



## Processamento de Dados de Rádio Ocultação da Constelação de Satélites COSMIC-2

Primavera Botelho de Souza<sup>1</sup>, João Francisco Galera Monico<sup>2</sup>, Hisao Takahashi<sup>3</sup> e Fábio Becker Guedes<sup>4</sup>

<sup>1,3,4</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) – Brasil

<sup>2</sup> Faculdade de Ciências e Tecnologia de Presidente Prudente/FCT/UNESP – Brasil

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

The constellation of artificial satellites COSMIC (*Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate*) program, launched in 2006 and COSMIC-2, scheduled for launched in 2016 consists of radio occultation *Global Positioning System (GPS)* receptors, whose purpose is to realize observation measurements of the atmosphere in quasi real time. This work presents the project for development and adaptation of software data processing of COSMIC-2 and generates atmospheric indicators of interest for weather forecasting and space weather research. The software to be developed will be deployed in the center to be deployed in the Brazilian Center Data for processing of occultation radio measurements, the CDAAC/BR, which is being created at the center for Brazilian Studies and Monitoring Space Weather (EMBRACE) of the National Institute for Space Research (INPE), in São José dos Campos.

### Resumo

A constelação de satélites artificiais do programa *Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate* (COSMIC), lançado em 2006 e COSMIC-2, com lançamento inicial previsto para 2016, consiste na composição de um sistema de receptores do sistema de Posicionamento Global (GPS) de rádio ocultação, que tem como propósito realizar medidas de observação da atmosfera em tempo quase real. Este trabalho apresenta o projeto de desenvolvimento e adaptação de todos os programas computacionais de processamento de dados do COSMIC-2 para geração de indicadores atmosféricos de interesse em previsões meteorológicas e pesquisa de clima espacial. O sistema a ser desenvolvido será implantado no centro brasileiro de processamento de dados de medidas de rádio ocultação, o CDAAC/BR, que está sendo criado no centro de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em São José dos Campos.

### Introdução

O programa COSMIC, lançado com sucesso em 14 de abril de 2006, tornou possível o monitoramento da atmosfera da Terra a longo prazo, com um conjunto de características como alta resolução e ampla cobertura.

Tornou-se possível armazenar um conjunto de dados para a detecção da variabilidade e mudança do clima, a separação de causas naturais e antropogênicas, e testes de modelos climáticos. Dados do programa COSMIC propiciaram o monitoramento em tempo real de perfis atmosféricos como o perfil de vapor d'água na troposfera, o perfil de temperatura na estratosfera. E, ainda, possibilitam aos cientistas monitorarem a resposta da atmosfera global a eventos regionais (Rocken et al., 2004).

A constelação COSMIC produz dados atmosféricos, que então são transmitidos às estações terrestres e enviados para o processamento no Centro de Análise e Armazenamento de Dados do COSMIC (CDAAC - COSMIC Data Analysis and Archive Center) (CDAAC-a, 2013), *University Corporation for Atmospheric Research (UCAR)*, em Boulder, Colorado, nos Estados Unidos. O CDAAC processa, armazena e encaminha os dados para usuários científicos e operacionais. Todos os dados e produtos gerados no CDAAC também são enviados para o centro do COSMIC em Taiwan (TACC). O TACC também realiza sua própria análise dos dados e distribui seus produtos à comunidade de usuários em Taiwan (Rocken et al., 2000).

Com o objetivo de realizar a sua própria análise dos dados atmosféricos e gerar em tempo quase real produtos de interesse em meteorologia e clima espacial, e também distribuir à comunidade de usuários do Brasil, pesquisadores do Centro de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial (EMBRACE) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), envolvidos no programa COSMIC, estão criando o Centro Brasileiro de Processamento de Dados de Rádio Ocultação: o CDAAC/BR (EMBRACE, 2006), visando participar do programa COSMIC-2, como fase avançada do COSMIC e que tem como previsão, até 2018, o lançamento de doze novos satélites, igualmente distribuídos em órbitas com baixa inclinação e órbitas de inclinação alta.

