

Estimativa do Campo de Velocidades a partir das Estações da RBMC

Comissão Técnica 2: Agrimensura, Geodésia, Astronomia e Topografia

Sonia Maria Alves Costa

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

Departamento de Geodésia

Av. Brasil 15671, CEP : 21241-051, Rio de Janeiro, RJ, Brasil

e-mail: soniamaria@ibge.gov.br

RESUMO

As estruturas geodésicas concebidas hoje em dia, através das técnicas espaciais de posicionamento de alta precisão, tais como o VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Range) e GPS (Global Positioning System), possuem além das três componentes definidoras de um ponto no espaço, a componente de definição temporal, referindo-se à época das observações. A técnica GPS passou a contribuir nos estudos de geodinâmica, juntamente com o VLBI e SLR, a partir da operacionalização do IGS (International GPS Service) em 1994. Com o objetivo de análise destas informações, grupos de pesquisa em instituições internacionais dedicam-se ao processamento diário das observações das estações que compõem a rede IGS.

No Brasil, a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos satélites do sistema GPS) (Fortes, 1997) é uma estrutura com as mesmas características da rede IGS e está em operação desde agosto de 1997. Atualmente ela é uma importante ferramenta para integração do SGB (Sistema Geodésico Brasileiro) aos sistemas geocêntricos de referência em uso pela comunidade internacional. A RBMC também é a contribuição do Brasil na rede IGS, através da adoção de suas observações por um dos centros regionais de análise (RNNAC SIR) IGS (Seemüller e Drewes, 1997), promovendo desta forma, a direta integração das estações geodésicas brasileiras ao ITRF (International Terrestrial Reference Frame). A mais recente contribuição, é a participação da RBMC na realização ITRF2000.

A análise da variação temporal das coordenadas das estações da RBMC (Costa, 1999) através do processamento de seus dados GPS em um *software* científico, fornece um tratamento mais refinado ao cálculo do vetor velocidade para as estações envolvidas. A escolha do software Bernese versão 4.2 deve-se ao fato dele ser um *software* completo, contemplando a possibilidade de traçar estratégias, seja na utilização de modelos troposféricos e mapas de ionosfera mais adequados, ou na aplicação de modelagens para resolução de ambigüidades.

Este trabalho tem por finalidade informar as atividades de pesquisas realizadas no IBGE referente à estimativa do campo de velocidades utilizando-se observações GPS das estações da RBMC e outras estações na América do Sul. Neste estudo foram processados observações GPS de 9 períodos, cada um composto por 15 dias, entre os anos 1997 a 2001.

ABSTRACT

The geodetic structures established nowadays, using high precision spatial positioning techniques, such as VLBI (Very Long Baseline Interferometry), SLR (Satellite Laser Range) and GPS (Global Positioning System), has besides the three components of spatial point definition, the time component, referred to the observations epoch. The GPS technique started to contribute in the geodynamics studies, with VLBI and SLR, since IGS (International GPS Service) was officially created, in 1994. Contributing with the observation analysis, there are several research groups in international institutions dedicates to daily processing of station observations, which make part of IGS network.

In Brazil, RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GPS), is a geodetic structure similar to IGS network and it is operational since August 1997. Nowadays, it is an important tool for the integration of SGB (Brazilian Geodetic System) into geocentric reference systems in use by the international community. RBMC, is the Brazilian contribution to the IGS network, through the adoption of their observations by one of Regional IGS Analysis Centers – RNNAC SIR, promoting this way, the direct integration of Brazilians geodetic stations to the ITRF (International Terrestrial Reference Frame). The most recent contribution is the participation in ITRF2000 realization.

The analysis of the time variation of the RBMC station coordinates is performed through GPS observations processing making use of scientific software, which promote velocities computations. The Bernese *software* is a sophisticated tool meeting several strategies and atmosphere models to obtain the highest quality of GPS results.

The objective of this paper is to inform the research activities carried out at IBGE, regarding the velocity field estimation, using GPS observations of RBMC and other stations in South America. The results presented in this paper were obtained by processing 9 periods of GPS observations, each one composed by 15 days, between years 1997 to 2001.

1 INTRODUÇÃO

Em decorrência da proposta de adoção do SIRGAS como sistema de referência terrestre, faz-se necessário o monitoramento temporal das coordenadas que o materializam, caracterizando assim a sua concepção dinâmica. Este fato foi a principal motivação para o desenvolvimento de um estudo geodinâmico apoiado no GPS. Estações pertencentes as redes de rastreamento contínuo por satélites GPS, como é o caso da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo de satélites GPS (RBMC), permitem dentre outras informações, o monitoramento da variação temporal das coordenadas. O estabelecimento da RBMC, foi um passo de grande importância para a Geodésia no contexto nacional. Esta rede é atualmente composta por 13 estações, sendo 9 delas coincidentes com estações SIRGAS, fornecendo assim todas informações necessárias para a integração do SGB aos sistemas de referência terrestres adotados internacionalmente.

