

JULIERME WAGNER DA PENHA

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEC NO TERRITÓRIO
BRASILEIRO UTILIZANDO DADOS DO IGS NO
PERÍODO DE 2004 A 2008**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T	
P399a	Penha, Julierme Wagner da - Avaliação da variação do TEC no território brasileiro utilizando dados do IGS no período de 2004 a 2008. / Julierme Wagner da Penha. – Viçosa, MG, 2009.
2009	xii, 110f. : il.(algumas col.); 29cm. Inclui anexo, apêndice e CD-ROM. Orientador: Antônio Simões Silva. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa. Referências bibliográficas: f. 92-95. 1. Geodésia. 2. Ionosfera. 3. Sistema de Posicionamento Global. I. Universidade Federal de Viçosa. II.Título. CDD 22.ed. 526.1

JULIERME WAGNER DA PENHA

**AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO DO TEC NO TERRITÓRIO
BRASILEIRO UTILIZANDO DADOS DO IGS NO
PERÍODO DE 2004 A 2008**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

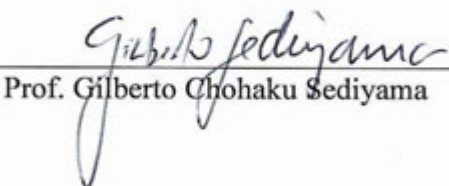
APROVADA: 07 de agosto de 2009.



Prof. Dalto Domingos Rodrigues
(Coorientador)



Prof. Moisés Ferreira Costa



Prof. Gilberto Chohaku Sedyama



Prof. Edvaldo Simões da Fonseca Jr.



Prof. Antônio Simões Silva
(Orientador)

“Quanto mais acredito na ciência, mais acredito em Deus. O universo é inexplicável sem Deus.”

(Albert Einstein)

Aos meus avós **Diva e Genin**
A minha mãe **Maria Auxiliadora**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais este desafio em minha vida.

À família, pelo incentivo, apoio e dedicação.

À Universidade Federal de Viçosa, através do Departamento de Engenharia Civil, pela oportunidade de realização do mestrado.

Ao Professor Orientador Antônio Simões Silva, pela orientação, dedicação ao estudo, incentivo, profissionalismo ético e amizade.

Aos Professores Coorientadores Dalto Domingos Rodrigues, Carlos Antônio Oliveira Vieira, pelas contribuições acadêmicas e ensinamentos.

Ao professor Coorientador Marcelo Tomio Matsuoka, pela grande ajuda nessa dissertação, pela orientação, dedicação, incentivo e amizade.

Aos professores do Setor de Engenharia de Agrimensura, pelos ensinamentos.

Aos colegas e irmãos de república e do alojamento 2032, em especial Marcus Vinícius “Barbonildo” e Eduardo (Baiano) “Dudas”, pela convivência agradável.

A minha namorada Lidiana “Lid” pelo incentivo e momentos felizes.

Aos grandes amigos da graduação do Curso de Engenharia de Agrimensura que fiz nesta Instituição.

Aos parentes e amigos de Nova Venécia – ES e Manhuaçu – MG, pelo incentivo e apoio durante esta jornada.

Aos colegas de estudo da Pós-graduação em Informações Espaciais, pelo companheirismo e discussões sobre diversos assuntos.

À CAPES, agência financiadora da bolsa de mestrado durante o desenvolvimento da dissertação.

Ao IBGE, pelo fornecimento dos dados da estação VICO da RBMC.

Ao IGS, pelo fornecimento dos dados do VTEC (arquivos IONEX).

Ao NRCAN, pela disponibilidade do *software on-line* (CSRS-PPP) e sua documentação.

Aos professores da banca examinadora pelas críticas e sugestões.

Enfim, agradeço a todas as pessoas e instituições que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho.

BIOGRAFIA

JULIERME WAGNER DA PENHA, filho de Elias Boldt e Maria Auxiliadora Pinto da Penha.

Em abril de 2001, ingressou no Curso de Engenharia de Agrimensura na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, concluindo a graduação em outubro de 2006.

Em março de 2007, ingressou na pós-graduação através do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil – Área de Concentração em Informações Espaciais e Linha de Pesquisa Geodésia Aplicada, em nível de mestrado, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em 07 de agosto de 2009.

SUMÁRIO

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	x
RESUMO	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	5
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Estruturação da dissertação	6
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	7
2.1 Estrutura e Subdivisão da Atmosfera Terrestre	7
2.2 Efeitos da Ionosfera no GPS.....	10
2.3 Erro devido à Ionosfera nos Sinais GPS.....	13
2.4 Cintilação ionosférica	20
2.5 Regiões geográficas da ionosfera	22
2.6 Determinação do TEC utilizando as observáveis GPS.....	23
2.7 Determinação do TEC utilizando as pseudodistâncias	24
2.8 Determinação do TEC a partir de Medidas da Fase da Portadora	24
2.9 Ciclos solares.....	25
2.10 Campo geomagnético	26
2.11 Índices geomagnéticos.....	28
2.12 Dados globais da ionosfera calculados pelo IGS - arquivos IONEX	29
3. METODOLOGIA.....	32
3.1 Primeiro Experimento - Mapas horários médios mensais de VTEC	32
3.2 Segundo Experimento - Posicionamento por ponto preciso da estação VICO.....	37
3.3 Local de estudo.....	43
4. RESULTADOS E ANÁLISES	44
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
APÊNDICE 1.....	96
APÊNDICE 2.....	97
APÊNDICE 3.....	98
APÊNDICE 4.....	106
APÊNDICE 5.....	107
ANEXO 1	110

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AE	<i>Auroral Electrojet</i>
C/A	<i>Course / Acquisition</i>
CODE	<i>Centre for Orbit/ Determination in Europe</i>
Dst	<i>Disturbance Storm-Time</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSD	<i>Geodetic Survey Division</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HL	Hora Local
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IGS	<i>International GNSS Service</i>
IERS	<i>International Earth Rotation and Reference Systems Service</i>
IONEX	<i>IONosphere map EXchange format</i>
ITRF	<i>International Terrestrial Reference Frame</i>
JPL	<i>Jet Propulsion Laboratory</i>
Kp	<i>Planetarische Kennziffer – Índice Planetário</i>
L1	Portadora GPS em 1575,42 MHz
L2	Portadora GPS em 1227,60 MHz
L5	Portadora GPS em 1176,45 MHz
LF	<i>Low Frequency</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
NRCan	<i>Natural Resources Canada</i>
PPP	Posicionamento por Ponto Preciso
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	<i>Receiver INdependent EXchange format</i>
SA	<i>Selective Availability</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

TEC	<i>Total Electron Content</i>
TECU	<i>Total Electron Content Unit</i>
TU	Tempo Universal
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UPC	<i>Universitat Politècnica de Catalunya</i>
VICO	Estação pertencente a RBMC localizada em Viçosa-MG
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VTEC	<i>Vertical TEC</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da ionosfera.....	9
Figura 2. Perfis da densidade de elétrons durante o dia e a noite.	10
Figura 3. Geometria para o atraso do caminho ionosférico.	16
Figura 4. Ângulo z x z'	17
Figura 5. Pontos ionosféricos obtidos de observações GPS de 4 estações da RBMC referente a 29 de outubro de 2003.	18
Figura 6. Índice de refração em função da altitude para a ionosfera e troposfera.	20
Figura 7. Bolhas ionosféricas.....	22
Figura 8. Regiões geográficas da ionosfera.	22
Figura 9. Número de manchas solares e ciclos solares.....	25
Figura 10. Número de manchas solares – Ciclos 23 e 24.	26
Figura 11. Equador geomagnético em 1957 e 2000.....	27
Figura 12. Equador geomagnético e posição do pólo magnético norte em 2005.	27
Figura 13. Estações da rede IGS.	30
Figura 14. Malha interpolada de 1° x 1° do território brasileiro (krigagem).....	30
Figura 15. Disposição dos mapas nos resultados.....	36
Figura 16. Mapa de localização da área em estudo.....	43
Figura 17. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (janeiro/2004).	44
Figura 18. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (fevereiro/2004).	45
Figura 19. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (março/2004).....	46
Figura 20. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (abril/2004).	47
Figura 21. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (maio/2004).....	48
Figura 22. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (junho/2004).	49
Figura 23. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (julho/2004).	50
Figura 24. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (agosto/2004).	51
Figura 25. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (setembro/2004).....	52
Figura 26. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (outubro/2004).	53
Figura 27. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (novembro/2004).	54
Figura 28. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (dezembro/2004).....	55
Figura 29. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (janeiro/2008).	56
Figura 30. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (fevereiro/2008).	57
Figura 31. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (março/2008).....	58
Figura 32. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (abril/2008).	59
Figura 33. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (maio/2008).....	60
Figura 34. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (junho/2008).	61
Figura 35. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (julho/2008).	62
Figura 36. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (agosto/2008).	63
Figura 37. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (setembro/2008).....	64
Figura 38. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (outubro/2008).	65
Figura 39. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (novembro/2008).	66
Figura 40. Mapas médios mensais do VTEC para o Brasil (dezembro/2008).....	67
Figura 41. Valores médios diários do VTEC para Viçosa, Porto Alegre e Macapá (janeiro/2004, abril/2004, janeiro/2008 e abril/2008).	69

Figura 42. Valores médios diários do VTEC para Viçosa, Porto Alegre e Macapá (julho/2004, outubro/2004, julho /2008 e outubro/2008).....	70
Figura 43. Mapas de diferenças do VTEC entre os meses de abril/2004 e abril/2008.	71
Figura 44. Mapas indicadores de VTEC de abril/2004 (8 TU).....	73
Figura 45. Mapas indicadores de VTEC de abril/2004 (20 TU).....	74
Figura 46. Mapas indicadores de VTEC de abril/2008 (8 TU).....	75
Figura 47. Mapas indicadores de VTEC de abril/2008 (20 TU).....	76
Figura 48. Gráfico de dispersão de VTEC entre abril/2004 e abril/2008 (8 TU).	77
Figura 49. Gráfico de dispersão de VTEC entre abril/2004 e abril/2008 (20 TU). ...	77
Figura 50. Discrepâncias das coordenadas X, Y e Z da estação VICO - 2004.....	79
Figura 51. Resultante das discrepâncias da estação VICO - 2004.....	81
Figura 52. Desvio padrão das coordenadas X, Y e Z da estação VICO - 2004.	83
Figura 53. Discrepâncias das coordenadas X, Y e Z da estação VICO - 2008.....	85
Figura 54. Resultante das discrepâncias da estação VICO - 2008.....	87
Figura 55. Desvio padrão das coordenadas X, Y e Z da estação VICO - 2008.	89

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1. Possíveis divisões da atmosfera terrestre.....	7
Tabela 1. Bandas de frequências.....	8
Tabela 2. Características das principais camadas da ionosfera.....	8
Tabela 3. Efeito do atraso de propagação, devido à ionosfera sobre as distâncias observadas na vertical com uma frequência.....	19
Tabela 4. Erros residuais para combinações lineares entre duas frequências.....	19
Tabela 5. Efeito sistemático máximo devido à ionosfera na direção vertical.....	19
Tabela 6. Relação entre o índice geomagnético Kp e ap.....	28
Tabela 7. Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap.....	29
Tabela 8. Classificação de uma tempestade geomagnética.....	29
Tabela 9. Cabeçalho do arquivo IONEX referente ao final combinado (IGSG).....	33
Tabela 10. Dados do VTEC do arquivo IONEX (IGSG).....	33
Tabela 11. Dados da latitude, longitude e VTEC obtidos pela rotina.....	34
Tabela 12. Relação dos 6 (seis) menores índices Ap de cada mês em 2004.....	35
Tabela 13. Relação dos 6 (seis) menores índices Ap de cada mês em 2008.....	35
Tabela 14. Arquivo de observação RINEX original da estação VICO-RBMC (IBGE).	38
Tabela 15. Arquivo de observação GPS da estação VICO-RBMC (IBGE).....	39
Tabela 16. Arquivo de observação GPS (L1 e C1) da estação VICO.....	40
Tabela 17. Tipos de efemérides precisas fornecidas pelo IGS.....	41
Tabela 18. Parâmetros de transformação e suas taxas do ITRF2005 para o IRTF2000.	42
Tabela 19. Análise estatística de abril/2004 (8 TU).....	73
Tabela 20. Análise estatística de abril/2004 (20 TU).....	74
Tabela 21. Análise estatística de abril/2008 (8 TU).....	75
Tabela 22. Análise estatística de abril/2008 (20 TU).....	76

RESUMO

PENHA, Julierme Wagner da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2009. **Avaliação da variação do TEC no território brasileiro utilizando dados do IGS no período de 2004 a 2008.** Orientador: Antônio Simões Silva. Coorientadores: Dalto Domingos Rodrigues, Carlos Antônio Oliveira Vieira e Marcelo Tomio Matsuoka.

A principal fonte de erro na posição do usuário do sistema GPS (*Global Positioning System*), utilizando receptores de uma frequência, é o efeito causado pela ionosfera no sinal transmitido pelos satélites. Este erro é diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC – *Total Electron Content*) presentes na ionosfera e inversamente proporcional ao quadrado da frequência do sinal transmitido. O TEC varia no tempo e no espaço com relação a hora (variação diária), a época do ano (variação sazonal), a localização geográfica, ao ciclo de manchas solares (variação de longo período). Neste trabalho foi estudado e avaliado a variação do TEC para os anos de 2004 a 2008, abrangendo o território brasileiro, através de mapas do VTEC (TEC na direção vertical) utilizando dados do modelo global da ionosfera (arquivos IONEX – *Ionosphere Map Exchange Format*) do IGS (*International GNSS Service*), analisando a fase de declínio do ciclo de manchas 23 e início do ciclo 24. Também foi avaliado o processamento do posicionamento por ponto preciso, utilizando *software* PPP-online fornecido pelo GSD (*Geodetic Survey Canada*) do NRCan (*Natural Resource Canada*), denominado CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Precise*) para os anos de 2004 e 2008, corrigindo o efeito da ionosfera pelo IONEX. Estes experimentos constatam uma redução no valor do VTEC no ano de 2008 em relação ao ano de 2004, devido a menor atividade solar no ano de 2008 em comparação à 2004, conseqüentemente, uma menor quantidade de elétrons presentes na ionosfera, melhorando a performance do posicionamento com GPS, com o declínio no número de manchas solares.

