região F1	140-210 km. Combinada com a região E, pode contribuir com mais de 10% do atraso ionosférico encontrado pelo GPS;
Região F2	210-1.000 km, é a mais densa e também a de maior variação, causando muitos dos potenciais efeitos nos sistemas de recepção GPS. A altura do cume da densidade de elétrons da região F ₂ , geralmente varia de 250 a 400 km.
Região H ⁺	> 1.000km, é a protonosfera. É de baixa densidade, mas estende-se além da altitude orbital dos satélites GPS. Densidade de elétrons desconhecida pode ser uma significativa fonte de variabilidade do atraso para o usuário GPS.

Tabela 1 – Características das regiões ionosféricas, SILVA (2000).

KLOBUCHAR (1991) afirma que a ionosfera é uma importante fonte de erros das distâncias e de taxa de oscilação desses erros para os usuários do sistema de posicionamento global (GPS), que necessitem de medidas de alta precisão. Os principais efeitos que a ionosfera pode provocar no sinal GPS são os seguintes:

- Atraso de grupo na modulação do sinal;
- Avanço na fase da portadora ou erro na distância relativa;
- Efeito Doppler, erros na taxa da distância;
- Rotação Faraday dos sinais polarizados linearmente;
- Refração ou curvatura da onda de rádio;
- Distorção de pulso nas formas da onda;
- Enfraquecimento da amplitude do sinal ou amplitude de cintilação;
- Cintilações de fase.

O parâmetro da ionosfera que pode quantificar os principais efeitos causados nos sinais GPS é o número total de elétrons, chamado de TEC (*Total Electron Content*). Seu valor representa a quantidade de elétrons livres em uma coluna com seção transversal de 1 m², que vai da antena do satélite até a antena do receptor. Geralmente o valor do TEC é modelado ao longo da direção vertical, chamando-se TVEC (*Total Vertical Electron Content*). O conteúdo total de elétrons da ionosfera terrestre sofre as influências diretas das explosões solares e dos buracos coronais, ou seja, o lado da ionosfera terrestre que se encontra iluminado pelo sol. Eventos como estes podem causar efeitos na ionosfera durante dias, dependendo do fluxo dissipado de partículas (elétrons e prótons).

Uma das conseqüências destas perturbações solares são as modificações no campo magnético terrestre, resultando em tempestades geomagnéticas. Como a camada ionosférica tende a manter o equilíbrio do TEC como um todo, jatos de elétrons livres migram do lado iluminado para o lado que acabou de escurecer da ionosfera. Estes jatos de elétrons são mais intensos e comuns na região equatorial e provocam severas perturbações no sinal GPS.

De acordo com HOFMANN-WELLENHOF (2001), o valor do TEC está relacionado com o efeito causado nos sinais emitidos pelos satélites GPS de acordo com as seguintes equações:

$$\Delta_F^{IONO} = -\frac{40.3}{f^2} \cdot TEC$$

Equação 9

ou

$$\Delta_P^{IONO} = \frac{40.3}{f^2} \cdot TEC$$

Equação 10

onde:

Δ_F^{IONO} representa o avanço na fase da portadora em metros;

Δ_P^{IONO} representa o atraso de grupo na modulação do sinal em metros;

f representa a freqüência da portadora utilizada em Hz;

TEC representa o conteúdo total de elétrons, em (elétrons / m^2) $\times 10^{16}$;
 40.3 é uma constante de unidade $Hz^2 / [(elétrons / m^3) \times 10^{16}]$.

Como a ionosfera é um meio dispersivo, o atraso de grupo e o avanço de fase causados são funções da frequência do sinal. Sendo assim a utilização de receptores de dupla frequência permite a eliminação matemática destes efeitos. Aos usuários de receptores de apenas uma frequência resta utilizar modelos matemáticos baseados em dados enviados no arquivo de navegação ou nas observáveis (fase da portadora L1 e código C/A). Alguns destes modelos serão descritos a seguir.

2.4.1.1 Modelo de Klobuchar

Para a utilização deste modelo é necessário que se conheça a latitude e a longitude geodésicas aproximadas do local de observação (ϕ_u, λ_u), o ângulo de elevação (E) e o azimute (A) de cada satélite em relação à antena do receptor, e os coeficientes α_n e β_n ($n=0..3$), que são transmitidos no arquivo de navegação. Os ângulos são representados em radianos, e o tempo em segundos. As etapas de cálculo são as seguintes:

- 1) Cálculo do ângulo em relação ao centro da Terra, Ψ (figura 3):

$$\psi = \left(0,0137 \left(\frac{E}{\pi} + 0,11 \right) - 0,022 \right) \cdot \pi$$

Equação 11

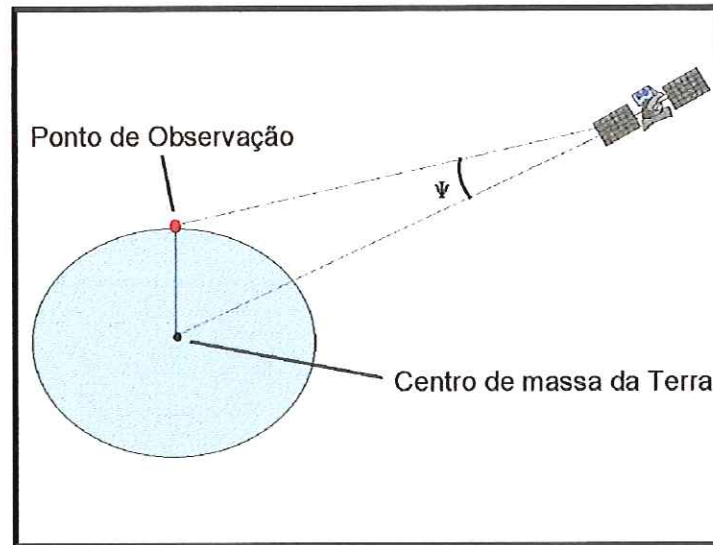


Figura 4 – Ângulo do satélite em relação ao centro da Terra

- 2) Cálculo da latitude subionosférica, ϕ_1 (latitude da projeção do ponto ionosférico sobre a superfície terrestre):

$$\phi_1 = \phi_u + \psi \cdot \cos A$$

Equação 12

Se $\phi_1 > 0,416$, então $\phi_1 = 0,416$. Se $\phi_1 < -0,416$, então $\phi_1 = -0,416$

- 3) Cálculo da longitude sub-ionosférica λ_1 (longitude da projeção do ponto ionosférico sobre a superfície terrestre):

$$\lambda_1 = \lambda_u + \left(\frac{\Psi \cdot \text{sen} A}{\cos \phi_1} \right)$$

Equação 13

- 4) Encontrar Latitude geomagnética, ϕ_m , da localização subionosférica de observação de cada satélite GPS:

$$\phi_m = \phi_1 + 0,064 \cdot \pi \cdot \cos(\lambda_1 - 1,617 \cdot \pi)$$

Equação 14

5) Encontrar a hora local, t , no ponto subionosférico:

$$t = \frac{4,32 \cdot 10^4}{\pi} \cdot \lambda_1 + \text{tempoGPS}$$

Equação 15

Se $t > 86400$, usar $t = t - 86400$; se $t < 0$, adicionar 86400.

6) Para converter para atraso oblíquo, calcular o fator de obliquidade, F :

$$F = 1,0 + 16 \cdot \left(0,53 - \frac{E}{\pi}\right)^3$$

Equação 16

7) Cálculo do atraso ionosférico T_{iono} , calculando inicialmente x (fase):

$$x = \frac{2\pi(t - 50400)}{\sum_{n=0}^3 \beta_n \Phi_m^n}$$

Equação 17

Se $|x| > 1,57$ $T_{iono} = F(5(10^{-9}))$

Caso contrário:

$$T_{iono} = F \left[5(10^{-9}) + \sum_{n=0}^3 \alpha_n \Phi_m^n \left(1 - \frac{x^2}{2} + \frac{x^4}{24} \right) \right]$$

Equação 18

2.4.1.2 Modelos Baseados nas Observáveis

A ionosfera é um meio dispersivo em relação aos sinais GPS, causando efeitos distintos sobre a pseudodistância e sobre a fase da portadora. A pseudodistância sofre um atraso de grupo, a portadora sofre um avanço de fase, possuindo estes dois efeitos o mesmo valor absoluto, ou seja:

$$\Delta_F^{IONO} = -\Delta_P^{IONO}$$

É possível então relacionar as equações de código e fase da portadora a fim de determinar os efeitos causados pela ionosfera. As equações de observação de pseudodistância e fase da portadora, em unidades métricas, para uma mesma época são dadas por:

$$R = \rho + c \cdot \Delta\delta + \Delta^{IONO} + \Delta^{TROPO}$$

Equação 19

e

$$\lambda_{L1} \cdot \phi_{L1} = \rho + c \cdot \Delta\delta + \lambda_{L1} \cdot N_{L1} - \Delta^{IONO} + \Delta^{TROPO}$$

Equação 20

onde:

R representa a observável pseudodistância em metros;

ϕ_{L1} representa a observável fase da portadora L1, em ciclos;

ρ representa a distância real entre a antena do receptor e a antena do satélite em metros;

c representa a velocidade da luz no vácuo em metros por segundo;

$\Delta\delta$ representa a combinação dos erros de relógio do satélite e do receptor em segundos;

λ_{L1} representa o comprimento de onda da portadora L1 em metros;

N_{L1} representa a ambigüidade da portadora L1, em ciclos;

Δ^{IONO} representa o efeito causado pela ionosfera em metros;

Δ^{TROPO} representa o efeito causado pela troposfera em metros.

Nestas equações não estão sendo considerados os erros sistemáticos de hardware do satélite e do receptor para as medidas das observáveis. A diferença entre as equações 19 e 20 resulta em:

$$R - \lambda_{L1} \cdot \phi_{L1} = 2 \cdot \Delta^{IONO} - \lambda_{L1} \cdot N_{L1}$$

Equação 21

Sendo assim possível determinar o atraso ionosférico a partir das observáveis, uma vez realizada uma série de observações.

Modelo da Lâmina Ionosférica

Segundo LEICK (1995), este é um dos modelos ionosféricos mais simples, pois considera a ionosfera, para um receptor isolado, como sendo uma lâmina de espessura constante que possui distribuição homogênea de elétrons livres. Neste modelo é desconsiderada a curvatura da Terra. O atraso vertical, Δ_v^{IONO} , e o atraso ao longo da trajetória, Δ^{IONO} são relacionados como a seguir:

$$\Delta^{IONO} = \frac{\Delta_v^{IONO}}{\text{sen}(E)}$$

Equação 22

Onde o símbolo E denota o ângulo de elevação do satélite em relação à antena do receptor. O atraso vertical é considerado constante, não dependendo do azimute do satélite. Substituindo o atraso ionosférico na equação 21, teremos:

$$R - \lambda_{L1} \cdot \phi_{L1} = \frac{2 \cdot \Delta_v^{IONO}}{\text{sen}(E)} - \lambda_{L1} \cdot N_{L1}$$

Equação 23

Sendo assim, o modelo possui duas variáveis: o atraso ionosférico vertical Δ_v^{IONO} e a ambigüidade da portadora N_{L1} . Com uma série de observações de um mesmo satélite é possível então determinar as incógnitas, aplicando-se o método dos mínimos quadrados (MMQ).

Modelo Diário com função Co-seno

Este modelo leva em consideração a rotação da Terra e o movimento diário do Sol em relação ao local de observação, o que o torna um pouco mais refinado que o modelo da lâmina ionosférica. Neste modelo, o atraso ionosférico é dependente do atraso ionosférico máximo sendo os dois relacionados com uma função coseno, de acordo com a equação:

$$\Delta_v^{IONO} = \Delta_{v,max}^{IONO} \cdot \cos(h_s - h_{am})$$

Equação 24

onde:

Δ_v^{IONO} representa o atraso ionosférico vertical, em metros;

$\Delta_{v,max}^{IONO}$ representa o atraso ionosférico vertical máximo, em metros;

h_s representa a hora solar local, em horas;

h_{am} representa a hora solar local em que ocorre o atraso ionosférico vertical máximo, em horas.

De acordo com KLOBUCHAR (1987), o atraso máximo ocorre próximo às 14 h do horário solar local (duas horas após a passagem meridiana do Sol), podendo, entretanto, este valor variar em função da estação do ano, da latitude e das condições de atividade solar. De acordo com Observatório Nacional (1998), a passagem meridiana do Sol em Greenwich ocorre próximo às 12 h do sistema universal de tempo. Considerando este horário como padrão pode-se calcular a hora solar local de acordo com a equação:

$$h_{s,UT} = \frac{\lambda}{15} + t_{UT}$$

Equação 25

onde λ representa a longitude do local de observação, e t_{UT} representa a época da observação no sistema universal de tempo. Para a hora de máximo atraso adotar-se-á 14 h, resultando a equação 24 em:

$$\Delta_v^{IONO} = \Delta_{v,max}^{IONO} \cdot \cos(h_{s,UT} - 14)$$

Equação 26

Substituindo o atraso ionosférico na equação 21, teremos:

$$R - \lambda_{L1} \cdot \Phi_{L1} = \frac{2 \cdot \Delta_{v,max}^{IONO} \cdot \cos(h_{s,UT} - 14)}{\text{sen}(E)} - \lambda_{L1} \cdot N_{L1}$$

Equação 27

Obtendo-se finalmente o atraso ($\Delta_{v,max}^{IONO}$) e a ambigüidade da portadora através do método dos mínimos quadrados (MMQ).

Modelo do Ponto Ionosférico

Este modelo possui o mesmo princípio do modelo da lâmina ionosférica, porém utiliza o ângulo de elevação do satélite em relação ao ponto ionosférico, conforme a Figura 5.

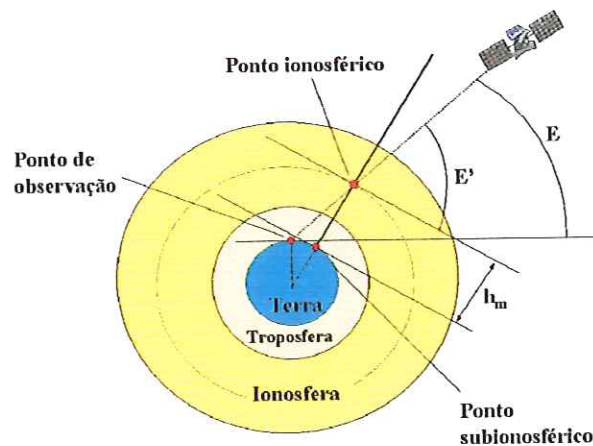


Figura 5 – Ponto Ionosférico – Adaptado de HOFMANN-WELLENHOF (2001)

Como a camada F2, que é a camada com maior densidade de elétrons livres, se situa a altitudes de 300 a 400 km aproximadamente, utiliza-se geralmente como altura média para o ponto ionosférico (h_m) o valor de 350 km. O modelo é dado por:

$$\Delta^{IONO} = \frac{\Delta_v^{IONO}}{\text{sen}(E')}$$

Equação 28

onde E' representa o ângulo de elevação do satélite em relação ao ponto ionosférico, e pode ser calculada de acordo com a seguinte equação:

$$\text{sen}(E') = \frac{R_t}{R_t + h_m} \cdot \text{sen}(E)$$

Equação 29

onde R_t representa o raio médio da Terra para o ponto de observação, podendo ser calculado pela equação:

$$R_t = \sqrt{X_{r,0}^2 + Y_{r,0}^2 + Z_{r,0}^2}$$

Equação 30

Substituindo o atraso ionosférico na equação 21, teremos:

$$R - \lambda_{L1} \cdot \phi_{L1} = \frac{2 \cdot \Delta_v^{IONO}}{\text{sen}(E')} - \lambda_{L1} \cdot N_{L1}$$

Equação 31

2.4.2 A Troposfera e os Sinais GPS

O efeito causado pela atmosfera neutra nos sinais emitidos pelos satélites do sistema GPS é chamado de refração troposférica, atraso troposférico de percurso ou simplesmente atraso troposférico HOFMANN-WELLENHOF, (2001). De acordo com ELGERED et al. (1985), esta nomeação é ligeiramente incorreta, pois exclui a estratosfera, que é outra constituinte da atmosfera neutra. Entretanto, a contribuição dominante da troposfera justifica a nomenclatura.

A atmosfera neutra é um meio não dispersivo em relação às ondas de rádio com frequências de até 15 GHz, BAUERSIMA (1983). Sendo assim, os efeitos causados na propagação do sinal não dependem da frequência da portadora. A desvantagem disto é que a eliminação matemática da refração troposférica não é possível utilizando-se duas frequências. Portanto, a única maneira de diminuir estes efeitos no resultado do processamento é utilizando modelos matemáticos pontuais.