A criação do CDAAC/BR também se apoia na ação cooperativa previamente estabelecida entre a UNESP Presidente Prudente (UNESP PP), via o Grupo de Estudo em Geodésia Espacial (GEGE) (GEGE, 2013) e o programa EMBRACE do INPE. E, ainda, no trabalho em conjunto com o CDACC/UCAR para auxiliar no desenvolvimento, adaptação e aprimoramento de programas computacionais necessários ao processamento das medidas baseadas no Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) de rádio ocultação (RO). O processamento das medidas obtidas da constelação de satélites do programa COSMIC-2 deverá ser capaz de gerar em tempo real os seguintes produtos finais: cálculo de erro de posicionamento do sistema GNSS aplicado na pesquisa em geodésia,

umidade do ar na troposfera; a temperatura na estratosfera e o conteúdo total de elétrons (TEC) na ionosfera, com aplicação direta no monitoramento e pesquisa em clima espacial no Brasil.

As Seções seguintes apresentam respectivamente a fundamentação da técnica de RO, a metodologia de desenvolvimento do projeto e os resultados esperados. Por fim, as considerações finais relacionadas ao andamento do projeto.

### Técnica de RO

A técnica de RO foi concebida inicialmente para estudos de atmosferas planetárias do sistema solar (Fjeldbo *et al.*, 1971). O êxito nestes resultados pioneiros ampliou a investigação, sobretudo na área de sensoriamento remoto da atmosfera terrestre. A técnica baseia-se no fato de uma atmosfera planetária comportar-se como uma lente esférica para sinais de rádio em escala centimétrica (banda L), refratando e gerando atrasos na propagação destes sinais. O efeito de lente é devido ao decréscimo exponencial da densidade atmosférica com a altitude. Assim, se as posições dos satélites que transmitem e recebem os sinais são precisamente conhecidas, este "atraso atmosférico" (diferença temporal de atraso do sinal ao refratar-se pela atmosfera) pode ser medido com boa acurácia, determinando-se a refração Doppler do sinal, que por sua vez é transformada (método de inversão) para estimar a densidade em função da altitude. Esta seção sumariza os conceitos básicos da técnica de RO, compreendendo as características das medidas e a obtenção dos perfis atmosféricos, tais como: a umidade do ar na troposfera e temperatura na estratosfera com aplicações em ciências da meteorologia e aeronomia.

Em uma primeira aproximação, os elementos da óptica geométrica e o método de aproximação WKB fornecem um suporte adequado à descrição dos experimentos de RO (Gorbulov e Kornbluh, 2003). A Figura 1 representa a geometria de um evento de ocultação entre os satélites GPS-oc e LEO (*Low Earth Orbiter*), que se encontra na

região de órbita baixa da Terra. A calibração dos relógios dos receptores e transmissores requer a seguinte configuração: o receptor de ocultação (LEO) deve visualizar simultaneamente o transmissor de ocultação (GPS-oc) e o transmissor de visada direta (GPS-cal); um segundo transmissor de visada direta (GS) deve visualizar simultaneamente o GPS-oc e o GPS-cal. Um exemplo de modelagem dos sinais de GPS envolvidos nestes experimentos, e os respectivos observáveis, pode ser encontrado em Jakowski *et al.* (2002).

A Figura 1 também introduz os seguintes elementos importantes: o ângulo de refração (*bending angle*) e o parâmetro de impacto radial. O ângulo de refração,  $\alpha$ , é definido como o ângulo entre o raio de visada do sinal antes e depois da passagem pela atmosfera; o parâmetro de impacto,  $p$ , é definido como a distância entre o centro de simetria da Terra e o prolongamento do traçado que representa o caminho do sinal no vácuo. Durante um evento de ocultação, seja no modo ascendente (sinais de ocultação acima do ponto de tangência) ou no modo descendente (sinais de ocultação abaixo do ponto de tangência), a variação do ângulo  $\alpha$  em relação ao parâmetro de impacto  $p$  é dependente do índice de refração atmosférico,  $n$ . Teoricamente, a relação  $\alpha(p)$  pode ser convertida por intermédio da transformada de Abel (problema inverso) em perfis verticais de índice de refração,  $n(r)$  (Gaykovich, *et al.* 1983; Hocke, 1997; Holzschuh, 2007).