Poucos estudos foram desenvolvidos na América do Sul (Drewes, 1997b), (DGFI, 1998b) e (DGFI, 1998c), mais especificamente no Brasil, por ser uma região estável na placa SOAM. Procura-se também, conhecer a compatibilidade das informações fornecidas pelos modelos tectônica de placas, quando comparados com as informações obtidas através das técnicas espaciais, tais como o GPS, ou até mesmo a estimativa de um campo de velocidades através do GPS. Com os resultados obtidos no processamento da RBMC, serão realizadas várias análises e comparações com os modelos geofísicos de movimento de placas, como por exemplo o modelo NNR-NUVEL 1A (Demelts et al., 1990), (Demelts et al., 1994), o qual é baseado apenas em informações geológicas e fundamentado na teoria da tectônica de placas (a qual considera a variação de coordenadas com o tempo em caráter linear) (Drewes, 1982). O modelo geodésico usado na comparação é o APKIM8.80 (Drewes, 1993), o qual é baseado em observações de VLBI, SLR e GPS realizadas nas últimas décadas, contribuindo, deste modo com informações mais recentes sobre o movimento de placas litosféricas. Também foram utilizadas nas comparações soluções geodésicas fornecidas pelo ITRF96 (Sillard et al., 1998) RNNAC SIR (Regional Network Associate Analysis Centers SIRGAS).

O objetivo principal deste trabalho é a estimativa de um campo de velocidades para a porção ocupada pelo Brasil na placa Sul-americana, a partir do

conjunto de vetores de velocidades estimados nas estações da RBMC (os quais vem a formar o campo de velocidades) são estimados os elementos definidores do movimento da placa SOAM.

2 COLETA E PREPARO DOS DADOS GPS PARA O PROCESSAMENTO

Os arquivos de dados GPS referentes as estações da RBMC foram fornecidos pelo IBGE através do Departamento de Geodésia, enquanto os arquivos pertencentes as estações IGS, bem como as efemérides precisas foram transferidos via ftp - CDDIS. Os dados de cada estação estão organizados em períodos de 24 horas e em formato RINEX¹ a um intervalo de registro de 30 segundos no caso de estações IGS e 15 segundos no caso de estações RBMC. Ao todo foram utilizadas 24 estações, sendo 13 pertencentes à RBMC e 11 pertencentes a rede IGS (as estações Brasília e Fortaleza, pertencem a ambas redes). Todas as estações envolvidas neste processamento estão aparelhadas com receptores geodésicos capazes de coletar dados em código e fase segundo as duas portadoras e conectados a antenas *choke ring* para redução do efeito de multicaminhamento² na recepção do sinais. No total, foram processados 135 dias, entre os anos 1997 a 2001. Os períodos escolhidos para o processamento dos dados GPS foram: 30 dias do ano 1997 (dias julianos: 126 a 140 e 309 a 323), 30 dias do ano 1998 (dias julianos 125 a 139 e 316 a 330), 30 dias do ano 1999 (dias julianos: 52 a 66 e 309 a 323), 30 dias do ano 2000 (dias julianos 126 a 140 e 309 a 323) e 15 dias do ano 2001 (dias julianos: 116 a 131). Na tabela 1 são apresentados os dados GPS coletados para a realização deste trabalho e a quantidade de dias.

Algumas informações foram verificadas no cabeçalho dos arquivos RINEX antes do processamento, tais como, identificação das estações, altura da antena e identificação receptor/antena. A cada estação foi atribuída uma única identificação composta por quatro campos. Este cuidado é importante na etapa de combinação de soluções. Se uma segunda identificação for adotada para a mesma estação, ao invés de 24, serão combinadas 25. Da mesma forma, a identificação do

¹ Formato padrão para armazenamento dos dados GPS.

² O efeito de multi-caminhamento é decorrente da presença de objetos com superfícies refletoras próxima a estação GPS, ocasionando uma dispersão dos sinais recebidos.

tipo de receptor e antena deve seguir os padrões IGS e a altura da antena deve estar referida ao plano de referência da mesma, para que no processamento as observações sejam reduzidas exatamente aos centros de fase das portadoras L1 e L2. Essa preocupação é

importante porque cada antena possui uma posição do centro de fase e o software Bernese aplica a correção de centro de fase para reduzir as coordenadas obtidas no centro de fase ao marco da estação.

TABELA 1 - RESUMO DOS DADOS COLETADOS PARA O ANO DE 1997 (quadrados em branco caracterizam a ausência de observações).

| Época | AREQ | ASCI | BOGT | BOMJ | BRAZ | BRMU | CROI | CUIB | FORT | GALA | IMPZ | MANA | KOUR | LPGS | OHIG | PARA | SANT | UEPP | VICO | SALV | POAL | RECF | CRAT | RIOP |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1997,3 | 5 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | 15 | 14 | | 15 | 15 | | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | | | |
| 1997,9 | 15 | 11 | | 15 | 14 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | | 14 | 15 | 15 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | | |
| 1998,3 | 15 | 14 | 12 | 15 | 15 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | | | | |
| 1998,9 | 15 | 15 | 15 | 7 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 12 | 12 | 14 | 15 | 3 | 15 | 12 | 15 | 10 | | | | | |
| 1999,2 | | 15 | 15 | 10 | 14 | 13 | 15 | 15 | 15 | | 6 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 15 | 11 | 13 | | | | | |
| 1999,9 | 15 | | | 15 | 13 | | 14 | 15 | 15 | | | | 15 | 15 | 14 | 15 | 13 | 14 | 13 | 7 | 15 | 15 | | 14 |
| 2000,3 | 15 | | | 10 | 15 | | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 12 | 15 | 12 | |
| 2000,9 | 15 | | | 15 | 15 | | 15 | 15 | 14 | 15 | 14 | | 15 | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 11 | 11 | 15 | 11 | 15 | 15 |
| 2001,3 | 15 | | | | 15 | | 11 | 14 | 15 | 15 | 13 | | 14 | 15 | 15 | 13 | 13 | 13 | 11 | 8 | 12 | 10 | 8 | 14 |
| TOTAL | 110 | 69 | 57 | 102 | 131 | 71 | 128 | 133 | 134 | 104 | 75 | 85 | 131 | 118 | 120 | 133 | 128 | 128 | 103 | 40 | 54 | 51 | 35 | 43 |

