

# GERAÇÃO DE VRS A PARTIR DE MODELOS ATMOSFÉRICOS: CONCEITO, IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

*Generating a VRS Using Atmospheric Models: Concept, Implementation and Results*

DANIELE BARROCA MARRA ALVES  
JOÃO FRANCISCO GALERA MONICO  
LUIZ FERNANDO ANTONIO DALBELO

Faculdade de Ciências e Tecnologia – UNESP  
R. Roberto Simonsen 305, 19060 900 - Presidente Prudente – São Paulo  
[danibarroca@yahoo.com.br](mailto:danibarroca@yahoo.com.br); [galera@fct.unesp.br](mailto:galera@fct.unesp.br); [lfdalbelo@gmail.com](mailto:lfdalbelo@gmail.com)

## RESUMO

Atualmente, com a implantação das redes de estações de referência GNSS (*Global Navigation Satellite System*), diversas técnicas de posicionamento têm sido desenvolvidas e/ou melhoradas. Utilizando os dados dessa rede é possível modelar os erros GNSS dependentes da distância e calcular parâmetros de correção para a região de abrangência da mesma. Diversos métodos têm sido desenvolvidos para formular os parâmetros de correção a partir dos dados de uma rede de estações de referência. Um método que tem se destacado é o que utiliza o conceito de VRS (*Virtual Reference Station*). A idéia é que os dados da VRS se assemelhem tanto quanto possível com aqueles provenientes de um receptor real colocado no mesmo local. Assim, o usuário tem a possibilidade de utilizar a VRS como se ela fosse uma estação real existente em suas proximidades, e pode realizar o posicionamento relativo com um receptor de simples frequência. Neste artigo é descrita uma metodologia diferenciada que foi utilizada para implementar o conceito de VRS, utilizando modelos atmosféricos desenvolvidos por pesquisadores brasileiros. Além disso, são apresentados experimentos que avaliam a qualidade da VRS gerada, mostrando a eficiência do método proposto.

**Palavras chaves:** RTK em Rede; VRS; Modelos Atmosféricos.

## ABSTRACT

Nowadays, with the implantation of GNSS (Global Navigation Satellite System) reference station networks, several positioning techniques have been developed and/or improved. Using such kind of network data it is possible to model the GNSS distance dependent errors and to compute correction terms for the network region. Several methods have been developed to formulate the corrections terms from network stations data. A method that has been received a great attention is the Virtual Reference Station (VRS). The idea is that the VRS data resemble as much as possible a real receiver data placed in the same local. Therefore, the user has the possibility of using the VRS as if it were a real reference station in your proximities, and to accomplish the relative positioning with a single frequency receiver. In this paper it is described a different methodology applied to implement the VRS concept, using atmospheric models developed by Brazilian researchers. Besides, experiments for evaluating the quality of generated VRS are presented, showing the efficiency of the proposed method.

**Keywords:** Network RTK; VRS; Atmospheric Models.

## 1. INTRODUÇÃO

A implantação das redes de estações de referência GNSS viabiliza o desenvolvimento e/ou aprimoramento de técnicas de posicionamento que possibilitam ao usuário uma maior acurácia e produtividade. Isso ocorre pois quando se utiliza dados de diversas estações de referência é possível modelar os erros dependentes da distância e calcular os parâmetros de correção da rede.

Nos últimos anos, diversos métodos vêm sendo desenvolvidos para formular correções a partir dos dados de uma rede de estações de referência. Os principais métodos são: algoritmos de derivadas parciais (WÜBBENA, 1996; FOTOPOULOS, 2000; VARNER, 2000), algoritmos de interpolação (GAO and LI, 1998; ODIJK, 2000), algoritmo de ajustamento condicional (RAQUET, 1998; FORTES, 2002; FOTOPOULOS e CANNON, 2000) e estação de referência virtual (ZHANG and ROBERTS, 2003; van der MAREL, 1998; HU et al., 2003; RETSCHER, 2002; SEJAS et al., 2003). Uma descrição detalhada desses métodos é realizada em Alves et al. (2005).

Os três primeiros métodos se concentram na geração de correções da fase da onda portadora, o que requer mudanças no *software* que o usuário utiliza para realizar o posicionamento, enquanto o último método gera uma estação virtual próxima ao usuário, que é compatível com o *software* por ele utilizado. Portanto, nesse trabalho, optou-se por investigar o conceito de VRS, o qual pode ser muito útil no Brasil.

Para gerar os dados de uma VRS utilizando uma rede de estações de referência, uma das principais e mais complexas etapas diz respeito a solução do vetor de ambigüidades. No entanto, neste trabalho, uma metodologia diferenciada é

utilizada para gerar os dados da VRS, onde a solução do vetor das ambigüidades não é realizada. A VRS é gerada utilizando apenas correções geométricas e atmosféricas (refração troposférica e efeito ionosférico).

Em se tratando do erro devido á refração troposférica, as correções são obtidas utilizando o modelo de Previsão Numérica do Tempo (PNT), denominado modelagem dinâmica, desenvolvido para a América do Sul (SAPUCCI et al., 2003; SAPUCCI et al., 2006) (seção 4.1) por pesquisadores da FCT/UNESP e CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos/ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). No que concerne a ionosfera, é utilizado o modelo desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP denominado Mod\_Ion\_FK (CAMARGO, 1999; CAMARGO et al., 2000; AGUIAR, 2005) (seção 4.2).

Portanto, nesse artigo é descrito o método utilizado para gerar a VRS utilizando um *software* científico que está sendo desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP (ALVES, 2007), bem como os modelos envolvidos. Além disso, são apresentados os experimentos e análises realizadas com o objetivo de avaliar a qualidade do método proposto.

## 2. REDES DE ESTAÇÕES DE REFERÊNCIA GNSS

O conceito de rede de estações de referência GNSS foi desenvolvido devido á necessidade de uma melhor disponibilidade, acurácia e confiabilidade no posicionamento e navegação (ALVES, AHN e LACHAPELLE, 2003).

Diversas vantagens podem ser obtidas com a utilização de uma rede de estações de referência GNSS. Uma delas é a possibilidade de se realizar uma modelagem dos erros dependentes da distância ou espacialmente correlacionados, como o efeito ionosférico e a refração troposférica, dentro da área de abrangência da rede. Uma outra vantagem diz respeito à distância entre o usuário e a estação de referência, pois quando se utiliza um único receptor de referência a distância entre o receptor móvel e o de referência é muito limitada (ALVES, 2007).