Em experimentos de RO, medidas diretas de  $\alpha$  e  $p$  são tecnicamente difíceis de ser realizadas. Para contornar estas dificuldades, medidas do desvio Doppler na frequência do sinal, calculado pela projeção das velocidades dos satélites GPS e LEO (Figura 1) em relação ao caminho percorrido pelo sinal entre o transmissor e o receptor, combinada à sua relação geométrica com o traçado da ocultação, podem ser utilizadas para estimar em primeira ordem valores para  $\alpha$  e  $p$ . A dedução formal, passo a passo, deste procedimento, pode ser encontrada em Gorbulov e Kornbluh (2003).

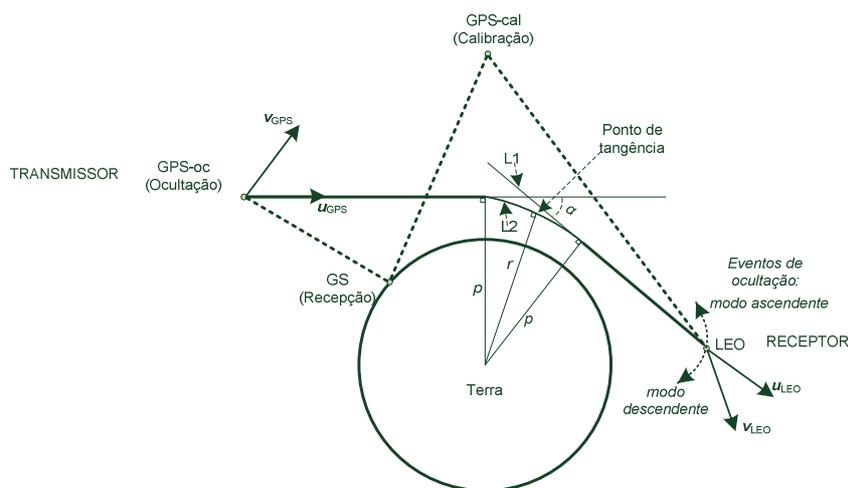


Figura 1 - Geometria da ocultação GPS, usando de conceitos advindos da óptica geométrica aplicada ao problema de RO. Os sinais de frequência L1 e L2 (banda L) percorrem caminhos distintos devido à característica dispersiva do meio ionosférico.

Fonte: Adaptação de Chi (2009).

Em aplicações atmosféricas, a refratividade do meio é definida por  $N = 10^6(n-1)$ . Na atmosfera neutra,  $N$  relaciona-se à temperatura ( $T$ ), à pressão parcial hidrostática ( $P_d$ ) e à pressão parcial do vapor de água ( $P_w$ ) (Kursinski e Hajj, 2001). Aproximadamente 90% do “atraso troposférico” é devido à parcela hidrostática. A parcela ‘úmida’ depende do vapor d’água, que, devido à sua alta variabilidade, é de difícil parametrização. Na ionosfera, que é um meio parcialmente ionizado e dispersivo,  $N$  é dependente da frequência do sinal de propagação ( $f$ ) e da densidade eletrônica ( $n_e$ ). No espectro das frequências de sinais de GNSS, 99.9% do “atraso ionosférico” deve-se à contribuição de  $N$  em primeira ordem, proveniente da relação de dispersão básica ionosférica, em que se negligenciam os efeitos do campo geomagnético. Os efeitos de segunda ordem (equação de Appleton-Hartree) são discutidos em Bassiri e Hajj, (1993) e Marques *et al* (2011). Assim, uma parametrização aproximada à refratividade é dada por:

$$N = a_1 \frac{P_d}{T} + a_2 \frac{P_d}{T^2} + a_3 \frac{P_w}{T^2} - b \frac{n_e}{f^2}.$$

Os valores dos fatores dimensionais  $a$  e  $b$  estão em contínua avaliação experimental (Bevis *et al.*, 1994).