3 ESTRATÉGIAS PARA O PROCESSAMENTO DOS DADOS GPS NO SOFTWARE BERNESE

Desenvolvido por uma equipe de cientistas do Instituto Astronômico da Universidade de Bern, no final da década de 80, o software Bernese encontra-se atualmente na sua sétima versão conhecida por “*The Bernese GPS Software Version 4.2*” (Hugentobler U. et al., 2001), finalizada em novembro de 1999. Atualmente o Bernese é considerado um dos melhores programas científicos de processamento de dados GPS, visando contudo atender aos requisitos dos mais variados tipos de usuários, os quais buscam, acima de tudo, resultados de alta precisão. Justamente, por gerar soluções de alta confiabilidade necessárias principalmente aos usuários de nível científico, ele é amplamente utilizado pelos grandes centros de processamento e análises do IGS.

Inicialmente foram selecionadas 9 estações de referência nas quais as suas coordenadas foram usadas como valores *a priori* no processamento; sendo elas: Arequipa, Ascensão, Santiago, Saint Croix, La Plata, Bogotá, Brasília, O'Higgins e Kourou. Nos períodos que compreendem os anos 1997, 1998 e os primeiros quinze dias de 1999, os valores de coordenadas foram tomados da solução ITRF96, nos demais períodos até 2001 os valores de coordenadas foram tomados da solução ITRF97. Este procedimento, visa a compatibilidade entre o referencial terrestre representado pelas coordenadas das estações de referência e o referencial celeste, representado pelas órbitas combinadas IGS. As coordenadas de cada estação foram reduzidas ao dia médio de cada época processada. O programa utilizado na redução das

coordenadas foi o TRNOBS, desenvolvido no Geodetic Survey of Canada.

Os primeiros 5 períodos foram processados na versão 4.0, do software Bernese, os demais períodos foram processados na versão 4.2. A única diferença ocorrida nos processamentos é que na versão 4.0 foi utilizado o modelo de Saastamoinen, como modelo *a priori* da troposfera, na versão 4.2 não foi utilizado modelo troposférico *a priori*. Na tabela 2 são apresentadas as estratégias e opções adotados nos processamentos diários.

TABELA 2 – OPÇÕES DOS PROCESSAMENTOS REALIZADOS NO BERNESE.

| Solução | Opção |
|-------------------------------|---|
| observações | Simple diferenças, observável L3 (combinação de L1 e L2 livre dos efeitos da ionosfera) |
| modo | Sessões diárias (24 horas) |
| Intervalo de rastreo | 30 segundos (estações IGS) 15 segundos (estações RBMC) |
| Ângulo de elevação | 10 graus |
| Órbitas e ERP | Combinadas IGS |
| Modelo de troposfera | Saastamoinen (versão 4.0) Não foi utilizado (versão 4.2) |
| Atraso troposférico no zênite | Correção aplicada a cada 2 horas |
| Função de Mapeamento | Niell (componente seca) |
| Modelo de Ionosfera | Não |
| Ambigüidades | Estratégia QIF (Quasi Ionosphere Free) |
| Injunções ou referências | AREQ, ASC1, SANT, CROI, LPGS, BOGT, BRAZ, OHIG e KOUR |

Na solução final da estimativa dos parâmetros as ambigüidades resolvidas³ (fixadas) foram usadas na solução, as demais ambigüidades foram pré-eliminadas, ou seja, não entram como incógnitas no sistema de equações. Foi aplicado o processamento de sessão em uma solução final de rede livre.

4 COMBINAÇÃO DAS SOLUÇÕES DIÁRIAS

A cada solução diária foram gerados dois arquivos, um contendo as coordenadas finais do processamento e outro contendo as respectivas equações normais. A combinação das soluções é um ajustamento por mínimos quadrados de todas as soluções diárias (através das equações normais), no qual são estimados coordenadas e velocidades para as estações. No contexto de combinação de soluções GPS (ou de qualquer outra técnica observacional), podem ser configurados dois tipos de soluções: rede injuncionada e rede livre⁴. A solução de “rede injuncionada” consiste na ponderação das coordenadas e/ou velocidades *a priori* das estações de referência (estações injuncionadas). Um ajustamento de “rede livre” as injunções são definidas somente pelo referencial das órbitas, permitindo assim, a estimativa de parâmetros de transformação (além das coordenadas e velocidades) entre a solução combinada GPS (sistema interno da solução) e um sistema *a priori*, como por exemplo ITRF96.