ABSTRACT

PENHA, Julierme Wagner da, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2009.
Evaluation of the TEC variation in Brazilian territory using data from the IGS in the period 2004 to 2008. Adviser: Antônio Simões Silva. Co-Advisers: Dalto Domingos Rodrigues, Carlos Antônio Oliveira Vieira and Marcelo Tomio Matsuoka.

The main source of error in the position of the user of GPS (Global Positioning System) receivers, using a frequency is the effect caused by the ionosphere on the signal transmitted by satellites. This error is directly proportional to the total electron content (TEC - Total Electron Content) in the ionosphere and inversely proportional to the square of the frequency of the transmitted signal. The TEC varies in time and space with respect to time (daily variation), the time of year (seasonal variation), geographical location, the cycle of sunspots (range, long period). In this work was studied and evaluated the variation of the TEC and, therefore, the error due to the ionosphere in the GPS observable for the years 2004 to 2008, covering the Brazilian territory, using maps of VTEC (TEC in vertical direction) using the data model global ionosphere (files IONEX - Ionosphere Map Exchange Format) from IGS (International GNSS Service) assessing the stage of the cycle of decline of 23 spots and start the cycle 24. It was also assessed the processing of precise point positioning using PPP on-line software provided by the GSD (Geodetic Survey Canada) of NRCan (Natural Resource Canada), known as CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System – Precise Point Precise) for the years 2004 and 2008, correcting the effect of the ionosphere by IONEX. These experiments show a reduction in the value of the VTEC during 2008 in respect to the year 2004, due to lower solar activity in the year 2008 compared to 2004, consequently, a smaller amount of electrons in the ionosphere, improving the performance of the positioning with GPS, with this decline in the number of sunspots.

1. INTRODUÇÃO

As atividades geodésicas e cartográficas têm experimentado uma verdadeira revolução com o advento dos sistemas de posicionamento por satélites, em função da rapidez e precisão com que as coordenadas são obtidas, independentemente das condições atmosféricas e da visibilidade entre os pontos a serem determinados.

A maior fonte de erros no posicionamento com GPS (Sistema de Posicionamento Global) era a técnica SA (Disponibilidade Seletiva), desativada às 04 horas TU (Tempo Universal) de 02 de maio de 2000. Com a desativação da técnica SA, a ionosfera tornou-se a maior fonte de erro sistemático no posicionamento com GPS (MATSUOKA, 2007).

A ionosfera, termo sugerido por Watt-Watson em 1926, segundo McNamara (1991), é a região da atmosfera terrestre formada pela interação dos átomos e moléculas neutras existentes com as fontes ionizantes solares e cósmicas resultando em um plasma com alta densidade de cargas livres, o plasma ionosférico.

A ionosfera, está localizada em uma altura de aproximadamente 60 km (dia) e 90 km (noite) tendo o íon do oxigênio atômico O^+ como o elemento químico mais abundante até em torno de aproximadamente 1000 km quando começa a predominar o íon do hélio He^+ , a heliosfera e, acima desta, o íon do hidrogênio H^+ , a protonosfera (RISHBETH E GARRIOT, 1969).

A existência desta região na atmosfera da Terra foi observada inicialmente pelas variações periódicas nas medições do campo geomagnético, tornando-se conhecida por permitir as radiocomunicações a longas distâncias nas primeiras décadas deste século (RISHBETH E GARRIOT, 1969). Isto se deve ao fato da ionosfera formar um guia de onda com a superfície terrestre fazendo com que as ondas de rádio reflitam-se sucessivamente, percorrendo distâncias transcontinentais.

A ionosfera é formada pela ação das fontes ionizantes solares e cósmicas. As fontes ionizantes solares consistem na principal fonte de ionização, tendo as fontes

ionizantes cósmicas um papel secundário, mas muito importante na manutenção da ionosfera noturna.

Como a composição da atmosfera varia com a altitude, a taxa de produção de íon também varia e assim induz a formação de vários picos de ionização distintos, que são as camadas D, E, F1 e F2 (SEGANTINE, 2005). Elas são nomeadas em ordem crescente de altitude.

Região D: região entre, aproximadamente, 75 e 95 km sobre a superfície terrestre cuja ionização é a principal responsável pela absorção de altas-frequências de ondas de rádio.

Região E: região entre 95 e 150 km, sobre a superfície terrestre, é a região de máxima condutividade elétrica e seu comportamento depende do ângulo zenital do Sol e do nível de atividade.

Região F: encontra-se aproximadamente, entre 150 e 500 km de altitude. Durante o dia, a camada F separa-se em duas camadas, F1 e F2. Geralmente, durante a noite, a camada F1 desaparece. A camada F produz o máximo de ionização após o meio dia, mas os efeitos do ciclo diário são menos pronunciados que nas camadas D e E.

A ionosfera caracteriza-se como parte da atmosfera superior onde está presente um número suficiente de elétrons e íons, que afetam a propagação das ondas de rádio. O seu estado pode ser descrito através da densidade de elétrons n_e em unidades de elétrons por m^3 . O conteúdo total de elétrons – TEC, caracteriza-se pelo impacto da ionosfera na propagação das ondas de rádio.

O erro associado à ionosfera é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao conteúdo total de elétrons (TEC) presentes ao longo do caminho da trajetória percorrida pelo sinal na ionosfera. O TEC varia no tempo e no espaço e é influenciado por diversas variáveis, tais como: ciclo solar, época do ano, hora do dia, localização geográfica, atividade geomagnética. Alguns modelos têm sido desenvolvidos para a correção das observáveis GPS do erro sistemático devido à ionosfera. O modelo mais conhecido e utilizado é o modelo de

Klobuchar que corrige algo em torno de 50 a 60% do erro ionosférico (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008; MONICO, 2000).

Os erros de atrasos ocasionados pela ionosfera são devidos principalmente à redução da velocidade e ao desvio da direção de propagação das ondas eletromagnéticas, causados pela sua refração. O retardo total pode ser estimado e compensado utilizando informações sobre a diferença dos atrasos de propagação das ondas nas frequências L1 e L2. Entretanto, como na maior parte dos receptores comerciais somente a frequência L1 está disponível, alguns modelos (ex. Kloubuchar) são usados na tentativa de se minimizar este erro. O atraso devido à ionosfera pode superar o valor de 60 ns, o que corresponde a um erro de aproximadamente 18 m na distância entre o satélite e a antena receptora, podendo chegar a 100 m e como consequência um erro grande na determinação da posição do usuário (OLIVEIRA *et al.*, 2003).

O IGS disponibiliza valores do TEC, calculados usando dados coletados de receptores de dupla frequência, no formato IONEX (*Ionosphere Map Exchange Format*) com resolução espacial de $5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas para todo o globo terrestre.

A ionosfera não só degrada a acurácia do GPS, como também reduz a sua confiabilidade, pois existe uma alta dependência entre perdas do sinal e as irregularidades ionosféricas (SKONE, 2000).

O TEC é o principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS. O entendimento do comportamento do TEC na região de interesse é importante para compreender os efeitos e as limitações impostas pela ionosfera no que concerne à qualidade do posicionamento com GPS (MATSUOKA, 2007).

Com respeito à região brasileira em particular, o estudo do comportamento do TEC da ionosfera é de grande interesse, pois, nesta região estão presentes os maiores valores do TEC, bem como uma alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do globo terrestre (KOMJATHY *et al.*, 2003).

Devido à natureza dispersiva da ionosfera, com dados GPS de receptores de dupla frequência pode-se efetuar correções do erro devido à ionosfera, bem como calcular o TEC.

Há muitos trabalhos na área, tais como: (SKONE, 1998); (CAMARGO, 1999); (FEDRIZZI, 1999); (SKONE *et al.*, 2001), (DAL POZ, 2002); (FONSECA JUNIOR, 2002); (MATSUOKA, 2003); (LIU, 2004); (MATSUOKA e CAMARGO, 2004); (VERONEZ, 2004); (AGUIAR, 2005); (MATSUOKA, 2007); e outros.

1.1 Justificativa

Hoje em dia, com a tecnologia do posicionamento por satélites, obtêm-se fácil e rapidamente coordenadas cartesianas geocêntricas ou coordenadas geodésicas. Essas coordenadas são influenciadas de certa forma pela ionosfera. A ionosfera causa um erro sistemático que afeta diretamente as coordenadas na determinação de um ponto.

Embora a maioria dos softwares de processamento de dados GPS possui modelos de correção do efeito da ionosfera, visando o Hemisfério Norte (EUA, Canadá e Europa), é recomendável que se tenha um modelo referente a cada região para se obter suas coordenadas com uma melhor acurácia. Pois os modelos globais são construídos por observações de todo o globo e é possível que não se tenha uma quantidade de observações suficientes para uma determinada área que represente matematicamente a ionosfera local ou seu efeito.

Uma das aplicações dos dados da ionosfera determinados pelo IGS é proporcionar informações do TEC para usuários do GPS. Os valores do TEC permitem a correção das observáveis GPS do erro devido à ionosfera, melhorando assim o desempenho do posicionamento com GPS; isto é possível devido à relação existente entre o TEC e o erro devido à ionosfera. Uma vantagem do uso dos valores do TEC do IGS, para aplicação no posicionamento com GPS, é que eles são disponibilizados gratuitamente e em caráter oficial.

O Brasil é a região que apresenta os maiores valores do TEC, e uma alta variação espacial e temporal se comparados com valores referentes às outras regiões do globo terrestre. Daí a motivação de estudar o efeito ionosférico, uma vez que inúmeras atividades como na geodésia e na geodinâmica utilizam-se do posicionamento por satélites, beneficiando os usuários e trazendo melhorias para o posicionamento preciso com GPS.

1.2 Objetivos

O objetivo geral é analisar e transmitir conhecimentos sobre o comportamento do erro devido à ionosfera na região brasileira, nas observáveis GPS, a partir do parâmetro TEC, utilizando dados dos arquivos de TEC das estações do IGS.

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Produzir uma série temporal de mapas horários médios mensais de VTEC para um longo período, referente aos anos de 2004 à 2008, com os arquivos IONEX (IGSG – arquivos combinados precisos), analisando a variação do VTEC horária, diária, sazonal e de ciclo de manchas;
- Analisar o comportamento do erro devido à ionosfera a partir do posicionamento por ponto (absoluto) da estação VICO (RBMC), fazendo a correção do efeito ionosférico com os arquivos do IONEX nos solstícios e equinócios para os anos de 2004 e 2008.

1.3 Estruturação da dissertação

Além desta parte introdutória que caracteriza o objeto de estudo, a dissertação está organizada em cinco capítulos conforme a descrição abaixo.

No capítulo 2, se encontra uma revisão bibliográfica sobre assuntos importantes que sustentam o estudo: GPS, ionosfera, TEC, IGS etc.

No capítulo 3, são descritos os experimentos, assim como área de estudo e metodologia empregada na obtenção dos resultados. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos e diversas análises que foram realizadas nesta pesquisa. E finalmente no capítulo 5, encontram-se as conclusões, considerações finais, sugestões e recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estrutura e Subdivisão da Atmosfera Terrestre

Segundo Matsuoka (2007), a atmosfera terrestre, para propósitos práticos, pode ser considerada como um conjunto de camadas de gases, esféricas e concêntricas à Terra. A sua estrutura está relacionada com diversos elementos, tais como: químicos, térmicos e eletromagnéticos. Estes parâmetros combinados variam sensivelmente em função da hora, posição geográfica, estação do ano e atividade solar.

O Quadro 1 apresenta um esquema simplificado da atmosfera terrestre que pode ser dividida em função da temperatura, ionização, campo magnético, propagação de ondas eletromagnéticas e um parâmetro técnico.

Altitude (km)	Temperatura	Ionização	Campo Magnético	Propagação	Técnico
100000	Termosfera	Protonosfera	Magnetosfera	Ionosfera	Atmosfera Superior
10000		Ionosfera			
1000					
100	Mesosfera	Neutrosfera	Dinamosfera	Troposfera	Atmosfera Inferior
	Estratosfera				
10	Troposfera				

Quadro 1. Possíveis divisões da atmosfera terrestre.

Fonte: Adaptada de Seeber (1993).

Segundo Leick (1995), a refração troposférica não depende da frequência do sinal transmitido, desde que ela esteja abaixo de 30 GHz. A propagação do sinal na troposfera depende principalmente do conteúdo do vapor d'água, da temperatura e da pressão do ar. Desta forma, os sinais UHF, que compreendem a faixa de frequência de 300 a 3000 MHz, onde estão incluídos os sinais GPS (L1 = 1575,42 MHz e L2 = 1227,60 MHz), se propagam de forma não dispersiva na troposfera.

A Tabela 1 apresenta algumas subdivisões das bandas de frequências, como também os comprimentos de ondas e suas respectivas faixas de frequência. Esta subdivisão é utilizada de forma habitual em tecnologia de comunicação, segundo Seeber (1993).

Tabela 1. Bandas de frequências.

Denominação	Comprimento de onda (λ)	Frequência (f)
LF	> 1000 m	< 300 kHz
MF	100 m... 1000 m	300 kHz... 3 MHz
HF	10 m... 100 m	3 MHz... 30 MHz
VHF	1m... 10 m	30 MHz... 300 MHz
UHF	10 cm... 1 m	300 MHz... 3GHz
SHF	1 cm... 10 cm	3 GHz... 30 GHz
EHF	1 mm... 1 cm	30 GHz... 300 GHz

Fonte: Seeber (1993).

A Tabela 2 apresenta as principais camadas da ionosfera e suas densidades de elétrons durante os períodos noturno e diurno.