O número de estações de uma rede pode variar de três estações até dezenas ou centenas delas. A distância entre as estações pode variar de poucos quilômetros a dezenas de quilômetros ou mais (OMAR e RIZOS, 2003).

No Brasil, tem-se disponível a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo) (FORTES, 1997), a RIBaC (Rede Inera de Bases Comunitárias do GPS) (INCRA, 2007), a rede do Oeste do Estado de São Paulo ([http://gege.prudente.unesp.br/index\\_port.php?p=50](http://gege.prudente.unesp.br/index_port.php?p=50)), além de várias estações contínuas de empresas revendedoras de receptores GPS. Além disso, a RBMC está sendo modernizada através de uma parceria com o INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). Essa modernização diz respeito a troca de alguns receptores antigos por receptores modernos (estação de referência GNSS) e instalação de novas estações de referência em locais a serem definidos.

Espera-se, que num futuro breve, serviços gratuitos possam ser fornecidos aos usuários utilizando dados das redes de estações de referência, apoiando, por exemplo, o georreferenciamento de imóveis rurais. Portanto, técnicas de posicionamento utilizando dados de redes de estações de referência devem ser desenvolvidas e/ou melhoradas. Pesquisas nesse sentido vêm sendo desenvolvidas na FCT/UNESP, como o DGPS em rede (DALBELO, 2007) e o RTK em rede utilizando o conceito de VRS, descrito nesse artigo.

### 3. VRS

Diversos métodos têm sido desenvolvidos para formular os parâmetros de correção a partir dos dados de uma rede de estações de referência. Um método que tem se destacado é o que utiliza o conceito de VRS (*Virtual Reference Station*).

A idéia desse método é que os dados das diversas estações da rede de estações de referência sejam utilizados para gerar os dados de uma estação próxima ao usuário, denominada VRS. Essa estação não existe fisicamente, mas os seus dados devem se assemelhar tanto quanto possível com aqueles que seriam provenientes de um receptor real colocado no mesmo local. Assim, o usuário tem a possibilidade de utilizar a VRS como se ela fosse uma estação real presente em suas proximidades, e pode realizar o posicionamento relativo com um receptor de simples frequência.

Na concepção original de VRS, primeiramente é necessário solucionar o vetor de ambigüidades para cada linha de base da rede. Posteriormente, são determinadas as correções residuais e geométricas e os dados da VRS são gerados (HU et al., 2003; RETSCHER, 2002). Nesse artigo, é apresentada uma metodologia diferenciada para gerar os dados da VRS. Na metodologia proposta a VRS é gerada utilizando apenas correções geométricas e modelos atmosféricos.

Primeiramente é necessário selecionar a estação de referência da rede mais próxima ao usuário, que será denominada estação base. A partir das observações de fase e pseudodistância da estação base e da magnitude dos erros atmosféricos modelados pelos dados das estações de referência são geradas as observações da estação virtual.

Assim, sendo,

$$\rho_b^s(t) = \|X^s - X_b\|, \quad (1)$$

$$\rho_v^s(t) = \|X^s - X_v\|, \quad (2)$$

onde:

- $\rho_b^s(t)$ ,  $\rho_v^s(t)$  são a distância geométrica entre o satélite e a estação de referência base e a VRS respectivamente (m);
- $t$  é o instante em questão (s);
- $X^s$  é o vetor composto pela posição do satélite (m);

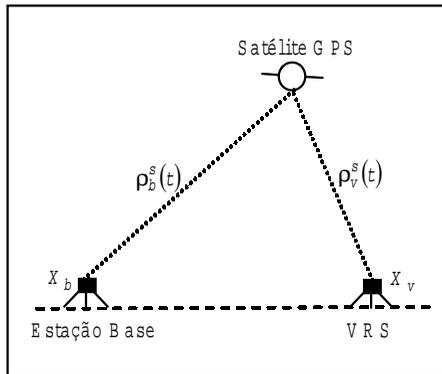
•  $X_b, X_v$  são os vetores compostos pela posição da estação de referência base e VRS, respectivamente (m).

A correção geométrica, que é chamada de deslocamento geométrico (DG), é dada por:

$$\Delta\rho = \rho_v^s(t) - \rho_b^s(t). \quad (3)$$

A Figura 1 ilustra os elementos envolvidos no cálculo do DG para 1 satélite.

Figura 1 – Elementos envolvidos no cálculo do DG

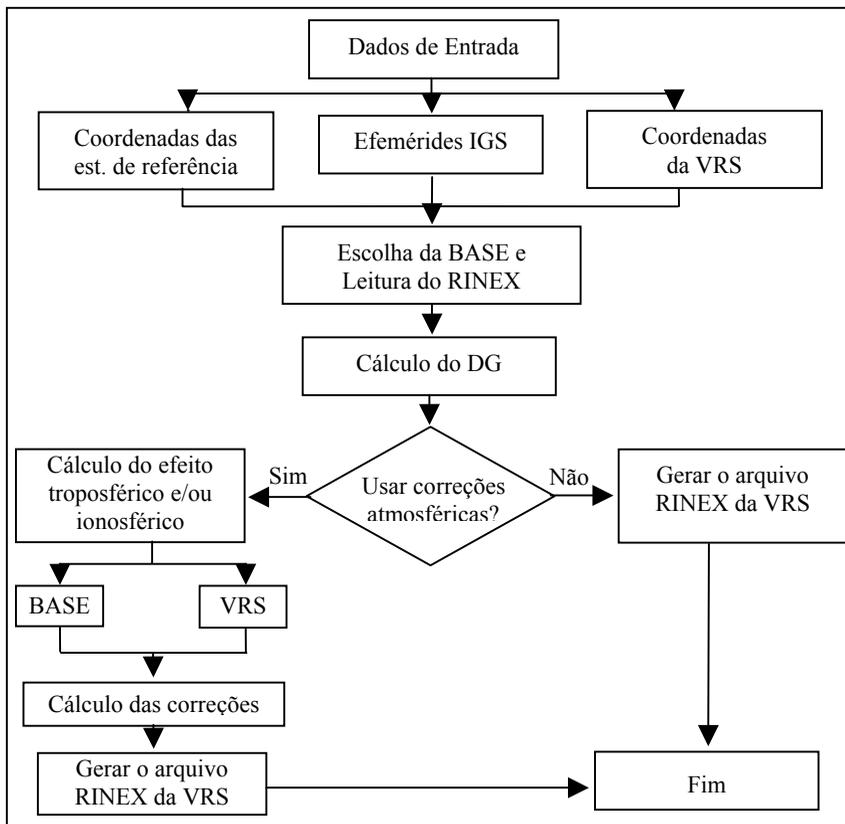


O DG deve ser aplicado a todas as observações da estação base para deslocar as observações de fase e pseudodistância da estação base para a posição da VRS (HU et al., 2003).