O atraso temporal do sinal GNSS é a medida fundamental em experimentos de RO, que é uma função da refratividade atmosférica. O atraso temporal contém, basicamente, três tipos de erros: o erro relacionado à precisão da órbita entre GNSS – LEO; o erro devido ao atraso somente devido à ionosfera e a baixa atmosfera (excesso de fase – na realidade um sinal); e o ruído (multicaminho e os efeitos intrínsecos que limitam a resolução do receptor). As técnicas empregadas em processamento dos sinais GNSS envolvem combinações lineares das diferenças de fases (simples e duplas diferenças) entre os atrasos temporais (Wofmann-Wellenhof, *et al.* 2008). Os dados relacionados a um evento de ocultação, em função do tempo e da altura do ponto de tangência, produzem os perfis de variação da relação sinal/ruído, do atraso do excesso de fase e Doppler.

O processo de obtenção dos perfis atmosféricos é caracterizado por duas etapas. Inicialmente, os perfis de variação da relação sinal/ruído e do atraso do excesso de fase são usados para determinar o perfil do ângulo de refração em função do parâmetro de impacto,  $\alpha(p)$ . Em seguida,  $\alpha(p)$  é invertido (transformada de Abel) para gerar a refratividade e, posteriormente, os perfis verticais de temperatura, pressão, umidade e densidade eletrônica ionosférica são obtidos. Note que somente com a determinação da refratividade, não é possível avaliar as quantidades geofísicas de interesse sem a suposição de condicionantes. Por exemplo, na estratosfera a densidade numérica do vapor d’água é muito pequena, tal que a sua contribuição à refratividade é desprezível. Uma análise semelhante é válida à densidade eletrônica. Assim, tem-se  $N = N(P, T)$ . A solução para as duas grandezas atmosféricas é alcançada se estabelecermos um modelo de fluido, tal como as equações do equilíbrio

hidrostático e a lei dos gases perfeitos (dito, solução hidrostática).

As aplicações das medidas de RO em previsão meteorológica (informação do conteúdo de vapor d’água) têm sido profícuas. Uma nova vertente de pesquisa em assimilação de dados de RO, com o objetivo de incorporá-los aos modelos numéricos de circulação global e regional, tem demonstrado ser promissora para estudos climáticos de longo prazo.

A aplicação fundamental da RO do ponto de vista da aeronomia ionosférica é a possibilidade de medir o perfil vertical da densidade eletrônica. Em princípio, a resolução vertical é elevada; entretanto, os valores obtidos representam o conteúdo eletrônico total (TEC), que é definido por:

$$TEC = \int_0^{\infty} n_e dz$$

A inversão da medida do TEC pode ser realizada supondo simetria esférica (Lei, *et al.* 2007). Por conseguinte, na presença de gradientes horizontais da densidade eletrônica, a técnica produzirá um perfil apenas aproximado do real. Faz-se necessário conhecer a variabilidade da estrutura horizontal ionosférica, seja por intermédio de medidas radiométricas de satélite conjuntas (Dymond *et al.* 2009) ou por modelos numéricos ionosféricos (Jakowski *et al.* 2002), tornando a inversão um processo laborioso.

### Metodologia de desenvolvimento do software

A concepção do sistema de software do CDAAC/BR para processamento dos dados de RO baseia-se no fluxo de dados provenientes dos receptores GNSS, de órbitas dos satélites GNSS e LEO e de dados coletados por estações GNSS terrestres e de todos os processos até que os produtos cheguem aos usuários, conforme ilustrado na Figura 2.