O atraso troposférico pode ser definido como a influência do índice de refração do meio troposférico no sinal ao longo de todo o caminho percorrido, de acordo com a equação:

$$\Delta^{Trop} = \int (n - 1) ds$$

Equação 32

onde:

n representa o índice de refração;

Δ^{Trop} representa o atraso troposférico em metros.

Geralmente, ao invés do índice de refração é utilizada a refratividade (N^{Trop}) na equação 32, resultando em:

$$\Delta^{Trop} = 10^{-6} \int N^{Trop} ds$$

Equação 33

onde $N^{Trop} = 10^6 \cdot (n - 1)$

HOPFIELD (1969) demonstrou a possibilidade de separar a refratividade N^{Trop} em duas componentes (uma seca e uma úmida), sendo que:

$$N^{Trop} = N_s^{Trop} + N_u^{Trop}$$

Equação 34

onde:

N_s^{Trop} representa a refratividade seca, resultante da atmosfera seca;

N_u^{Trop} representa a refratividade úmida, resultante da atmosfera úmida.

Podemos então dividir a equação 33 em:

$$\Delta_s^{Trop} = 10^{-6} \int N_s^{Trop} ds$$

Equação 35

$$\Delta_u^{Trop} = 10^{-6} \int N_u^{Trop} ds$$

Equação 36

O atraso troposférico total resulta então em:

$$\Delta^{Trop} = \Delta_s^{Trop} + \Delta_u^{Trop} = (10^{-6} \int N_s^{Trop} ds) + (10^{-6} \int N_u^{Trop} ds)$$

Equação 37

Cerca de 90 % da refração troposférica é causada pela componente seca e os outros 10 % pela componente úmida, JANES et al. (1989). Na prática, utilizam-se modelos para estimar as refratividades, e as integrais são substituídas por processos numéricos como séries de expansão. As refratividades seca e úmida na superfície terrestre podem ser expressas por:

$$N_{s,0}^{Trop} = c_1 \cdot \frac{p}{T}$$

Equação 38

e

$$N_{u,0}^{Trop} = c_2 \cdot \frac{e}{T} + c_3 \cdot \frac{e}{T^2}$$

Equação 39

onde:

$N_{s,0}^{Trop}$ representa a refratividade seca na superfície terrestre;

$N_{u,0}^{Trop}$ representa a refratividade úmida na superfície terrestre;

c_1 , c_2 e c_3 são coeficientes de refratividade;

p representa a pressão atmosférica em milibares;

T representa a temperatura em graus Kelvin;

e representa a pressão parcial de vapor d'água em milibares.

Os coeficientes c_1 , c_2 e c_3 são provenientes de determinações empíricas, e de acordo com LANGLEY (1996), foram determinados por Thayer em 1974 com os seguintes valores:

$$c_1 = 77,604 \pm 0,14 \text{ K mb}^{-1}$$

$$c_2 = 64,79 \pm 10 \text{ K mb}^{-1}$$

$$c_3 = 377600 \pm 3000 K^2 mb^{-1}$$

A componente úmida do atraso troposférico depende, entre outras coisas, da quantidade de vapor d'água existente na atmosfera. Muitas pesquisas têm sido realizadas a fim de modelar esta variável.

A pressão do vapor d'água pode ser calculada a partir de informações meteorológicas previamente conhecidas, como a umidade relativa e a temperatura do local de observação. A equação para o cálculo da pressão de vapor d'água que foi recomendada na Convenção IERS (1996) é:

$$e_0 = 0,0611 \cdot UR \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot T_0}{273,3 + T_0}}$$

Equação 40

onde:

e_0 representa a pressão de vapor d'água, em milibares;

UR representa a umidade relativa do ar no local de observação, em porcentagem;

T_0 representa a temperatura atmosférica no local de observação, em graus Celsius.

2.4.2.1 Modelo de Hopfield

Hopfield desenvolveu empiricamente em 1969 um modelo troposférico utilizando dados globais. O modelo de Hopfield considera a atmosfera como sendo uma única camada politrópica, se estendendo desde a superfície terrestre até altitudes de aproximadamente 11 km e 40 km, para as camadas úmida e seca, respectivamente (Figura 6), HOPFIELD (1976).

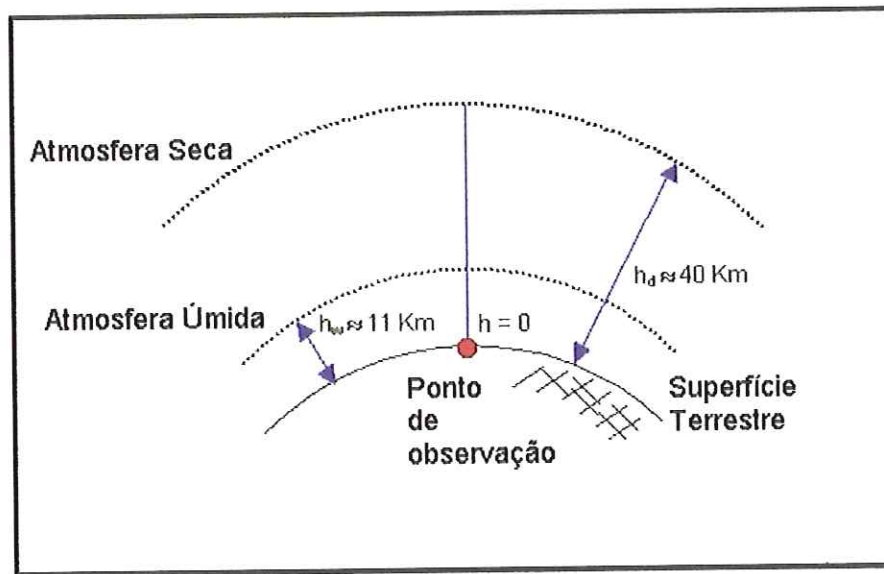


Figura 6 - Modelo de atmosfera (camada politrópica única) utilizado por Hopfield.
Adaptado de HOFMANN-WELLENHOF (2001).

O modelo de Hopfield considera as refratividades seca e úmida como sendo funções da altura, de acordo com as seguintes equações:

$$N_s^{Trop}(h) = N_{s,0}^{Trop} \cdot \left[\frac{h_s - h}{h_s} \right]^4$$

Equação 41

e

$$N_u^{Trop}(h) = N_{u,0}^{Trop} \cdot \left[\frac{h_u - h}{h_u} \right]^4$$

Equação 42

onde:

N_s^{Trop} representa a refratividade da componente seca;

N_u^{Trop} representa a refratividade da componente úmida;

h representa a altura acima da superfície terrestre, em metros;

h_s representa a altura média da componente seca da atmosfera, em metros;

h_u representa a altura média da componente úmida da atmosfera, em metros.

Substituindo as equações 41 e 42 nas equações 35 e 36, respectivamente, teremos:

$$\Delta_s^{Trop} = 10^{-6} \cdot N_{s,0}^{Trop} \cdot \int \left[\frac{h_s - h}{h_s} \right]^4 ds$$

Equação 43

e

$$\Delta_u^{Trop} = 10^{-6} \cdot N_{u,0}^{Trop} \cdot \int \left[\frac{h_u - h}{h_u} \right]^4 ds$$

Equação 44

Considerando um caminho percorrido ao longo da vertical, e desconsiderando a curvatura do sinal ao longo do percurso, teremos:

$$\Delta_{s,v}^{Trop} = 10^{-6} \cdot N_{s,0}^{Trop} \cdot \frac{1}{h_s^4} \int_{h=0}^{h=h_s} (h_s - h)^4 dh$$

Equação 45

e

$$\Delta_{u,v}^{Trop} = 10^{-6} \cdot N_{u,0}^{Trop} \cdot \frac{1}{h_u^4} \int_{h=0}^{h=h_u} (h_u - h)^4 dh$$

Equação 46

Resolvendo a integral:

$$\Delta_{s,v}^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \cdot N_{s,0}^{Trop} \cdot h_s$$

Equação 47

e

$$\Delta_{u,v}^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \cdot N_{u,0}^{Trop} \cdot h_u$$

Equação 48

Portanto o atraso vertical total é dado por:

$$\Delta_v^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \cdot (N_{s,0}^{Trop} \cdot h_s + N_{u,0}^{Trop} \cdot h_u)$$

Equação 49

Normalmente, o atraso vertical é relacionado com o atraso sofrido ao longo da trajetória do sinal através de funções de mapeamento. Introduzindo a função de mapeamento na equação 49, teremos:

$$\Delta_v^{Trop} = \frac{10^{-6}}{5} \cdot (N_{s,0}^{Trop} \cdot h_s \cdot m_s(E) + N_{u,0}^{Trop} \cdot h_u \cdot m_u(E))$$

Equação 50

onde $m_s(E)$ e $m_u(E)$ representam as funções de mapeamento para as componentes seca e úmida, respectivamente, e E representa o ângulo de elevação de cada satélite em relação à antena do receptor, em graus. As funções de mapeamento para o modelo de Hopfield são dadas por:

$$m_s(E) = \frac{1}{\text{sen}(\sqrt{E^2 + 6,25})}$$

Equação 51

e

$$m_u(E) = \frac{1}{\text{sen}(\sqrt{E^2 + 2,25})}$$

Equação 52

Sendo assim, conhecidos a temperatura, pressão, umidade relativa do ar e calculados os ângulos de elevação de cada satélite, é possível determinar o atraso troposférico total em metros para um ponto de observação qualquer.

2.4.2.2 Modelo de Saastamoinen

Este modelo, que é baseado na lei dos gases ideais, admite a atmosfera como sendo uma mistura de dois gases: ar seco e vapor d'água. Saastamoinen dividiu a atmosfera seca em duas camadas: troposfera politrópica, se estendendo desde a superfície terrestre até altitudes de aproximadamente 11 a 12 km, e estratosfera isotérmica, se estendendo desde acima da troposfera até altitudes de aproximadamente 50 km. O modelo de Saastamoinen considera o atraso troposférico como sendo uma função do ângulo zenital do satélite, da pressão atmosférica, da temperatura e da pressão parcial de vapor d'água (Equação 53).

$$\Delta^{TROP} = \frac{0,002277}{\cos(z)} \cdot \left[p + \left(\frac{1255}{T + 273,15} + 0,05 \right) \cdot e - \tan^2(z) \right]$$

Equação 53

onde:

Δ^{TROP} representa o atraso troposférico vertical, em metros;

z representa o ângulo zenital de cada satélite, em graus;

p representa a pressão atmosférica, em milibares;

T representa a temperatura ambiente, em graus Celsius;

e representa a pressão parcial de vapor d'água, em milibares.

2.4.2.3 Funções de mapeamento

As funções de mapeamento descrevem a relação do ângulo de elevação dos satélites com o atraso de sinais que atravessam a atmosfera neutra, NIELL (1996). O atraso zenital, quando combinado com uma destas funções, resulta no

atraso ao longo da trajetória verdadeira. Normalmente, admite-se simetria em relação ao azimute. O atraso troposférico pode ser estimado da seguinte maneira:

$$\Delta^{Trop} = \Delta_s^{Trop} \cdot m_s(E) + \Delta_u^{Trop} \cdot m_u(E)$$

Equação 54

onde $m_s(E)$ e $m_u(E)$ representam as funções de mapeamento para as componentes seca e úmida do atraso troposférico, respectivamente.

MARINI (1972) desenvolveu uma função de mapeamento utilizando a expansão de uma fração contínua da forma $1/\text{sen}(E)$. HERRING (1992) especificou três constantes para a expansão. Para a componente seca da atmosfera a função de mapeamento de Marini pode ser descrita como:

$$m_s(E) = \frac{1 + \frac{a_s}{1 + \frac{b_s}{1 + c_s}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_s}{\text{sen}(E) + \frac{b_s}{\text{sen}(E) + c_s}}}$$

Equação 55

onde os coeficientes a_s , b_s e c_s são definidos como:

$$a_s = [1,2320 + 0,0139 \cdot \cos(\phi) - 0,0209 \cdot h + 0,00215 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 56

$$b_s = [3,1612 - 0,1600 \cdot \cos(\phi) - 0,0331 \cdot h + 0,00206 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 57

$$c_s = [71,224 - 4,293 \cdot \cos(\phi) - 0,149 \cdot h - 0,0021 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 58

onde T , ϕ e h representam a temperatura, a latitude e a altura geométrica do local de observação. Para a componente úmida, analogamente à seca, teremos:

$$m_u(E) = \frac{1 + \frac{a_u}{1 + \frac{b_u}{1 + c_u}}}{\text{sen}(E) + \frac{a_u}{\text{sen}(E) + \frac{b_u}{\text{sen}(E) + c_u}}}$$

Equação 59

onde os coeficientes a_u , b_u e c_u são definidos como:

$$a_u = [0,583 - 0,011 \cdot \cos(\phi) - 0,052 \cdot h + 0,0014 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 60

$$b_u = [1,402 - 0,102 \cdot \cos(\phi) - 0,101 \cdot h + 0,0020 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 61

$$c_u = [45,85 - 1,91 \cdot \cos(\phi) - 0,29 \cdot h + 0,015 \cdot (T - 283)] \cdot 10^{-3}$$

Equação 62

3 O Programa MARGEO

Para que fosse possível realizar todas as análises, foi desenvolvido pelo autor deste trabalho um programa para processamento de dados GPS (Programa MARGEO – Manipulador de Arquivos RINEX para Geodésia), especificamente para posicionamento por ponto simples usando as observações do código C/A. A linguagem de programação utilizada foi o Visual Basic versão 5.0. A escolha foi conveniente, pois o autor já possuía conhecimentos sobre esse ambiente de programação, ao mesmo tempo em que o departamento dispunha da licença de utilização.

A Figura 7 ilustra a tela de abertura do programa MARGEO:

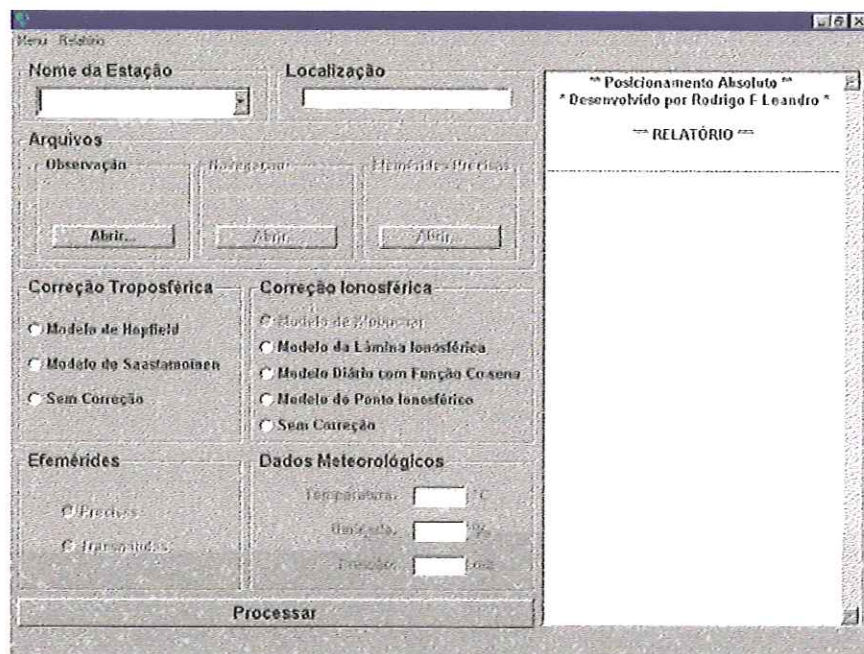


Figura 7 – Tela inicial do programa MARGEO.

Este aplicativo é composto por diversas rotinas que desempenham funções diferentes, sendo que a união de todas elas resulta na determinação das coordenadas do ponto. Cada rotina executa um passo do processamento dos dados:

1) Leitura do arquivo de observação (Figura 8)

- o arquivo de observação é aberto e lido;
- as observáveis são armazenadas em variáveis de maneira organizada;
- são determinadas as épocas em que o sinal de cada satélite começa e pára de ser recebido pelo receptor.

