



Modelo de risco ionosférico temporal para o aeroporto estadual de Presidente Prudente/SP visando a certificação de um GBAS

Temporal ionospheric threat model for the Presidente Prudente state airport aiming at the certification of a GBAS

Ana Carolina Schleicher Homem¹, Vinícius Amadeu Stuani Pereira²

RESUMO

Para a certificação de um GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) em um determinado aeroporto é necessário, primordialmente, o cálculo de gradientes ionosféricos, contemplando vários dias ionosféricos perturbados e calmos, e, a construção do modelo de risco ionosférico. Assim, utilizando o programa *Ion_Index*, um conjunto de 185 datas selecionadas entre os anos de 2013 e 2022 e seis estações GNSS (*Global Navigation Satellite System*) da rede INCT GNSS-NavAer, foram obtidos os gradientes pelo *time-step method* e o índice de irregularidades ROTI para a região do aeroporto estadual de Presidente Prudente (código ICAO – SBDN). Uma vez validados os eventos ionosféricos a partir da comparação do ROTI com índice de cintilação S4 das estações, verificou-se que os gradientes extrapolaram o limite máximo do *CONUS Threat Model* (425 mm/km), inviabilizando o uso do GBAS da Honeywell em um primeiro momento no local. No entanto, analisando os horários de ocorrências e as estações do ano, verifica-se que é possível estabelecer prováveis janelas de restrições ao uso do GBAS: para o outono das 23h às 4h30 Tempo Universal (TU) (20h-1h30 local), para o inverno não há restrições, para a primavera das 22h30 às 4h TU (19h30-1h local) e para o verão das 22h30 às 5h TU (19h30-2h local).

PALAVRAS-CHAVE: GBAS; GNSS; ionosfera.

ABSTRACT

For the certification of a GBAS (*Ground-Based Augmentation System*) at a given airport, it is primarily necessary to calculate ionospheric gradients, considering several disturbed and calm ionospheric days, and the construction of the ionospheric threat model. Thus, using the *Ion_Index* program, a set of 185 dates selected between the years 2013 and 2022 and six GNSS (*Global Navigation Satellite System*) stations from the INCT GNSS-NavAer network, the gradients were obtained using the time-step method and the index of irregularities ROTI for the region of Presidente Prudente state airport (ICAO code – SBDN). Once the ionospheric events were validated by comparing the ROTI with the stations' S4 scintillation index, it was found that the gradients exceeded the maximum limit of the *CONUS Threat Model* (425 mm/km), making it unfeasible to use Honeywell's GBAS in a first moment on site. However, analyzing the times of occurrence and the seasons of the year, it appears that it is possible to establish probable windows of restrictions on the use of GBAS: for Autumn from 23h to 4h30 Universal Time (UT) (20h-1h30 local), for Winter there are no restrictions, for Spring from 22h30 to 4h UT (19h30-1h local) and for Summer from 22h30 to 5h UT (19h30-2h local).

KEYWORDS: GBAS; GNSS; ionosphere.

INTRODUÇÃO

A camada ionosférica é uma das principais fontes de erros sistemáticos na navegação e posicionamento pelo GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Nos últimos anos os efeitos da ionosfera têm despertado grande interesse da comunidade científica, no que diz respeito ao uso do GBAS (*Ground-Based Augmentation System* – sistema que auxilia o pouso preciso de aeronaves a partir do GNSS), com destaque para as atividades do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “Tecnologia GNSS no Suporte à Navegação

¹ Bolsista de Iniciação Científica da UTFPR. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Santa Helena, Paraná, Brasil. E-mail: anahom@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 7681859844749402.

² Docente no Curso de Agronomia. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Santa Helena, Paraná, Brasil. E-mail: vpereira@utfpr.edu.br. ID Lattes: 3206540313926848.



Aérea” (INCT GNSS-NavAer, <https://inct-gnss-नाव्ाer.fct.unesp.br/pt/>) e pesquisas realizadas por Pereira (2018).

Para a certificação da usabilidade do GBAS em qualquer aeroporto é necessário: 1 – calcular gradientes ionosféricos em determinadas áreas do território nacional, as quais estão sujeitas a condições ionosféricas diferentes; 2 – validar as atividades ionosféricas identificadas; e 3 – construir um modelo de risco ionosférico a partir dos gradientes obtidos.

Assim, após demanda repassada pela Secretaria de Navegação Aérea Civil (SENAV) via o INCT GNSS-NavAer, será que é viável o uso do GBAS no aeroporto estadual de Presidente Prudente/SP (código ICAO – SBDN)? Dessa forma serão calculados gradientes pelo *time-step method* (LEE et al., 2017).