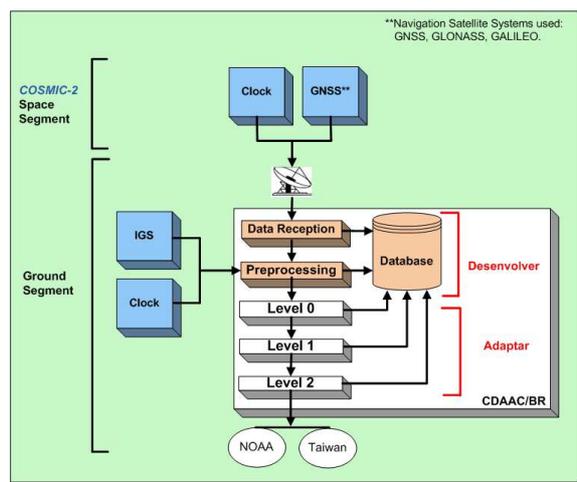


Figura 2 – Recepção e envio de dados do COSMIC-2 para o processamento no CDAAC/BR.

Também estão representados os componentes do software ou programas computacionais a serem desenvolvidos e aqueles que deverão ser adaptados por estarem disponíveis como parte da cooperação estabelecida com o CDACC (UCAR) e a UNESP PP.

Os dados originais adquiridos pela estação terrena (segmento solo) devem ser armazenados, tratados e formatados para realização de pós-processamento, representado por três níveis de processamentos dos dados de RO (*Level0*, *Level1* e *Level2*).

A fase de pós-processamento dos dados de dados de RO, requer uma adaptação dos programas computacionais disponíveis para o COSMIC e que deverão ser adaptados para o COSMIC-2. O início da fase, representado pelo nível zero de processamento (*Level0*), está relacionado ao processamento dos dados formatados dos receptores GNSS. O nível intermediário está relacionado ao processamento da ocultação atmosférica e ao cálculo do conteúdo total eletrônico na ionosfera (TEC). E, o último nível de processamento dos dados (*Level2*) está relacionado com a geração de dados de vapor d'água na troposfera e de temperatura na estratosfera, bem como a densidade de elétrons na região ionosférica.

Os componentes de software que constituem os níveis *Level0*, *Level1* são mostrados na Figura 3, que apresenta uma adaptação da arquitetura do software CDAAC/UCAR para o CDAAC/BR. Os componentes a serem adaptados, que integram o nível de processamento *Level2* são aqueles relacionados aos métodos de determinação de órbitas precisas dos satélites LEO e GNSS e os destinados à geração de produtos para monitoramento e pesquisa do clima espacial. São eles: componente de análise da atmosfera neutra para gerar umidade do ar na troposfera e temperatura na estratosfera. E, o componente de análise da ionosfera para gerar o TEC.

Para obtenção de órbitas de precisão serão utilizados os métodos de alta acurácia para determinação de órbita, denominado *Precision Orbit Determination* (POD). O software do CDAAC/BR deverá ser capaz de alcançar

esta acurácia em tempo quase real. Para o caso dos satélites LEO, será aplicado o método de posicionamento por ponto preciso (PPP) (Marques, 2012). E, para os satélites GNSS, serão utilizadas as órbitas IGU (IGU, 2013).

Para o componente de análise da atmosfera neutra, serão realizadas adaptações do programa ROAM (CDAAC-b, 2013), desenvolvido pela UCAR e que atualmente realiza o processamento dos dados do COSMIC de UCAR (*University Corporation for Atmospheric Research*). E, ainda o ROPP: *Radio Occultation Processing Package* (ROM SAF, 2013), testado com dados obtidos do projeto COSMIC. Um dos responsáveis pelo programa é a *Meteorological Office* (MetOffice, 2013), órgão governamental do Reino Unido, que oferece serviço de previsão de tempo.

O componente de software de análise da ionosfera para o CDAAC/BR será construído a partir da adaptação do programa GMRION, desenvolvido em UCAR (CDAAC-b, 2013), que utiliza algoritmos de inversão de sinais de RO na ionosfera para cálculo do TEC, encontrando-se ainda em fase de validação.