Tabela 2. Características das principais camadas da ionosfera.

Camadas	D	E	F1	F2
Intervalo (km)	60... 90	90... 140	140... 200	200... 1000
n_e (el/m ³) durante o dia	$10^2...10^4$	10^5	$5 \cdot 10^5$	10^6
n_e (el/m ³) durante a noite	-	$2 \cdot 10^3$	10^3	$3 \cdot 10^5$

Fonte: Seeber (1993).

A Figura 1 apresenta a distribuição das camadas, a densidade de elétrons no período diurno, bem como tipos de ondas que propagam na ionosfera e outras informações.

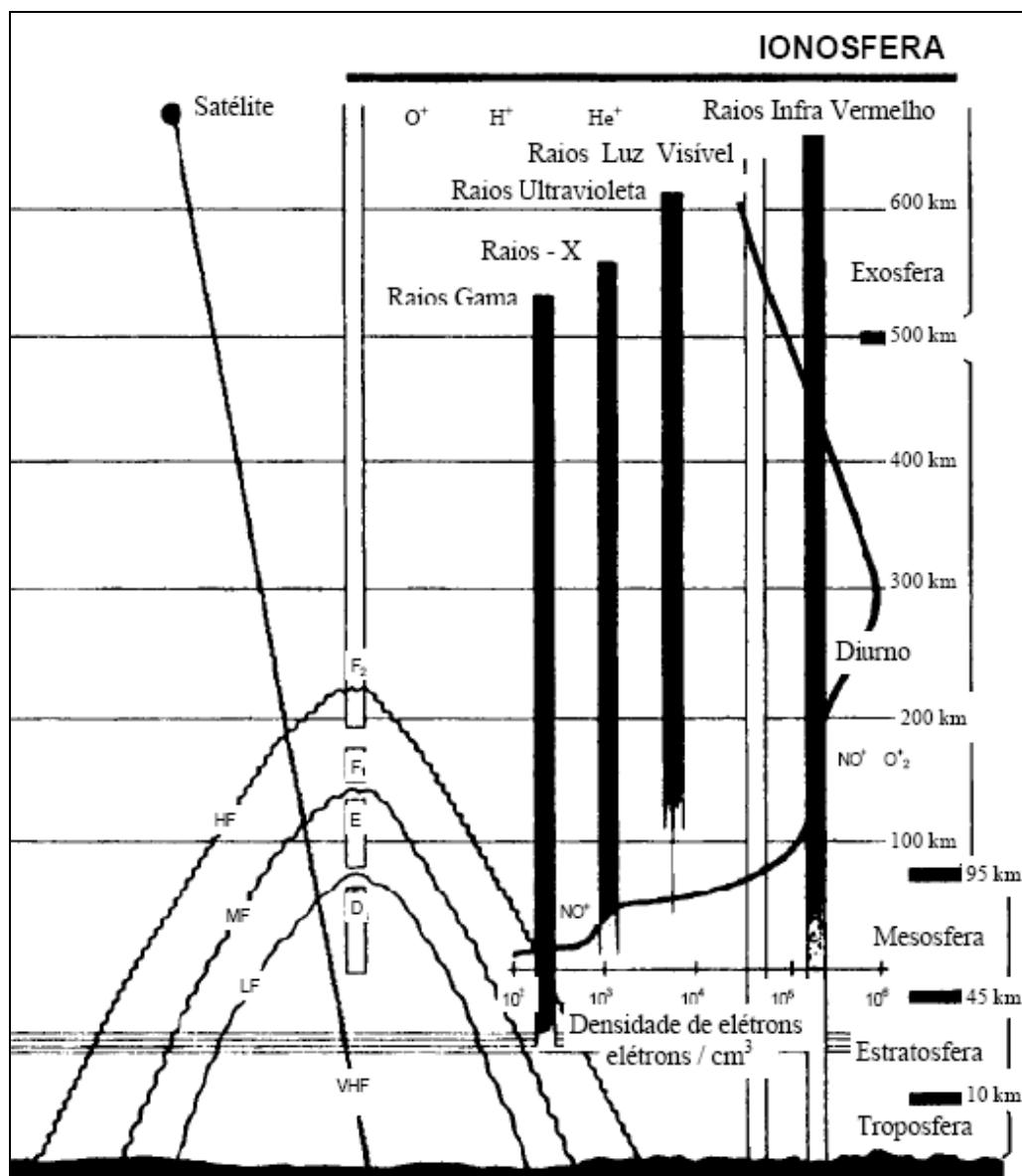


Figura 1. Representação esquemática da ionosfera.
Fonte: Adaptada de Osório (1992).

É importante salientar que a ionosfera se comporta de forma distinta durante os períodos diurnos e noturnos. Devido à ausência da radiação solar, durante o período noturno, acontece uma queda considerável na densidade de elétrons, como pode ser observado na Figura 2.

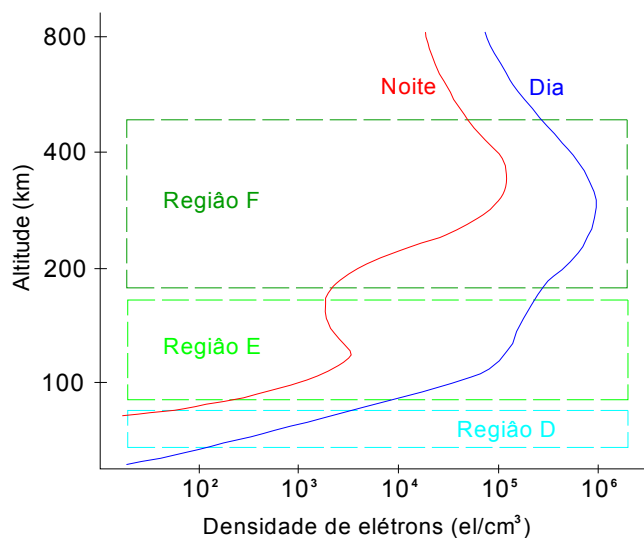


Figura 2. Perfis da densidade de elétrons durante o dia e a noite.
 Fonte: Adaptada de El Gizawy (2003).

2.2 Efeitos da Ionosfera no GPS

Os sinais GPS, no seu caminho entre o satélite e a antena receptora, propagam-se através da atmosfera dinâmica, atravessando camadas de diferentes naturezas e estados variáveis. Assim sendo, sofrem diferentes tipos de influências, que podem provocar variações na direção de propagação, velocidade de propagação, na polarização e na potência do sinal (SEEBER, 1993).

Esse meio de propagação compreende a troposfera e a ionosfera, com características bem diferentes. A troposfera, para frequências abaixo de 30 GHz, comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração é independente da frequência do sinal transmitido, dependendo apenas das propriedades termodinâmicas do ar. A ionosfera, como um meio dispersivo, afeta a modulação e a fase da portadora, fazendo com que sofram, respectivamente, um retardo e um avanço na distância entre o satélite e o receptor (LEICK, 1995). O retardo é referido, também, como atraso ionosférico e aumenta o comprimento aparente do caminho percorrido pelo sinal.

O efeito da ionosfera, que depende da frequência e, conseqüentemente, do índice de refração, é proporcional ao TEC, ou seja, ao número de elétrons presentes ao longo do percurso do satélite ao receptor. O problema principal é que o TEC varia

no tempo e no espaço, em função do fluxo de ionização solar, atividade magnética, ciclo de manchas solares, estação do ano, localização do usuário e direção do raio vetor do satélite (LEICK, 1995).

Segundo Monico (2000) o afastamento do índice de refração de seu valor unitário, nas diferentes camadas da ionosfera, faz com que a velocidade da fase da portadora (V_f) dada pela Equação 1:

$$V_f = \lambda \cdot f \quad (1)$$

sofra um atraso, onde λ representa o comprimento de onda e f a sua frequência.

Para as medidas de código, ou seja, para um grupo de ondas, a propagação da energia é definida com a velocidade do código (V_c),

$$V_c = -\frac{df}{d\lambda} \cdot \lambda^2 \quad (2)$$

e sofre um avanço durante a propagação do sinal.

Diferenciando a Equação 1 em relação a λ tem-se:

$$dV_f = f \, d\lambda + \lambda \, df \quad (3)$$

e dividindo a Equação 3 por $\lambda \, d\lambda$, obtém-se:

$$\frac{df}{d\lambda} = \frac{1}{\lambda} \frac{dV_f}{d\lambda} - \frac{f}{\lambda} \quad (4)$$

Substituindo a Equação 4 na Equação 2:

$$V_c = -\lambda \cdot \frac{dV_f}{d\lambda} + \lambda \cdot f \quad (5)$$

A partir da diferenciação da equação (1) e substituindo-a na equação (2), obtém-se uma equação que relaciona a velocidade do código com a velocidade da fase, descrita como equação de *Rayleigh*:

$$V_c = V_f - \lambda \cdot \frac{dV_f}{d\lambda}. \quad (6)$$

Os índices de refração para a velocidade da fase e do código são dados, respectivamente, por:

$$n_f = \frac{c}{V_f} \quad (7)$$

e

$$n_c = \frac{c}{V_c} \quad (8)$$

em que, c é a velocidade da luz.

A equação modificada de *Rayleigh* relaciona esses dois índices de refração por meio da equação (MONICO, 2000):

$$n_c = n_f - \lambda \cdot \frac{dn_f}{d\lambda} \quad (9)$$

ou

$$n_c = n_f + f \cdot \frac{dn_f}{df}. \quad (10)$$

Estas equações são obtidas a partir da derivação da relação $c = \lambda \cdot f$, em relação a f e λ . O índice de refração da fase na ionosfera pode ser aproximado pela série (SEEBER, 1993):

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} + \dots \quad (11)$$

em que, os coeficientes c_2 , c_3 e c_4 dependem somente da densidade de elétrons, ao longo da trajetória em que o sinal se propaga. Considerando somente os efeitos de primeira ordem, obtém-se:

$$n_f = 1 + \frac{c_2}{f^2}. \quad (12)$$

Logo, ao derivar a equação (12), tem-se:

$$dn_f = -2 \cdot \frac{c_2}{f^3} \cdot df \quad (13)$$

que ao ser substituída na equação (10), obtém-se o índice de refração da velocidade do código:

$$n_c = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (14)$$

Pode-se observar que os índices de refração da fase e do código se diferenciam somente no sinal do coeficiente c_2 . Esse coeficiente, que depende da densidade de elétrons (n_e), é dado por (MONICO, 2000):

$$c_2 = -40,3 \cdot n_e \quad (15)$$

Em unidades do SI, a constante 40,3 é dada em $\text{mHz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}$ e n_e em elétrons/ m^3 . Assim, tem-se que:

$$n_f = 1 - \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2} \quad (16)$$

e

$$n_c = 1 + \frac{40,3 \cdot n_e}{f^2} \quad (17)$$

resultando em diferentes velocidades nos sinais, de modo que ocorre avanço na fase e atraso no código, pois a velocidade da fase V_f é maior que a velocidade do código V_c . Dessa maneira, resulta em um aumento nas distâncias obtidas a partir do código, e uma redução nas obtidas a partir da fase, de uma mesma intensidade.

2.3 Erro devido à Ionosfera nos Sinais GPS

A distância (L) entre o satélite (s) e a antena receptora (r), considerando apenas o erro devido à ionosfera, é definida por Leick (1995):

$$L = \int_r^s n dl, \quad (18)$$

em que n representa, o índice de refração da fase ou do código. A distância geométrica (ρ) entre o satélite e a antena receptora é obtida quando o índice de refração é unitário ($n = 1$), logo:

$$\rho = \int_r^s dl . \quad (19)$$

A diferença entre a distância medida, com a influência da ionosfera, e a distância geométrica, entre o satélite e a antena receptora, resulta no erro devido à ionosfera, que é dado por:

$$I = \int_r^s n dl - \int_r^s dl . \quad (20)$$

Substituindo os índices de refração da fase e do código na equação (20), obtém-se o erro devido à ionosfera para a distância medida pela fase da portadora (I_f) e pelo código (I_c). Logo, para a fase da portadora tem-se que:

$$I_f = \int_r^s \left(1 - \frac{40,3n_e}{f^2}\right) dl - \rho \quad (21)$$

ou

$$I_f = -\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e dl . \quad (22)$$

E, para o código, tem-se que:

$$I_c = \int_r^s \left(1 + \frac{40,3n_e}{f^2}\right) dl - \rho , \quad (23)$$

ou

$$I_c = +\frac{40,3}{f^2} \int_r^s n_e dl , \quad (24)$$

em que, a parcela variável ($\int_r^s n_e dl$) caracteriza a quantidade de elétrons ao longo do caminho do sinal, entre o satélite e a antena receptora em uma coluna de 1 m^2 , que por sua vez representa o conteúdo total de elétrons (TEC), ou seja (LEICK, 1995):

$$TEC = \int_r^s n_e dl . \quad (25)$$

Substituindo a equação (25) nas equações (22) e (24), obtém-se o erro devido à ionosfera na distância medida pela fase da portadora e pelo código, em função do TEC e da frequência:

$$I_f = -\frac{40,3}{f^2}TEC, \quad (26)$$

$$I_c = +\frac{40,3}{f^2}TEC. \quad (27)$$

O TEC é dado em elétrons por metro quadrado (el/m^2), a frequência em Hertz (Hz) e a constante 40,3 é dada em $\text{mHz}^2(\text{el}/\text{m}^2)^{-1}$, resultando no erro devido à ionosfera expresso em metros (m). De acordo com as equações (26) e (27), percebe-se que o erro devido à ionosfera, seja ela incidente sobre o código ou a fase da portadora, é inversamente proporcional ao quadrado da frequência e diretamente proporcional ao TEC. Com isso, as frequências mais altas são menos afetadas pela ionosfera e quanto menor o TEC menor será o erro devido à ionosfera.