Depois que as correções geométricas são aplicadas aos dados originais da estação base, as correções atmosféricas (efeitos ionosféricos e troposféricos – seção 4) geradas pelas estações da rede devem ser acrescentadas aos dados da VRS. A Figura 2 ilustra as principais etapas utilizadas para gerar a VRS.

Como pode ser observado na Figura 2, para gerar a VRS são utilizados como dados de entrada as coordenadas das estações de referência (conhecidas), as órbitas dos satélites fornecidas pelo IGS (*International GNSS Service*) e as coordenadas da VRS (posição aproximada do usuário). Com essas informações é determinada a estação base da rede e em seguida calculados os DG e correções atmosféricas. E, finalmente, os dados da VRS são gerados no formato RINEX. Além disso, a VRS também pode ser gerada sem utilizar as correções atmosféricas. Mas, nesse caso, os testes têm mostrado que a qualidade da VRS é inferior (ALVES et al., 2006b; MONICO et al., 2006).

Figura 2 – Etapas utilizadas para gerar a VRS



#### 4. MODELOS ATMOSFÉRICOS

Nessa seção, são descritos os modelos de ionosfera e troposfera que foram utilizados para gerar a VRS.

##### 4.1. Troposfera

O uso do atraso zenital troposférico ( $Z_{TD}$ ) obtido por modelos de PNT (KINTER et al., 1997) tem se tornado uma boa alternativa para minimizar os efeitos da troposfera no posicionamento GPS. Esse processo é denominado modelagem dinâmica (SAPUCCI et al., 2006). O CPTEC/INPE, localizado em Cachoeira Paulista-SP, possui o único modelo de PNT operacional para a América do Sul. Essa técnica de modelagem já foi explorada por outros pesquisadores e bons

resultados foram obtidos (JENSEN et al., 2003; JUPP et al., 2003; SCHÜLER et al., 2000).

O  $Z_{TD}$  é dividido em duas componentes: úmida ( $Z_{WD}$ ), formada pela influência do vapor d'água, e hidrostática ( $Z_{HD}$ ), formada pela influência dos demais gases que compõem a atmosfera. Os valores do  $Z_{HD}$  são dados pela equação (SPILKER, 1996):

$$Z_{HD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} k_1 R_n \rho dh \quad (3)$$

onde:

$K_1 = 77,60 \text{ KhPa}^{-1}$  é uma constante de refratividade atmosférica;

$R_n = 287,0538 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$  é a constante específica para os gases hidrostáticos;

$\rho$  é a densidade do ar que varia em função da altitude ( $h$ ).

Os valores do  $Z_{WD}$  podem ser obtidos usando a seguinte expressão (SPILKER, 1996):

$$Z_{WD} = 10^{-6} \int_{h_0}^{\infty} (k_2' \frac{e}{T} Z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} Z_w^{-1}) dh, \quad (4)$$

$K_2' = 22,10 \text{ KhPa}^{-1}$  e  $K_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$  são constantes de refratividade atmosférica;

$e$  é a pressão parcial do vapor d'água;

$T$  é a temperatura;

$Z_w^{-1}$  é o inverso da constante de compressibilidade do vapor d'água;

As predições do  $Z_{HD}$  são obtidas aplicando os perfis de temperatura atmosférica e pressão preditos pelo modelo de PNT (para um ponto "A" pertencente a grade do modelo) através de uma integração numérica da equação (3). De forma similar, os valores do  $Z_{WD}$  podem ser obtidos aplicando os perfis de temperatura e umidade gerados pelo modelo de PNT para o mesmo ponto na equação (4). O valor do  $Z_{TD}$  predito para este ponto "A" é obtido adicionando os valores de ambas componentes. Aplicando o mesmo processo para todos os pontos da grade é obtida uma superfície com informações sobre a distribuição espacial da variável. Usando um processo de interpolação é possível obter os valores preditos do  $Z_{TD}$  para qualquer ponto interno a grade.

Os dados fornecidos para previsões do  $Z_{TD}$  obtidos pelo modelo de PNT estão disponíveis na página do CPTEC/INPE:

(<http://satelite.cptec.inpe.br/htmldocs/ztd/zenital.htm>). A página possui um mapa da América do Sul dividida em uma malha de 500 por 500 km, onde cada elemento da malha possui um arquivo com dados do atraso de 100 em 100 km. Os valores de atraso são atualizados duas vezes ao dia. A primeira atualização é realizada entre 7:30 e 8:30 h da manhã, a qual se refere às saídas do modelo das 00:00. A segunda atualização é feita entre 19:30 e 20:30 h e se refere às saídas das 12:00 do modelo

numérico do CPTEC. Para aplicar o atraso na direção receptor-satélite deve ser utilizada uma função de mapeamento. Além disso, para obter os valores do atraso troposférico em uma determinada posição, deve-se realizar uma interpolação bilinear utilizando os valores da grade.

Alves et. al (2006a; 2006b) apresenta comparações realizadas com a VRS gerada utilizando o modelo de PNT (modelagem dinâmica) e o modelo empírico de Hopfield (SEEBER, 2003). Os resultados obtidos com o modelo de PNT apresentaram melhorias de até 19%, mostrando a eficiência da modelagem dinâmica da troposfera.

## 4.2. Ionosfera

A ionosfera é uma das maiores fontes de erro no posicionamento GPS para usuários de receptores de simples frequência. O erro devido a ionosfera depende de várias variáveis, tais como: hora do dia, estação do ano, ciclo solar, localização geográfica do usuário e campo geomagnético terrestre (CAMARGO, 1999).