Em suma, a metodologia de desenvolvimento do software de processamento dos dados de RO do CDAAC/BR baseia-se na realização das seguintes atividades:

- Concepção definitiva da arquitetura do software, definição das interfaces e formatos dos dados;
- Conhecimento aprofundado do conteúdo dos dados e prepará-los para processamento;
- Desenvolvimento de um banco de dados adequado para pré e pós- processamento;
- Coleta de dados para determinação de órbitas precisas a partir do método PPP e órbitas IGU;
- Compreensão dos algoritmos ROAM e ROPP, adaptando-os ao CDAAC/BR;
- Compreensão do algoritmo GMRION, adaptando-o ao CDAAC/BR;

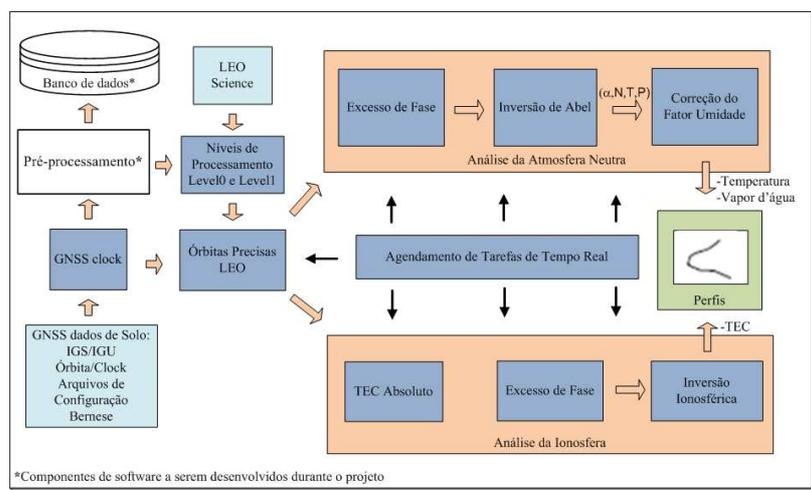


Figura 3 – Arquitetura CDAAC/BR.

Fonte: Adaptado de Schreiner *et al.* (2012).

- Verificação do software integrado, utilizando dados da constelação do programa COSMIC;
- Desenvolvimento de procedimentos para validação de todos os componentes do software;
- Comparação dos resultados com programas similares de outros grupos de RO (*e. g.* Takahashi *et al.* 2013);
- Adaptação do software de processamento já integrado para o COSMIC-2.

As atividades de verificação e validação do software de processamento de dados de RO do CDAAC/BR serão realizadas a partir dos dados obtidos do programa COSMIC em operação, por estar sendo considerada a possibilidade de haver atraso no lançamento inicial previsto para 2016 dos seis primeiros satélites de inclinação baixa do programa COSMIC-2.

### Resultados esperados

Como resultado do projeto proposto, espera-se que o sistema de software de processamento de dados de RO provenientes da constelação de satélites do programa COSMIC-2, seja capaz de gerar em tempo real os seguintes produtos finais: dados de umidade do ar na troposfera, temperatura na estratosfera e o conteúdo total de elétrons da ionosfera para a previsão de tempo e clima espacial. Como resultado espera-se ainda que os seguintes objetivos sejam alcançados:

- Avanço significativo no controle dos dados obtidos com a missão COSMIC-2, visto que a arquitetura do software permite que se tenha acesso a vários níveis de processamento de dados e ainda, com a possibilidade de armazená-los e distribuí-los;
- Controle sobre o processamento de dados locais de interesse para o monitoramento e pesquisa do clima espacial;
- Aquisição de grande volume de observações com características como resolução, cobertura e precisão para pesquisa do clima espacial;
- Obtenção de conhecimento na análise de medidas de radio ocultação como decorrência do desenvolvimento do software de processamento;
- Contribuir com o desenvolvimento científico e tecnológico na área do projeto.

Este projeto visa capacitar o software para quando ambas as constelações do programa COSMIC-2 estiverem operacionais (previsão para 2018), ao qual deverá ser capaz de fornecer até 12.000 perfis de umidade do ar e temperatura por dia. Um aumento considerado revolucionário no número de observações atmosféricas e que irá beneficiar fortemente as comunidades de monitoramento e pesquisa do clima espacial.

