# Cálculo de gradientes ionosféricos dos aeroportos brasileiros SBCT, SBFI e SBPA

***Calculation of ionospheric gradients of the SBCT, SBFI and SBPA Brazilian airports***

Lucas Xavier Pereira*, Vinícius Amadeu Stuani Pereira†

**RESUMO**

A investigação da usabilidade do *Ground-Based Augmentation System* (GBAS) em um determinado aeroporto compreende, primeiramente, o cálculo de gradientes ionosféricos para vários dias ionosféricos perturbados e calmos, e, a construção de modelos de risco ionosférico. Assim, utilizando o programa científico GTS (Gradientes pelo Time-Step), um conjunto de 29 datas selecionadas entre os anos de 2013 e 2015 e estações *Global Navigation Satellite System* (GNSS) da Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), foram obtidos os gradientes para três aeroportos internacionais brasileiros: Foz do Iguaçu/PR (SBFI), Porto Alegre/RS (SBPA) e São José dos Pinhais/PR (SBCT). Para os três aeroportos os gradientes extrapolaram o limite do *CONUS Threat Model*, inviabilizando o uso do GBAS da *Honeywell* em um primeiro momento nestes locais. No entanto, analisando os horários de ocorrência, verifica-se que é possível realizar pousos precisos utilizando GBAS em determinadas janelas: para SBFI uma provável janela para uso seria das 5h às 23h Tempo Universal (TU) (2h-20h local), para SBCT das 7h às 22h TU (4h-19h local) e, por fim, para SBPA das 6h às 23h TU (3h-20h).

**Palavras-chave:** GBAS, ionosfera, GNSS

**ABSTRACT**

The investigation of the usability of the Ground-Based Augmentation System (GBAS) in a given airport comprises, firstly, the calculation of ionospheric gradients for several disturbed and calm ionospheric days, and the construction of ionospheric threat models. Thus, using the GTS scientific program (Gradients by Time-Step), a set of 29 selected dates between the years 2013 and 2015 and Global Navigation Satellite System (GNSS) stations from Brazilian Network for Continuous Monitoring (RBMC), were obtained gradients for three Brazilian international airports: Foz do Iguaçu/PR (SBFI), Porto Alegre/RS (SBPA) and Sao Jose dos Pinhais/PR (SBCT). For the three airports, the gradients extrapolated the limit of the CONUS Threat Model, making the use of Honeywell GBAS unfeasible at first in these locations. However, analyzing the times of occurrence, it is verified that it is possible to make precise landings using GBAS in certain windows: for SBFI a likely window for use would be from 5:00 to 23:00 Universal Time (UT) (2:00-20:00 local time), for SBCT from 7:00 am to 22:00 UT (4:00-19:00 local time) and, finally, to SBPA from 6:00 to 23:00 UT (3:00-20:00 local time).

**Keywords:** GBAS, ionosphere, GNSS

## 1 INTRODUÇÃO

A camada ionosférica é uma das maiores fontes de erros sistemáticos no posicionamento e navegação pelo *Global Navigation Satellite System* (GNSS). Nos últimos anos os efeitos da ionosfera têm despertado grande interesse nacional e principalmente internacional, no que diz respeito ao uso do *Ground-Based Augmentation System* (GBAS), com destaque para as atividades do Instituto Nacional de Ciência e

Tecnologia "Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação Aérea" (INCT GNSS-NavAer) e pesquisas realizadas por Kim et al. (2015), Pereira (2018) e Pereira et al. (2021).

Para a investigação da usabilidade do GBAS nos principais aeroportos brasileiros é necessário, primordialmente: 1 – calcular gradientes ionosféricos em determinadas áreas do território nacional, as quais estão sujeitas a condições ionosféricas diferentes, e 2 – construir modelos de risco ionosférico a partir dos gradientes obtidos.