Para efeito de padronização, o TEC é dado na direção vertical (VTEC) e o erro devido à ionosfera é calculado pelas seguintes equações (28) e (29):

$$I_f = -\frac{1}{\cos(z')} \cdot \frac{40,3}{f^2} \cdot VTEC, \quad (28)$$

e

$$I_c = \frac{1}{\cos(z')} \cdot \frac{40,3}{f^2} \cdot VTEC, \quad (29)$$

respectivamente, para a fase e o código.

O valor de z' representa o ângulo zenital do sinal transmitido com relação à vertical e é calculado no ponto em que o sinal transmitido atravessa a camada ionosférica, e pode ser obtido pela Equação 30 (HOFMANN-WELLENHOF *et al.*, 2008):

$$\text{sen}(z') = \frac{R_m}{R_m + h_m} \cdot \text{sen}(z), \quad (30)$$

em que:

$z = z_0$ que é o ângulo zenital do sinal transmitido, em relação ao receptor;

R_m é o raio médio da Terra;

h_m é a altura da camada ionosférica em referência à superfície da Terra, que varia de 300 a 450 km.

A Figura 3 ilustra todas as quantidades envolvidas na Equação 30, além de identificar o ponto ionosférico (PI), o ponto sub-ionosférico (PSI), o centro da Terra (O) e o ângulo de elevação (el) entre o receptor (r) e o satélite (s).

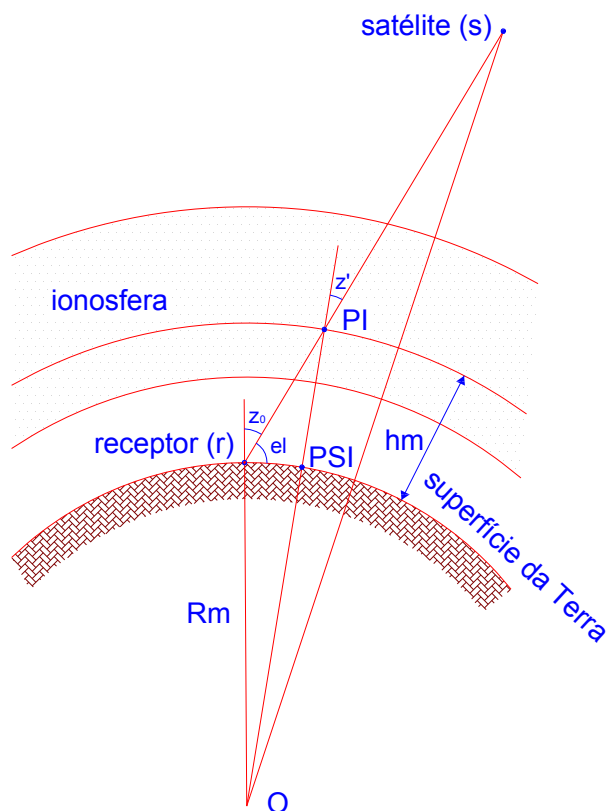


Figura 3. Geometria para o atraso do caminho ionosférico.
Fonte: Adaptado de Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008).

A Figura 4 mostra os valores do ângulo zenital do caminho do sinal no ponto ionosférico em relação ao ângulo zenital no receptor, para as altitudes médias da camada ionosférica de 300, 350, 400 e 450 km.

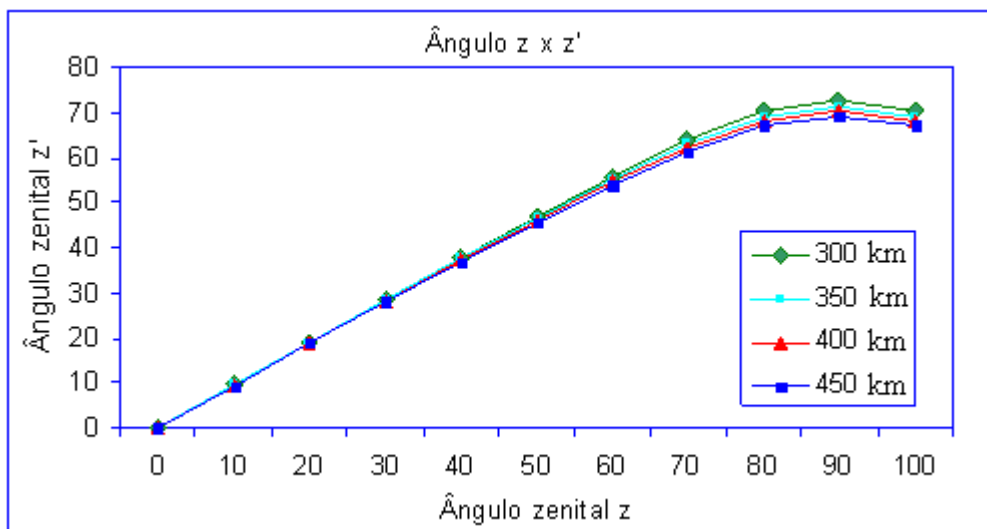


Figura 4. Ângulo z x z'.

Os valores do TEC são obtidos para um ponto na camada ionosférica, denominado ponto ionosférico (PI). Este ponto é a interseção entre o vetor satélite/receptor e a camada que representa a ionosfera.

A localização do ponto ionosférico pode ser calculado em função da latitude e da longitude geodésica do receptor, do azimute e do ângulo de elevação do satélite. De acordo com El Gizawy (2003), a latitude e longitude geodésica do ponto ionosférico são calculados assim:

$$\phi_{PI} = \phi_r + \psi \cdot \cos Az, \quad (31)$$

$$\lambda_{PI} = \lambda_r + \left(\frac{\psi \cdot \sin Az}{\cos \phi_{PI}} \right), \quad (32)$$

sendo:

$$\psi = \cos^{-1} \left(\frac{Rm}{Rm + hm} \cdot \cos el \right) - el, \quad (33)$$

em que:

ϕ_{PI} e λ_{PI} representam a latitude e a longitude do ponto ionosférico;

ϕ_r e λ_r representam a latitude e a longitude do receptor;

el representa o ângulo de elevação do satélite;

Az representa o azimute do satélite.

Para ilustração, a Figura 5 mostra a localização dos pontos ionosféricos, durante um período de 24 horas obtidos a partir de observações GPS de quatro estações da RBMC (BRAZ, IMPZ, POAL e UEPP) para o dia 29 de outubro de 2003. Para cada ponto ionosférico uma medida de TEC pode ser obtida.

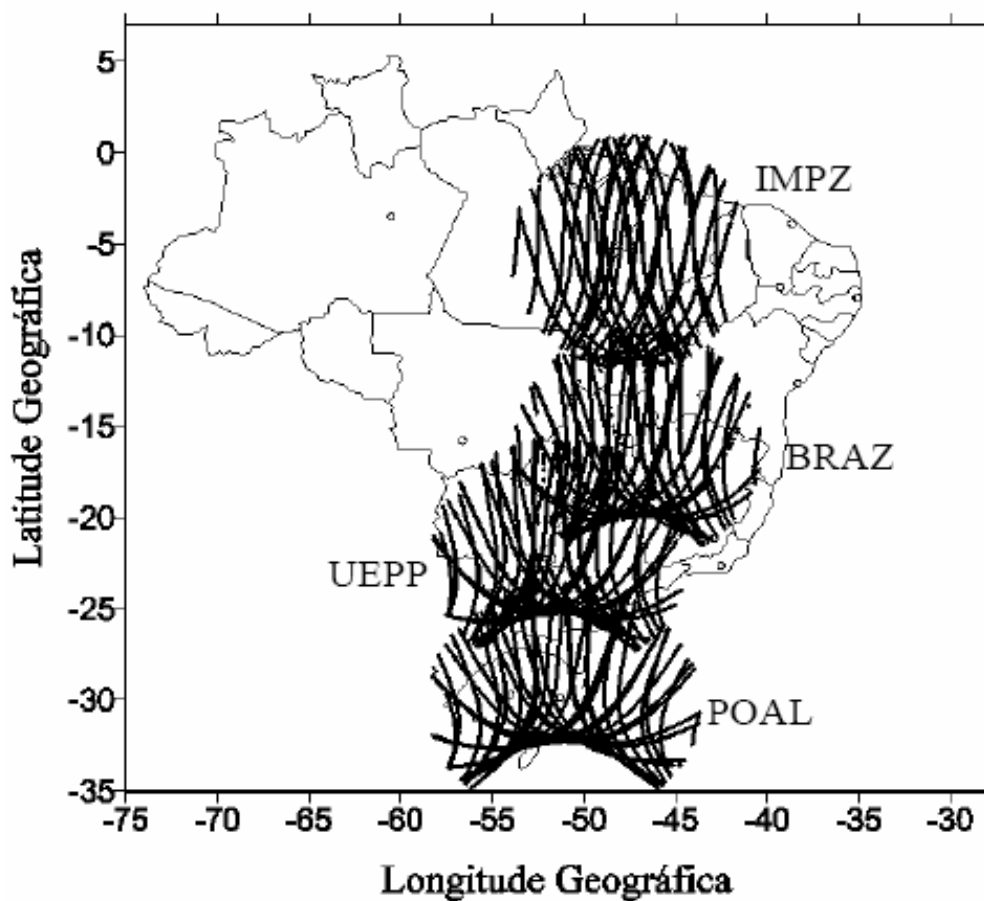


Figura 5. Pontos ionosféricos obtidos de observações GPS de 4 estações da RBMC referente a 29 de outubro de 2003.

Fonte: Matsuoka (2007).

Na Tabela 3, tem-se uma estimativa do erro devido à ionosfera em distâncias observadas na vertical para diferentes frequências e na Tabela 4 tem-se o erro residual na direção vertical para a combinação linear *ion-free* entre duas frequências (SEEBER, 1993).

Tabela 3. Efeito do atraso de propagação devido à ionosfera sobre as distâncias observadas na vertical com uma frequência.

1 frequência	400 MHz	1600 MHz	2000 MHz	8000 MHz
Efeito médio	50 m	3 m	2 m	0,12 m
90% <	250 m	15 m	10 m	0,6 m
Efeito máximo	500 m	30 m	20 m	1,2 m

Fonte: Seeber (1993).

Tabela 4. Erros residuais para combinações lineares entre duas frequências.

2 frequências	150 / 400 MHz	400 / 2000 MHz	1227 / 1572 MHz	2000 / 8000 MHz
Efeito médio	0,6 m	0,9 cm	0,3 cm	0,04 cm
90% <	10 m	6,6 cm	1,7 cm	0,21 cm
Efeito máximo	36 m	22,0 cm	4,5 cm	0,43 cm

Fonte: Seeber (1993).

Devido a aproximação realizada para a obtenção do índice de refração nas equações (23) e (24), a correção do erro sistemático por causa da ionosfera, calculada pelas expressões (23) e (24), representa somente os efeitos de primeira ordem da ionosfera, os quais podem ser modelados a partir dos dados obtidos com receptores GPS de dupla frequência. O erro remanescente é da ordem de poucos centímetros (SEEBER, 1993). A Tabela 5 apresenta o erro máximo, na direção vertical, que pode ser esperado nas portadoras L1 e L2 e para a combinação linear livre da ionosfera (L0), considerando os efeitos de 1ª, 2ª e 3ª ordem da ionosfera. Segundo Seeber (1993), para direções inclinadas, a influência aumenta.

Tabela 5. Efeito sistemático máximo devido à ionosfera na direção vertical.

Frequência	Efeitos de 1ª ordem ($1/f^2$)	Efeitos de 2ª ordem ($1/f^3$)	Efeitos de 3ª ordem ($1/f^4$)
L1	32,5 m	0,036 m	0,002 m
L2	53,5 m	0,076 m	0,007 m
L0	0,0 m	0,026 m	0,006 m

Fonte: (Seeber, 1993; Monico, 2000).

O valor do índice de refração da ionosfera, que depende da frequência do sinal, bem como da troposfera, pode ser visto na Figura 6, através do índice de refatividade em função da altitude. Na troposfera, o índice (N_t) é positivo e independente da frequência utilizada, ao contrário da ionosfera, onde o índice (N_i) é negativo e depende da frequência (Seeber, 1993).

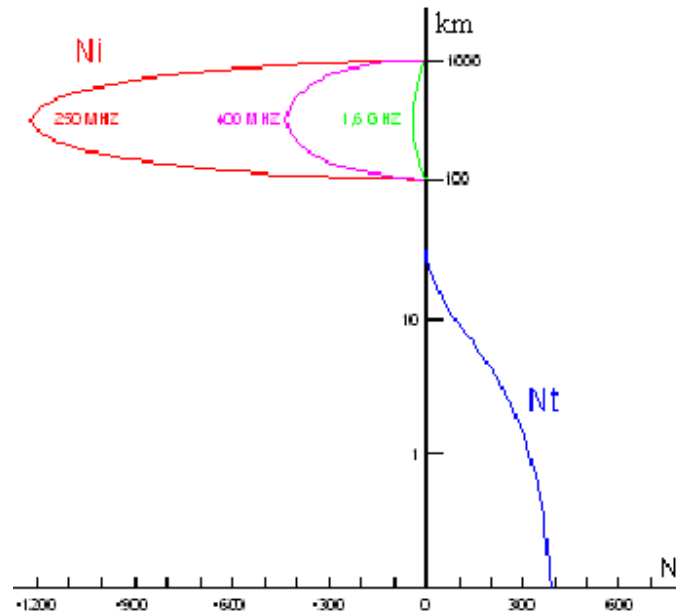


Figura 6. Índice de refatividade em função da altitude para a ionosfera e troposfera.
Fonte: Adaptado de Seeber (1993).

2.4 Cintilação ionosférica

Segundo Webster (1993) e El Gizawy (2003), as cintilações ionosféricas são rápidas variações na fase e amplitude do sinal GPS recebido, as quais são causadas por irregularidades na densidade de elétrons ao longo do caminho percorrido pelo sinal na ionosfera.

Rodrigues (2003) define as cintilações ionosféricas como sendo as flutuações da amplitude ou fase de uma onda de rádio, através de uma região na qual existem irregularidades na densidade de elétrons e, conseqüentemente, do índice de refração. Segundo Davies (1990) apud Matsuoka (2007), essas irregularidades que causam cintilação estão localizadas entre 200 e 600 km de altitude.