### Considerações finais

O projeto encontra-se na fase de formalização de um acordo de intercâmbio internacional entre o INPE e UCAR, visto que o desenvolvimento do software de processamento de dados de RO do CDAAC/BR apoia-se na colaboração estabelecida com a equipe do CDAAC/UCAR. A parceria já firmada entre a UNESP PP e o EMBRACE/INPE também auxiliará no processo de adaptação do programa ROAM (versão 5.0), que se encontra em uso na UNESP, bem como na utilização do método de posicionamento por ponto preciso (PPP) para o caso dos satélites LEO.

### Agradecimentos

Os agradecimentos dos autores ao CNPq (instituição governamental) pelo suporte a pesquisa através da subvenção: 303807/2013-0.

### Referências

- BASSIRI, S., HAJJ, G. High-order ionospheric effects on the global positioning system observables and means of modelling them. *Manuscr. Geod.*, 18, 280-289, 1993.
- BEVIS, M., BUSINGER, S., CHISWELL, S., HERRING, T. A., ANTHES, R. A., ROCKEN, C., AND WARE, R. H.: GPS meteorology: mapping zenith wet delays onto precipitable water, *J. Appl. Met.*, 33, 3, 379-386, 1994.
- CHI O. Atmospheric Sensing Using GNSS Occultations, 381-397. In: *GNSS Applications and Methods* (S.Gleason, D. Gebre-Egziabher), Artech House, 2009.
- CDAAC-b (COSMIC Data Analysis and Archive Center). ROAM and GMRIION algorithms. Disponível em: <<http://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/cdaac/doc/overview.html>> Acesso em 20/08/2013.
- CDAAC-a (COSMIC Data Analysis and Archive Center). Disponível em: <<http://opensky.library.ucar.edu/collections/OSGC-000-000-004-447>>. Acesso em 10/07/2013.
- COSMIC-2, Cosmic Program Office. **COSMIC (Constellation Observing System for Meteorology, Ionosphere and Climate)**. Disponível em: <<http://www.cosmic.ucar.edu/cosmic2/>> Acesso em 21/01/2013.
- DYMOND, K. F., BUDZIEN, S. A., CHUA, D. H.; COKER, C., J-Y. LIU. Tomographic Reconstruction of the Low-Latitude Nighttime Electron Density Using FORMOSAT-3/COSMIC Radio Occultation and UV Photometer Data. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 20, 1, 215-219, 2009.
- EMBRACE, Centro de Estudo e Monitoramento Brasileiro do Clima Espacial. **INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais)**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/climaespacial/>>. Acesso em 21/01/2013.