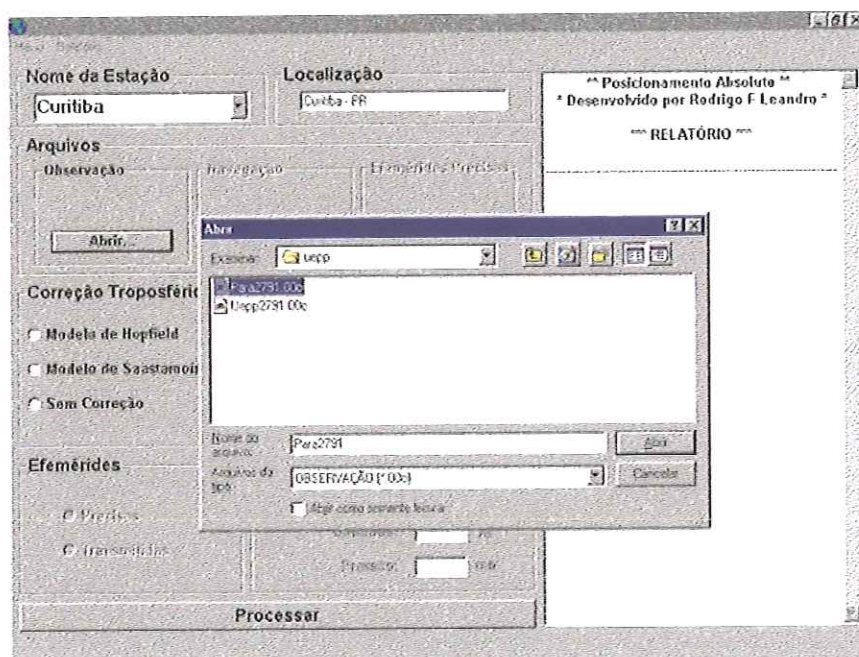


Figura 8 – Leitura do arquivo de observação.

2) Leitura do arquivo de navegação (Figura 9)

- o arquivo de navegação é aberto e lido;
- os coeficientes são armazenados em variáveis;

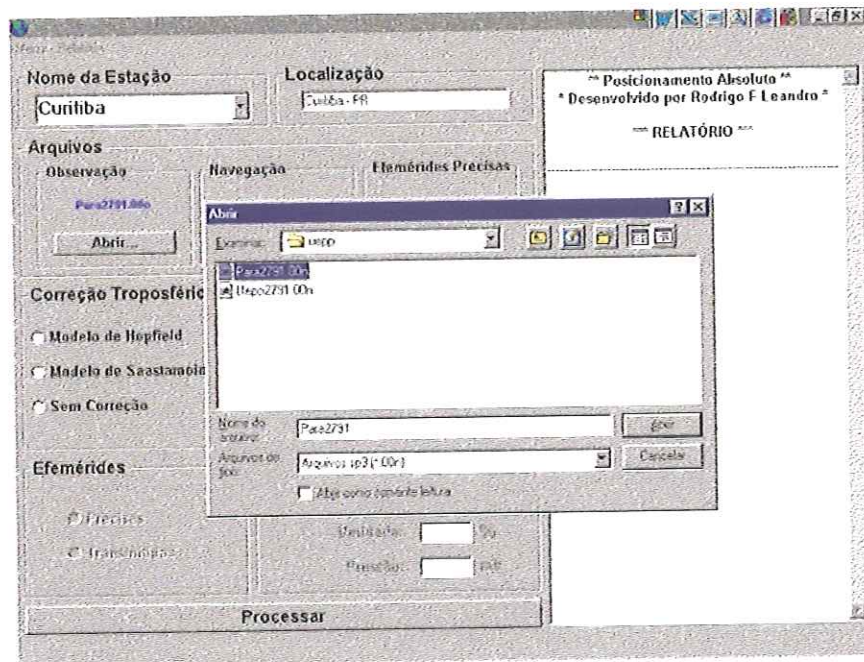


Figura 9 – Leitura do arquivo de navegação.

3) Leitura do arquivo de efemérides precisas (Figura 10)

- o arquivo de efemérides precisas é aberto e lido;
- as coordenadas dos satélites são armazenadas em variáveis;

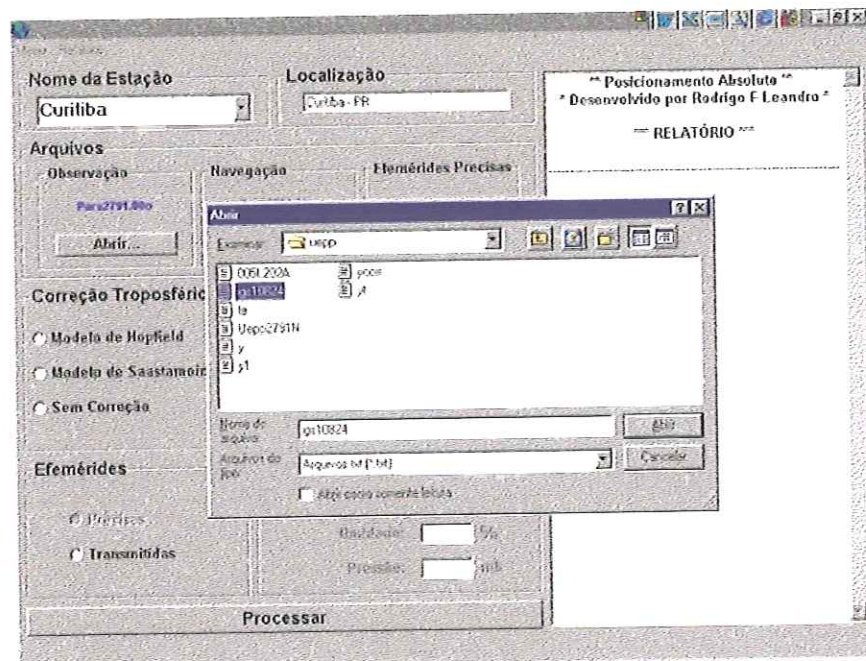


Figura 10 – Leitura do arquivo de efemérides precisas.

4) Aplicação do modelo troposférico (Figura 11)

- é escolhido o modelo troposférico que será utilizado pelo programa;
- são informados os valores para temperatura, umidade e pressão;
- as pseudodistâncias de todos os satélites em todas as épocas são corrigidas utilizando o modelo.

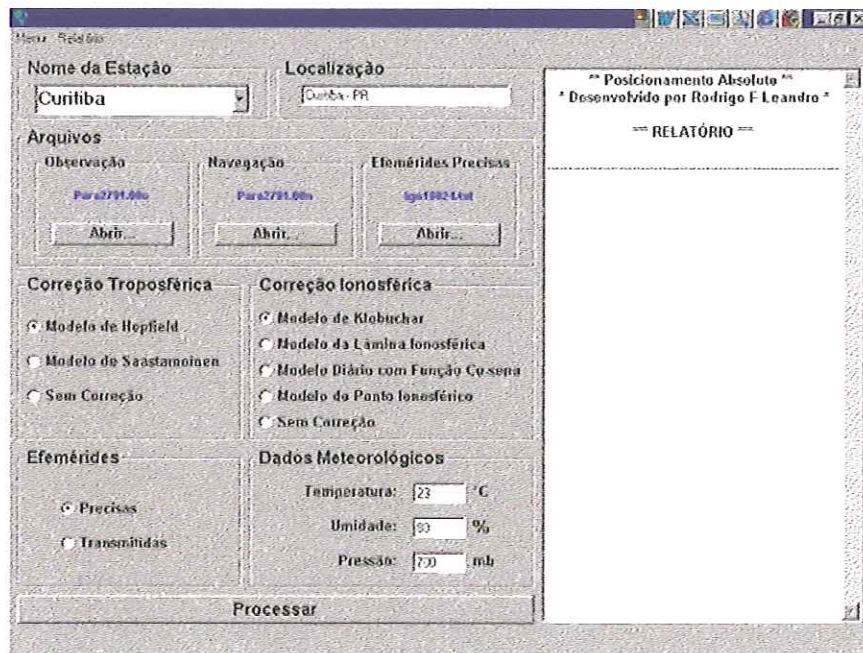


Figura 11 – Escolha do modelo troposférico, modelo ionosférico e efemérides que serão utilizados no processamento.

5) Aplicação do modelo ionosférico (Figura 11)

- é escolhido o modelo ionosférico que será utilizado pelo programa;
- as pseudodistâncias de todos os satélites em todas as épocas são corrigidas utilizando o modelo.

6) Cálculo das coordenadas dos satélites para cada época (Figura 11)

- a partir das informações do arquivo de efemérides precisas ou de navegação são calculadas as coordenadas para todos os satélites para cada época;
- o método de cálculo utilizado no caso das efemérides precisas é a interpolação de Lagrange, ou Polinômio Interpolador de Lagrange;

7) Cálculo das coordenadas do ponto (Figuras 12 e 13)

- determinadas as coordenadas dos satélites e corrigidas as observáveis, as coordenadas do ponto são calculadas época a época;
- como geralmente em uma única época há superabundância de observações (mais de quatro satélites), utiliza-se o Método dos Mínimos Quadrados;
- com coordenadas determinadas a cada época, determina-se a média e o desvio padrão destas como resposta do processamento;

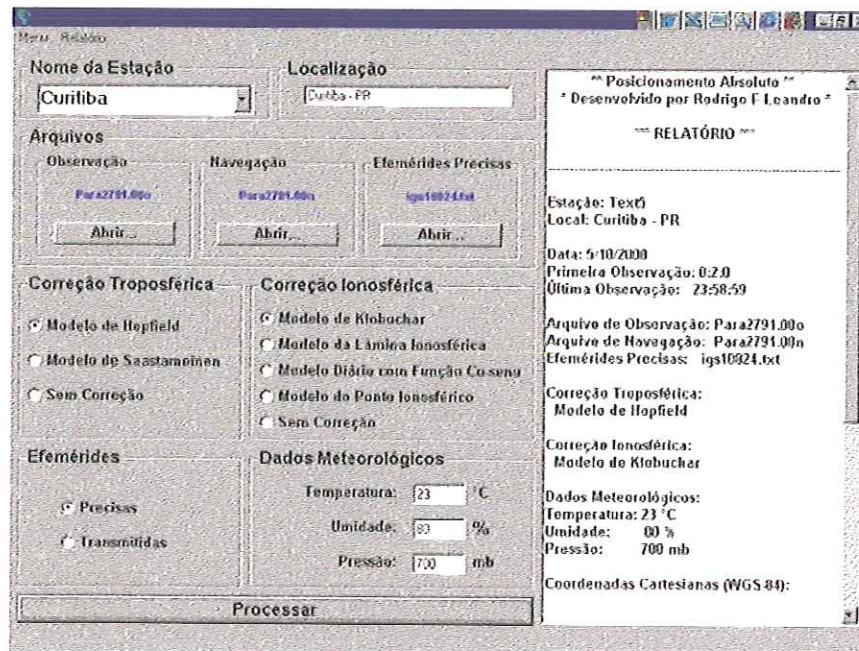


Figura 12 – Apresentação dos resultados.

Nome da Estação: Curitiba
Localização: Curitiba-PR

Arquivos

Observação Para2701.00a Abrir...	Navegação Para2701.00n Abrir...	Efemérides Precisas Epa1982.1.txt Abrir...
--	---------------------------------------	--

Correção Troposférica

- Modelo de Hopfield
- Modelo de Saastamoinen
- Sem Correção

Correção Ionosférica

- Modelo de Klobuchar
- Modelo da Lâmina Ionosférica
- Modelo Diário com Função Co-seno
- Modelo do Ponto Ionosférico
- Sem Correção

Efemérides

- Precisas
- Transmitidas

Dados Meteorológicos

Temperatura: 23 °C
Umidade: 80 %
Pressão: 700 mb

Correção Troposférica:
Modelo de Hopfield

Correção Ionosférica:
Modelo de Klobuchar

Dados Meteorológicos:
Temperatura: 23 °C
Umidade: 80 %
Pressão: 700 mb

Coordenadas Cartesianas (WGS 84):
X: 3763754.28 m desvio padrão: 8.65 m
Y: 4365114.61 m desvio padrão: 9.03 m
Z: 2724420 m desvio padrão: 9.34 m

Coordenadas Cartesianas (SAD 69):
X: 3763821.15 m
Y: 4365118.98 m
Z: 2724301.48 m

Coordenadas Geodésicas (SAD 69)
Latitude : -25 ° 20 ' 52.77 "
Longitude : -49 ° 13 ' 49.67 "
Altura Geométrica : 937.42 m

Processar

Figura 13 – Apresentação dos resultados

4 Metodologia

4.1 Dados

Os arquivos referentes a observações GPS utilizados na realização deste trabalho foram arquivos RINEX, provenientes das estações RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Os arquivos foram cedidos gentilmente pelo Departamento de Geodésia do IBGE, sendo que estes são referentes a observações de todas as estações da rede para o período do ano de 2000 (ano de grande atividade solar).

Os dados meteorológicos (temperatura, umidade e pressão) utilizados nos modelos de atrasos troposféricos foram obtidos através da internet, na página do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia – www.inmet.gov.br). As informações estão representadas em gráficos que mostram os valores médios mensais de cada variável meteorológica (Figura 14).

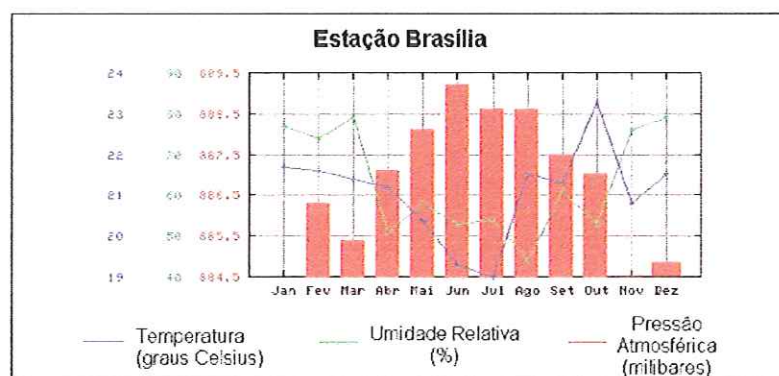


Figura 14 - Gráfico dos valores médios mensais de temperatura, umidade e pressão para a estação de Brasília. Adaptado de www.inmet.gov.br.

Como o INMET disponibiliza estes dados apenas para as capitais brasileiras, a abrangência da pesquisa ficou restrita às cidades que, além de possuírem estações da RBMC, fossem capitais estaduais. Sendo assim, do total de treze estações da rede, poderiam ser utilizados dados de apenas oito, que estão representadas na Figura 15.

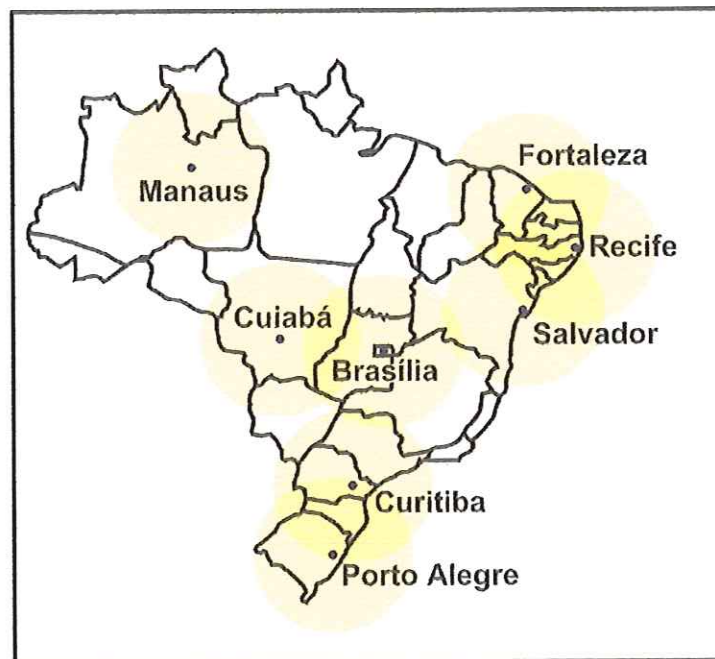


Figura 15 - Distribuição no Território Nacional das Estações RBMC que poderiam ser utilizadas

Como pode ser visto, apesar da restrição do número de estações, a distribuição promove uma grande amplitude quanto à latitude dentro do território nacional. Tal fato foi imprescindível para que os objetivos desta pesquisa fossem atingidos.

A escolha das estações utilizadas foi feita em função da disponibilidade de dados e da distribuição das mesmas no território nacional. A escolha dos dias de observação foi feita em função da atividade solar. O índice utilizado para estimá-la foi o fluxo de raios X. Estes dados foram obtidos através da internet no endereço <http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html> (em julho de 2002), em gráficos como o da Figura 16.