Após o lançamento do primeiro satélite artificial em 1957, tornou-se possível observar cintilações ionosféricas em sinais emitidos por rádios-transmissores a bordo de satélites (RODRIGUES, 2003).

De acordo com Skone (2000), os efeitos mais intensos da cintilação ionosférica ocorrem nas regiões de baixa latitude geomagnética (± 10 até ± 20 graus), nas regiões onde ocorrem as auroras (65 até 75 graus de latitude geomagnética), e na região que envolve a capa polar (latitudes geomagnéticas maiores que 75 graus). Cintilações que ocorrem nas regiões de altas latitudes (região auroral) e na região equatorial surgem de distintos fenômenos físicos. As cintilações que ocorrem na região equatorial possuem um maior impacto na performance de rastreamento dos receptores do que na região de altas latitudes. No caso da região equatorial, a cintilação está relacionada mais diretamente com a anomalia equatorial.

De acordo com Santos (2001), as bolhas ionosféricas são imensas regiões do espaço onde a densidade do plasma ionosférico é drasticamente reduzida, ela estende-se ao longo das linhas de força do campo geomagnético, alcançando extensões 10000 km e cerca de 150 a 300 km na direção perpendicular a esse campo. Essas bolhas ocorrem após o por do Sol e principalmente no período noturno até a meia noite (Hora Local).

Segundo Matsuoka (2007), as bolhas ionosféricas geralmente ocorrem entre os meses de outubro a março e variam de acordo com as características da atividade solar.

A Figura 7 ilustra um esquema da evolução espacial e temporal das bolhas ionosféricas.

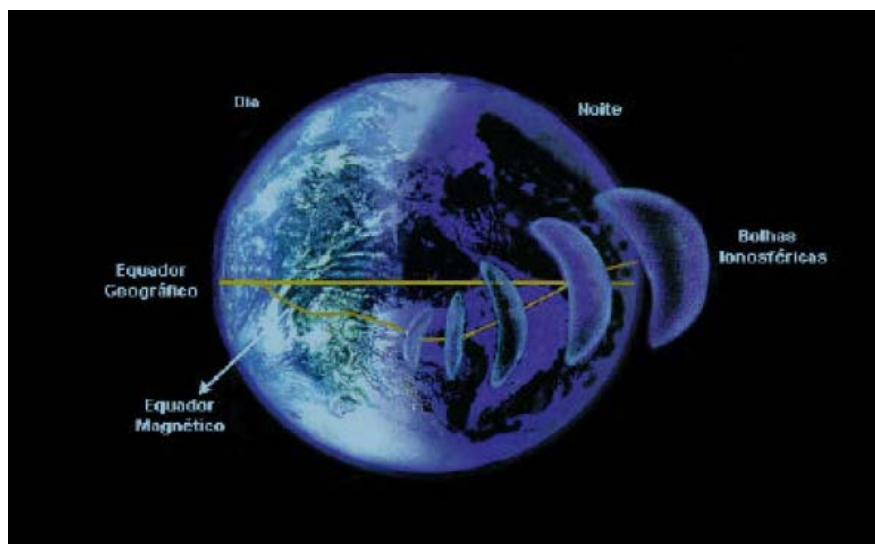


Figura 7. Bolhas ionosféricas.
Fonte: Adaptado de Abreu (2007)

2.5 Regiões geográficas da ionosfera

A estrutura global da ionosfera não é homogênea. As três maiores regiões geográficas ionosféricas são conhecidas como regiões de altas e médias latitudes e região equatorial. A Figura 8 mostra a localização geográfica dessas regiões no globo terrestre. Ainda que a amplitude dessas regiões da ionosfera não possa ser estabelecida exatamente, quando projetadas na superfície terrestre, é conveniente indicar aproximadamente a localização destas regiões.

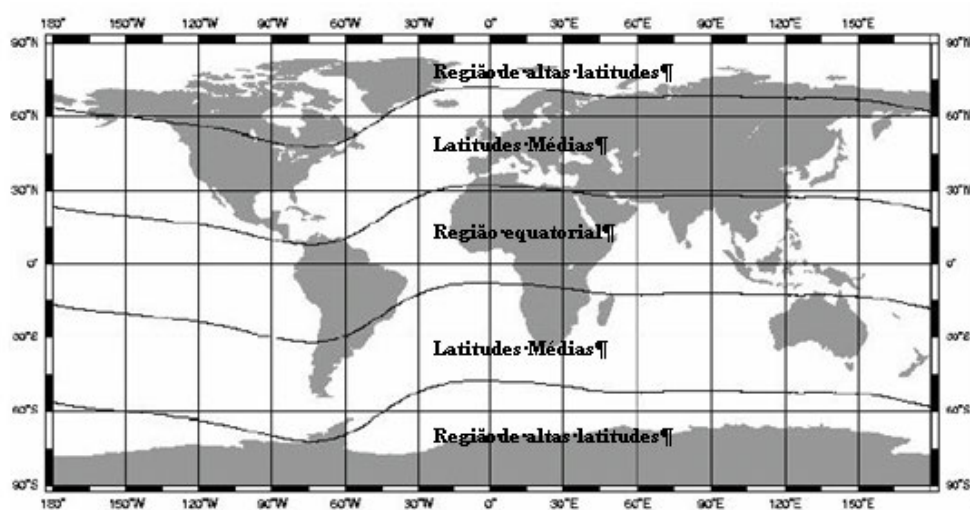


Figura 8. Regiões geográficas da ionosfera.
Fonte: Adaptada de Fonseca Junior (2002).

2.6 Determinação do TEC utilizando as observáveis GPS

O TEC é o principal parâmetro que descreve o efeito da ionosfera nos sinais GPS, este é medido em elétrons/m². Normalmente, o TEC apresenta valores muito elevados, sendo muitas vezes maior que 1×10^{18} elétrons/m² (LIU, 2004). O TEC representa o número de elétrons contidos em uma coluna que se estende desde a antena receptora até o satélite, e cuja área da seção transversal é unitária (1 m²). Para propósitos de padronização a comunidade científica tem adotado como unidade do TEC a sigla TECU (*TEC Unit* – Unidade de TEC), sendo $1 \text{ TECU} = 1 \times 10^{16}$ elétrons/m². O TEC é facilmente convertido em erro na distância medida pela fase portadora ou pelo código, nas frequências L1 e L2, usando as equações (26) e (27), em que:

Para L1, $1 \text{ TECU} = \pm 0,16 \text{ m}$;

Para L2, $1 \text{ TECU} = \pm 0,27 \text{ m}$;

Para L5, $1 \text{ TECU} = - 0,29 \text{ m}$.

A natureza dispersiva da ionosfera permite o cálculo do TEC usando dados coletados por receptores GPS de dupla frequência. O TEC pode ser obtido utilizando dados de um receptor de dupla frequência a partir de uma combinação linear entre as observáveis da fase da portadora e as observáveis da pseudodistância em L1 e L2. Nessas combinações lineares para a obtenção do TEC, os erros que afetam as observáveis em ambas as frequências da mesma maneira são eliminados, tais como a refração troposférica, o erro das efemérides, o não sincronismo do relógio do satélite e do receptor, bem como, também a distância geométrica é eliminada. Alguns erros não são correlacionados com as frequências e, portanto, não são eliminados na combinação linear, influenciando na determinação do TEC. São eles: o atraso instrumental interfrequência do satélite e do receptor, o ruído do receptor e os efeitos de multicaminho (MATSUOKA,2007). Mais detalhes sobre estes erros podem ser obtidos, em Seeber (1993), Monico (2000) e Hofmann-Wellenhof *et al.* (2008).

2.7 Determinação do TEC utilizando as pseudodistâncias

O TEC na direção do satélite (s) à antena receptora (r) pode ser obtido utilizando as pseudodistâncias, advindas dos códigos P nas portadoras L1 e L2, a partir desta combinação linear (MATSUOKA, 2007):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40,3 \cdot (f_1^2 - f_2^2)} \left[(P_2 - P_1) - \varepsilon_{P12} \right] \quad (34)$$

em que,

f_1 e f_2 representam as frequências das portadoras L1 e L2, respectivamente;

P_1 e P_2 representam as pseudodistâncias nas portadoras L1 e L2, respectivamente;

ε_{p12} representa a diferença dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre L1 e L2 e os erros aleatórios. O cálculo desses erros sistemáticos é feito pelo atraso instrumental interfrequência do satélite e receptor, pelo efeito do multicaminho e pelos efeitos do ruído do receptor.

2.8 Determinação do TEC a partir de Medidas da Fase da Portadora

O TEC na direção do satélite (s) à antena receptora (r) também pode ser obtido partir desta combinação linear entre as medidas da fase das portadoras L1 e L2 (MATSUOKA, 2007):

$$TEC_r^s = \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{40,3 \cdot (f_1^2 - f_2^2)} \left[(\lambda_1 \cdot \varphi_1 - \lambda_2 \cdot \varphi_2) - (\lambda_1 \cdot N_1 - \lambda_2 \cdot N_2) - \varepsilon_{\varphi12} \right] \quad (35)$$

em que,

λ_1 e λ_2 representam os comprimentos de ondas nas portadoras L1 e L2, respectivamente;

φ_1 e φ_2 representam as medidas de fase nas portadoras L1 e L2, respectivamente;

$\varepsilon_{\varphi12}$ representa a diferença dos demais erros sistemáticos não eliminados na combinação linear entre L1 e L2 e os erros aleatórios.

2.9 Ciclos solares

A Figura 9 apresenta o número de manchas solares desde 1700 até 2008. Vale notar que de 1700 até 1755, as médias eram anuais, visto que de 1755 até os dias atuais, a contagem do número de manchas são dadas pela média mensal. Nota-se que os ciclos solares variam de 11 anos aproximadamente. Atualmente a ionosfera está no “ciclo 24”.

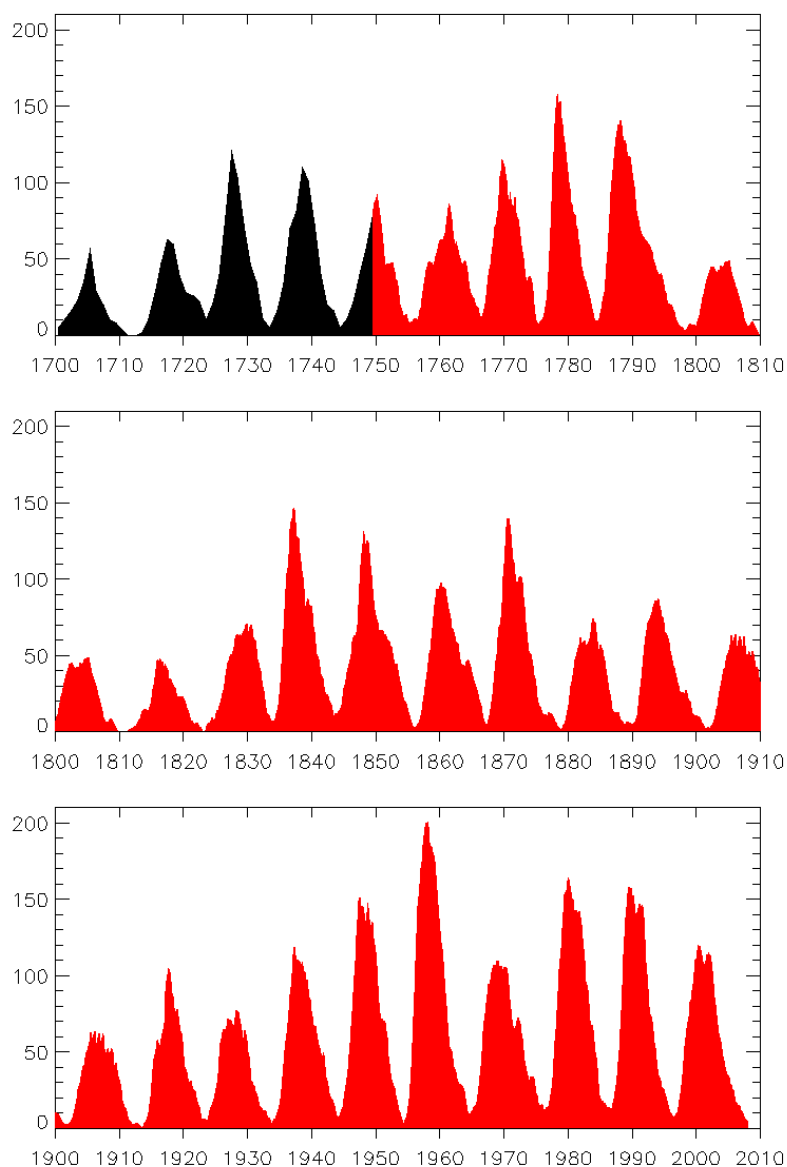


Figura 9. Número de manchas solares e ciclos solares.

Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfam1.html> - acesso em agosto/2008.

A Figura 10 apresenta o número de manchas solares em relação aos anos de 1997 a 2008, abrangendo todo o ciclo 23 e o início do ciclo 24. No ciclo 23 o período de máxima atividade solar compreendeu os anos de 2000 e 2002. A curva tracejada mostra uma previsão do número de manchas até meados de 2009.