Neste sentido, e após demanda repassada pela Secretaria de Navegação Aérea Civil (SENAV) via o INCT GNSS-NavAer, será que é viável o uso do GBAS nos aeroportos internacionais de Foz do Iguaçu/PR (SBFI), Porto Alegre/RS (SBPA) e São José dos Pinhais/PR (SBCT)? Para isto serão estimados gradientes pelo *time-step method* (LEE et al., 2017), dada a existência de poucas estações GNSS ativas nestas regiões.

## 2 GBAS E MODELO DE RISCO IONOSFÉRICO

O GBAS foi desenvolvido para ser utilizado nas aproximações de precisão de aeronaves em aeroportos. As aproximações de precisão são realizadas por aeronaves equipadas com receptor GNSS, o qual faz uso de mensagens transmitidas via *Very High Frequency* (VHF) de uma estação GBAS instalada próximo à pista de um aeroporto. As mensagens contêm correções de posição, parâmetros de integridade e procedimentos de pouso (ICAO, 2013).

Para que o sistema GBAS atenda aos requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, limites devem ser impostos na variação dos erros ionosféricos entre a aeronave que se aproxima e as estações de referência, de modo a minimizar a perda de disponibilidade (DATTA-BARUA *et al.*, 2002).

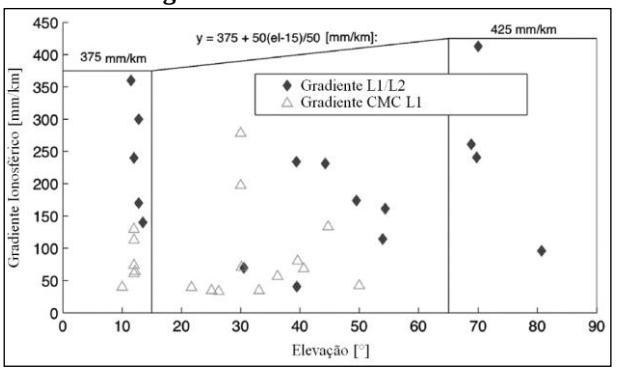
Com o intuito de estimar esses limites, a configuração do GBAS que deve ser modelada é aquela em que as estações de referência e o receptor da aeronave rastreiem simultaneamente uma determinada quantidade mínima de satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devidos à ionosfera. No entanto, esses atrasos não são iguais quando as linhas de visadas forem diferentes (DATTA-BARUA *et al.*, 2002). Dada a problemática, pesquisadores da *Stanford University* dos Estados Unidos desenvolveram um modelo de risco ionosférico, a fim de estimar a máxima decorrelação espacial existente entre o atraso na transmissão de um satélite a uma estação de referência e o atraso do sinal desse mesmo satélite ao receptor da aeronave. Tal estimativa é denominada de gradiente ionosférico (DATTA-BARUA *et al.*, 2010). Para a estimativa de gradientes são utilizadas estações GNSS de redes ativas próximas aos aeroportos.

O modelo em questão, denominado de *CONUS Threat Model*, utilizou dados GPS de vários anos da *Continuously Operating Reference Stations* (CORS) para a determinação dos parâmetros do modelo (gradiente ionosférico, extensão e velocidade da frente ionosférica e valor máximo de atraso ionosférico), contemplando diferentes cenários de atividades ionosféricas. A Fig. 1 apresenta os limites dos gradientes ionosféricos.

No entanto, a particularidade do modelo é que o mesmo foi desenvolvido para ser aplicado na região latitudinal dos Estados Unidos (médias latitudes), cujo comportamento da ionosfera é mais estável (DATTA-BARUA *et al.*, 2010). Para as demais regiões da Terra, o uso do *CONUS Threat Model* não é recomendado inicialmente (KIM *et al.*, 2015). Entre estas se encontra a região equatorial e de baixas latitudes, onde se localiza o Brasil, que apresenta a ocorrência AIE e cintilação ionosférica.