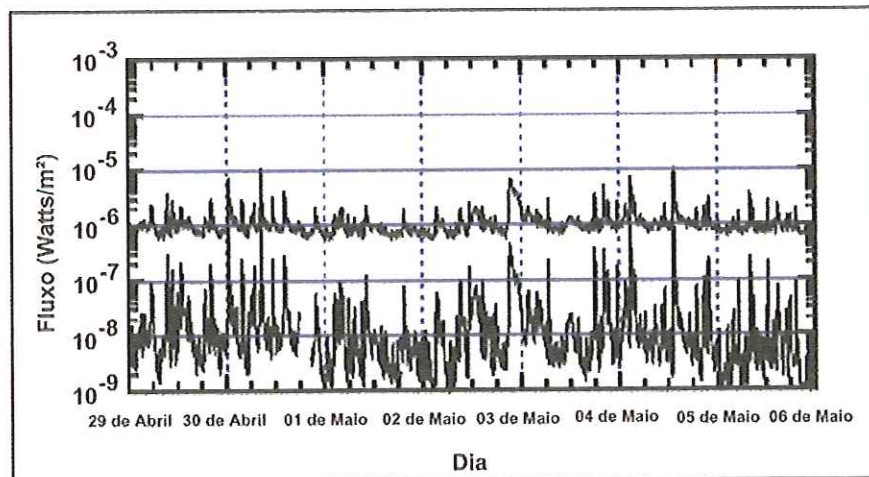


Figura 16 - Gráfico de fluxo de raios X. Adaptado de

<http://www.sec.noaa.gov/weekly/weekly00.html> (julho de 2002)

Em relação aos dias de observação foram analisadas seis condições:

- Baixa atividade solar, sem eventos solares nos dias anteriores (Caso 1);
- Baixa atividade solar, com eventos solares nos dias anteriores (Caso 2);
- Média atividade solar, sem eventos solares isolados (Caso 3);
- Média atividade solar, com eventos solares isolados (Caso 4);
- Alta atividade solar, sem eventos solares nos dias anteriores (Caso 5);
- Alta atividade solar, com eventos solares nos dias anteriores (Caso 6).

Para cada caso foi escolhido o seguinte dia:

Caso 1 → 5 de agosto de 2000;

Caso 2 → 6 de maio de 2000;

Caso 3 → 15 de setembro de 2000;

Caso 4 → 18 de maio de 2000;

Caso 5 → 24 de novembro de 2000;

Caso 6 → 26 de novembro de 2000.

Visando cobrir uma grande amplitude quanto à variação de latitude foram escolhidas três estações para as análises:

- Estação BRAZ (Localizada em Brasília – DF);
- Estação FORT (Localizada em Fortaleza – CE);
- Estação PARA (Localizada em Curitiba – PR).

O programa utilizado para o processamento dos dados foi o MARGEO, já descrito no Capítulo 3.

Para o cálculo das coordenadas e erros de relógio dos satélites foram utilizados arquivos de efemérides precisas (fornecidas pelo *International GPS Service for Geodynamics* através da internet).

4.2 Análises

Para que seja realizada a análise da eficácia dos modelos ionosféricos sob diferentes condições, é necessário que se utilize sempre o mesmo modelo para troposfera. Como padrão para as análises foi escolhido o Modelo de Hopfield, que é um dos modelos mais utilizados pelos softwares comerciais de processamento GPS.

Para cada estação os dados foram processados com intervalos de uma hora variando ao longo de todo o dia, para cada um dos seis casos. Foram utilizados os mesmos horários e dias para as diferentes estações. Este procedimento foi executado quatro vezes, uma utilizando cada um dos modelos ionosféricos:

- Modelo de Klobuchar;
- Modelo do Ponto Ionosférico;
- Modelo da Lâmina Ionosférica;
- Modelo Diário com função co-seno.

5 Resultados

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo são apresentados graficamente os resultados do processamento dos seis casos. Para analisar a eficácia de cada modelo no posicionamento foram adotadas como coordenadas verdadeiras das estações as fornecidas pelo IBGE. Os gráficos mostram os desvios planos e espaciais das coordenadas obtidas em relação às consideradas verdadeiras. O desvio plano foi determinado de acordo com a Equação 64:

$$DP = \sqrt{[R_T \cdot (\phi_o - \phi_v)]^2 + [R_T \cdot (\lambda_o - \lambda_v)]^2}$$

Equação 63

onde:

DP representa o desvio plano em metros;

ϕ_o representa a latitude obtida pelo programa MARGEO em radianos;

ϕ_v representa a latitude considerada verdadeira em radianos;

λ_o representa a longitude obtida pelo programa MARGEO em radianos;

λ_v representa a longitude considerada verdadeira em radianos;

R_T representa o raio média da Terra em metros.

O desvio espacial foi determinado de acordo com a Equação 65:

$$DE = \sqrt{[R_T \cdot (\phi_o - \phi_v)]^2 + [R_T \cdot (\lambda_o - \lambda_v)]^2 + (h_o - h_v)^2}$$

Equação 64

onde:

DE representa o desvio espacial em metros;

ϕ_o representa a latitude obtida pelo programa MARGEO em radianos;

ϕ_v representa a latitude considerada verdadeira em radianos;

λ_o representa a longitude obtida pelo programa MARGEO em radianos;

λ_v representa a longitude considerada verdadeira em radianos;

h_o representa a altura geométrica obtida pelo programa MARGEO, em metros;

h_v representa a altura geométrica considerada verdadeira em metros;

R_T representa o raio médio da Terra em metros.

Os horários dos gráficos estão no sistema universal de tempo (UT). Para as três estações analisadas a hora local tem uma diferença de aproximadamente menos três horas em relação à hora UT (a hora local pode ser calculada em função da latitude do ponto, de acordo com a Equação 25). Por exemplo, 15 h UT equivalem a aproximadamente 12 h locais em qualquer das estações.

5.2 Resultados do Caso 1

No caso 1 foi escolhido um dia com baixa atividade solar, sem ocorrência de eventos de grande magnitude nos dias anteriores. O dia escolhido foi 5 de agosto de 2000. Na Figura 17 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

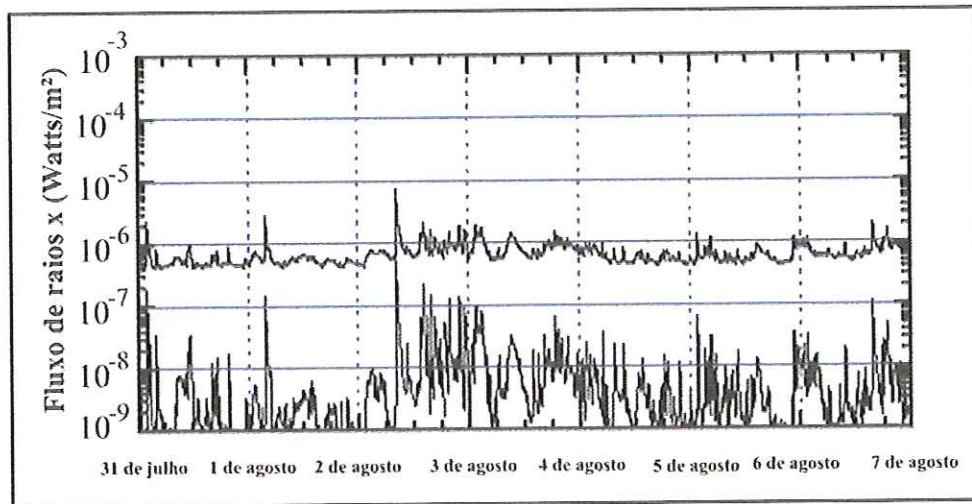


Figura 17 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 1

5.2.1 Desvio Plano (Caso 1)

Estação Brasília - 05/08 (Baixa Atividade s/ eventos anteriores)

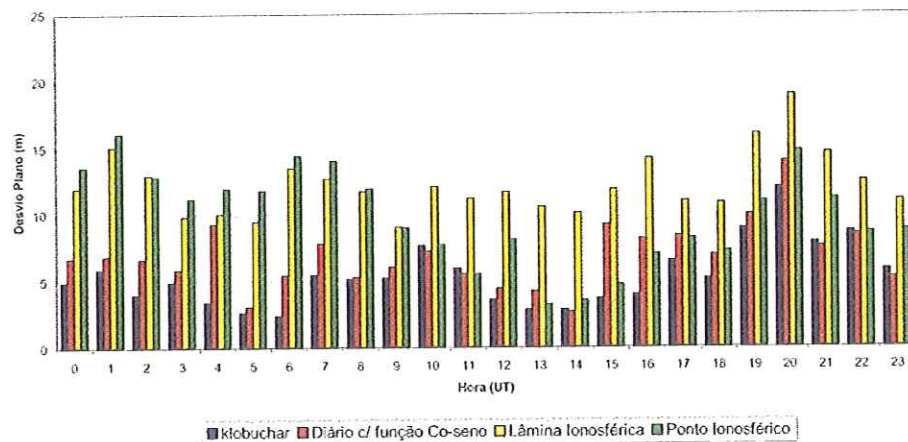


Figura 18 – Desvio plano para o Caso 1 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 05/08 (Baixa Atividade s/ eventos anteriores)

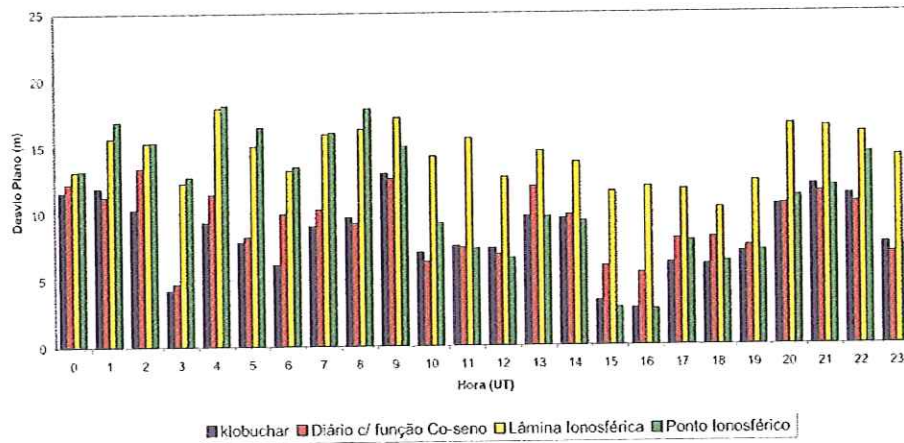


Figura 19 - Desvio plano para o Caso 1 (Estação FORT)

Estação Curitiba - 05/08 (Baixa Atividade s/ eventos anteriores)

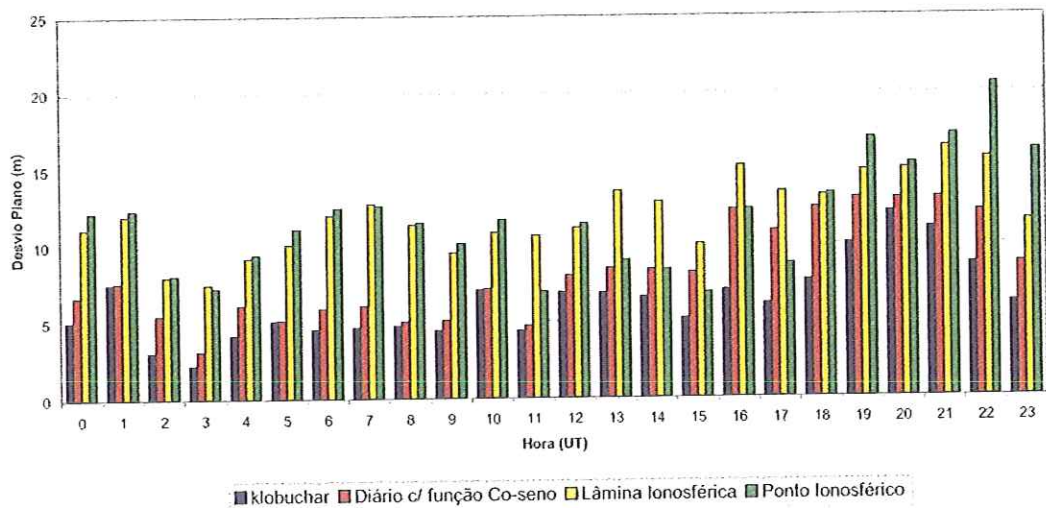


Figura 20 - Desvio plano para o Caso 1 (Estação PARA)

5.2.2 Desvio Espacial (Caso 1)

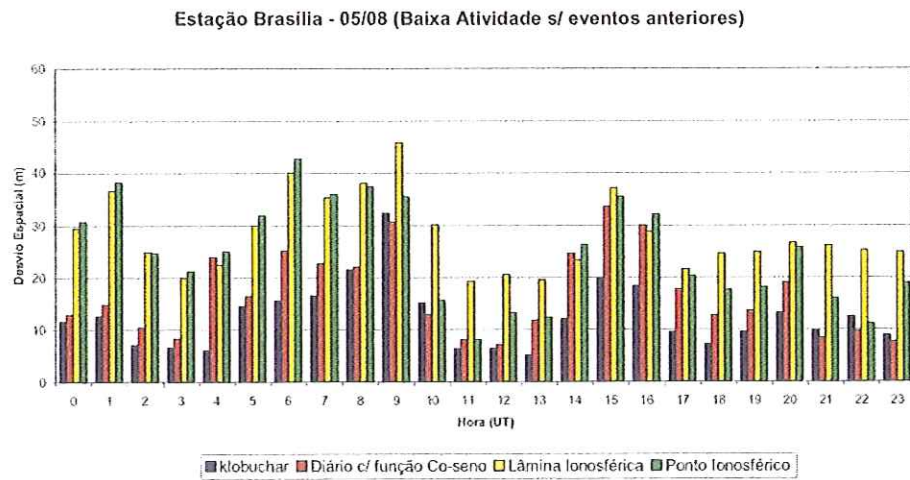


Figura 21 – Desvio espacial para o Caso 1 (Estação BRAZ)

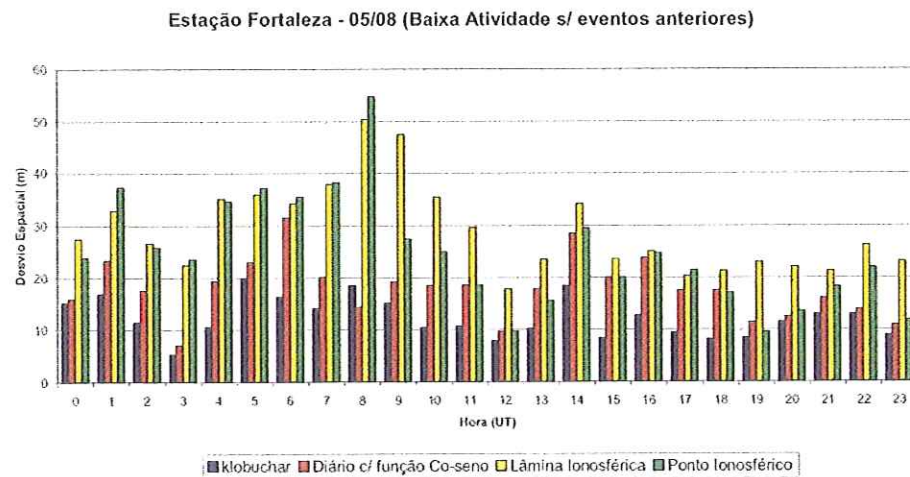


Figura 22 – Desvio espacial para o Caso 1 (Estação FORT)

Estação Curitiba - 05/08 (Baixa Atividade s/ eventos anteriores)

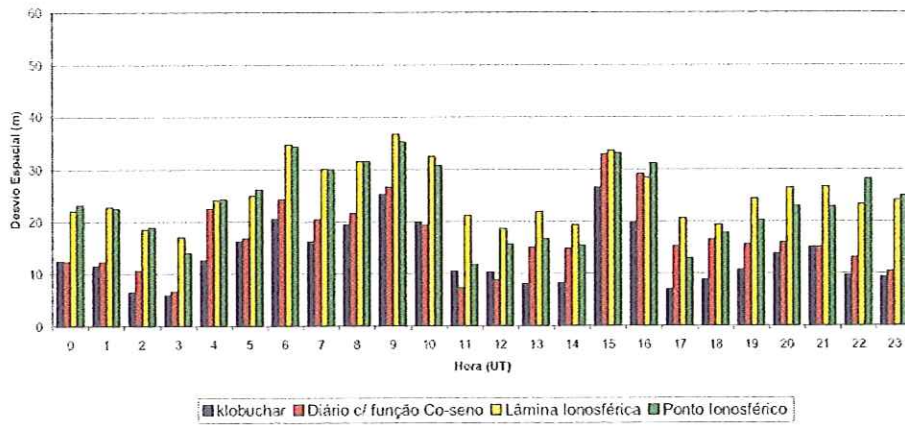


Figura 23 – Desvio espacial para o Caso 1(Estação PARA)

5.3 Resultados do Caso 2

No caso 2 foi escolhido um dia com baixa atividade solar, com ocorrência de eventos de grande magnitude nos dias anteriores. O dia escolhido foi 6 de maio de 2000. Na Figura 24 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