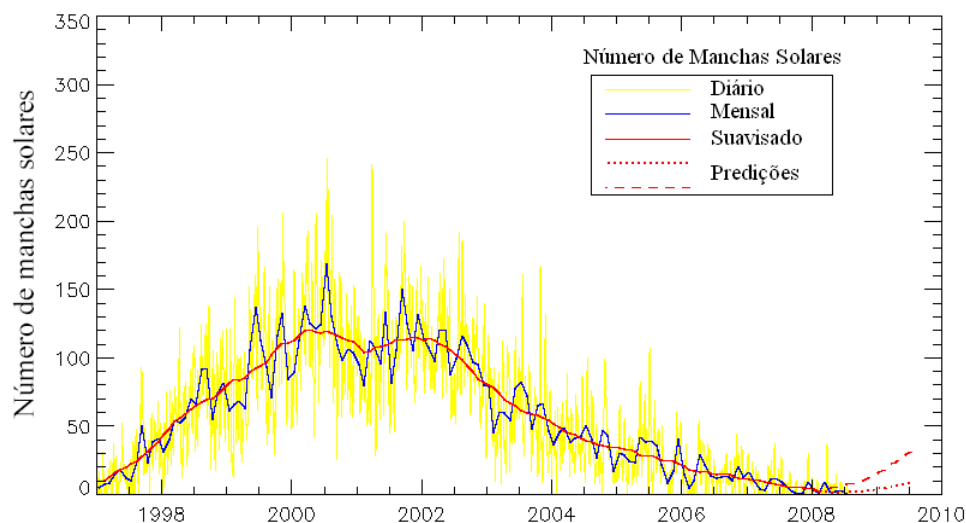


Figura 10. Número de manchas solares – Ciclos 23 e 24.

Fonte: <http://sidc.oma.be/html/wolfjmms.html> - acesso em agosto/2008.

Segundo previsão do NCAR (2008), o ciclo de manchas solares 24 será de 30% a 50% maior do que o ciclo 23. Os valores máximos do número de manchas solares do ciclo 24 deve ocorrer por volta de 2012.

2.10 Campo geomagnético

Segundo Fonseca Junior (2002), próximo a superfície da Terra, o campo magnético terrestre ou campo geomagnético pode ser aproximado a um dipolo não coincidente com o eixo de rotação da Terra. A Figura 11 ilustra a localização do equador geomagnético em 1957 e 2000.

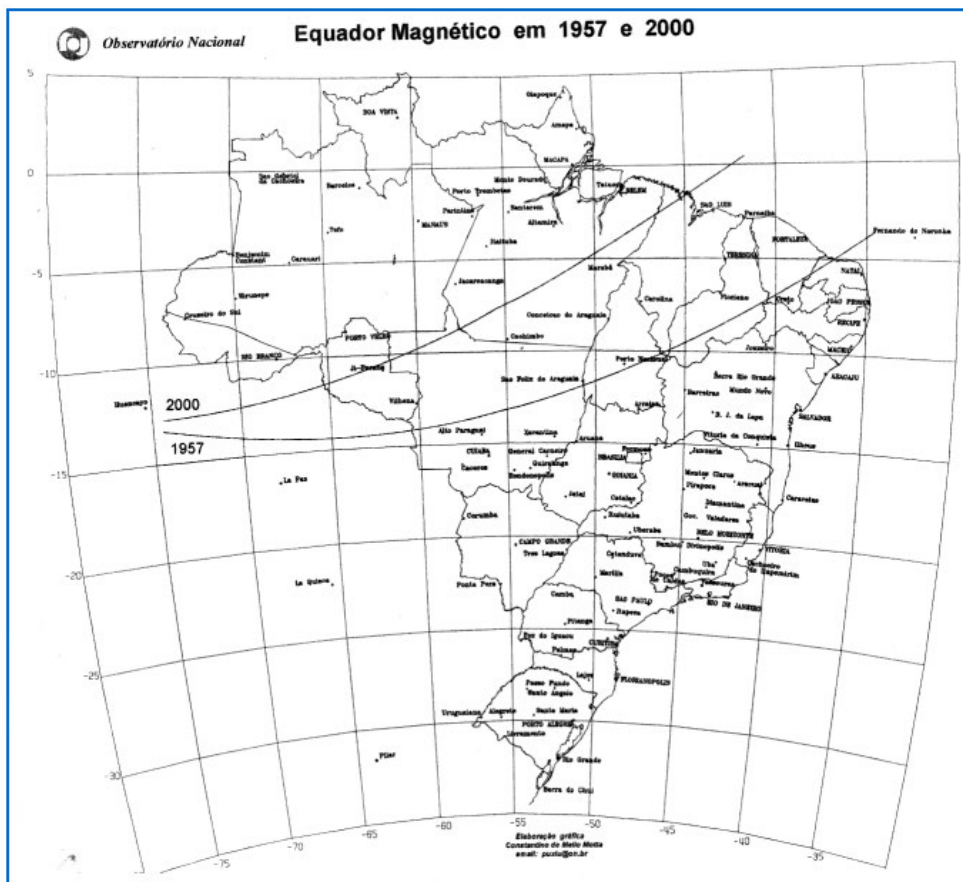


Figura 11. Equador geomagnético em 1957 e 2000.
 Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/coord/polos.htm>- acesso em janeiro/2009.

A Figura 12 ilustra a posição do pólo magnético norte em 2005 com as coordenadas geodésicas de 83,21°N e 118,32°O

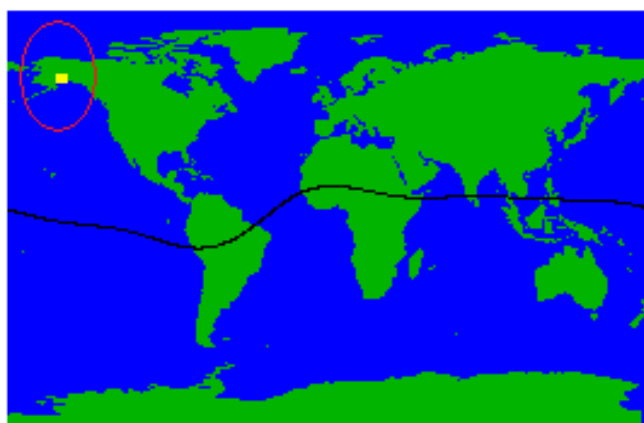


Figura 12. Equador geomagnético e posição do pólo magnético norte em 2005.
 Fonte: <http://astro.if.ufrgs.br/coord/polos.htm>- acesso em janeiro/2009.

2.11 Índices geomagnéticos

Índices geomagnéticos constituem uma série de dados que visam descrever em escala planetária a atividade geomagnética ou alguns de seus componentes (ISGI, 2008). Os índices geomagnéticos mais frequentemente utilizados para determinar a intensidade e a duração das tempestades são os índices: Dst (*Disturbance Storm-Time*), Kp (*Planetary Kennziffer*) ou índice planetário e AE (*Auroral Electrojet*) (Fedrizzi, 2003).

O índice planetário Kp é obtido à partir da média aritmética dos índices K medidos em 13 observatórios entre as latitudes de 46° e 63° N e 46° e 63° S em relação ao equador geomagnético (OLIVEIRA, 2003). De acordo com a Tabela 7 o índice Kp está distribuído em 28 níveis que varia de 0 a 9, sendo expressos em terços de uma unidade; por exemplo: 4- é equivalente a $3 \frac{2}{3}$, 4° é equivalente ao próprio 4 e 4+ é equivalente a $4 \frac{1}{3}$. Segundo Batista (2003), o índice Kp possui intervalos de 3 horas (8 valores diários), para estudos de longo período é conveniente definir um único índice médio por dia. Devido aos índices Kp serem de função logarítmica, é difícil trabalhar com médias dos mesmos, por isso, foram criados índices lineares. E assim, o índice ap (no mesmo intervalo) é derivado do índice Kp, como pode ser observado na Tabela 6. O índice Ap é obtido a partir da média dos oitos valores diários de ap.

Valores dos índices Kp e Ap podem ser obtidos nos seguintes endereços eletrônicos: <http://swdcwww.kugi.kyoto-u.ac.jp/kp/index.html>; <ftp://ftp.gfz-otsdam.de/pub/home/obs/kp-ap>.

Tabela 6. Relação entre o índice geomagnético Kp e ap.

Kp	0°	0+	1-	1°	1+	2-	2°	2+	3-	3°	3+	4-	4°	4+
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Kp	5-	5°	5+	6-	6°	6+	7-	7°	7+	8-	8°	8+	9-	9°
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Fonte: Adaptada de Matsuoka (2007).

A atividade geomagnética é classificada de acordos com os índices Kp e Ap, como é apresentada na Tabela 7.

Tabela 7. Classificação da atividade geomagnética em função de Kp e Ap.

Atividade Geomagnética	Índice Kp	Índice Ap
Calma	0 - 2	< 8
Transição	3	8 - 15
Ativo	4	16 - 29
Tempestade Fraca	5	30 - 49
Tempestade Intensa	6	50 - 99
Tempestade Muito Intensa	7 - 9	100 - 400

Fonte: Adaptada de Batista (2003).

De acordo com a Tabela 8, a classificação de uma tempestade geomagnética é dada em função do índice Dst. O índice Dst (dado em nanoTesla - nT) representa o invólucro das curvas de medidas magnetométricas obtidas por uma cadeia de magnetômetros localizados na região equatorial, ao longo do globo terrestre (YAMASHITA, 1999).

Tabela 8. Classificação de uma tempestade geomagnética.

Condição da Tempestade Geomagnética	Valor do índice Dst (nT)
Fraca	-30 a -50
Moderada	-50 a -100
Intensa	-100 a -250
Muito Intensa	< -250

Fonte: Fedrizzi (2003).

2.12 Dados globais da ionosfera calculados pelo IGS - arquivos IONEX

No ano de 1998 o IGS, a partir do seu grupo de trabalho da ionosfera, iniciou a produção de arquivos da ionosfera que disponibilizam valores de VTEC calculados usando dados coletados pela sua rede de receptores de dupla frequência. A Figura 13 ilustra as estações pertencentes ao IGS.

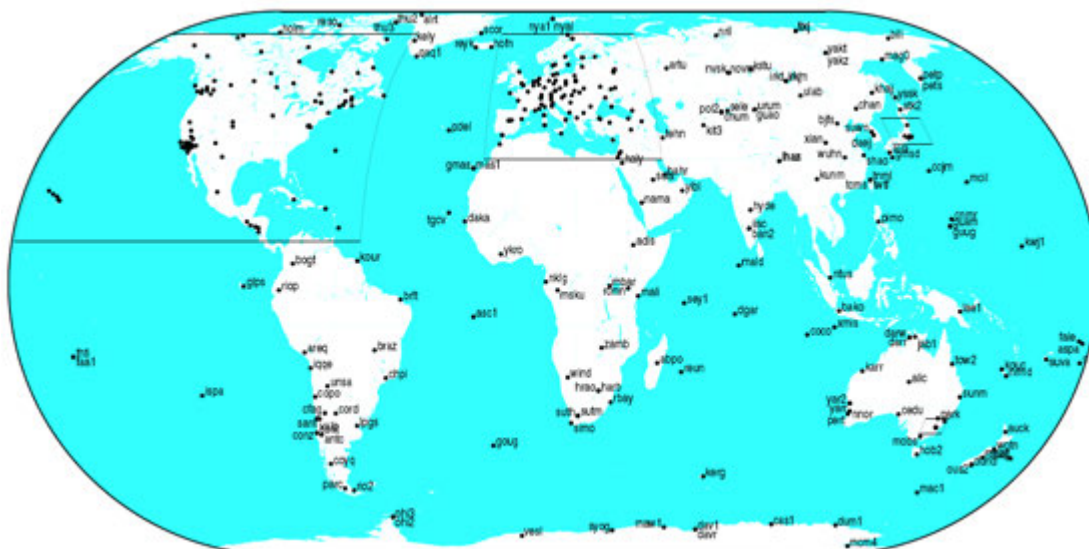


Figura 13. Estações da rede IGS.

Fonte: IGS <<http://igsb.jpl.nasa.gov>> acesso: out./2008.

Oficialmente, estes arquivos são disponibilizados na sua forma final com uma latência de 11 dias (HERNANDEZ-PAJARES, 2003). Porém, desde dezembro de 2003, o IGS vem disponibilizando esses arquivos em uma versão preliminar com uma disponibilidade menor do que 24 horas (Produtos Ionosféricos Rápidos do IGS).

Os arquivos são disponibilizados no formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*), que fornecem valores de VTEC em um *grid* com resolução espacial de $5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas. Além dos valores de VTEC, os arquivos IONEX fornecem valores do atraso instrumental dos satélites, bem como, dos receptores envolvidos no processamento.

Atualmente, o grupo de trabalho da ionosfera do IGS conta com a participação de 4 centros de análises:

- CODE (*Center for Orbit Determination in Europe* - Suíça);
- ESA (*European Space Agency* - Alemanha);
- JPL (*Jet Propulsion Laboratory* - EUA);
- UPC (*Universitat Politècnica de Catalunya* - Espanha).

São estes centros de análise que produzem os mapas do TEC disponibilizados pelo IGS, cada qual com suas estratégias, porém todas utilizando os dados GPS e GLONASS das estações ativas do IGS.

No modelo do CODE, o TEC é modelado por uma expansão em harmônicos esféricos até 12 graus e ordem 8, referido a uma estrutura de referência geomagnética solar. Os 12 parâmetros da ionosfera, a cada 2 horas, são obtidos a partir de medidas da fase da portadora da rede global do IGS (AIUB, 2008);

Para a ESA, a ionosfera é modelada por um modelo bi-dimensional considerando a ionosfera como uma camada única, bem como um modelo baseado no perfil 3-D de Chapman, com uma integração vertical usando uma função exponencial do tipo Gauss (ESA, 2008);

No JPL, a ionosfera é modelada numa estrutura de referência geomagnética solar usando *splines* bicúbicas num *grid* esférico. O filtro de Kalman é usado para resolver, simultaneamente, a tendência instrumental L1-L2 e o atraso vertical nos pontos de um *grid* ionosférico. Os parâmetros são modelados como um processo estocástico e os arquivos são gerados a cada hora (JPL, 2008);

Na UPC usa-se um modelo tomográfico estocástico e a ionosfera é dividida em duas camadas. As altitudes limites são de 59-739 km e de 739-1419 km (UPC, 2008).