Baseado no *CONUS Threat Model*, alguns países desenvolveram, ou adaptaram, e avaliaram seus próprios modelos de risco ionosférico, como os casos da Alemanha Austrália, Coreia do Sul e Equador, por exemplo.

**Figura 1 – Limites dos gradientes ionosféricos do *CONUS Threat Model***




**Fonte: Datta-Baua *et al.* (2010)**

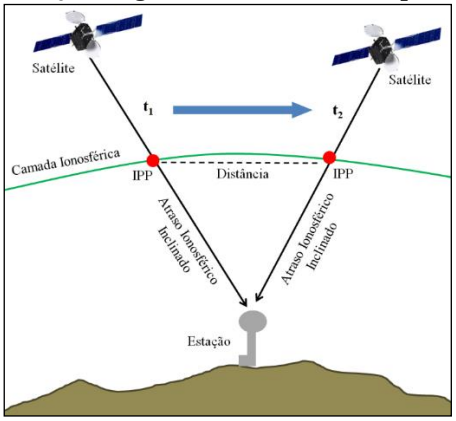
No Brasil, o órgão responsável pelo controle das atividades relacionadas ao espaço aéreo é o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Em 2011, o Departamento adquiriu uma estação GBAS da empresa norte-americana *Honeywell*, a qual foi instalada no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ, com o intuito de avaliar a qualidade e segurança do serviço no âmbito brasileiro. Entretanto, ressalva-se que o equipamento está certificado para operação somente nos territórios dos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália, por meio dos modelos de risco (ICEA, 2013).

## 2.1 Determinação de Gradiente Ionosférico pelo *Time-Step Method*

Gradientes ionosféricos podem ser estimados a partir de dois métodos: *station-pair method* e *time-step method*, os quais se diferenciam a partir das configurações de estações e de satélites (LEE *et al*., 2007).

O *time-step method* foi desenvolvido com o intuito de aumentar a amostragem de gradientes ionosféricos, bem como obter gradientes com distâncias menores que a separação física das estações da rede (DATTA-BARUA *et al*., 2002). O método agrupa um único satélite e uma única estação como um par (Fig. 2).

**Figura 2 – Determinação de gradientes ionosféricos pelo *time-step method***




**Fonte: Pereira (2018)**

O atraso ionosférico entre o satélite e o receptor da estação em um instante $t_1$ é comparado com o atraso do mesmo par em um instante posterior $t_2$. O gradiente é então calculado pela divisão entre o valor absoluto da diferença dos atrasos dos instantes $t_1$ e $t_2$ pela distância entre os *Ionospheric Pierce Point* (IPP) referentes aos instantes $t_1$ e $t_2$. A Eq. (1) apresenta o cálculo do gradiente:

$$g^s = \frac{\left| I^s_{r\,t_1} - I^s_{r\,t_2} \right|}{D_{IPPt1t2}} \tag{1}$$

onde: $I^s_{r\,t_1}$ - atraso ionosférico para o instante $t_1$, em milímetros; $I^s_{r\,t_2}$ - atraso ionosférico para o instante $t_2$, em milímetros; e $D_{IPP_{t1t2}}$ - distância entre os IPP dos instantes $t_1$ e $t_2$, em quilômetros.

## 3 PROGRAMA CIENTÍFICO GTS

Para a estimativa de gradientes ionosféricos pelo *time-step method* para os satélites GPS tem-se disponível o programa científico GTS (Gradientes pelo Time-Step), desenvolvido pelo Prof. Dr. Vinícius A. S. Pereira.

A partir da informação do nome da estação, da resolução amostral do arquivo RINEX, do ano, do DOY (*Day Of Year*), da máscara de elevação e da altura da camada ionosférica, o programa estima e representa os gradientes ionosféricos para cada satélite rastreado pela estação.