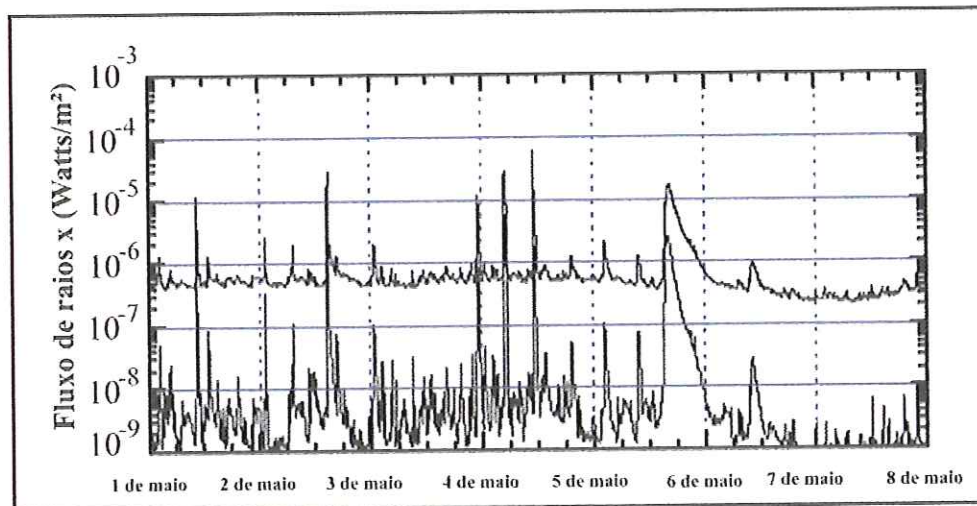


Figura 24 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 2

5.3.1 Desvio Plano (Caso 2)

Estação Brasília - 06/05 (Baixa Atividade c/ eventos anteriores)

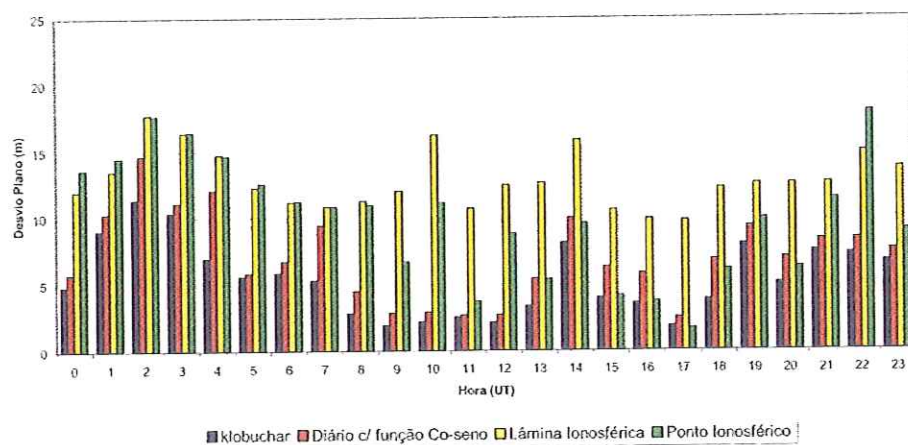


Figura 25 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 06/05 (Baixa Atividade *c/* eventos anteriores)

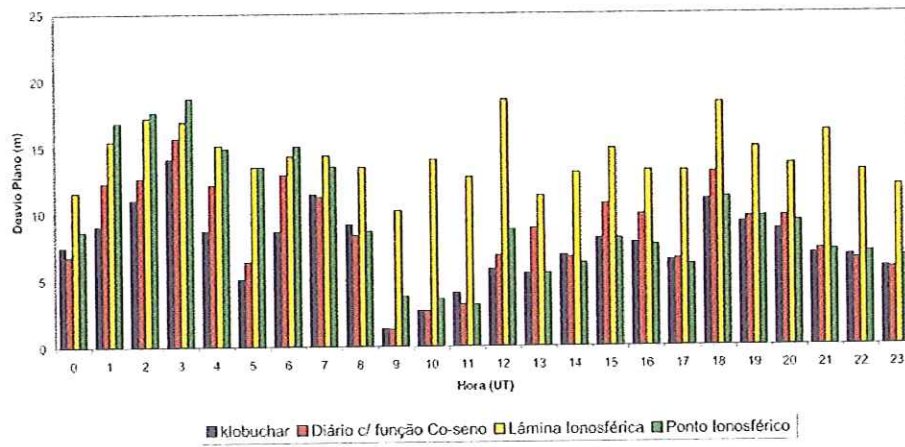


Figura 26 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação FORT)

Estação Curitiba - 06/05 (Baixa Atividade *c/* eventos anteriores)

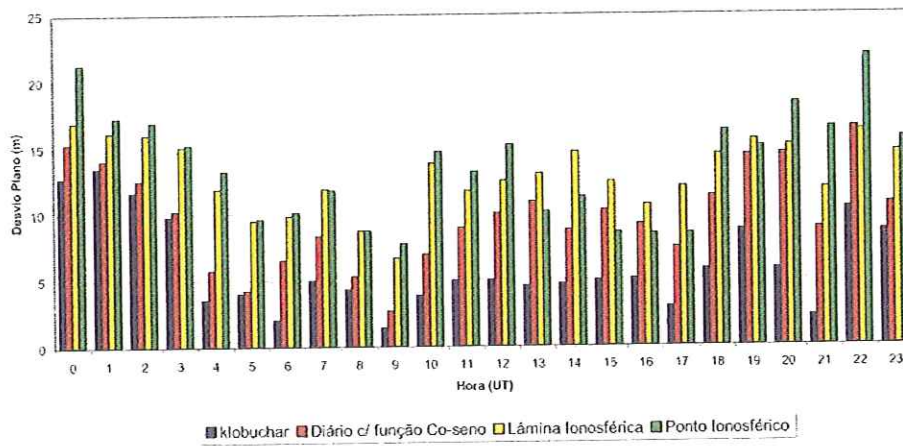


Figura 27 – Desvio plano para o Caso 2 (Estação PARA)

5.3.2 Desvio Espacial (Caso 2)

Estação Brasília - 06/05 (Baixa Atividade c/ eventos anteriores)

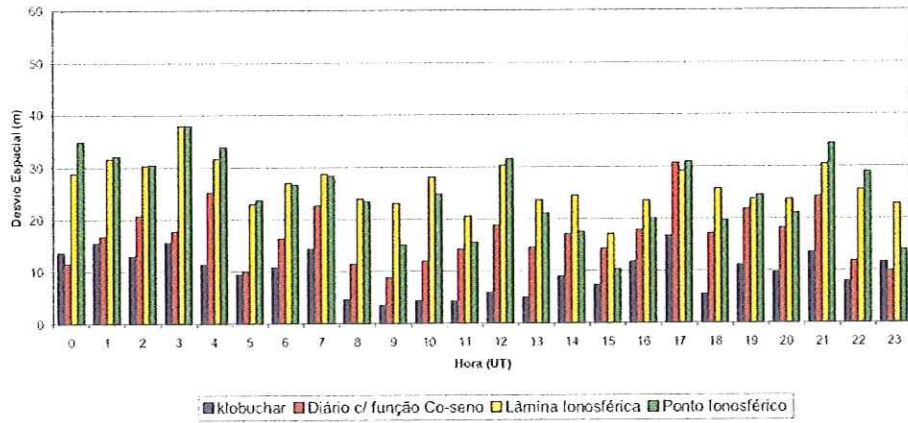


Figura 28 – Desvio espacial para o Caso 2 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 05/08 (Baixa Atividade s/ eventos anteriores)

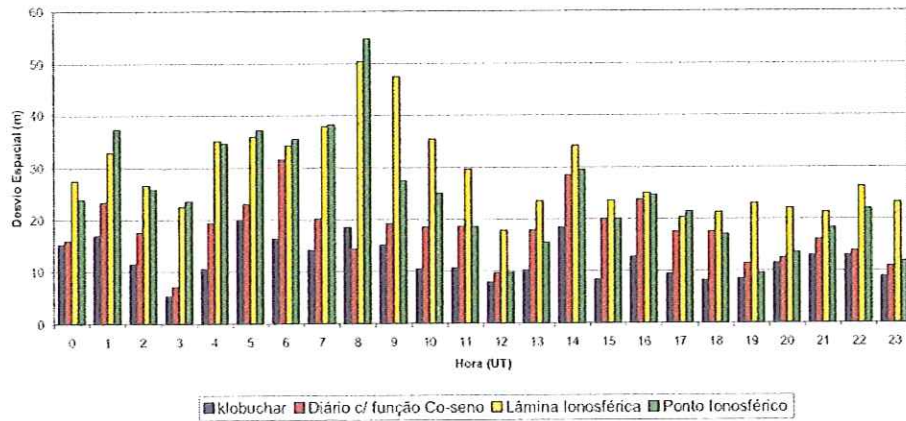


Figura 29 – Desvio espacial para o Caso 2 (estação FORT)

Estação Curitiba - 06/05 (Baixa Atividade c/ eventos anteriores)

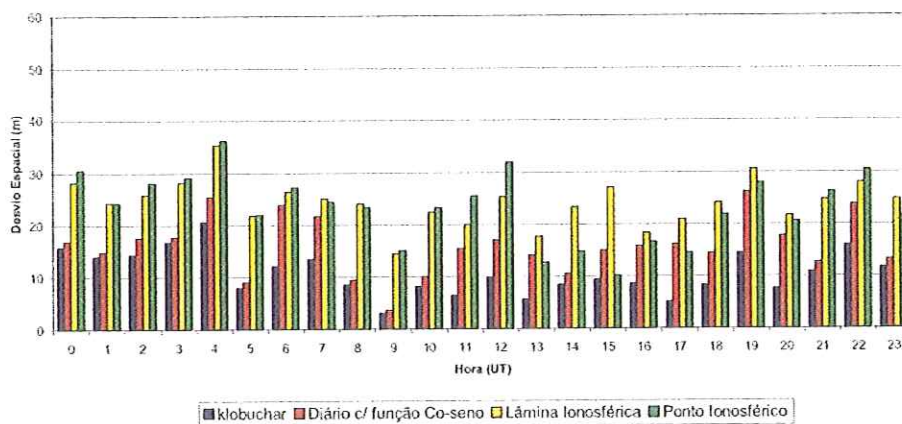


Figura 30 – Desvio espacial para o Caso 2 (Estação PARA)

5.4 Resultados do Caso 3

No caso 3 foi escolhido um dia com média atividade solar, sem ocorrência de eventos de grande magnitude durante o período. O dia escolhido foi 18 de maio de 2000. Na Figura 31 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

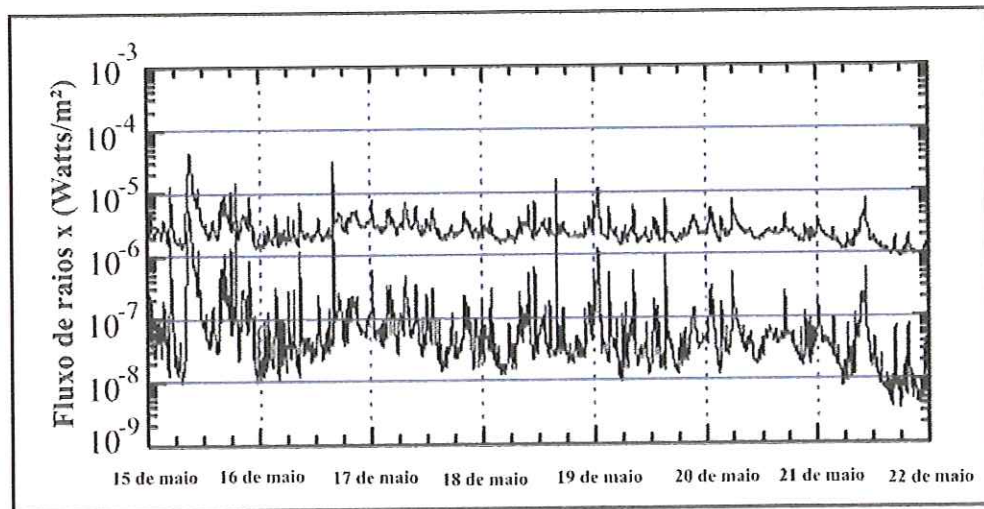


Figura 31 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 3

5.4.1 Desvio Plano (Caso 3)

Estação Brasília - 18/05 (Média Atividade s/ eventos)

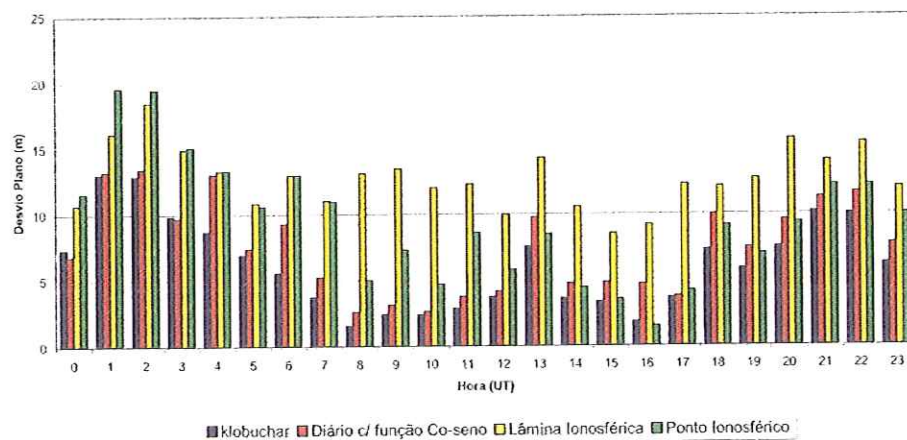


Figura 32 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 18/05 (Média Atividade s/ eventos)

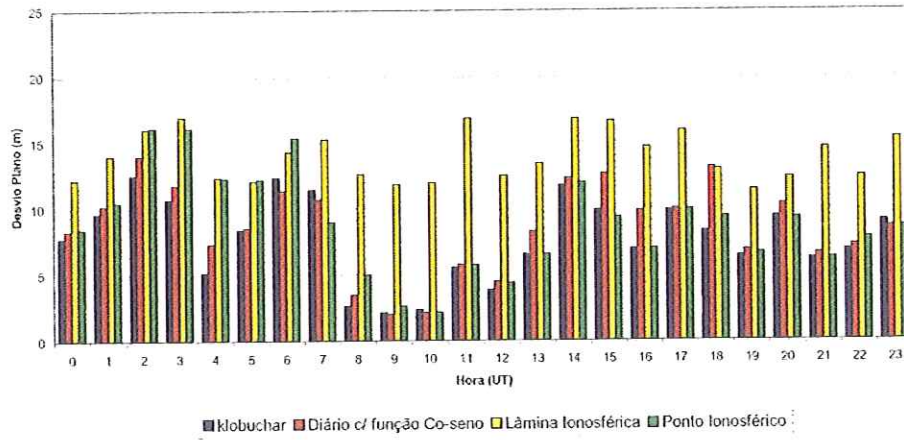


Figura 33 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação FORT)

Estação Curitiba - 18/05 (Média Atividade s/ eventos)

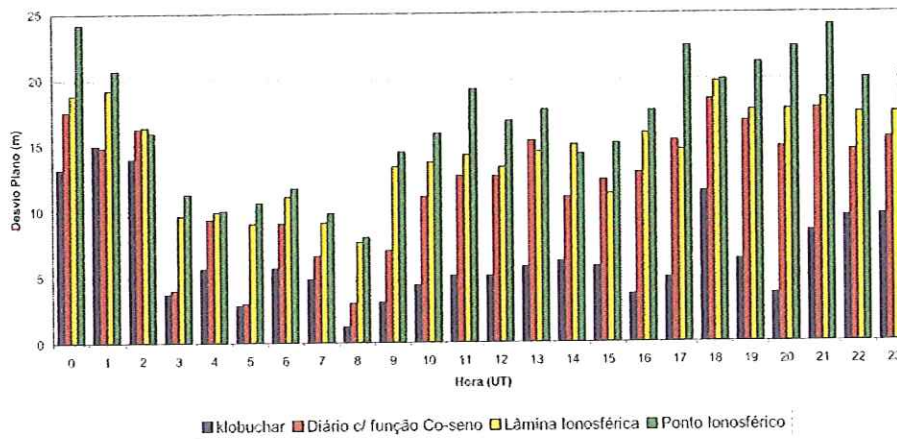


Figura 34 – Desvio plano para o Caso 3 (Estação PARA)

5.4.2 Desvio Espacial (Caso 3)

Estação Brasília - 18/05 (Média Atividade s/ eventos)