Desde meados de dezembro de 2002, para cada dia, os arquivos IONEX produzidos por cada um dos centros de análise são combinados para resultar em um único arquivo IONEX, ou seja, em um único arquivo global do VTEC. Os arquivos IONEX de cada centro de análise, bem como os arquivos combinados, são disponibilizados pelo IGS no seguinte endereço: <ftp://cddisa.gsfc.nasa.gov.br>.

3. METODOLOGIA

A metodologia foi executada em dois conjuntos de experimentos. O primeiro conjunto de experimentos refere-se à geração de mapas do VTEC para a região brasileira em uma série temporal (2004 - 2008), considerando os dias com atividade geomagnética classificada como calma, e o segundo experimento, refere-se ao processamento do posicionamento por ponto preciso – PPP da estação VICO referente aos meses das quatro estações (solstícios e equinócios) dos anos de 2004 e 2008 com a correção da ionosfera, a partir dos arquivos IONEX, com a finalidade de reduzir o erro ionosférico. Em ambos os experimentos, considerando-se a variação do VTEC diária, mensal, sazonal e de ciclo de manchas.

3.1 Primeiro Experimento - Mapas horários médios mensais de VTEC

Os dados brutos foram obtidos das estações da rede IGS (*International GNSS Service*); disponibilizados no formato IONEX (*IONosphere map EXchange format*), com os valores de VTEC sendo fornecidos com resolução espacial de 5° e 2,5° em longitude e latitude, respectivamente, e resolução temporal de 2 horas. Estes dados são referentes aos valores de VTEC finais combinados do IGS (IGSG) com disponibilidade de 11 dias.

A Tabela 09 apresenta o cabeçalho do arquivo IONEX com várias descrições informações, tais como: data, início e fim dos dados, número de estações e satélites envolvidos etc. Já a Tabela 10 ilustra os valores do VTEC na escala de 10 vezes a sua magnitude real, para cada latitude e longitude especificada.

Tabela 9. Cabeçalho do arquivo IONEX referente ao final combinado (IGSG).

1.0	IONOSPHERE MAPS	MIX	IONEX VERSION / TYPE	
cmprmb v1.2	gAGE/UPC	30-jan-08 12:34	PGM / RUN BY / DATE	
ionex file containing IGS COMBINED Ionosphere maps		COMMENT		
global ionosphere maps for day 015, 2008		DESCRIPTION		
IONEX file containing the COMBINED IGS TEC MAPS and DCBs		DESCRIPTION		
IONEX files of the following IAACs were combined:		cod	DESCRIPTION	
		esa	DESCRIPTION	
		jpl	DESCRIPTION	
		upc	DESCRIPTION	
Contact address (e-mail): manuel@mat.upc.es		DESCRIPTION		
2008	1	15	0 0 0	EPOCH OF FIRST MAP
2008	1	16	0 0 0	EPOCH OF LAST MAP
7200	INTERVAL			
13	# OF MAPS IN FILE			
COSZ	MAPPING FUNCTION			
0.0	ELEVATION CUTOFF			
combined TEC calculated as weighted mean of input TEC values		OBSERVABLES USED		
321	# OF STATIONS			
30	# OF SATELLITES			
6371.0	BASE RADIUS			
2	MAP DIMENSION			
450.0	450.0	0.0	HGT1 / HGT2 / DHGT	
87.5	-87.5	-2.5	LAT1 / LAT2 / DLAT	
-180.0	180.0	5.0	LON1 / LON2 / DLON	
-1	EXPONENT			
TEC values in 0.1 tec units; 9999, if no value available		COMMENT		
DCB values in nanoseconds, reference is Sum_of_SatDCBs = 0		COMMENT		

Tabela 10. Dados do VTEC do arquivo IONEX (IGSG).

1	START OF TEC MAP														
2008	1	15	0	0	0	EPOCH OF CURRENT MAP									
87.5-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	32	32	32	32	32	31
31	31	31	30	30	30	30	30	30	30	29	29	29	29	29	29
29	28	29	29	29	29	29	29	29	29	29	30	30	30	30	31
31	31	31	32	32	32	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
33	33	33	33	33	33	33	33	33	33						
85.0-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
34	34	34	35	34	34	34	34	34	33	33	32	32	32	31	31
30	30	29	29	28	27	27	26	25	25	25	25	25	24	25	25
25	25	25	26	26	27	27	27	27	28	28	29	29	30	30	31
31	30	31	31	31	32	31	32	32	32	33	33	33	33	33	33
33	33	33	33	33	34	34	34	34							
82.5-180.0	180.0	5.0	450.0	LAT/LON1/LON2/DLON/H											
36	37	36	37	37	37	36	36	36	35	35	34	33	33	32	31
30	29	28	27	26	25	24	23	23	22	22	22	22	22	23	23
23	23	24	24	24	25	26	26	27	27	27	27	28	29	29	30
30	31	31	31	31	31	31	32	32	32	32	32	32	32	32	32
32	32	32	33	33	34	34	35	36							

Esses dados são selecionados de acordo com a região de interesse, neste caso, a região que envolve todo o território brasileiro, definido pelo retângulo envolvente na Figura 16. Desta forma, foram considerados os valores do VTEC da grade referente ao território brasileiro.

Para a seleção destes dados, ou seja, latitude, longitude e VTEC foi utilizada uma rotina desenvolvida pelo autor, que gera a partir do arquivo bruto do IGS, 12 arquivos (.dat) referentes as horas (0, 2, 4, 6, ..., 22) com 3 colunas referentes a latitude, longitude e valor do VETC respectivamente, de acordo com a Tabela 11.

Tabela 11. Dados da latitude, longitude e VTEC obtidos pela rotina.

Latit (°)	Longit (°)	VTEC (tecu)
5.00000	-75.00000	25.300
5.00000	-70.00000	25.800
5.00000	-65.00000	26.200
5.00000	-60.00000	26.900
5.00000	-55.00000	27.700
5.00000	-50.00000	27.700
5.00000	-45.00000	27.400
5.00000	-40.00000	26.800
5.00000	-35.00000	26.100
5.00000	-30.00000	25.400
2.50000	-75.00000	28.400
2.50000	-70.00000	28.900
2.50000	-65.00000	29.200
2.50000	-60.00000	29.900
2.50000	-55.00000	30.500
2.50000	-50.00000	30.100
2.50000	-45.00000	29.000
2.50000	-40.00000	27.900
2.50000	-35.00000	26.900
2.50000	-30.00000	26.000
.00000	-75.00000	30.100
.00000	-70.00000	30.800
.00000	-65.00000	31.000
.00000	-60.00000	31.600

Visou-se a elaboração de mapas médios mensais. Para tanto, foram escolhidos os seis dias de cada mês com base na atividade geomagnética (verificando-se o índice Ap diário), que correspondem aos seis dias com menor atividade geomagnética, ou seja, buscou-se estudar o comportamento do TEC em períodos com atividade geomagnética calma, a fim de evitar dias com influência de tempestades geomagnéticas. Esses dias podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12. Relação dos 6 (seis) menores índices Ap de cada mês em 2004.

2004												
Data	8/jan	12/jan	14/jan	21/jan	29/jan	31/jan	8/fev	10/fev	17/fev	20/fev	25/fev	26/fev
Ap	7	9	12	14	9	10	4	6	4	4	6	3
Data	5/mar	6/mar	7/mar	8/mar	24/mar	25/mar	1/abr	14/abr	20/abr	22/abr	27/abr	29/abr
Ap	5	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4
Data	9/mai	16/mai	17/mai	18/mai	25/mai	27/mai	12/jun	22/jun	23/jun	24/jun	25/jun	27/jun
Ap	5	4	4	4	4	4	3	2	3	3	3	3
Data	4/jul	6/jul	7/jul	8/jul	9/jul	21/jul	3/ago	4/ago	8/ago	19/ago	24/ago	25/ago
Ap	5	5	3	2	4	4	3	3	3	4	3	4
Data	3/set	4/set	10/set	11/set	12/set	26/set	1/out	7/out	17/out	23/out	26/out	28/out
Ap	2	2	2	2	2	3	3	2	2	2	1	2
Data	2/nov	5/nov	6/nov	15/nov	18/nov	19/nov	2/dez	3/dez	4/dez	19/dez	20/dez	24/dez
Ap	4	4	1	2	2	4	4	3	0	3	4	3

Tabela 13. Relação dos 6 (seis) menores índices Ap de cada mês em 2008.

2008												
Data	2/jan	3/jan	4/jan	11/jan	22/jan	30/jan	5/fev	6/fev	9/fev	22/fev	24/fev	26/fev
Ap	2	2	2	3	2	2	4	4	4	4	4	4
Data	4/mar	6/mar	7/mar	24/mar	25/mar	31/mar	1/abr	2/abr	3/abr	11/abr	14/abr	20/abr
Ap	3	3	2	3	3	4	4	1	2	5	2	4
Data	9/mai	13/mai	15/mai	17/mai	18/mai	27/mai	4/jun	5/jun	9/jun	10/jun	13/jun	22/jun
Ap	3	3	2	1	2	3	3	2	3	2	2	3
Data	2/jul	3/jul	7/jul	8/jul	19/jul	25/jul	2/ago	5/ago	15/ago	24/ago	26/ago	30/ago
Ap	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Data	11/set	12/set	13/set	21/set	24/set	29/set	8/out	9/out	18/out	24/out	25/out	27/out
Ap	2	1	0	2	2	2	1	0	1	1	1	1
Data	3/nov	6/nov	11/nov	13/nov	21/nov	22/nov	1/dez	2/dez	9/dez	14/dez	21/dez	29/dez
Ap	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1

Os mapas horários médios mensais do VTEC (12 mapas por mês) foram gerados no *software* Surfer 8.0, utilizando os arquivos de saída da rotina (média mensal), que contém valores de VTEC dos pontos da malha do IGS. Para a conclusão destes mapas foi utilizado o método de interpolação por Krigagem, devido sua dependência espacial, para uma malha de 1° de latitude x 1° de longitude como ilustra a Figura 14 através das isolinhas do VTEC. Mais detalhes sobre esse método de interpolação pode ser encontrado em Isaaks e Srivastava (1989).

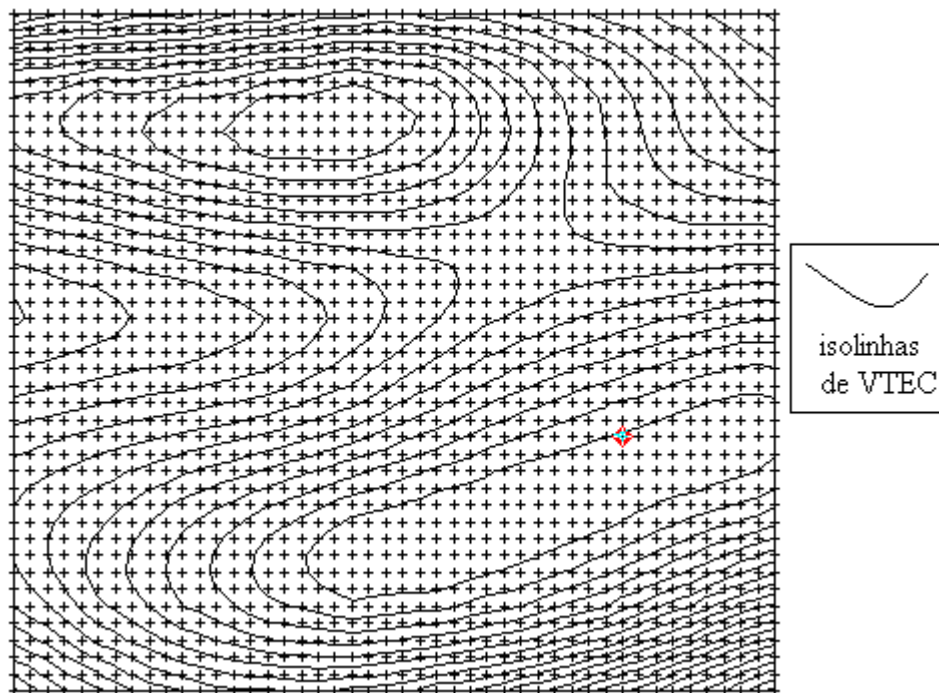


Figura 14. Malha interpolada de 1° x 1° do território brasileiro (krigagem).

Pela Figura 14 pode-se observar que o parâmetro variável são os valores do VTEC dentro da malha interpolada.

Os mapas encontram-se disponibilizados nos resultados de acordo com o quadro explicativo na Figura 15.

MÊS/ANO 00 TU	MÊS/ANO 02 TU	MÊS/ANO 04 TU
MÊS/ANO 06 TU	MÊS/ANO 08 TU	MÊS/ANO 10 TU
MÊS/ANO 12 TU	MÊS/ANO 14 TU	MÊS/ANO 16 TU
MÊS/ANO 18 TU	MÊS/ANO 20 TU	MÊS/ANO 22 TU

Figura 15. Disposição dos mapas nos resultados.

3.2 Segundo Experimento - Posicionamento por ponto preciso da estação VICO

Os arquivos de observação foram obtidos da estação VICO da rede RBMC no site oficial do IBGE, com acesso livre, disponibilizados no formato RINEX (*Receiver INdependent EXchange format*) de acordo com a Tabela 14.

Para o processamento foi utilizado o *software* PPP *on-line* fornecido pelo GSD (*Geodetic Survey Canada*) do NRCan (*Natural Resource Canadá*), denominado CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System – Precise Point Precise*), pois ele processa observações GPS de uma ou duas frequências, operando no método estático ou cinemático, segundo Tétreault *et al.*, (2005). A acurácia obtida por este processamento está baseada na utilização dos produtos IGS, sendo: órbitas, relógio e mapas da ionosfera (somente no processamento por código). Este software possibilita a obtenção do processamento preciso submetendo dados de somente uma estação, e é considerado equivalente ao processamento diferencial GPS.

Os dados usados neste processamento com o *software* CSRS-PPP foram o código C/A na portadora L1, sendo solicitados dados da ionosfera (IONEX) para corrigir os atrasos ionosféricos de primeira ordem.