O modelo de ionosfera utilizado para gerar a VRS nesse trabalho foi desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP. O modelo regional da ionosfera, denominado Mod\_Ion, foi desenvolvido inicialmente por Camargo (1999) e modificado por Matsuoka (2003). O Mod\_Ion foi desenvolvido para aplicações pós-processadas. No entanto, Aguiar (2005) introduziu melhorias ao modelo e gerou a versão em tempo real denominada Mod\_Ion\_FK. Nesse artigo a VRS é gerada utilizando o Mod\_Ion\_FK.

A equação de observação do modelo é baseada na diferença entre as pseudodistâncias nas portadoras L1 e L2 ou pseudodistâncias filtradas pela fase da onda portadora. A equação é dada por (CAMARGO, 1999; CAMARGO et al., 2000):

$$F(P_{2r}^s - P_{1r}^s) = I_{1r}^s + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})_r] + F\varepsilon_{p_{21}}, \quad (5)$$

onde:

- $F = \frac{f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}$ ;
- $P_{1r}^s$  e  $P_{2r}^s$  são as pseudodistâncias para as portadoras L1 e L2 respectivamente, sendo que  $s$  representa o satélite e  $r$  o receptor;
- $I_{1r}^s$  é o atraso ionosférico na portadora L1;
- $S_{p1}^s$  e  $S_{p2}^s$  representam o erro sistemático do hardware do satélite ( $s$ ), nas portadoras L1 e L2, respectivamente;
- $R_{p1}$  e  $R_{p2}$  representam o erro sistemático do hardware do receptor ( $r$ ), nas portadoras L1 e L2, respectivamente;
- $\varepsilon_{p_{21}}$  representa os erros remanescentes.

A equação (5) é utilizada para calcular a correção ionosférica inclinada ( $I_{i,r}^s$ ) na portadora L1, na direção satélite/receptor. Este modelo também possui como incógnitas as diferenças ( $S_{p2}^s - S_{p1}^s$ ) e ( $R_{p2} - R_{p1}$ ) que representam, respectivamente, o erro sistemático interfrequência dos satélites e dos receptores na portadora L1.

O atraso ionosférico pode ser obtido em função do atraso ionosférico vertical  $I_1^v$  utilizando a função de mapeamento geométrica padrão, da seguinte forma:

$$F(P_2^s - P_1^s) = \frac{I_1^v}{\cos(z^{s'})} + F[(S_{p2}^s - S_{p1}^s) + (R_{p2} - R_{p1})] + F\epsilon_{p21}, \quad (6)$$

onde:

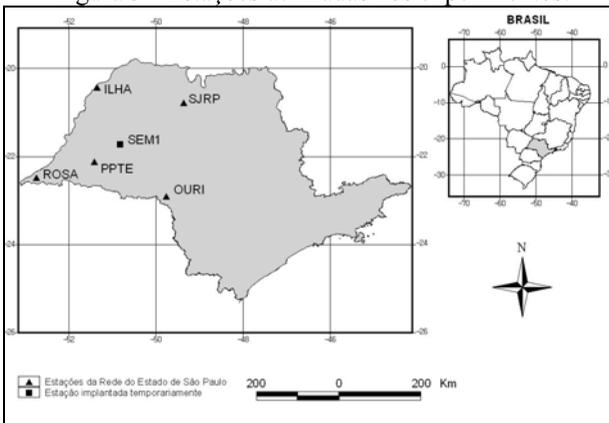
- $z^{s'}$  é o ângulo zenital do satélite.

O Mod\_Ion\_FK foi implementado em FORTRAN Lahey 95 com o objetivo de estimar os parâmetros desconhecidos do modelo e prover correções em tempo real. Os parâmetros são estimados utilizando o filtro de Kalman e o processo de predição de Gauss-Markov. Este modelo apresentou bons resultados no posicionamento por ponto. Portanto, sua eficiência foi testada na geração da VRS.

## 5. RESULTADOS E ANÁLISES

Os dados da VRS foram gerados utilizando a metodologia descrita na seção 2 e os modelos atmosféricos descritos na seção 4. Foram utilizados dados da rede GPS ativa do Oeste do Estado de São Paulo (ILHA, SJRP, ROSA, OURI, PPTE) (<http://gege.prudente.unesp.br/>) e de uma estação adicional coletada na cidade de Parapuã (SEM1) (Figura 3). Os dados foram coletados nos dias 28, 29 e 30 de Dezembro de 2006 (dias 362, 363, 364), 24 horas por dia.

Figura 3 - Estações utilizadas nos experimentos.



A VRS foi gerada utilizando diferentes procedimentos. A Tabela 1 apresenta as siglas que serão utilizadas para cada procedimento.

Tabela 1 – Opções utilizadas para gerar a VRS.

Geometri a	Troposfer a	Ionosfera	Siglas
	---	---	DG
	---	Mod_Ion_F K	DG+MOD
DG		---	DG+PNT
	PNT	Mod_Ion_F K	DG+MOD+PN T

A VRS foi gerada na mesma posição de uma estação real da rede de estações de referência, na posição da estação PPTE (Figura 3). Dessa forma, é possível avaliar os resultados obtidos pela VRS com relação aos resultados de um arquivo real existente na mesma posição.

Para avaliar a eficiência da metodologia proposta para gerar a VRS foi realizado o posicionamento relativo (modo estático e cinemático) e o DGPS (GPS Diferencial). Foram considerados como base a estação PPTE e a VRS gerada, e como móvel a estação OURI. Assim, foram processadas as linhas de base PPTE-OURI e VRS-OURI de aproximadamente 180 km.

### 5.1. Resultados Obtidos no Posicionamento Relativo

Para realizar o posicionamento relativo com as linhas de base PPTE-OURI e VRS-OURI foi utilizado o *software* TGO (Trimble Geomatics Office - versão 1.63) com a observável *Ion-Free*, tanto no modo estático como cinemático.

Para avaliar os resultados, as coordenadas consideradas verdadeiras da estação OURI foram comparadas com as coordenadas estimadas pelo posicionamento relativo.

A Figura 4 apresenta o EMQ (Erro Médio Quadrático) da resultante planimétrica obtido no posicionamento relativo (modo estático) com os dados da estação PPTE e das VRSs geradas (DG, DG+MOD, DG+PNT, DG+MOD+PNT). Já a Figura 5 apresenta o EMQ da resultante altimétrica.