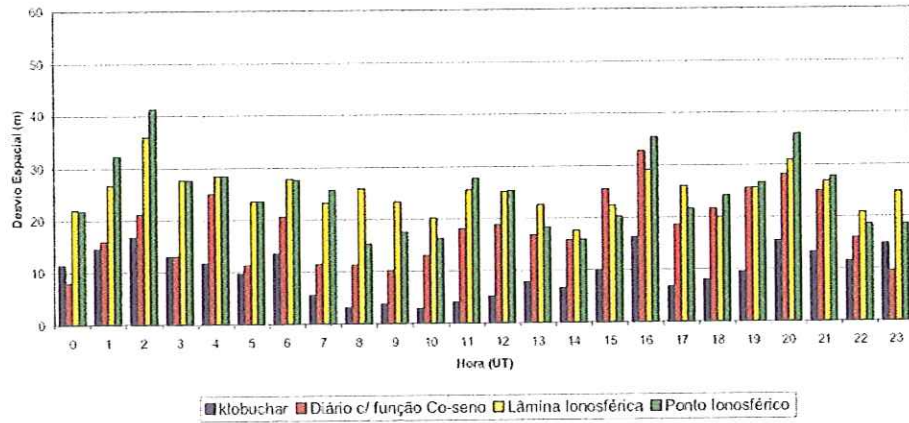


Figura 35 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 18/05 (Média Atividade s/ eventos)

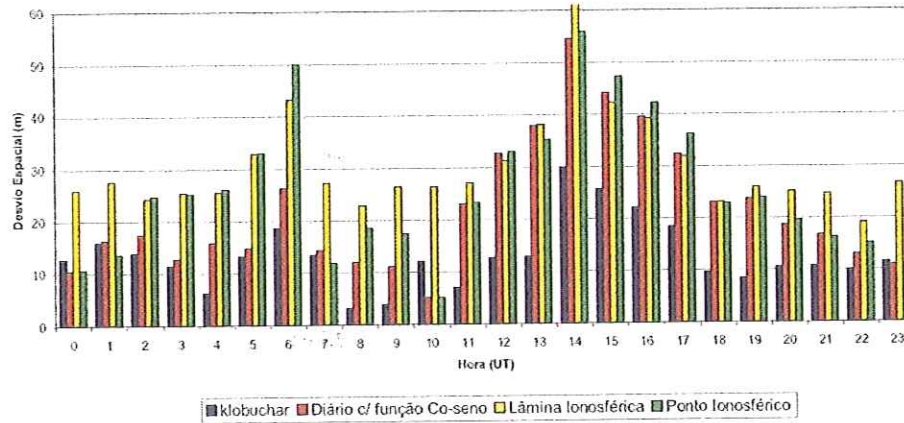


Figura 36 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação FORT)

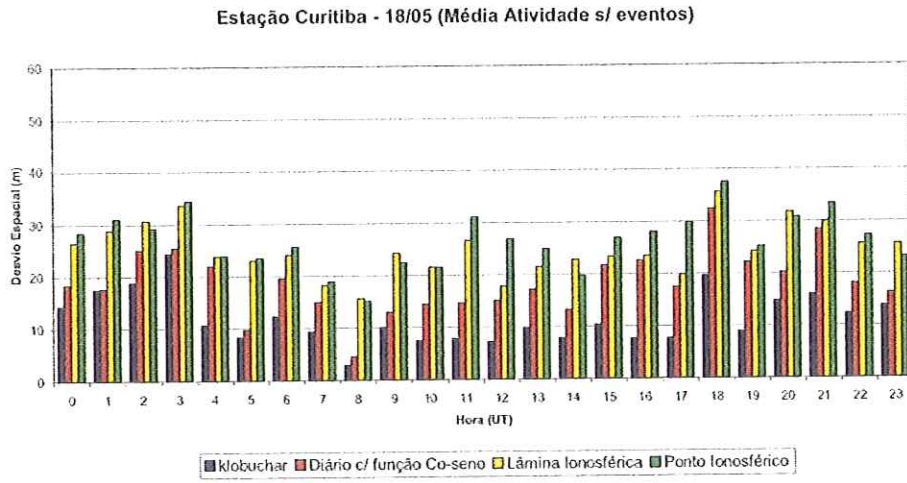


Figura 37 – Desvio espacial para o Caso 3 (Estação PARA)

5.5 Resultados do Caso 4

No caso 4 foi escolhido um dia com média atividade solar, com ocorrência de eventos de grande magnitude durante o período. O dia escolhido foi 15 de setembro de 2000. Na Figura 38 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

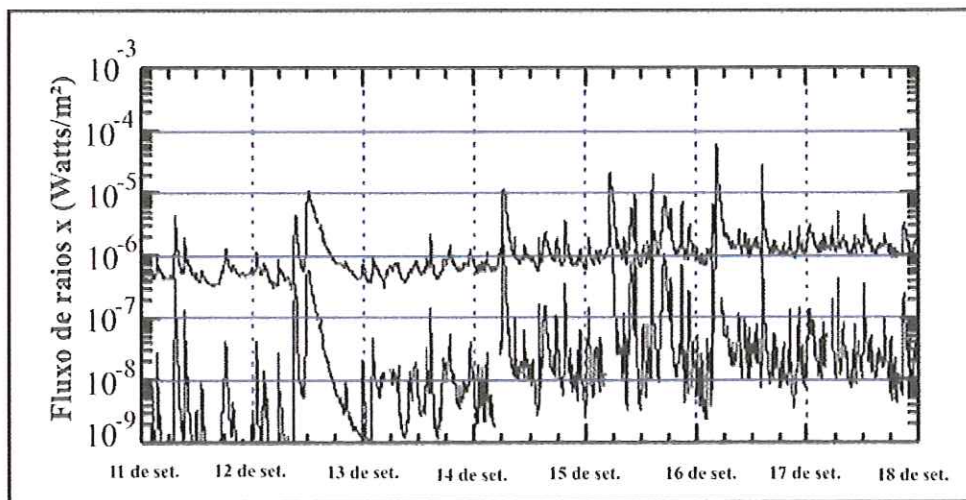


Figura 38 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 4

5.5.1 Desvio Plano (Caso 4)

Estação Brasília - 15/09 (Média Atividade c/ eventos)

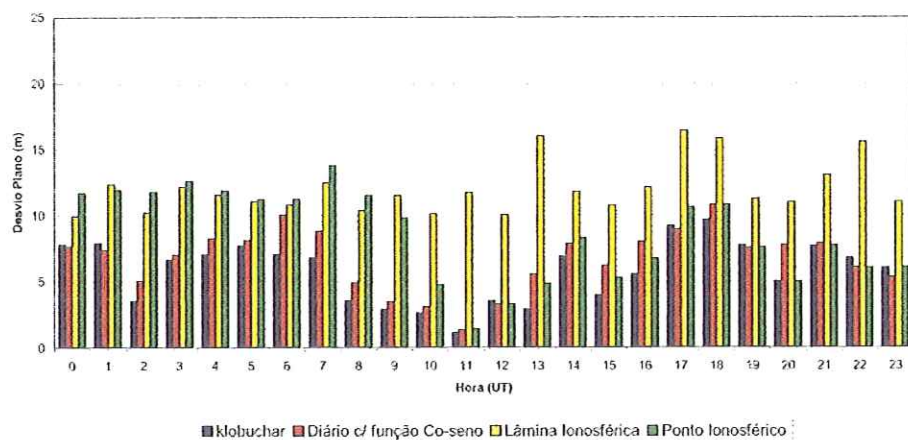


Figura 39 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação BRAZ)

Estação Fortaleza - 15/09 (Média Atividade c_f eventos)

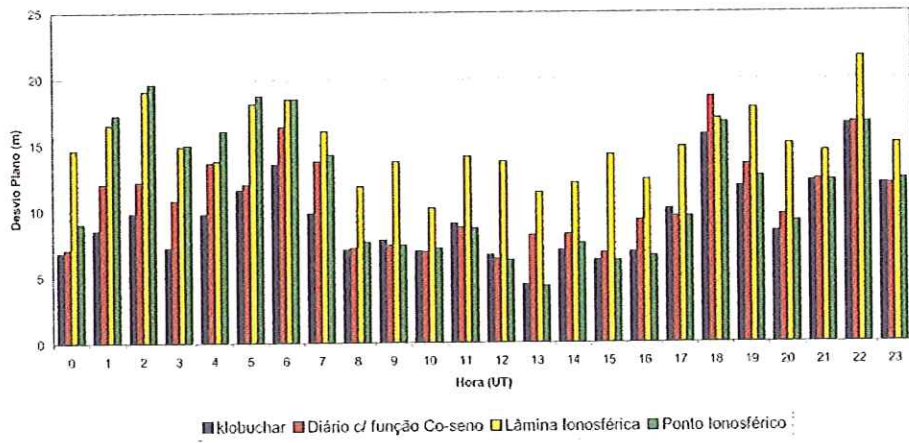


Figura 40 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação FORT)

Estação Curitiba - 15/09 (Média Atividade c_f eventos)

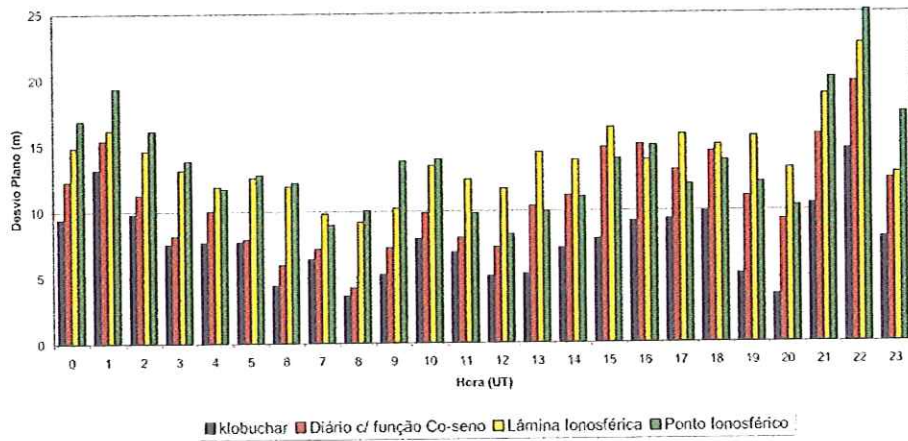


Figura 41 – Desvio plano para o Caso 4 (Estação PARA)

5.5.2 Desvio Espacial (Caso 4)

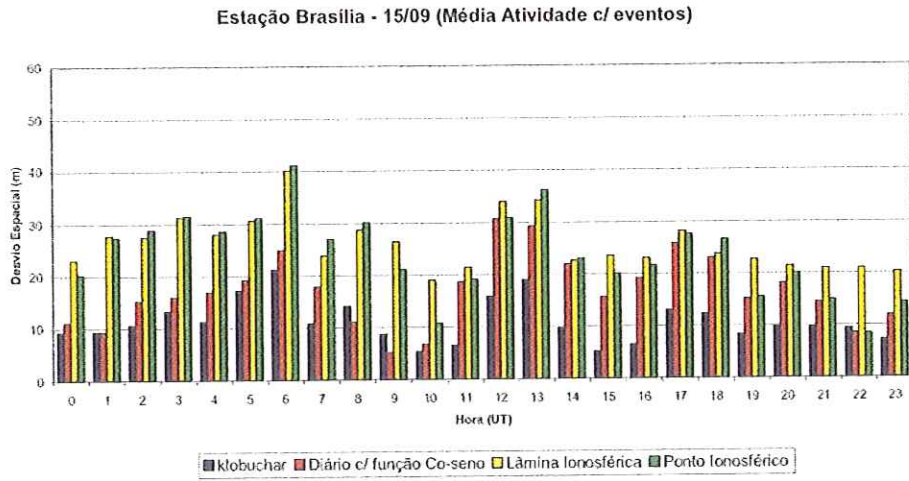


Figura 42 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação BRAZ)

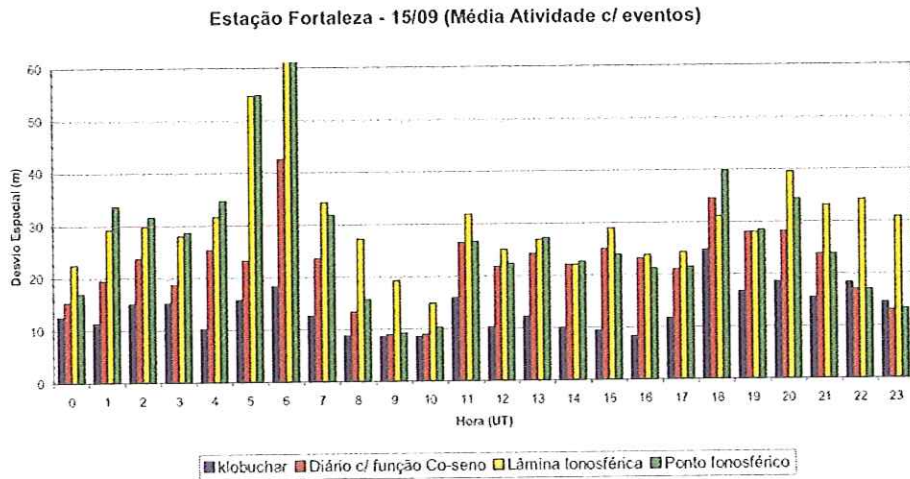


Figura 43 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação FORT)

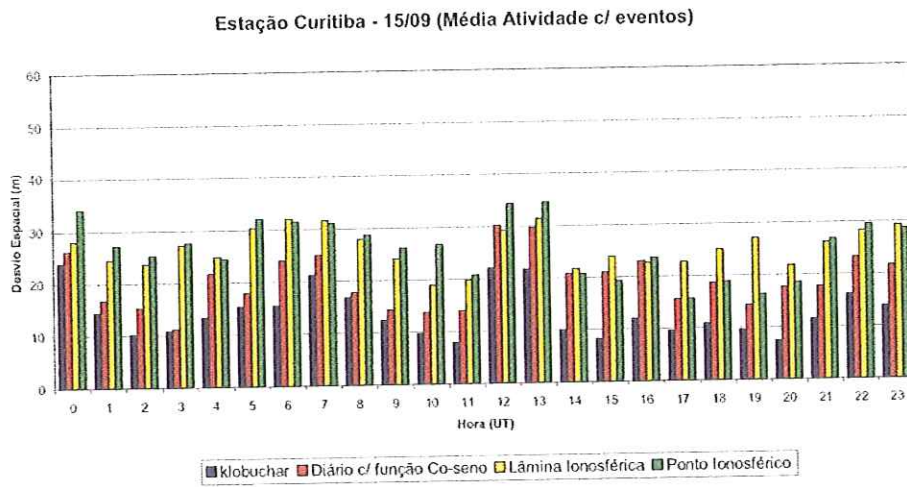


Figura 44 – Desvio espacial para o Caso 4 (Estação PARA)

5.6 Resultados do Caso 5

No caso 5 foi escolhido um dia com alta atividade solar, sem ocorrência de eventos de grande magnitude nos dias anteriores. O dia escolhido foi 24 de novembro de 2000. Na Figura 45 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

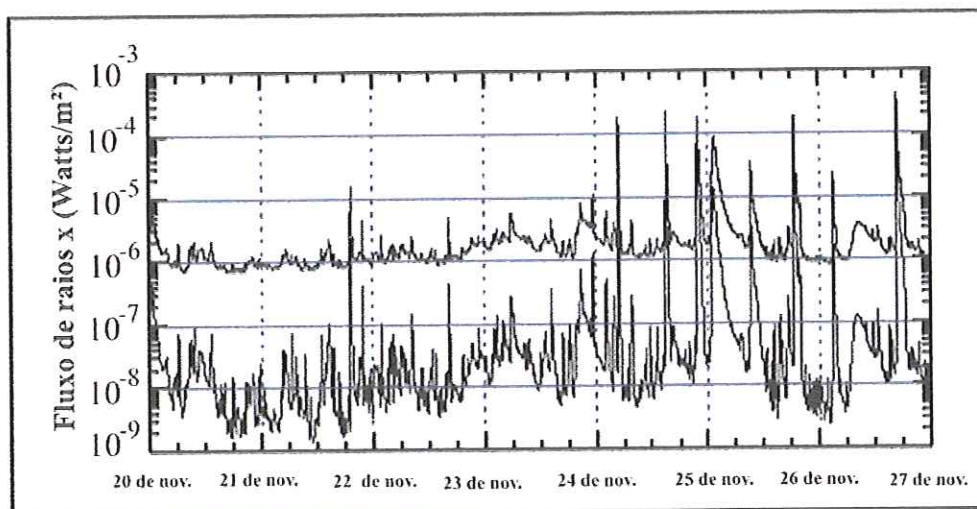


Figura 45 – Gráfico de emissão de raios X para o Caso 5

5.6.1 Desvio Plano (Caso 5)

Estação Brasília - 24/11 (Alta Atividade s/ eventos anteriores)