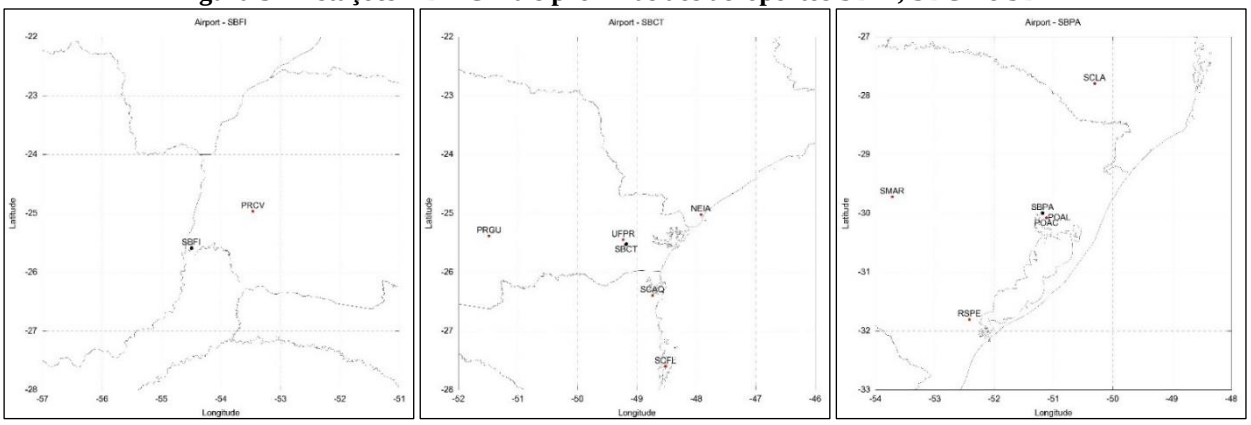
Salienta-se que o arquivo RINEX de observação da estação e as efemérides precisas do dia de interesse devem ser obtidos pelo usuário e inseridos no diretório do programa.

## 4 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E ANÁLISES

Foram selecionadas 29 datas de processamento entre os anos de 2013 e 2015, contemplando o ápice do ciclo solar 24. Para a seleção das datas foram considerados dias com alta e baixa atividades geomagnéticas/ionosféricas, a partir dos valores dos índices geomagnéticos Kp e Dst.

Na sequência foram identificadas as estações GNSS da RBMC mais próximas dos três aeroportos em estudo na pesquisa, e que também estejam operantes nas datas selecionadas. A Fig. 3 apresenta as localizações.