- GAYKOVICH, K. P., GUREVICH, A. S., NAUMOV, A. P. On a Reconstruction of Meteorological Parameters from Intra-Atmospheric Measurements of Optical Refraction of Cosmic Sources, *Investiya, Atmos. and Oceanic Phys.*, 19, 7, 507-512, 1983.
- GEGE (Grupo de Estudo em Geodésia Espacial), 2013. Disponível em: < <http://gege.fct.unesp.br>>. Acesso em 04/02/ 2013.
- GORBUNOV, M. E., KORNBLUEH, L. Principles of variational assimilation of GNSS radio occultation data, *Max Planck Institut fur Meteorologie, Report 350*, 2003.
- HOCKE, K. Inversion of GPS meteorology data. *Annales Geophysicae*, 15, 4, 443-450, 1997.
- HOFMANN-WELLENHOF, B.; LICHTENEGGER, H.; WASLE, E. GNSS – *Global Navigation Satellite Systems GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer, New York, 2008.
- HOLZSCHUH, M. L. **Recuperação de Perfis Atmosféricos a partir de Ocultação GPS: Fundamentos, Implementação e Análise de Resultados**. 2007, 116 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/UNESP – Campus de Presidente Prudente, 2007. Disponível em: <[http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d\\_holzschuh\\_ml.pdf](http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/d_holzschuh_ml.pdf)>. Acesso em: 26/03/2013.
- IGU. Ultra-Rapid GPS Orbit Combination, 2013. Disponível em <<http://acc.igs.org/>>. Acesso em: 11/12/2013.
- JAKOWSKI, N., A. WEHRENFENNIG, S. HEISE, C. REIGBER, H. LUHR, L. GRUNWALDT AND T. K. MEEHAN (2002). GPS radio occultation measurements of the ionosphere from CHAMP: Early results. *Geophysical Research Letters*, 29, 10, 1-4, 2002.
- KURSINSKI, E. R. E HAJJ, G. A. A comparison of water vapor derived from GPS occultations and global weather analyses. *J Geophys. Res.*, 106, D1, 1113-1138, 2001.
- LEI, J.H., SYNDERGAARD, S., BURNS, A.G., SOLOMON, S.C., WANG, W.B., ZENG, Z., ROBLE, R.G., WU, Q., KUO, Y.H., HOLT, J.M., ZHANG, S.R., HYSELL, D.L., RODRIGUES, F.S. AND LIN, C.H. Comparison of COSMIC ionospheric measurements with ground-based observations and model predictions: Preliminary results. *Journal of Geophysical Research*, vol. 112, A07308, 2007.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F. G.; AQUINO, M. RINEX\_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. **GPS Solutions** (Heidelberg), v. 15, p. 305-314, 2011.
- MARQUES, H. A. M. **PPP em Tempo Real com Estimativa das Correções dos Relógios dos Satélites no Contexto de Rede GNSS**. 2012. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) - Universidade Estadual Paulista, Campus de Presidente Prudente, 2012. Disponível em [http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/t\\_marques\\_ha.pdf](http://www2.fct.unesp.br/pos/cartografia/docs/teses/t_marques_ha.pdf). Acesso em: 28/08/2013.
- METOFFICE (Meteorological Office), 2013. Disponível em: <<http://www.metoffice.gov.uk/>>. Acesso em: 12/02/2013.
- ROCKEN, C.; KUO, Y.; SOKOLOVSKIY, S. V.; ANTHES, R. A.. **The ROCSAT-3/ COSMIC Mission and Applications of GPS Radio Occultation Data to Weather and Climate** Applications of COSMIC to Meteorology and Climate. Proc. SPIE 5661, Remote Sensing Applications of the Global Positioning System, DOI: 10.1117/12.566544, 12p, December, 2004. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1117/12.566544>>. Acesso em: 26/03/2013.
- ROCKEN, C.; KUO, Y-H.; SCHREINER, W. S.; HUNT, D., SOKOLOVSKIY, S.; MCCORMICK, C. **COSMIC System Description**. Terr. Atmos. Ocean. Sci. (TAO), v.11, n.1, p 21–52, 2000.
- ROM SAF. The Radio Occultation Processing Package (ROPP). **ROM SAF GRM-16: ROPP Software Deliverable**, 2013. Disponível em <http://www.romsaf.org/software.php> Acesso em: 28/08/2013.
- SCHREINER, B., KUO, B., SOKOLOVSKIY, S., HUNT, D., YUE, X., ZENG J, HUDNUT K., SLEZIAK, M. WEE K, VANHOVE, T.; LIN J. 6th FORMOSAT-3/COSMIC Data Users Workshop 2012. Disponível em: <[http://www.cosmic.ucar.edu/oct2012workshop/presentations/Session2/schreiner\\_session2.pdf](http://www.cosmic.ucar.edu/oct2012workshop/presentations/Session2/schreiner_session2.pdf)>. Acesso em 19/03/2013.
- TAKAHASHI, H.; COSTA, S.; OTSUKA, Y.; SHIOKAWA, K.; MONICO, J. G.; Paula, E.; NOGUEIRA P.; Nardin, C. M.; GUEDES, F. B.; WRASSE, C. M.; IVO, A. S.; GOMES, V. C.; GARGARELA W. Jr.; SANT'ANNA, N. Dr. Diagnostics of Equatorial and low latitude ionosphere by TEC Mapping over Brazil, Elsevier, 2013.