A combinação de soluções dos sistemas de equações normais, bem como a estimativa das velocidades, foi realizada através do programa ADDNEQ2 (programa pertencente ao software Bernese). Para cada solução diária *s*, em cada estação *i*, tem-se coordenadas representadas pelo vetor X_s^i na época t_s e velocidade \dot{X}_s^i expressa em um determinado sistema de referência terrestre. A combinação das equações normais consiste basicamente na estimativa de coordenadas X_{ITRF}^i em uma determinada época t_0 e velocidade \dot{X}_{ITRF}^i em ITRS (Boucher et al., 1997). Na combinação das soluções diárias foram excluídos os parâmetros troposféricos, reduzindo assim a quantidade de parâmetros na solução do sistema de equações. As combinações diárias foram realizadas por períodos processados, produzindo 9 sistemas de equações normais relativos a cada época de 15 dias.

Na solução final, a combinação das 9 épocas, foram injuncionadas nas 9 estações IGS (estações de referência), nenhuma transformação foi realizada na

³ Resolver ambigüidades significa atribuir o número correto de inteiros ao valor real estimado.

⁴ Conhecido na bibliografia inglesa por “non fiducial” ou “free network”.

combinação entre as soluções ITRF96 e ITRF97. Para as mesmas estações de referência foram adotados valores *a priori* em velocidades, segundo solução ITRF96. Foram atribuídos pesos (desvios padrão) nas velocidades *a priori* somente na componente altimétrica, conforme recomendação do manual do software Bernese⁵. As velocidades são produtos de uma extrapolação de resultados de coordenadas obtidas em distintas épocas, não havendo desta forma uma época de referência para elas. O sistema de referência das velocidades finais é ITRF96 (por serem informações derivadas das coordenadas das estações), pois foram adotados somente os 5 primeiros períodos para o seu cálculo.

5 RESULTADOS

Consistência das soluções GPS com o ITRF96

Com o objetivo de se obter a precisão da solução combinada de cada uma das cinco épocas com relação ao ITRF96, foram realizadas transformações de similaridade (ou Helmert). Os resultados das transformações (parâmetros e resíduos) podem ser vistos na tabela 3 revelando a precisão dos resultados com relação ao ITRF96. O maior desvio padrão da transformação foi de 14,7 mm na época 1998,3. Como era esperado, os resíduos são maiores na componente vertical, mas em nenhum dos casos passou de 2 cm, precisão esperada em função das órbitas utilizadas no processamento das observações.

TABELA 3 – DESVIO PADRÃO DA TRANSFORMAÇÃO DE HELMERT E DESVIOS PADRÃO RESIDUAIS, SEGUNDO AS COMPONENTES NORTE, LESTE E VERTICAL OBTIDOS NAS ÉPOCAS 1997,3, 1997,9, 1998,3, 1998,9 e 1999,2 COM ITRF96.(σ = Desvio padrão).

| Época | σ (mm) | σ Resíduos comp. Norte (mm) | σ Resíduos comp. Leste (mm) | σ Resíduos comp. Vertical (mm) |
|--------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| 1997,3 | 12,0 | 4,2 | 5,2 | 16,5 |
| 1997,9 | 7,8 | 3,9 | 3,2 | 10,4 |
| 1998,3 | 14,7 | 6,6 | 7,5 | 20,2 |
| 1998,9 | 12,3 | 7,5 | 9,5 | 14,4 |
| 1999,2 | 13,2 | 8,4 | 12,2 | 12,7 |

Os resultados apresentados são satisfatórios dentro da técnica observacional aplicada com o uso do GPS. No processamento de um modo geral ocorreram poucos problemas relacionados aos dados das estações, mais ficou claro que a formação de linhas de base com extensão maior que 800 km em regiões próximas ao

⁵ Consta no manual que para serem estimadas a velocidade na componente altimétrica, é necessário um período longo de dados GPS.

equador devem ser evitadas, pois a sua qualidade é inferior das demais, um exemplo disso são as linhas BRMU-FORT e GALA-MANA. Suspeita-se que este problema possa ser decorrente da intensa atividade ionosférica na região equatorial da Terra, pois em linhas de extensão equivalente, como por exemplo OHIG-PARA os resultados são melhores. Conseqüentemente, este problema é transmitido às coordenadas destas estações.

Comparação das velocidades entre diversas fontes

As tabelas 4 e 5 apresentam comparações feitas entre as diversas fontes onde foram obtidas velocidades para as estações envolvidas neste trabalho, com a solução final do trabalho. Os resultados nos modelos NNR-NUVEL-1A e APKIM8.8 foram calculados através do programa PLAMO3D, enquanto os valores da solução RNNAC SIR foram fornecidos pelo DGFI (Deutsches Geodaetisches Forschungsinstitut). As duas soluções ITRFyy foram obtidas na homepage do IERS. Os resultados finais tem uma concordância satisfatória com as outras fontes de comparação, principalmente no que se refere as estações localizadas no Brasil, por ser uma região da placa Sul-americana de baixa atividade sísmica, e não se localiza nos seus limites. Sendo assim, as velocidades de todas estações, obtidas por diferentes modelos ou soluções geodésicas seguem direção e magnitude próximas. Entretanto, para as estações que ocupam regiões de deformação na placa Sul-americana, a solução estimada diverge bastante das outras fontes. Um exemplo deste fato ocorreu nas estações Santiago e Arequipa. Isto deve-se à problemas encontrados no processamento da estação Santiago, com grande ocorrência de perdas de ciclos em todas as épocas processadas. Os valores numéricos são apresentados na forma gráfica nas figuras 1 e 2. Analisando somente os resultados das velocidades estimadas neste trabalho, concluiu-se que as coordenadas de uma estação no Brasil variam em média cerca de 2 cm ao ano.