Figura 4 – EMQ para a componente planimétrica obtida no Posicionamento relativo estático

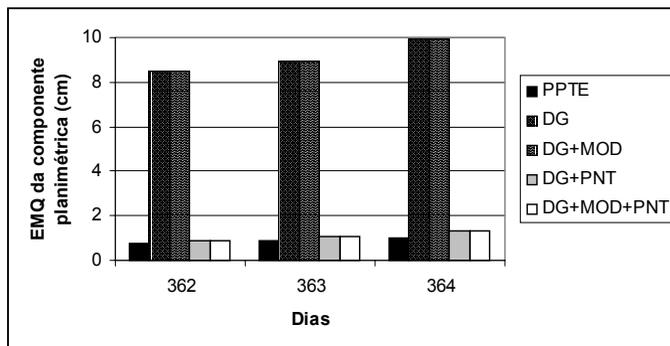
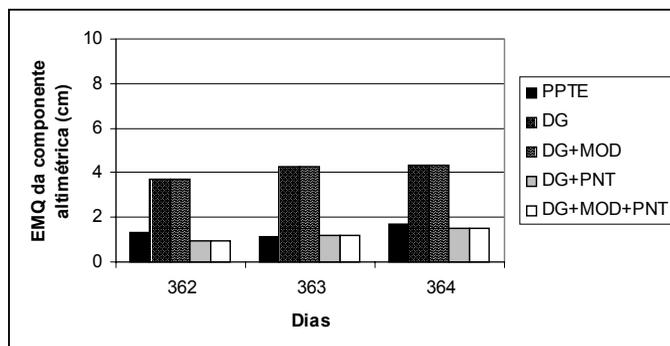


Figura 5 – EMQ para a componente altimétrica obtida no Posicionamento relativo estático



Analisando as Figuras 4 e 5 pode-se perceber que em se tratando da VRS, os valores obtidos pelos modos de processamento DG+PNT e DG+MOD+PNT apresentam os melhores resultados. Além disso, os resultados apresentados pelo arquivo real e os modos de VRS citados são similares. Valores menores do EMQ são obtidos para a componente planimétrica e maiores para a altimétrica.

A tabela 2 apresenta o EMQ resultante e a média para os 3 dias de processamento.

Tabela 2 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo estático (cm)

<b>Dia</b>	<b>PPTE</b>	<b>DG</b>	<b>DG+MOD</b>	<b>DG+PNT</b>	<b>DG+MOD+PNT</b>
<b>362</b>	1,51	9,28	9,28	1,28	1,28
<b>363</b>	1,46	9,89	9,89	1,60	1,60
<b>364</b>	1,96	10,82	10,82	2,01	2,01
<b>Média</b>	<b>1,64</b>	<b>10,00</b>	<b>10,00</b>	<b>1,63</b>	<b>1,63</b>

Como pode ser observado na Tabela 2 os resultados obtidos para os 3 dias de processamento são similares. Além disso, pode-se notar a eficiência da aplicação dos modelos atmosféricos. O RMS que é em média 10 cm com a VRS gerada apenas com correção geométrica (modo DG) é reduzido para 1,63 cm quando são aplicadas as correções atmosféricas (modo DG+MOD+PNT).

No que concerne ao posicionamento relativo no modo cinemático, espera-se que os valores obtidos para o RMS sejam maiores, visto que esses são obtidos a cada época. A Tabela 3 apresenta os valores para esse modo de processamento.

Tabela 3 – EMQ resultante obtido pelo posicionamento relativo cinemático (cm)

<b>Dia</b>	<b>PPTE</b>	<b>DG</b>	<b>DG+MOD</b>	<b>DG+PNT</b>	<b>DG+MOD+PN</b>
<b>362</b>	5,96	21,36	21,34	6,05	6,03
<b>363</b>	5,64	21,48	21,46	5,93	5,93
<b>364</b>	6,99	26,70	26,68	6,25	6,48
<b>Média</b>	<b>6,20</b>	<b>23,18</b>	<b>23,16</b>	<b>6,08</b>	<b>6,15</b>

Observando a Tabela 3 pode-se perceber que, como esperado, a magnitude do EMQ é maior para o modo cinemático. No entanto, com respeito a qualidade da VRS gerada, as mesmas conclusões tomadas para o modo estático podem ser observadas para o cinemático.

Para verificar a variação época por época das coordenadas, a Figura 6 apresenta a discrepância da resultante planimétrica (RP) e da resultante altimétrica (RA) quando é utilizada como base a estação PPTE e a VRS gerada pelo modo DG+MOD+PNT para o dia 362 de 2006.

Figura 6 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

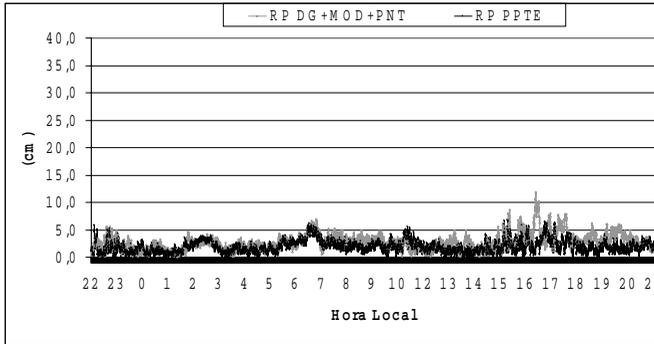
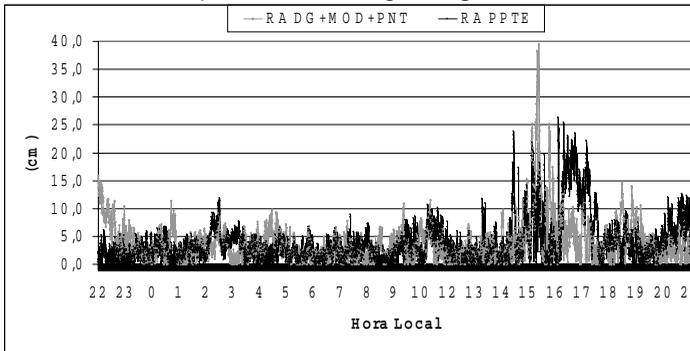


Figura 7 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT



Observando as Figuras 6 e 7 pode-se perceber que o comportamento época por época apresentado pelo arquivo real e pela VRS é similar, tanto para a componente planimétrica como altimétrica, o que reforça os resultados apresentados na Tabela 3.