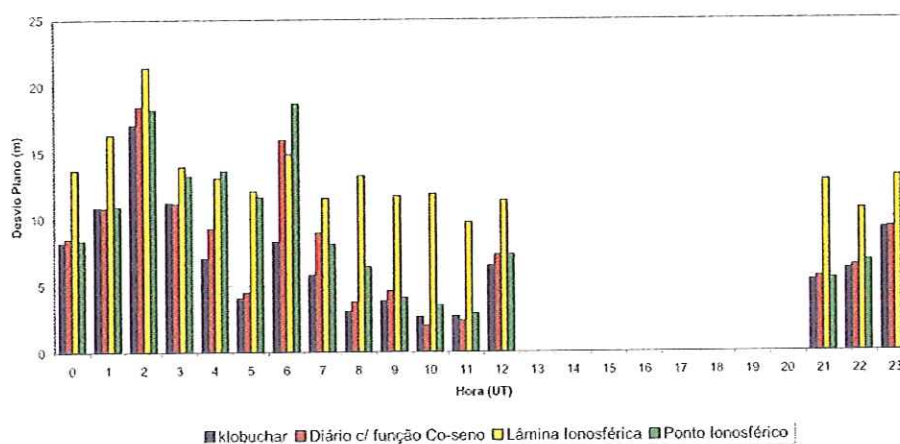


Figura 46 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação BRAZ)

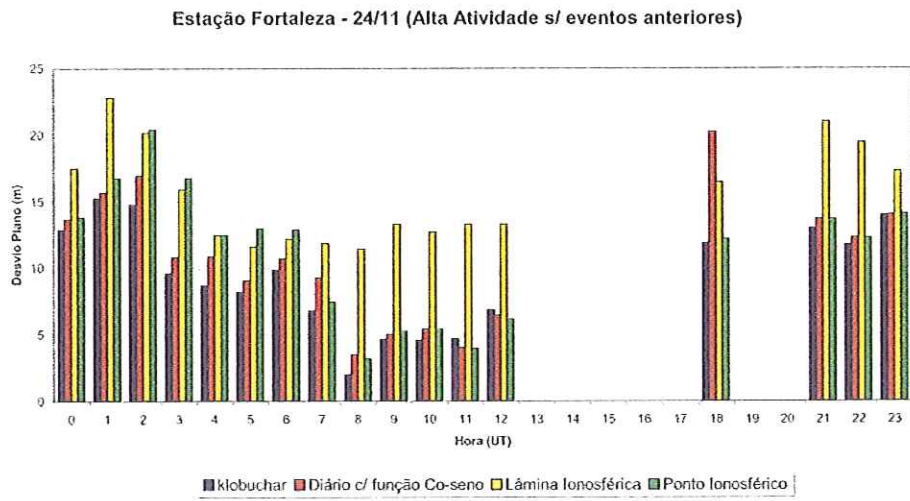


Figura 47 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação FORT)

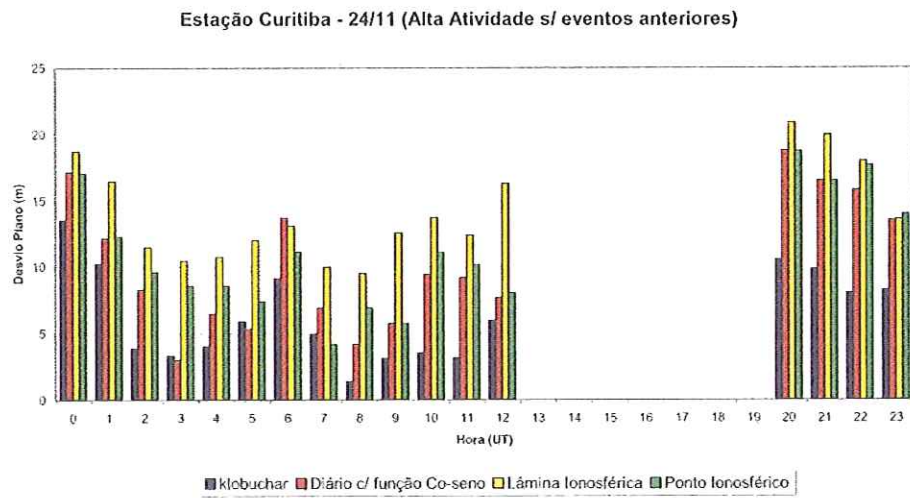


Figura 48 – Desvio plano para o Caso 5 (Estação PARA)

5.6.2 Desvio Espacial (Caso 5)

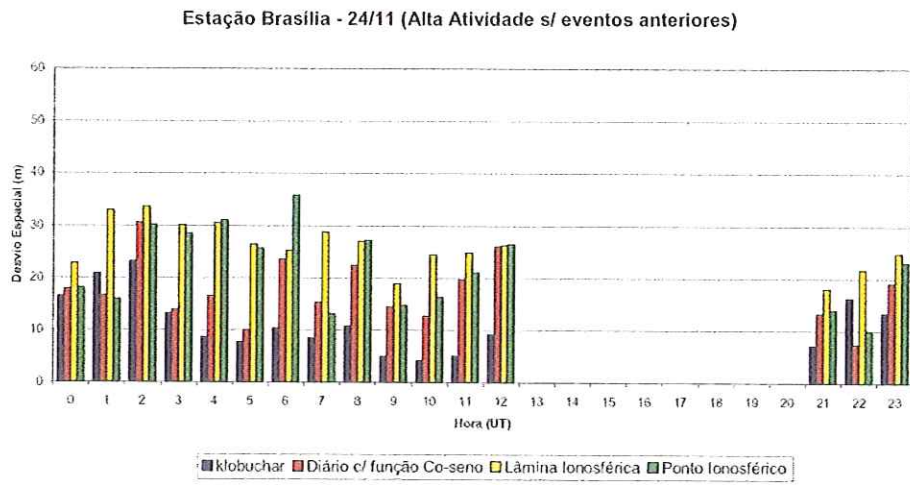


Figura 49 – Desvio espacial para o Caso 5 (estação BRAZ)

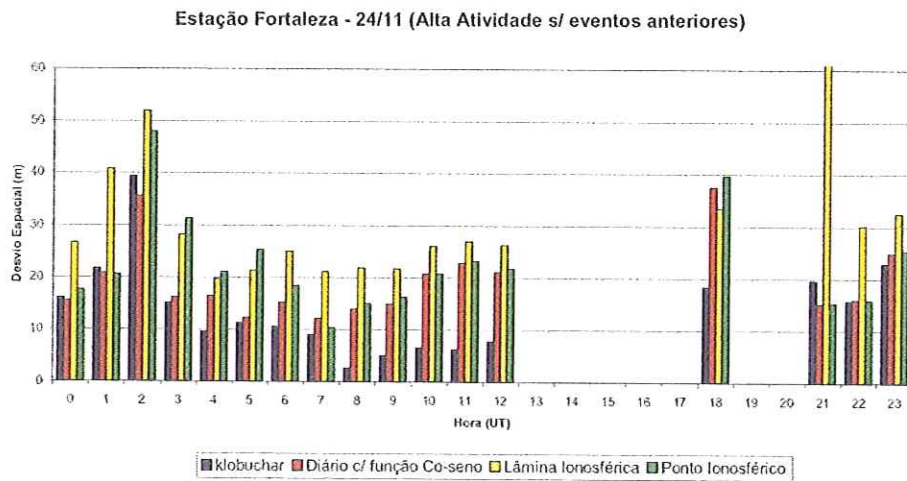


Figura 50 – Desvio espacial para o Caso 5 (Estação FORT)

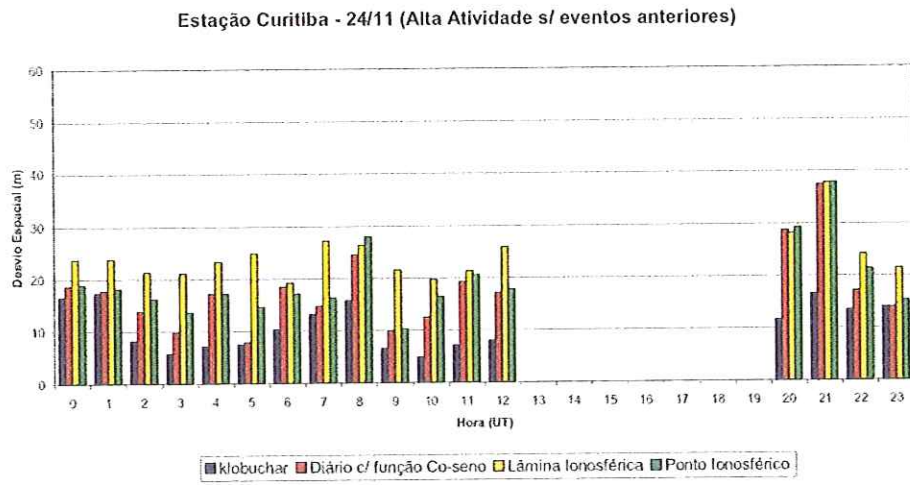


Figura 51 – Desvio espacial para o Caso 5 (Estação PARA)

5.7 Resultados do Caso 6

No caso 6 foi escolhido um dia com alta atividade solar, com ocorrência de eventos de grande magnitude nos dias anteriores. O dia escolhido foi 26 de novembro de 2000. Na Figura 52 está representado o gráfico de emissão de raios X para esta situação.

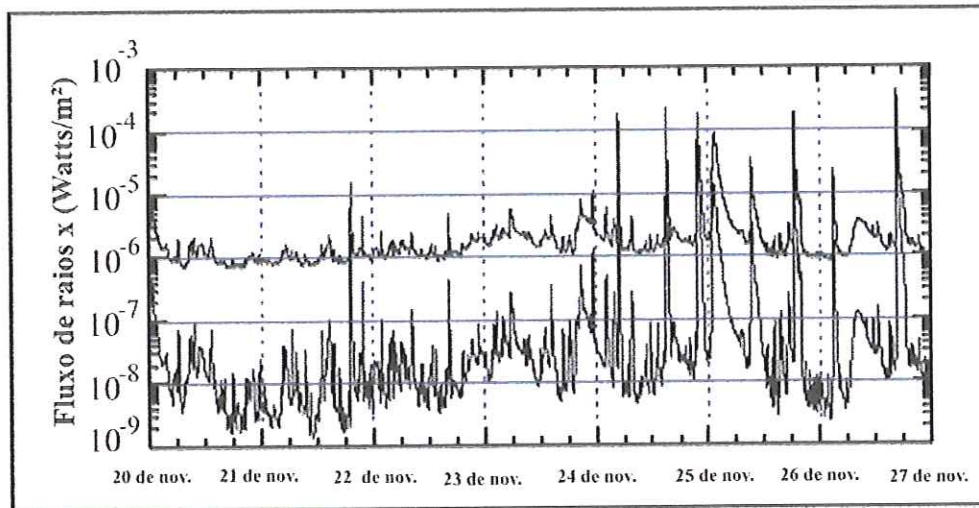


Figura 52 – Gráfico de emissão de raios x para o Caso 6

5.7.1 Desvio Plano (Caso 6)

Estação Brasília - 26/11 (Alta Atividade c/ eventos anteriores)

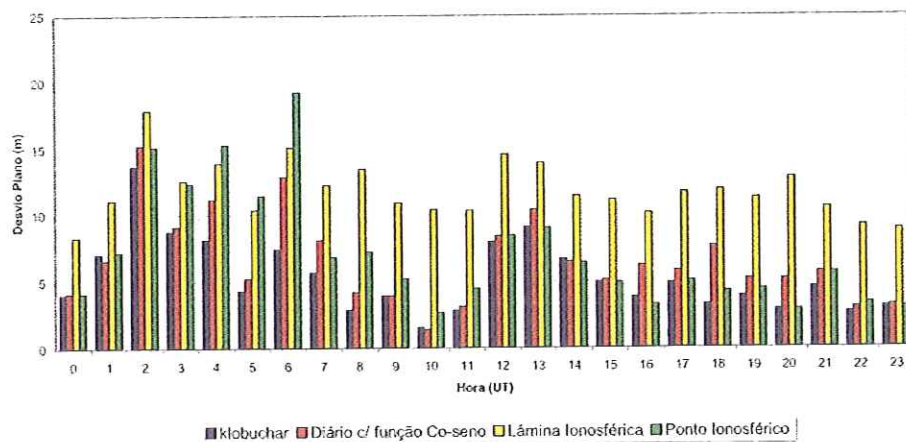


Figura 53 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação BRAZ)

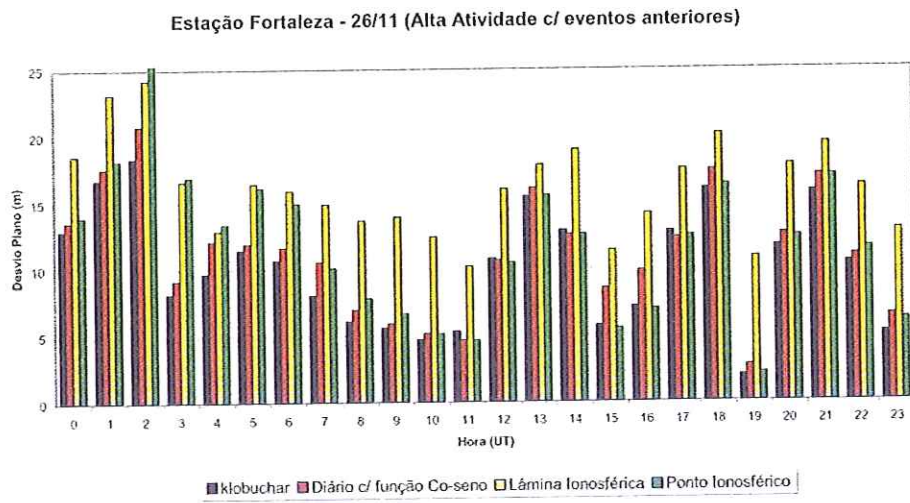


Figura 54 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação FORT)

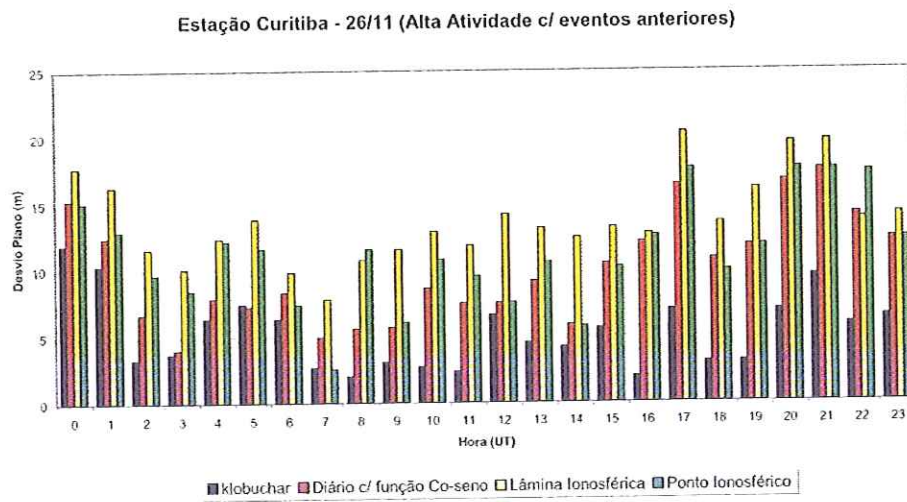


Figura 55 – Desvio plano para o Caso 6 (Estação PARA)

5.7.2 Desvio Espacial (Caso 6)

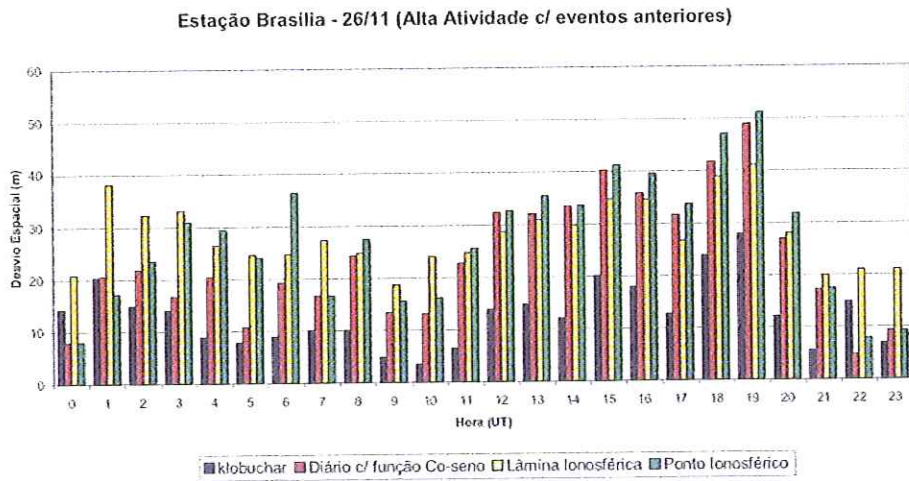


Figura 56 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação BRAZ)