6 VETORES DE ROTAÇÃO DA PLACA SOAM SEGUNDO ESTAÇÕES DA RBMC

O movimento relativo de uma placa tectônica (Δx), considerada uma calota esférica rígida, em um determinado sistema de referência, é descrito por um vetor de rotação denominado vetor de Euler (vetor geocêntrico de rotação). O módulo do vetor de Euler é proporcional à velocidade angular no extremo do vetor, localizado na crosta terrestre, este ponto é denominado de pólo de Euler (ou pólo de rotação) (Larson et al., 1997). Esse vetor ($\vec{\Omega}$) pode ser representado em um sistema de coordenadas cartesianas através das três componentes Ω_x , Ω_y e Ω_z , ou em um sistema esférico através das coordenadas (geodésicas) do pólo de rotação (Φ , Λ) e a velocidade de rotação da placa (ω). Sendo assim, o problema geométrico do movimento das placas

consiste em estabelecer o pólo de rotação de cada placa e sua velocidade angular.

O movimento ou o deslocamento ($\vec{\Delta x}_i$) de um ponto $P_i(\vec{x}_i)$ sobre a placa k em um intervalo de tempo Δt , em um sistema cartesiano é dado por (McCarthy, 1996):

$$\begin{aligned} \vec{\Delta x}_i &= (\vec{\Omega}_k \times \vec{x}_i) \Delta t \quad \text{ou} \\ V_x &= dx/dt = \Omega_y Z - \Omega_z Y \\ V_y &= dy/dt = \Omega_z X - \Omega_x Z \\ V_z &= dz/dt = \Omega_x Y - \Omega_y X \end{aligned}$$

Segundo a teoria apresentada, foram calculadas as componentes do vetor de Euler, segundo os eixos X, Y, e Z para a placa SOAM (Sul-americana) conforme as velocidades (V_x , V_y e V_z) fornecidas pelas estações brasileiras. A vantagem da utilização destes resultados está na fidelidade ou mais atual representação do movimento das estações em nosso território, ou seja, na representação do campo de velocidades. Estes resultados poderiam substituir, por exemplo, os fornecidos no modelo NNR-NUVEL-1A e APKIM8.80 segundo a placa SOAM. A tabela 6 apresenta uma comparação dos valores de Ω_x , Ω_y e Ω_z segundo os modelos NNR-NUVEL-1A e APKIM8.80 com os valores calculados para o Brasil, obtidos a partir dos resultados fornecidos pelas 10 estações da RBMC, verificando-se uma boa aproximação entre os parâmetros dos modelos em questão.

TABELA 6 - COMPARAÇÃO ENTRE OS VETORES DE ROTAÇÃO DA PLACA SOAM, SEGUNDO MODELOS: NNR-NUVEL-1A E RESULTADOS DA RBMC. * M./ANOS = MILHÕES DE ANOS

| MODELO | Ω_x (seg/m. anos) | Ω_y (seg/m. anos) | Ω_z (seg/m. anos)* |
|--------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| NNR-NUVEL-1A | -0,0595 | -0,0868 | -0,0498 |
| APKIM8.80 | -0,1161 | -0,0536 | -0,0401 |
| RBMC | -0,1607 | -0,0957 | -0,0621 |

7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste trabalho são um primeiro ensaio na estimativa das velocidades através de observações GPS no Brasil, conduzindo assim, às seguintes conclusões:

- A necessidade de se dispor de um período maior de observações GPS. Quanto mais longo for o período de observações GPS os resultados serão mais confiáveis. Alguns pesquisadores consideram o período de 5 anos apropriado para iniciar estudos de Geodinâmica. Com este propósito, pretende-se dar continuidade ao processamento as observações da RBMC e a avaliação das velocidades;

- Considerando os resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que os vetores velocidade nas estações da RBMC, possuem uma magnitude média de 2 cm/ano.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boucher, C.; Altamini, Z.; Sillard, P.. The ITRF96 Realization of the International Terrestrial Reference System, Institute Géographique National (ENSG/LAREG). IAG97, Rio de Janeiro, 1997.
- Costa, S.M.A.. Integração da Rede Geodésica Brasileira aos Sistemas de Referência Terrestres, tese de doutorado, Universidade Federal do Paraná – UFPR, 1999.
- Demelts, C. et al. Current plate motions. Geophysical Journal Int., n° 101, pp. 425-478, 1990.
- Demelts, C. et al.. Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions. Geophysical Research Letters, vol. 21, n° 20, pp. 2191-2194, 1994.
- DGFI - Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut ABT.I. Regional Networks – Casa. <http://www.dgfi.badw-muenchen.de/gps/casa.html>, 1998b.
- DGFI - Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut ABT.I. Regional Networks - Sirgas. <http://www.dgfi.badw-muenchen.de/gps/sirgas.html>, 1998c.
- Drewes, H.. A Geodetic Approach for the Recovery of Global Kinematic Plate Parameters, Bulletin Geodesique, n°56, pp. 70-79, 1982.
- Drewes, H.. Global and Regional Deformation Models of the Earth's Surface. Proceedings of the International Conference on Cartography and Geodesy, Maracaibo, 1993.
- Drewes, H.. Time Evolution of the SIRGAS Reference Frame. IAG97, Rio de Janeiro, 1997b.
- Fortes, L.P.S.. Operacionalização da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo do Sistema GPS (RBMC), dissertação de mestrado, IME, Rio de Janeiro, 1997.
- Hugentobler U. et al.; Bernese GPS Software Version 4.2. Astronomical Institute University of Berne, Berne, 2001.
- Larson, K.M.; Freymueller, J.T.; Philipsen, S.. Global Plate Velocities from Global Positioning System. Journal of Geophysical Research, vol. 102, n°B5, pp. 9961-9981, 1997.
- McCarthy, D.D.. IERS Technical Note 21 - IERS Conventions (1996). U.S. Naval Observatory, 1996.
- Seemüller, W.; Drewes H.. The IGS Regional Network Associate Analysis Center for South America at DGFI/I. IAG97, Rio de Janeiro, 1997.
- Sillard, P. et al.. The ITRF96 realization and its associated Velocity field. Geophysical Research Letters, vol. 25, n° 17, pp. 3223 – 3226, 1998.