Tabela 14. Arquivo de observação RINEX original da estação VICO-RBMC (IBGE).

```

4 L1 C1 L2 P2 # / TYPES OF OBSERV
15.0000 INTERVAL
CODIGO: 91696 Estacao: Vicoso COMMENT
2008 9 27 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
08 9 27 0 0 0.0000000 0 18G 7G 8G10G11G13G17G19G23G25G27G28R 4
R13R14R15R17R23R24
-15271266.279 7 22502562.469 7 -11863147.445 9 22502557.18048
-18160092.041 7 21833436.508 7 -13118953.27648 21833432.16848
-12554995.166 6 22782664.367 6 -9306763.39247 22782660.43047
-754069.047 3 25416651.586 3
-17624485.237 6 21912028.336 6 -13104012.37048 21912023.86348
-11381145.754 6 23176691.188 6 -8842808.569 9 23176686.46947
-3450921.424 5 24531024.547 5 -2453736.00946 24531016.48046
-3666203.319 5 24473575.055 5 -1923339.05146 24473567.34846
-13802243.760 6 23176545.062 6 -10437518.64447 23176539.95747
-21754310.429 7 21495332.359 7 -16509922.18748 21495327.25848
-28344174.619 7 20257078.023 7 -21947290.49249 20257072.12549
-15878051.393 7 20809449.594 7 -12330624.656 9 20809453.504 9
-1412269.455 4 23946819.211 4 -1080736.558 7 23946825.418 7
-13507134.196 7 21678510.727 7 -10489794.482 9 21678517.977 9
-11318951.587 7 22236040.734 7 -8776603.499 8 22236046.473 8
-15095637.671 7 21182188.352 7 -11724477.665 9 21182192.656 9
-1350116.176 1 23947024.906 1 -1041037.853 7 23947030.777 7
-15952173.494 8 20859650.922 8 -12384281.760 9 20859655.699 9
08 9 27 0 0 15.0000000 0 18G 7G 8G10G11G13G17G19G23G25G27G28R 4
R13R14R15R17R23R24

```

Como o intuito foi deixar somente as observações L1 e C1 do sistema GPS, houve a necessidade de retirar todas as observações *Glonass* do arquivo de observação original utilizando o *software* TEQC no *prompt MS-DOS*, aplicando o seguinte comando:

TEQC -R (arquivo de entrada) > (arquivo de saída).

Este arquivo de saída pode ser visualizado na Tabela 15.

Tabela 15. Arquivo de observação GPS da estação VICO-RBMC (IBGE).

```

4 L1 C1 L2 P2 # / TYPES OF OBSERV
15.0000 INTERVAL
MSXP|IAx86-PII|bcc32 5.0|MSWin95->XP|486/DX+ COMMENT
teqc 2007Jun25 RBMC 20080928 09:08:12UTCOMMENT
CODIGO: 91696 Estacao: Vicosa COMMENT
teqc edited: all GLONASS satellites excluded COMMENT
2008 9 27 0 0 0.0000000 GPS TIME OF FIRST OBS
END OF HEADER
08 9 27 0 0 0.0000000 0 11G 7G 8G10G11G13G17G19G23G25G27G28
-15271266.279 7 22502562.469 7 -11863147.445 9 22502557.18048
-18160092.041 7 21833436.508 7 -13118953.27648 21833432.16848
-12554995.166 6 22782664.367 6 -9306763.39247 22782660.43047
-754069.047 3 25416651.586 3
-17624485.237 6 21912028.336 6 -13104012.37048 21912023.86348
-11381145.754 6 23176691.188 6 -8842808.569 9 23176686.46947
-3450921.424 5 24531024.547 5 -2453736.00946 24531016.48046
-3666203.319 5 24473575.055 5 -1923339.05146 24473567.34846
-13802243.760 6 23176545.062 6 -10437518.64447 23176539.95747
-21754310.429 7 21495332.359 7 -16509922.18748 21495327.25848
-28344174.619 7 20257078.023 7 -21947290.49249 20257072.12549

```

A partir do arquivo com somente as observações GPS, retirou-se as observações L2 e P2, utilizando o mesmo *software* TEQC no *prompt MS-DOS*, aplicando outro comando:

TEQC -O.obs L1+C1(arquivo de entrada) > (arquivo de saída).

Este arquivo contendo somente as observáveis L1 e C1 do sistema GPS pode ser observado na Tabela 16.

Tabela 16. Arquivo de observação GPS (L1 e C1) da estação VICO.

2	L1	C1	# / TYPES OF OBSERV
15.0000			INTERVAL
MSXP IAx86-PII bcc32 5.0 MSWin95->XP 486/DX+			COMMENT
teqc	2008Oct2	20090117 04:25:56	UTCCOMMENT
teqc	2007Jun25	RBMC	20080928 09:08:12
CODIGO: 91696 Estacao: Vicoso			COMMENT
teqc edited: all GLONASS satellites excluded			COMMENT
2008	9	27 0 0	0.000000 GPS
			TIME OF FIRST OBS
			END OF HEADER
08	9	27 0 0	0.000000 0 11G 7G 8G10G11G13G17G19G23G25G27G28
-15271266.279	7	22502562.469	7
-18160092.041	7	21833436.508	7
-12554995.166	6	22782664.367	6
-754069.047	3	25416651.586	3
-17624485.237	6	21912028.336	6
-11381145.754	6	23176691.188	6
-3450921.424	5	24531024.547	5
-3666203.319	5	24473575.055	5
-13802243.760	6	23176545.062	6
-21754310.429	7	21495332.359	7
-28344174.619	7	20257078.023	7

Para realizar o posicionamento por ponto preciso, os dados foram processados no *software PPP-online (Precise Point Positioning online)* desenvolvido pelo GSD (*Geodetic Survey Division*) do NRCan (*Natural Resources Canada*).

O *PPP-online* pode ser acessado no seguinte endereço eletrônico: http://www.geod.nrcan.gc.ca/software/gpspace_e.php.

Esse *software* possibilita realizar o posicionamento por ponto preciso utilizando pseudodistâncias. No processamento utilizaram-se, como observáveis, as pseudodistâncias advindas do código C/A em L1, coletadas de satélites sem nenhuma máscara de elevação. As posições foram estimadas a cada 15 segundos. Para esta análise foram comparadas as coordenadas médias estimadas de cada dia com a coordenada conhecida da estação VICO a partir do descritivo (IBGE), ver Anexo 1.

Os processamentos PPP dos dados acima apresentados foram realizados a partir das efemérides precisas finais fornecidas pelo IGS. A Tabela 17 apresenta a qualidade das efemérides disponibilizadas pelo IGS.

Tabela 17. Tipos de efemérides precisas fornecidas pelo IGS.

Efemérides		Acurácia	Disponibilidade	Intervalo
Ultra Rápida	Órbitas	~160 cm	3 horas	15 min
	Relógios	~7 ns		
Rápida	Órbitas	< 5 cm	17 horas	15 min
	Relógios	~0,2 ns		5 min
Final	Órbitas	< 5 cm	~13 dias	15 min
	Relógios	< 0,1 ns		5 min

Fonte: adaptado do IGS (<http://igsb.jpl.nasa.gov/components/products.html>).

Para o processamento referente ao ano de 2004, o NRCan disponibilizou as coordenadas em ITRF2000. Como as coordenadas da estação VICO (RBMC) estão no SIRGAS2000 (Época 2000,4), não houve a necessidade de transformar esses sistemas para avaliar a acuracidade, pois estes dois sistemas são compatíveis para fins práticos e a realização do SIRGAS2000 é uma densificação regional do ITRF.

Já para o processamento referente ao ano de 2008, o NRCan disponibilizou as coordenadas no ITRF2005. Para avaliar a acurácia dessas coordenadas em relação a VICO (RBMC), houve a necessidade de transformar as coordenadas da estação para o ITRF2005 também, sendo esta, a última realização do ITRF.

Para transformar as coordenadas X, Y, Z em ITRF2000 para X_S, Y_S, Z_S em ITRFyy para a data de referência, neste caso ITRF2005, segue-se o seguinte modelo dado pela Equação (36), de acordo com Boucher *et al.* (2004).

$$\begin{bmatrix} X_S \\ Y_S \\ Z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D & -R_3 & R_2 \\ R_3 & D & -R_1 \\ -R_2 & R_1 & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (36)$$

Os parâmetros de transformação, de translação, envolvidos $T_1, T_2,$ e T_3 são as coordenadas da origem do ITRF2000 na rede ITRFyy para a época t_0 de referência. R_1, R_2, R_3 são os parâmetros de rotação para a época t_0 em milionésimos de segundos em torno dos eixos X, Y, Z da rede ITRF2000, respectivamente. O parâmetro D é o fator diferencial de escala expresso em partes por bilhão (ppb) para a época t_0 . Para

um parâmetro P , este deve ser atualizado conforme a Equação (37), onde t e t_0 são as datas para qual se deseja atualizar o parâmetro e a época de referência em anos, respectivamente.

$$P(t) = P(t_0) + \dot{P} \cdot (t - t_0) \quad (37)$$

A Tabela 18 apresenta os valores dos parâmetros de transformação de coordenadas do ITRF2005 para ITRF2000, retirados da página do IERS em http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/tp_05-00.php.

Tabela 18. Parâmetros de transformação e suas taxas do ITRF2005 para o ITRF2000.

Parâmetro	T₁	T₂	T₃	D	R₁	R₂	R₃	t₀
Unidade	mm	mm	mm	ppb	ms	ms	ms	
Taxa de Variação	\dot{T}_1	\dot{T}_2	\dot{T}_3	\dot{D}	\dot{R}_1	\dot{R}_2	\dot{R}_3	
Unidade	mm/ano	mm/ano	mm/ano	ppb/ano	ms/ano	ms/ano	ms/ano	ano
ITRF2000	0,1	-0,8	-5,8	0,40	0,000	0,000	0,000	
Taxa, Var.	-0,2	0,1	-1,8	0,08	0,000	0,000	0,000	2000,0

Mais detalhes sobre o ITRF e sistemas de referência, pode-se consultar Monico (2000) e Boucher *et al.* (2004).

3.3 Local de estudo

A área de estudo referente ao primeiro experimento está localizada na América do Sul, abrangendo em destaque o território brasileiro.

A área está delimitada pelo seguinte retângulo envolvente (Coordenadas Geodésicas), como pode ser observado na Figura 16:

Canto superior direito: $05^{\circ}00'00''\text{N}$ e $30^{\circ}00'00''\text{W}$;

Canto inferior esquerdo: $35^{\circ}00'00''\text{S}$ e $75^{\circ}00'00''\text{W}$.

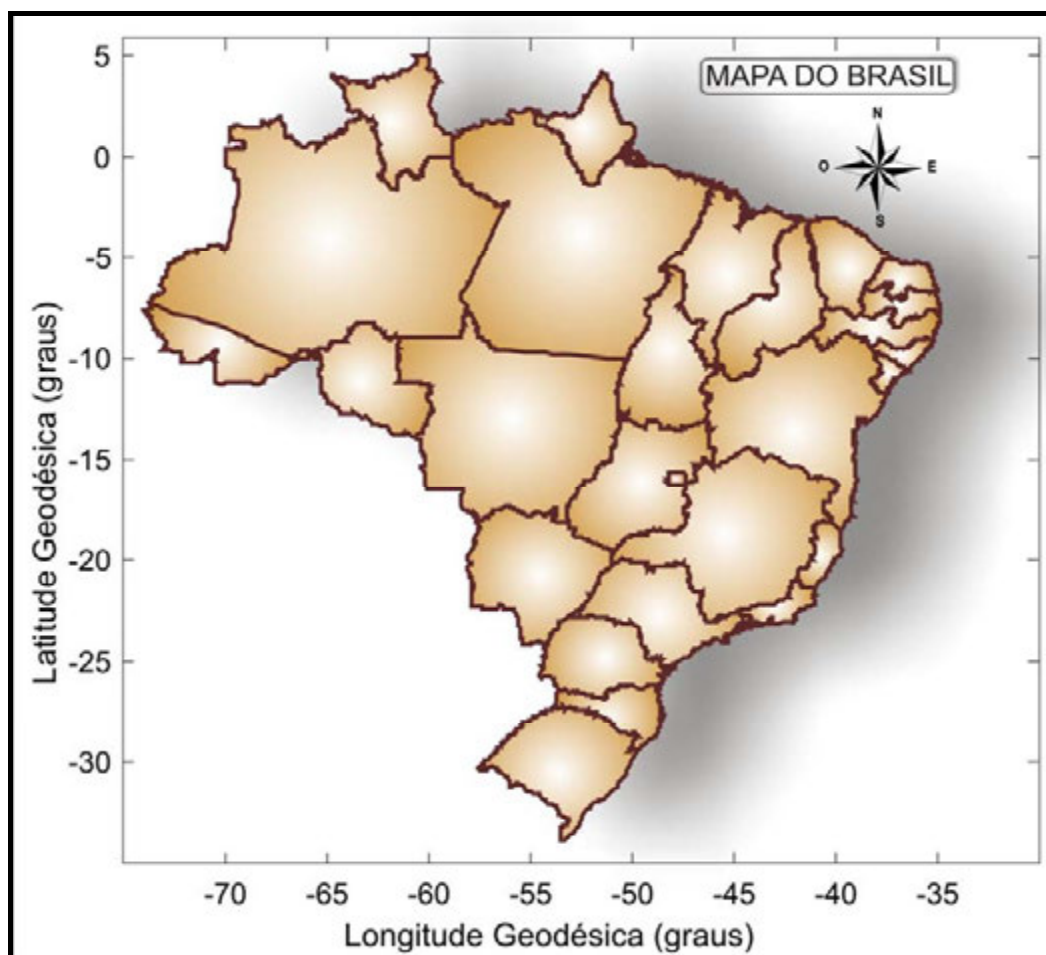


Figura 16. Mapa de localização da área em estudo

A área de estudo referente ao segundo experimento está localizada no Campus da Universidade Federal de Viçosa (UFV) – Minas Gerais.