Algo interessante que também pode ser avaliado está relacionado com o comportamento dos diferentes modos da VRS no processamento cinemático. Para realizar essa análise, são apresentados nas Figuras 8 e 9 os valores das RP e RA para o modo da VRS que utiliza apenas o DG e o DG+MOD+PNT.

Figura 8 – RP obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

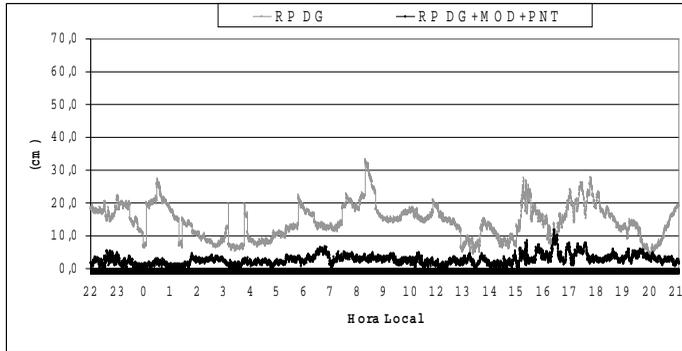
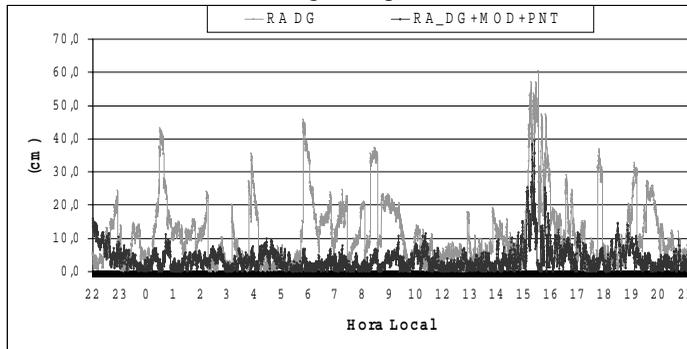


Figura 9 – RA obtida no posicionamento relativo cinemático usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT



Observando as figuras 8 e 9 pode-se perceber que os resultados possuem uma melhoria significativa quando a VRS é gerada com os modelos atmosféricos.

## 5.2. Resultados Obtidos com o DGPS

Para realizar o DGPS com as linhas de base PPTE-OURI e VRS-OURI foi utilizado o *software* desenvolvido por pesquisadores da FCT/UNESP (DALBELO et al., 2005). Para avaliar os resultados, as coordenadas consideradas verdadeiras da estação OURI foram comparadas com as coordenadas estimadas pelo DGPS.

A Tabela 4 apresenta o EMQ médio obtido para as 24 h de dados de cada um dos dias processados.

Tabela 4 – EMQ resultante obtido pelo DGPS (cm)

Dia	PPTE	DG	DG+PN		
			DG+MOD	T	DG+MOD+PNT
<b>362</b>	142,90	156,02	157,89	158,92	162,08
<b>363</b>	149,69	161,88	162,73	165,46	167,43
<b>364</b>	156,23	165,25	165,92	167,70	169,77
<b>Média</b>	<b>149,60</b>	<b>161,05</b>	<b>162,18</b>	<b>164,02</b>	<b>166,43</b>

Observando a Tabela 4 pode-se perceber que a magnitude do erro no DGPS é muito maior se comparado com o posicionamento relativo. Mas isto é esperado, visto que no DGPS é utilizada apenas a observável C1 (código C/A). Além disso, de acordo com Parkinson & Enge (1996) o DGPS proporciona uma precisão melhor que 1 m num raio de 50 km. Portanto, como nesse caso a linha de base é de aproximadamente 180 km, os resultados são satisfatórios. Além disso, pode-se perceber que para o arquivo real o RMS é em média 149,60 cm. Já quando se utiliza a VRS o RMS médio está entre 161 cm e 166 cm, uma piora de apenas 7% a 11% respectivamente.

Para analisar o comportamento época por época das coordenadas, as Figuras 10 e 11 apresentam respectivamente a discrepância da RP e da RA quando é utilizada como base a estação PPTE e a VRS gerada pelo modo DG+MOD+PNT (dia 362 de 2006).

Figura 10 – RP obtida DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT

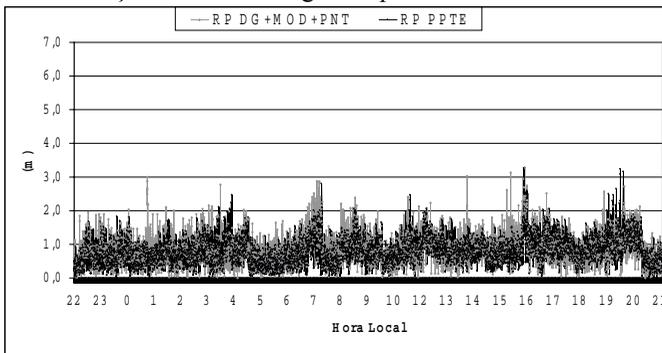
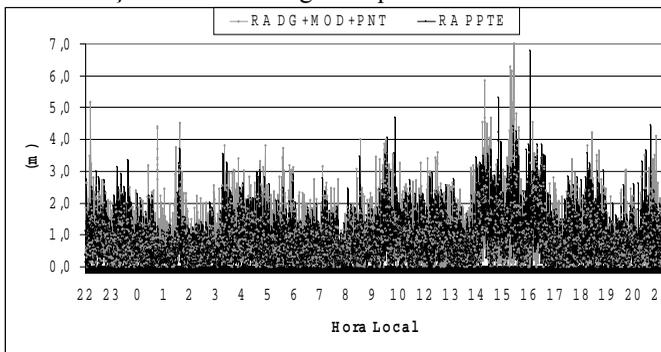


Figura 11 – RA obtida DGPS usando como base a estação real e a VRS gerada por DG+MOD+PNT



Observando as Figuras 10 e 11 pode-se perceber que o comportamento época por época tanto em planimetria como em altimetria é similar. No entanto, os valores obtidos com a VRS são ligeiramente maiores.