TABELA 4 - COMPONENTES DAS VELOCIDADES NO SISTEMA CARTESIANO, SEGUNDO OS MODELOS DE PLACAS NNR-NUVEL-1A E APKIM8.8 E RESULTADOS FORNECIDOS PELO DGFI NA SOLUÇÃO RNNAC SIR.

| | NNR-NUVEL-1A | | | APKIM 8.80 | | | RNAAC-SIR | | |
|------|--------------|-----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) |
| AREQ | -0,0023 | -0,0036 | 0,0090 | -0,0024 | -0,0050 | 0,0136 | 0,0067 | -0,0035 | 0,0161 |
| ASCI | 0,0089 | 0,0248 | 0,0176 | 0,0088 | 0,0240 | 0,0183 | | | |
| BOGT | -0,0061 | -0,0010 | 0,0090 | -0,0048 | -0,0002 | 0,0140 | -0,0131 | 0,0271 | 0,0124 |
| BOMJ | -0,0015 | -0,0054 | 0,0113 | -0,0016 | -0,0061 | 0,0129 | -0,0025 | -0,0194 | 0,0147 |
| BRAZ | -0,0013 | -0,0054 | 0,0110 | -0,0016 | -0,0064 | 0,0131 | -0,0032 | -0,0093 | 0,0124 |
| BRMU | -0,0130 | -0,0012 | 0,0070 | -0,0117 | -0,0009 | 0,0067 | | | |
| CROI | 0,0021 | 0,0045 | 0,0098 | 0,0069 | 0,0086 | 0,0150 | -0,0056 | 0,0263 | 0,0095 |
| CUIB | -0,0019 | -0,0047 | 0,0105 | -0,0020 | -0,0058 | 0,0135 | -0,0024 | -0,0112 | 0,0155 |
| FORT | -0,0028 | -0,0048 | 0,0117 | -0,0024 | -0,0044 | 0,0127 | -0,0054 | -0,0102 | 0,0143 |
| GALA | 0,0714 | -0,0012 | 0,0658 | 0,0377 | -0,0004 | 0,0179 | 0,0457 | -0,0015 | 0,0166 |
| IMPZ | -0,0032 | -0,0044 | 0,0114 | -0,0027 | -0,0042 | 0,0135 | 0,0075 | -0,0229 | 0,0103 |
| MANA | -0,0043 | -0,0031 | 0,0105 | -0,0035 | -0,0029 | 0,0142 | -0,0032 | -0,0160 | 0,0207 |
| KOUR | -0,0053 | -0,0027 | 0,0111 | -0,0041 | -0,0015 | 0,0138 | -0,0020 | -0,0084 | 0,0165 |
| LPGS | 0,0016 | -0,0062 | 0,0088 | 0,0003 | -0,0093 | 0,0116 | -0,0048 | -0,0060 | 0,0121 |
| OHIG | 0,0187 | 0,0010 | 0,0046 | 0,0189 | -0,0070 | 0,0081 | 0,0206 | -0,0043 | -0,0068 |
| PARA | 0,0003 | -0,0061 | 0,0102 | -0,0005 | -0,0082 | 0,0124 | -0,0041 | -0,0159 | 0,0119 |
| SANT | 0,0009 | -0,0051 | 0,0079 | -0,0003 | -0,0083 | 0,0119 | 0,0186 | -0,0107 | 0,0114 |
| UEPP | -0,0004 | -0,0057 | 0,0104 | -0,0010 | -0,0074 | 0,0128 | -0,0063 | -0,0140 | 0,0119 |
| VICO | -0,0001 | -0,0061 | 0,0108 | -0,0007 | -0,0076 | 0,0123 | -0,0090 | -0,0140 | 0,0174 |

TABELA 5 - COMPONENTES DAS VELOCIDADES NO SISTEMA CARTESIANO, SEGUNDO SOLUÇÕES ITRF96 E ITRF97 E RESULTADOS FORNECIDOS PELA SOLUÇÃO FINAL DO TRABALHO.