**Figura 3 – Estações RBMC mais próximas aos aeroportos SBFI, SBCT e SBPA**




**Fonte: autoria própria (2021)**

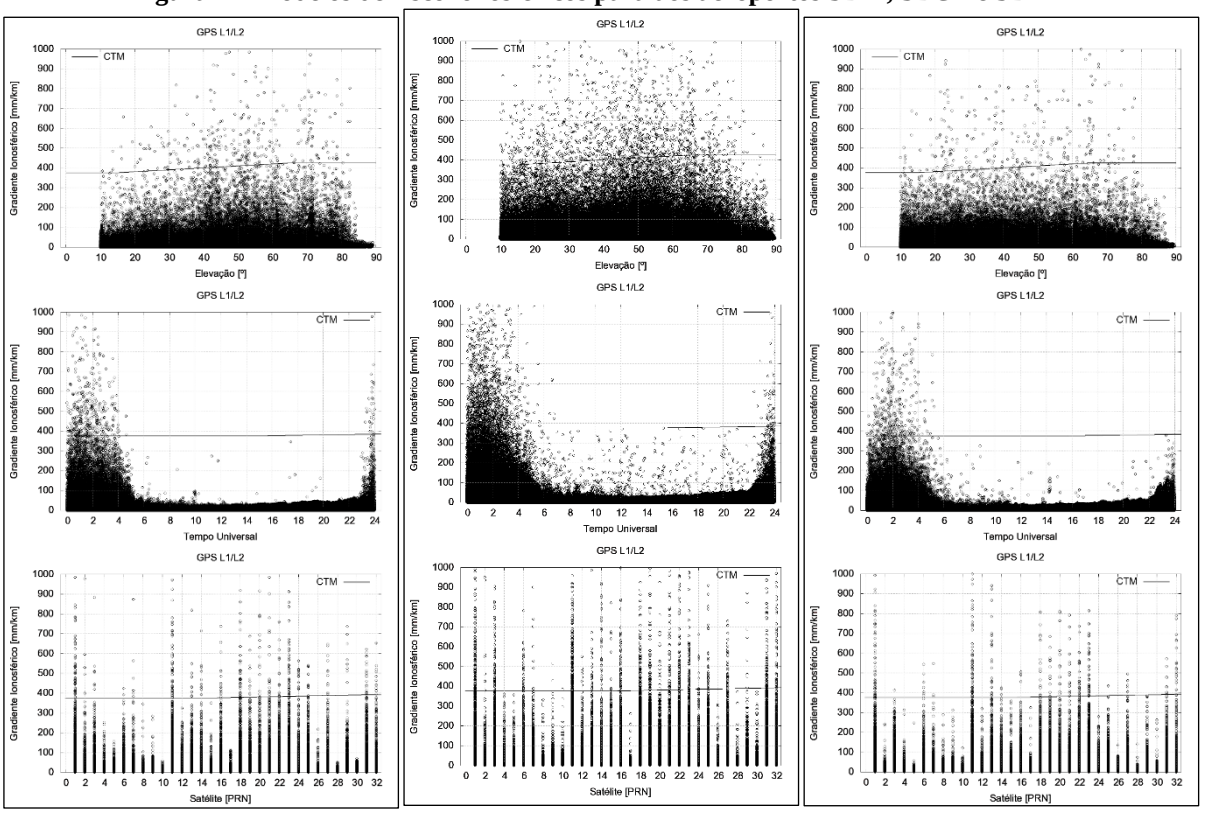
Para o conjunto de datas e estações selecionadas foram realizados os *downloads* dos arquivos RINEX de observação e das efemérides precisas.

Assim, utilizando o programa científico GTS, foram estimados os gradientes ionosféricos de cada aeroporto. Para tanto foi considerado uma resolução amostral de 30 segundos e uma máscara de elevação de 10°. Essa combinação permite obter gradientes com distância média entre os IPP no valor de 10 km.

Uma vez que em Porto Alegre/RS há uma estação da rede INCT GNSS-NavAer, foi possível realizar uma validação final dos gradientes na região do aeroporto; para os demais aeroportos não foi possível realizar a validação final. Tal validação consiste em comparar os horários de ocorrências dos elevados gradientes com os valores do índice de cintilação ionosférica S4.

Por fim, foram construídos os modelos de risco para os três aeroportos (gráfico que relaciona os gradientes com o ângulo de elevação dos satélites para todas as datas selecionadas). Tais modelos são apresentados na Fig. 4, em que CTM corresponde ao limiar do *CONUS Threat Model*. Também são apresentados os gráficos relacionando os gradientes com o Tempo Universal e com satélites.

**Figura 4 – Modelos de risco ionosféricos para aos aeroportos SBFI, SBCT e SBPA**




**Fonte: autoria própria (2021)**

A partir dos modelos de risco observa-se que, nos três aeroportos, os gradientes ionosféricos foram superiores ao limiar de 425 mm/km do *CONUS Threat Model*, o que inviabiliza, em um primeiro momento, a utilização do GBAS para pouso preciso nestes locais. Entretanto, ao analisar os gradientes pelos horários de ocorrências, é possível identificar que os gradientes que excederam o limiar estão concentrados durante o período noturno. Assim, é possível definir prováveis janelas de restrições ao uso do GBAS (Tab. 1).