Para verificar a diferença entre a VRS obtida por DG e DG+MOD+PNT, as figuras 12 e 13 apresentam as RP e RA respectivamente.

Figura 12 – RP obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT

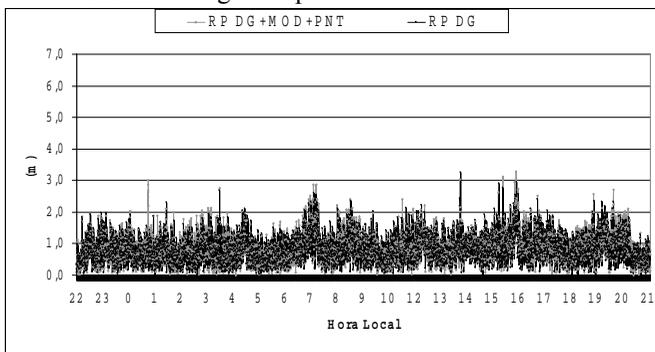
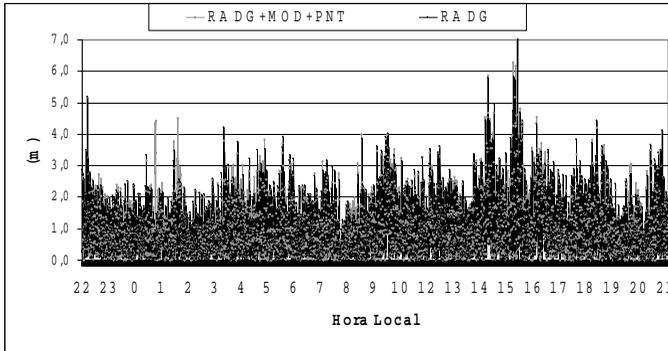


Figura 13 – RA obtida com o DGPS usando como base a VRS gerada por DG e DG+MOD+PNT



Observando as Figuras 12 e 13 pode-se verificar que as discrepâncias têm o mesmo comportamento e magnitude para os dois modos da VRS gerada.

Pode-se perceber que utilizando o DGPS, diferentemente do posicionamento relativo, a VRS gerada com modelos atmosféricos não apresentou melhorias se comparada com a VRS gerada sem tais modelos. Isso deve ter ocorrido pois, como dito anteriormente, no DGPS é utilizada apenas a observável C1 que é menos precisa, portanto os resultados podem ser afetados pelos resíduos da observável. Essa conclusão pode ser fortalecida pelo fato de que nos demais testes realizados com a VRS, como por exemplo no posicionamento por ponto preciso, posicionamento relativo usando apenas L1 e C1, posicionamento relativo usando apenas o código etc, os resultados apresentados pela VRS são sempre melhores quando modelos atmosféricos são utilizados (MONICO et al., 2006; Alves et al., 2006b).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi descrita uma metodologia diferenciada para gerar uma estação de referência virtual, na qual não é realizada a solução do vetor das ambigüidades entre as estações de referência da rede, apenas modelos atmosféricos são utilizados. Essa metodologia facilita o cálculo da VRS e proporciona uma acurácia satisfatória para diversas aplicações, como por exemplo, navegação, controle de frotas, agricultura de precisão e até mesmo o georreferenciamento de imóveis rurais.

Trata-se de uma metodologia que integra diversos campos de pesquisa que vem sendo desenvolvidos e aprimorados na FCT/UNESP, como é o caso da modelagem da ionosfera e troposfera. Além disso, é algo que pode ser implantado

na prática visto que as redes de estações de referência já fazem parte da realidade brasileira e tendem a melhorar cada vez mais.

Com os testes realizados, tanto com o posicionamento relativo como com o DGPS, os resultados foram promissores e ilustram o potencial da metodologia proposta. Em relação ao posicionamento relativo estático, o EMQ resultante para o arquivo verdadeiro e a VRS gerada por DG+MOD+PNT foram similares, 1,64 e 1,63 cm respectivamente. O mesmo ocorre para o posicionamento relativo cinemático, onde foi obtido um EMQ resultante de 6,20 e 6,15 cm respectivamente. Já para o DGPS, o EMQ foi de 149,60 e 166,43 cm, o que é satisfatório levando em consideração que apenas a observável C1 é utilizada.

Finalizando, cabe acrescentar que esse trabalho faz parte de uma pesquisa que está sendo desenvolvida. Portanto, os modelos utilizados poderão ser aprimorados e os resultados melhorados.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Luiz Fernando Antonio Sapucci por fornecer os dados do  $Z_{TD}$  para realizar os experimentos e a Claudinei Rodrigues de Aguiar por permitir o uso do Mod\_Ion\_FK. Além disso, este trabalho está sendo desenvolvido com recursos financeiros da FAPESP (Processo nº 03/12771-0) mediante atribuição de bolsa de doutorado à primeira autora.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, C. R. *Modelo regional da ionosfera (Mod\_Ion): A caminho da implementação em tempo real*. 2005. 159f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- ALVES, D. B. M. *Posicionamento RTK no Contexto de Redes GNSS Ativas Utilizando o Conceito de Estação Virtual*. 2007. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP (Em andamento).
- ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; MONICO, J. F. G.; SAPUCCI, L. F. Modelagem Dinâmica do ZTD Versus Modelo de Hopfield: Resultados Obtidos Utilizando o Conceito de Estação Virtual. In: Simpósio Brasileiro de Geofísica Espacial e Aeronomia - SBGEA, São José dos Campos. *Anais...*, 2006a.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; DALBELO, L. F. A.; SAPUCCI, L. F.; CAMARGO, P. O. VRS Concept Using NWP and Mod\_Ion\_FK: Preliminary Results in Brazil. In: International FIG Congress, Munique, Alemanha. *Proceedings...* 2006b.
- ALVES, D. B. M.; MONICO, J. F. G.; FORTES, L. P. S. Descrição dos Principais Algoritmos de Correção para RTK em Rede. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná. *Anais...* 2005.