| | ITRF96 | | | ITRF97 | | | SOLUÇÃO FINAL - RBMC | | |
|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|
| | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) | Vx(m/ano) | Vy(m/ano) | Vz(m/ano) |
| AREQ | 0,0114 | 0,0013 | 0,0123 | 0,0122 | -0,0020 | 0,0100 | 0,0044 | -0,0061 | 0,0243 |
| ASCI | 0,0032 | -0,0002 | 0,0072 | -0,0080 | -0,0021 | 0,0066 | -0,0006 | -0,0105 | 0,0143 |
| BOGT | 0,0076 | 0,0034 | 0,0161 | 0,0067 | 0,0009 | 0,0130 | 0,0002 | 0,0017 | 0,0192 |
| BOMJ | | | | | | | -0,0019 | -0,0092 | 0,0208 |
| BRAZ | -0,0089 | 0,0017 | 0,0115 | -0,0085 | 0,0010 | 0,0098 | -0,0015 | -0,0089 | 0,0196 |
| BRMU | -0,0113 | -0,0030 | 0,0079 | -0,0114 | -0,0025 | 0,0056 | -0,0131 | 0,0043 | 0,0150 |
| CROI | 0,0079 | 0,0085 | 0,0145 | 0,0093 | 0,0045 | 0,0106 | -0,0016 | 0,0058 | 0,0186 |
| CUIB | | | | | | | -0,0022 | -0,0081 | 0,0199 |
| FORT | 0,0010 | -0,0036 | 0,0114 | -0,0006 | -0,0047 | 0,0098 | -0,0039 | -0,0072 | 0,0211 |
| GALA | 0,0772 | -0,0240 | 0,0191 | 0,0532 | -0,0166 | 0,0147 | 0,0168 | -0,0003 | 0,0169 |
| IMPZ | | | | | | | -0,0042 | -0,0067 | 0,0219 |
| MANA | | | | | | | -0,0043 | -0,0040 | 0,0234 |
| KOUR | -0,0010 | 0,0001 | 0,0114 | -0,0022 | -0,0024 | 0,0103 | -0,0071 | -0,0028 | 0,0223 |
| LPGS | 0,0034 | -0,0061 | 0,0080 | -0,0020 | -0,0037 | 0,0084 | -0,0002 | -0,0121 | 0,0145 |
| OHIG | 0,0179 | 0,0006 | 0,0025 | 0,0204 | -0,0039 | -0,0078 | 0,0080 | -0,0051 | 0,0043 |
| PARA | | | | | | | -0,0004 | -0,0119 | 0,0184 |
| SANT | 0,0219 | -0,0074 | 0,0070 | 0,0216 | -0,0072 | 0,0069 | 0,0020 | -0,0139 | 0,0210 |
| UEPP | | | | | | | -0,0014 | -0,0103 | 0,0176 |
| VICO | | | | | | | -0,0022 | -0,0126 | 0,0183 |