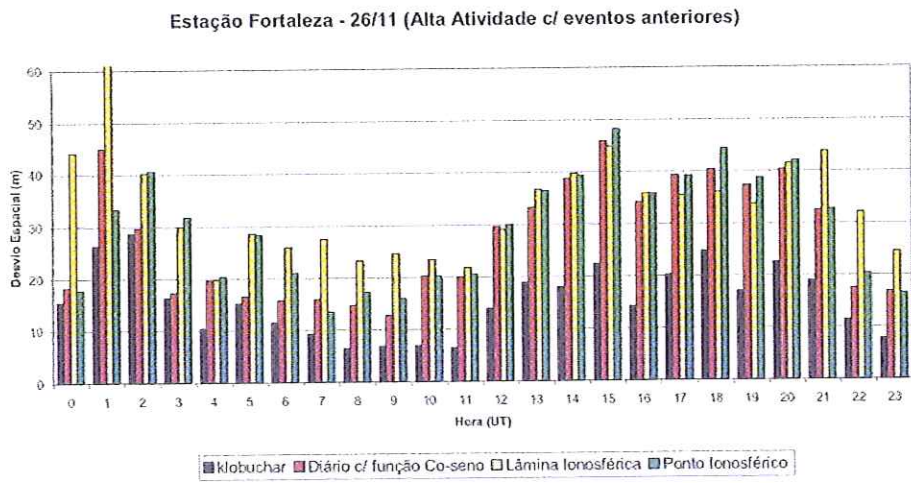


Figura 57 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação FORT)

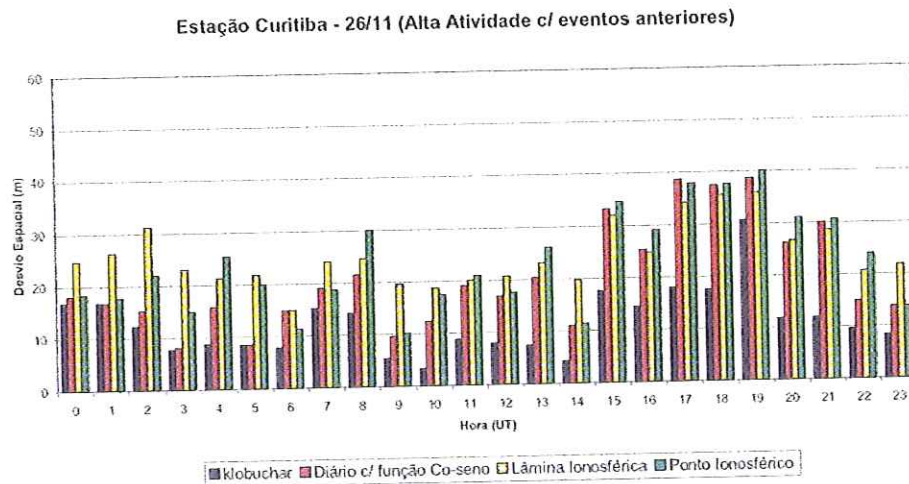


Figura 58 – Desvio espacial para o Caso 6 (Estação PARA)

5.8 Análises

Levando em consideração o desempenho de cada modelo em função da atividade solar, foi possível constatar que não houve disparidades sistemáticas nos resultados, com exceção do caso 5, em que por um período de 8 horas (das 16 h às 23 h UT) não foi possível calcular a posição do ponto devido a um grande ruído no sinal coletado por todas as estações analisadas. No gráfico da Figura 59 estão representados os resultados do modelo de Klobuchar na Estação BRAZ, para os seis casos. Este comportamento é de certa forma similar aos demais modelos e demais estações, guardadas as diferenças de magnitude.

Em relação ao horário do dia, pode-se perceber um aumento nos desvios a partir de 15 h a 16 h UT com máximo por volta das 18 h a 20 h UT. Outro ponto de máximo ocorre por volta de 0 h a 3 h UT. O ponto de mínimo se encontra em torno de 8 h a 11 h UT.

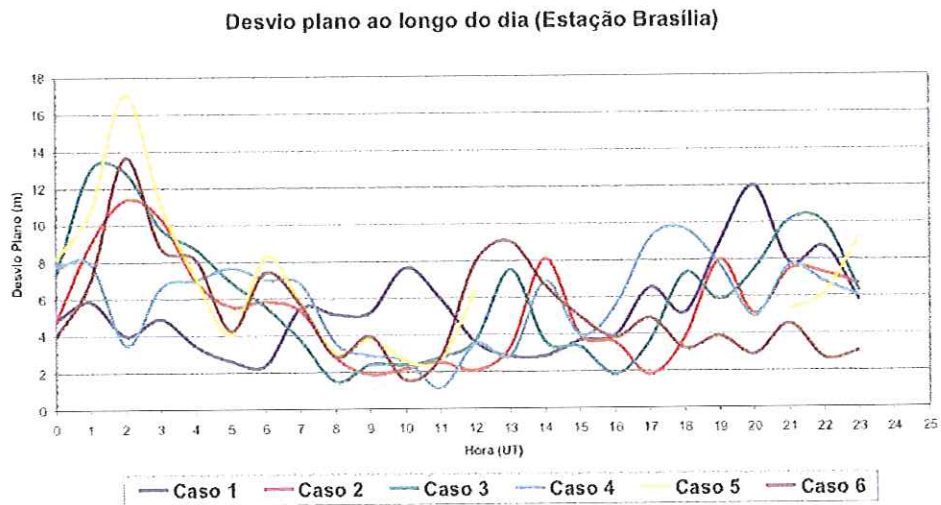


Figura 59 – Resultados do modelo de Klobuchar na estação BRAZ para os seis casos

Cada um dos modelos analisados apresentou desvios dentro de uma determinada faixa, independente da atividade solar. Os valores médios obtidos (médias diárias das três estações) para cada um deles no plano e no espaço estão representados na Tabela 2. Estas médias foram obtidas utilizando as médias diárias de cada modelo para todos os casos.

Desvio Plano (m)	
Modelo de Klobuchar	$6,9 \pm 0,5$
Modelo Diário com função Co-seno	$9,0 \pm 0,6$
Modelo da Lâmina Ionosférica	$14,6 \pm 0,4$
Modelo do Ponto Ionosférico	$10,9 \pm 0,6$
Desvio Espacial (m)	
Modelo de Klobuchar	$12,1 \pm 1,0$
Modelo Diário com função Co-seno	$19,0 \pm 2,5$
Modelo da Lâmina Ionosférica	$27,3 \pm 0,9$
Modelo do Ponto Ionosférico	$24,5 \pm 2,1$

Tabela 2 – Desvio médio para cada um dos modelos analisados

Analisando os desvios em relação às estações, constatou-se que as estações BRAZ e PARA apresentaram desvios dentro da mesma faixa, enquanto

que a estação FORT apresentou desvios um pouco maiores. Estas diferenças estão na faixa de $2,8 \text{ m} \pm 1,0 \text{ m}$ para posição plana e de $2,0 \text{ m} \pm 1,0 \text{ m}$ para posição espacial.

6 Conclusões e Recomendações

Com este trabalho foi possível concluir que, para posicionamento por ponto simples utilizando código, todos os modelos analisados se comportaram de maneira uniforme em relação às condições de atividade solar. Foi constatado, de acordo com os gráficos com resultados de processamento, que exceto no dia 24 de novembro de 2000 (classificado com um dia de alta atividade solar), não houve uma diferença significativa entre os resultados de dias com atividade solar com diferentes magnitudes.

Nos processamentos do dia 24 de novembro de 2000 (Caso 5) houve um período de tempo em que não foi possível calcular posição de nenhuma das estações, que ocorreu entre 16 h e 23 h UT. Apesar deste dia ser classificado como um dia de alta atividade sem eventos nos dias anteriores, houve grandes picos de atividade solar, o que provavelmente causou uma grande distorção na observável pseudodistância, impossibilitando o cálculo da posição.

Ao longo do dia foram constatados dois períodos críticos, por volta de 18 h a 20 h UT e de 0 h a 3 h UT. O período que apresentou menores desvios ocorreu sempre por volta de 8 h a 11 h UT.

A estação FORT apresentou sistematicamente resultados piores que as demais. Este fato pode ter ocorrido por diversos motivos: devido à localização numa região de baixa latitude geomagnética (fazendo com que esta estação esteja sujeita ao efeito dos jatos de elétrons), devido a ruídos eletrônicos locais que existem na região, e/ou devido à qualidade do receptor, que é mais antigo que os das demais estações.

O modelo de Klobuchar se mostrou melhor que os demais em praticamente todas as situações, com raríssimas exceções, apresentando desvios médios de

aproximadamente 6,9 m e 12,1 m para posição horizontal e espacial, respectivamente. O modelo Diário com função Co-seno apresentou erros pouco maiores que o de Klobuchar, com desvios médios de aproximadamente 9,0 m e 19,0 m para posição horizontal e espacial, respectivamente. O modelo do Ponto Ionosférico teve um desempenho próximo ao modelo Diário com função Co-seno para posição plana, porém para posição espacial resultou em erros maiores que o mesmo, com desvios médios de aproximadamente 10,9 m e 24,5 m para posição plana e espacial, respectivamente. O modelo da Lâmina Ionosférica apresentou desvios médios de aproximadamente 14,6 m e 27,3 m para posição plana e espacial, respectivamente. No caso de uma escolha entre estes modelos, a partir dos resultados aqui obtidos, indica-se o Modelo de Klobuchar.

Em trabalhos futuros seria interessante que fossem feitas novas análises, como:

- Análises similares a esta, porém utilizando posicionamento absoluto e relativo (bases longas) utilizando fase da portadora;
- Comparação do modelo de Klobuchar com outros modelos existentes, inclusive modelos regionais de ionosfera.

7 Referências Bibliográficas

- BAUERSIMA, I. (1983). NAVSTAR/Global Positioning System (GPS) II. Radiointerferométrische Satellitenbeobachtungen. Mitteilungen der Satelliten-Beobachtungsstation Zimmerwald. Bern, vol X.
- BRUNNER, F.K.; WELSCH, W.M. (1993). Effects of Troposphere on GPS Measurements. GPS WORLD, p 42-44, January.
- CAMARGO, P.O. (1999). Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Freqüência. Tese – Universidade Federal do Paraná.
- CAMARGO, P.; MONICO, J.F.; FERREIRA, L.D. (2000). Influência da ionosfera no posicionamento por ponto com GPS. Cobrac 2000, Florianópolis, Anais.
- DALY, P.; MISRA, P.N. (1995). GPS and Global Navigation Satellite System (GLONASS). Global Positioning System: Theory and Applications, v II. Parkinson and Spilker, Eds./Axelrad and ENGE, Assoc. Eds.
- ELGERED, G.; JOHANSON, J.; RÖNNÄNG, B. (1985). Methods to correct for the tropospheric delay in satellite-earth range measurements. Proceedings of the Second SATRAPE meeting, Saint-Mandé, França, November.
- HERRING, T.A. (1992). Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. Netherlands Geodetic Commission, Delft, new series, vol. XXXVI.
- HILLA, S. (1999). A more recent version of OMNI on the NGS anonymous ftp server.
- HOFFMANN-WELLENHOF, B. et. Al. (2001). Global Positioning System: Theory and Practice. Springer-Verlag Wien New York.

- HOPFIELD, H.S.(1976). Tropospheric range error parameters: further studies. Applies Physics Laboratory report CP015, Johns Hopkins University, Baltimore, Maryland.
- IERS CONVENTIONS (1996). IERS Technical Note 21. McCarthy, D. D. (Ed.) Observatoire de Paris, July, 95p.
- ISHIKAWA, M.; ITAME, O. (2000). Efeitos de multicaminhamento em levantamentos utilizando GPS aplicados ao cadastro técnico urbano. Cobrac 2000, Florianópolis, Anais.
- JANES, H.W.; LANGLEY, R.B.; WEWBY, S.P. (1989). A comparison of several models for the prediction of tropospheric propagation delay. Physical Science Laboratory. Apresentado ao Proceedings of the Fifth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. New Mexico, 1989.
- KLOBUCHAR, J.A. (1987). Ionospheric Time-Delay Corrections for Advanced Satellite Ranging System. AGARD Conference Proceedings – Propagation Limitations of Navigation and Positioning Systems.
- KLOBUCHAR, J.A. (1991). Ionospheric Effectes on GPS. Hancorn Air Force Base,Massachusetts.Global positioning System: Theory and Appications,Volume II.
- KLOBUCHAR, J.A. (1994). Ionospheric Effects on GPS-Global Psoitioning System. American Institute of Aeronautics and Astronautics. Washington D.C.
- LANGLEY, R. B. 1996. GPS Receivers and the Observables. Lecture Notes in Earth Sciences (60): GPS for Geodesy, A. Kleusberg and P. J. G. Teunissen (Eds.), Spring-Verlag, 141-173.
- LARocca, A.P.; SEGANTINE, P.C.L. (2000). Análise da influência de parâmetros de importância relevante no processamento de redes geodésicas com o Sistema de Posicionamento Global – GPS. Cobrac 2000, Florianópolis, Anais.
- LEICK, A.(1995). GPS Satellite Surveying. John Wiley & Sons, Inc. A Wiley-Interscience Publication. New York.
- MARINI, J.W. (1972). Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. Radio Science.
- MATSUOKA, M.; MONICO, J.F.; CAMARGO, P. (2000). Avaliação do posicionamento por ponto utilizando efemérides precisas e correções dos relógios dos satélites. Cobrac 2000. Florianópolis, 2000.

- MATSUOKA, M.; MACHADO, W.C.; CAMARGO, P.; MONICO, J.F. (2001). Análise do Posicionamento por Ponto após a Desativação da Técnica SA. XX Congresso Brasileiro de Cartografia. Porto Alegre, 2001.
- MONICO, J.F.G. (1995). High Precision GPS Inter-continental Networks, Nottingham,. Ph.D. Thesis, University of Nottingham.
- NEWBY, S.P.; LANGLEY, R.B. (1992). Three Alternative Empirical Ionospheric Model – are they better than GPS Broadcast model?. Proceedings of the Sixth International Geodetic Symposium on Satellite Positioning. Columbus, OH, USA.
- NIELL, A.E. (1996). Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths. Journal of Geophysical Research.
- OBSERVATÓRIO NACIONAL (1998). Efemérides Astronômicas 1998. Rio de Janeiro.
- OSORIO, I.M.T.V.P. (1992). O Sistema Global de Posicionamento na Orbitografia de Satélites de Baixa Altitude. Tese de Doutorado – Faculdade de Ciências – Universidade do Porto, Portugal.
- PICQUENARD, A. (1974). Propagação das Ondas Radioelétricas nos Meios Naturais. Rio de Janeiro.
- SANTOS, M.C. (2000). Efeitos e benefícios do fim da Disponibilidade Seletiva. Revista InfoGEO, Ano 3, nº 14.
- SEGANTINE, P.C.L. (1995). Estabelecimento e ajuste de uma rede geodésica no estado de São Paulo, com o Sistema de Posicionamento NAVSTAR/GPS. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- SEGANTINE, P.C.L. (2001). Estudo do Sinergismo entre os Sistemas de Informação Geográfica e o de Posicionamento Global. Tese de Livre Docência – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- SICKLE, J.V. (1996). GPS for Land Surveyors. ANN ARBOR PRESS, INC. Chelsea, Michigan.
- SILVA, C.A.U. (2000). Análise de precisão dos posicionamentos relativo e por ponto simples para bases curtas, com o Sistema NAVSTAR/GPS: estudo de caso em Belém – PA. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.

- WANNINGER, L. (1991). Effects of severe ionospheric conditions on GPS data processing. IAG Symposium G-2, IUGG XX General Assembly, 16 Agosto.
- WEBSTER, I. (1993). A Regional Model for Prediction of Ionospheric Delay for Single Frequency Users of the Global Positioning System. M.Cs.E Thesis – Department of Surveying Engineering, University of New Brunswick. New Brunswick.
- WITCHAYANGKOON, B. (2000). Elements of GPS Precise Point Positioning. Ph. D. Thesis - University of Maine