- ALVES, P.; AHN, Y.; LACHAPELLE, G. The Effects of Network Geometry on Network RTK Using Simulated GPS Data. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. *Proceedings...* 2003.
- CAMARGO, P. O. *Modelo Regional da Ionosfera para Uso em Posicionamento com Receptores GPS de Uma Frequência*. 1999. 191f. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- CAMARGO, P. O. et al. Application of ionospheric corrections in the equatorial region for L1 GPS users. *Earth Planets Space*. v. 52. p. 1083-1089. 2000.
- DALBELO, L. F. A. *DGPS em Rede: Desenvolvimento e Implantação via Internet no Estado de São Paulo*. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, SP (Em andamento).
- DALBELO, L. F. A. ALVES, D.B.M, e MONICO, J.F.G. DGPS utilizando órbitas precisas do IGS. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2005, Curitiba. In: IV Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Curitiba, Paraná. *Anais...* 2005.
- FORTES, L. P. S. *Optimising the Use of GPS Multi-Reference Stations for Kinematic Positioning*. 2002. 355f. Tese (PhD) – University of Calgary, Calgary.
- FORTES, L. P. S. *Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC)*. 1997. 152f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Sistemas e Computação) – Instituto Militar de Engenharia (IME), Rio de Janeiro.
- FOTOPOULOS. G. *Parameterization of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network of Reference Stations*. 2000. 202p. Dissertação (MSc) – University of Calgary. Calgary.
- FOTOPOULOS. G.; CANNON. M. E. Spatial and Temporal Characteristics of DGPS Carrier Phase Errors Over a Regional Network. In: INTERNATIONAL ASSOCIATIONS OF THE INSTITUTE OF NAVIGATION (IAIN). 2000. San Diego. CA. *Proceedings...* 2000.
- GAO. Y.; LI. Z. Ionosphere Effect and Modeling for Regional Area Differential GPS Network. In: ION GPS 1998. Nashville. Tennessee. *Proceedings...* 1998.
- HU, G. R. et al. Development and Assessment of GPS Virtual Reference Stations for RTK Positioning. *Journal of Geodesy*. v.77. p. 292-302. 2003.
- INCRA – *Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária*. Disponível em: <http://ribac.incra.gov.br/>. Acesso em: 04 Abr. 2007.
- JENSEN, A. B. O.; TSCHERNING, C. C.; MADSEN, F. Integrating Numerical Weather Predictions in GPS Positioning. In: ION GPS, Portland, Oregon. *Proceedings...* 2003.
- JUPP, SM.; POWE, J.; OWEN, J.; BUTCHER. *Use of Numerical Weather Prediction Fields for the Improvement of Tropospheric Corrections in Global*

- Positioning Applications*. Defense Science and Technology Laboratory, UK, 2003.
- KINTER, J.L. et al. *The COLA Atmosphere- Biosphere General Circulation Model*. Volume 1: Formulation. Center for Ocean-Land-Atmosphere Studies. Report n.o 51. Calverton, USA, 1997.
- MAREL. H. van der. Virtual GPS Reference Stations in the Netherlands. In: : ION GPS 1998. Nashville. Tennessee. *Proceedings...* 1998.
- MATSUOKA, M. T. *Avaliação de Funções para a Modelagem do Efeito da Refração Ionosférica na Propagação dos Sinais GPS*. 2003. 164f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; DALBELO, L. F. A.; CAMARGO, P. O.; SAPUCCI, L. F.; FORTES, L. P. S. Atmospheric Models applied to DGPS and RTK Network in Brazil: Preliminary Results. In: ION GNSS 2006, Fort Worth, Texas. *Proceedings...* 2006.
- ODIJK. D. Precise GPS Positioning by applying Ionospheric Corrections from an Active Control Network. *GPS Solutions*. v.3. n.3. p.49-57. 2000.
- OMAR, S.; RIZOS, C. Design of Reliable Communication System for Continuous GPS Reference Station Networks. In: ION GPS 2003, Oregon Convention Center, Portland. *Proceedings...* 2003.
- PARKINSON, B. W.; ENGE, P. K. Differential GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPILKER Jr., J. J. (Ed.). *Global Positioning: theory and applications*. Washington: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.2. p.3-50.
- RAQUET. J. *Development of a Method for Kinematic GPS Carrier-Phase Ambiguity Resolution Using Multiple Reference Receivers*. 1998. Tese (PhD) – University of Calgary. Calgary.
- RETSCHER. G. Accuracy Performance of Virtual Reference Station (VRS) Networks. *Journal of Global Positioning System*. v.1. n.1. p.40-47. 2002.
- SAPUCCI, L. F., MACHADO, L. A. T., MONICO, J. F. G. *Predictions of Tropospheric Zenithal Delay for South America: Seasonal Variability and Quality Evaluation*. Submitted to Brazilian Journal of Cartography. 2006.
- SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; ESPINOZA, E. S.; MACHADO, L. A. T. Predição do Atraso Zenital Troposférico na América do Sul para Posicionamento GNSS em Tempo Real. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, Paraná, Curitiba, 2003. *Anais...* 2003.
- SCHÜLER, T.; CHÜLER HEIN, T.G.W.; EISSFELLER, B. Improved Tropospheric Delay Modeling Using an Integrated Approach of Numerical Weather Models and GPS Troposphere. In: ION GPS 2000, Salt Lake City. *Proceedings...* 2000.
- SEEBER. G. *Satellite Geodesy: Foundations. Methods. and Applications*. Berlin. New York: Walter de Gruyter. 2003.

- SEJAS, M. I.; KRUEGER, C. P.; HECK, B.; SEITZ, K. Análise da Qualidade de um Posicionamento Empregando Estações de Referência Virtuais. In: *Série em Ciências Geodésicas*. 2003. v.3. p.40-53.
- SPIPKER Jr., J. J. Tropospheric Effects on GPS. In: PARKINSON, B. W.; SPIPKER Jr., J. J. *Global Positioning System: Theory and Applications*. Cambridge: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1996. v.1. p.517-546.
- VARNER, C. C. *DGPS Carrier Phase Networks and Partial Derivative Algorithms*. 2000. 175f. Tese (PhD) – University of Calgary. Calgary.
- WÜBBENA, G. et al. Reducing Distance Errors for Real-Time Precise DGPS Applications by Establishing Reference Station Networks. In: ION GPS 1996. Kansas City, Missouri. *Proceedings...* 1996.
- ZHANG, K.; ROBERTS C. Network-Based Real-Time Kinematic Positioning System: Current Development in Australia. In: Geoinformatics and Surveying Conference. 2003. The Institute of Surveyor. Malasia. *Proceedings...* 2003.

(Recebido em abril/2007. Aceito em agosto/2007)