**Tabela 1 – Prováveis janelas de restrições ao uso do GBAS nos aeroportos SBFI, SBCT e SBPA**

| Aeroporto | Janela de Restrição |
|---|---|
| SBFI | 23h-5h TU (20h-2h local) |
| SBCT | 22h-7h TU (19h-4h local) |
| SBPA | 23h-6h TU (20h-3h local) |

**Fonte: autoria própria (2021)**

## 5 CONCLUSÃO

A pesquisa proporcionou a estimativa de gradientes ionosféricos para os aeroportos internacionais de Foz do Iguaçu/PR (SBFI), Porto Alegre/RS (SBPA) e São José dos Pinhais/PR (SBCT), conforme demanda repassada do SENAV ao INCT GNSS-NavAer.

Com base nos gradientes pode-se verificar que os gradientes extrapolam o limite do *CONUS Threat Model*, inviabilizando o uso do GBAS da *Honeywell* em um primeiro momento nestes três aeroportos considerados.

No entanto, analisando os horários de ocorrência, verifica-se que é possível realizar pousos precisos utilizando GBAS em determinadas janelas, principalmente durante o dia. Para a região do aeroporto de Foz do Iguaçu, uma provável janela seria das 5h às 23h TU (2h-20h local), para a região de Curitiba/São José dos Pinhais das 7h às 22h TU (4h-19h local) e, por fim, para a região de Porto Alegre, das 6h às 23h TU (3h-20h).

## AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) – Brasil.

## REFERÊNCIAS

DATTA-BARUA, S.; WALTER, T.; PULLEN, S.; LUO, M.; BLANCH, J.; ENGE, P. Using WAAS ionospheric data to estimate LAAS short baseline gradients. **Proceedings of the National Technical Meeting of the Institute of Navigation**, San Diego, 2002. pp. 523-530

DATTA-BARUA, S.; LEE, J.; PULLEN, S.; LUO, M.; ENE, A.; QIU, D.; ZHANG, G.; ENGE, P. Ionospheric threat parameterization for local area Global-Positioning-System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, vol. 47, n. 4, 2010. pp. 1141-1151

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Guide for Ground Based Augmentation System Implementation**, 2013. Disponível em: <https://www.icao.int/SAM/ eDocuments/GBASGuide.pdf>. Acesso em: 24 out. 2020.

ICAO. International Civil Aviation Organization. **Global Navigation Satellite System (Gnss) Manual 2nd Edition (Doc 9849)**, 2013. Disponível em: <http://www.icao.int/ airnavigation/Lists/T_Documents/DispForm.aspx?ID=63>. Acesso em: 15 dez. 2020.

ICEA. Instituto de Controle do Espaço Aéreo. **Relatório técnico sobre a análise de dados ionosféricos e dados de desempenho do sistema GBAS instalado no aeroporto do Galeão no Rio de Janeiro**. Relatório n° 001/PCCT/2013, dez. 2013.

KIM, M.; CHOI, Y.; JUN, H. S.; LEE, J. GBAS ionospheric threat model assessment for category I operation in the Korean region. **GPS Solutions**, vol. 19, n. 3, 2015.

LEE, J.; PULLEN, S.; DATTA-BARUA, S.; ENGE, P. Assessment of ionosphere spatial decorrelation for Global Positioning System-Based aircraft landing systems. **Journal of Aircraft**, vol. 44, n. 5, 2007. pp. 1662-1669

PEREIRA, V. A. S. **Investigação da usabilidade do GBAS no Brasil**. Tese de Doutorado em Ciências Cartográficas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Presidente Prudente, 2018. 305p.

PEREIRA, V. A. S.; MONICO, J. F. G.; CAMARGO, P. O. Estimation and analysis of protection levels for precise approach at Rio de Janeiro international airport using real time σvig for each GPS and GLONASS satellite. **Boletim de Ciências Geodésicas**, vol. 27, p. 1-20, 2021.