Rede GPS - Calculo das velocidades - a priori ITRF96

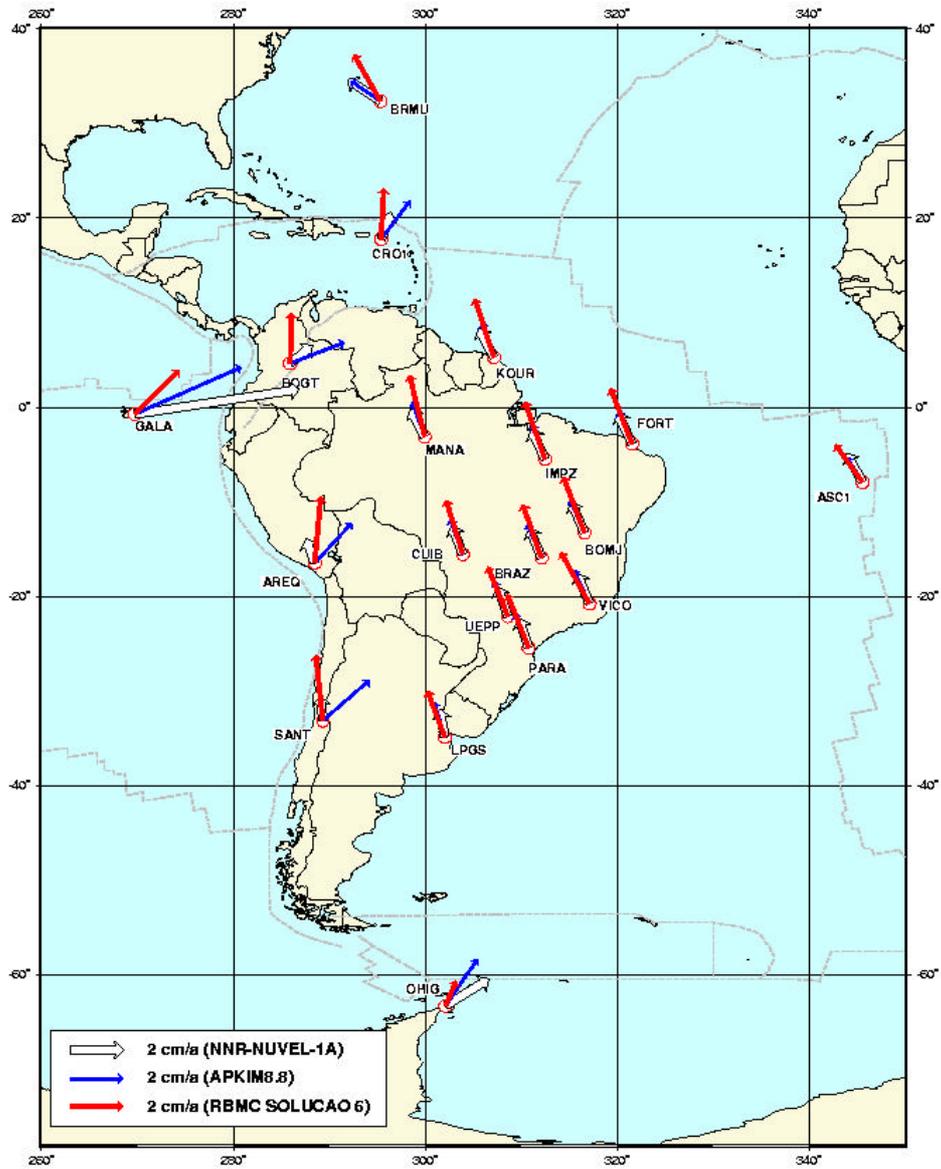


Fig. 1 - Representação dos vetores das velocidades finais comparados com os vetores fornecidos pelos modelos NNR-NUVEL-1A e APKIM8.8.

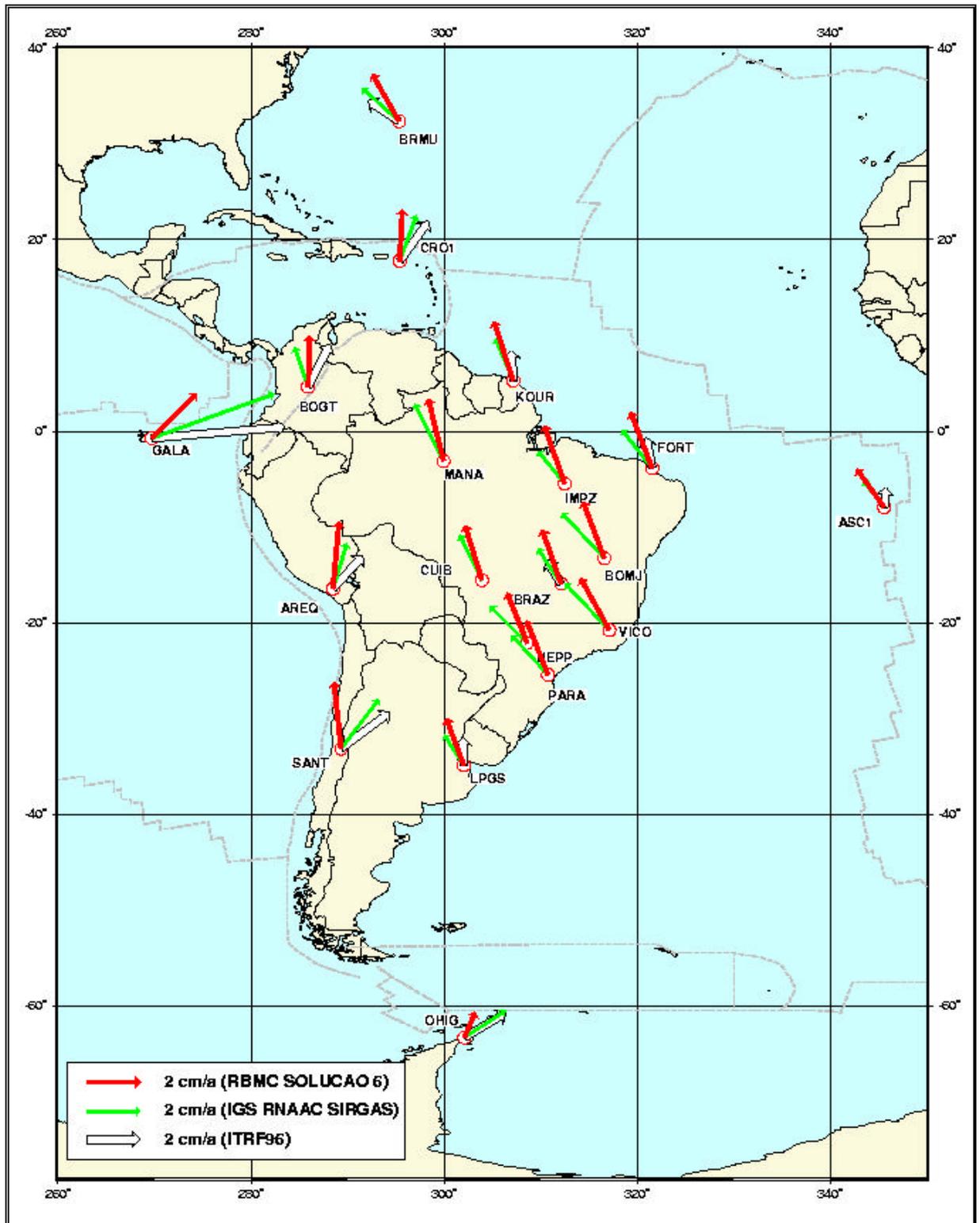


Fig. 2 - Representação dos vetores das velocidades finais comparados com os vetores fornecidos pela solução RNAAC-SIR e ITRF96.