GBAS E MODELO DE RISCO IONOSFÉRICO

O GBAS foi concebido para ser utilizado nos pousos de precisão de aeronaves em aeroportos. Estes pousos são realizados por aeronaves equipadas com receptor GNSS, o qual faz uso de mensagens transmitidas de uma estação GBAS instalada próximo à pista de um aeroporto. As mensagens contêm correções de posição, parâmetros de integridade e procedimentos de pouso.

Para que o sistema GBAS atenda aos requisitos de desempenho de navegação estabelecidos pela ICAO, limiares devem ser impostos na variação dos erros da ionosfera entre a aeronave e as estações de referência (DATTA-BARUA et al., 2010).

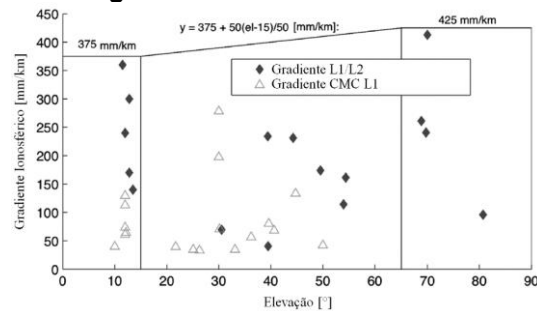
Com o objetivo de estimar esses limiares, a configuração do GBAS que deve ser implementada é aquela em que as estações de referência e o receptor da aeronave rastreiem, ao mesmo tempo, uma determinada quantidade mínima de satélites, cujos sinais sejam submetidos a atrasos devidos à ionosfera. Entretanto, esses atrasos não são os mesmos quando as linhas de visadas forem diferentes (DATTA-BARUA et al., 2010). Devido a isso, cientistas da Stanford University desenvolveram um modelo de risco ionosférico, a fim de determinar 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 o cálculo de gradientes são utilizadas estações GNSS de redes ativas próximas aos aeroportos.

O modelo citado, denominado de *CONUS Threat Model*, utilizou dados GNSS de vários anos da rede CORS (*Continuously Operating Reference Stations*) para a determinação dos gradientes ionosféricos, contemplando diferentes cenários de atividades ionosféricas. A Figura 1 apresenta os limites do modelo (de 375 a 425 mm/km).

Porém, uma característica do modelo é que o mesmo foi construído 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 *CONUS Threat Model* não é recomendado inicialmente, como o Brasil, localizado na região equatorial e de baixas latitudes.

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

Figura 1 – Limites dos gradientes ionosféricos do CONUS Threat Model



Fonte: Datta-Barua et al. (2010).

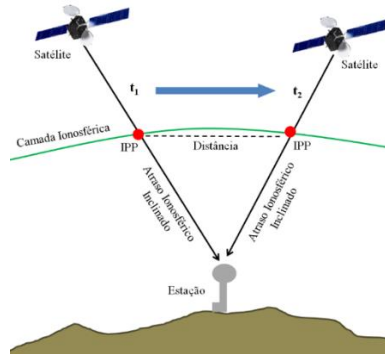
No Brasil o órgão responsável pelo controle das atividades relacionadas ao espaço aéreo é o DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo). Em 2011 o Departamento adquiriu um GBAS da Honeywell, o qual foi instalado no aeroporto internacional do Rio de Janeiro/RJ. Porém, até hoje o equipamento não recebeu certificação para uso devido as fortes atividades ionosféricas, conforme relatado por Pereira (2018). Ressalva-se que tal equipamento está certificado para operação somente nos territórios dos Estados Unidos, Alemanha e parte da Austrália, por meio dos modelos de risco.

CÁLCULO DE GRADIENTE IONOSFÉRICO PELO *TIME-STEP METHOD*

Gradientes ionosféricos podem ser calculados por dois métodos: *station-pair* e *time-step*, 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 quantidade de gradientes ionosféricos, bem como obter gradientes com distâncias menores que a separação das estações da rede (DATTA-BARUA et al., 2010). O método agrupa um único satélite e uma única estação como um par (Figura 2).

Figura 2 – Cálculo de gradiente ionosférico pelo *time-step method*



Fonte: Pereira (2018).

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



$$g = \frac{|I_{t_1} - I_{t_2}|}{D_{IPP_{t_1 t_2}}} \quad (1)$$

PROGRAMA ION_INDEX

Para o cálculo do índice de irregularidades ROTI e de gradientes pelo *time-step method* para os satélites GPS e GLONASS, nas portadoras L1, L2 e L5, tem-se o programa *Ion_Index* (PEREIRA; CAMARGO, 2017), disponível em: <https://www.fct.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo-e-pesquisa/gege/softwares/>.

O usuário pode escolher, para uma determinada data, qualquer estação da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), neste caso o programa faz o *download* do arquivo RINEX automaticamente, ou, informar manualmente um RINEX de uma estação não pertencente à RBMC. Independentemente do modo, a máscara de elevação e a altura da camada ionosférica devem ser informadas.

EXPERIMENTO, RESULTADOS E ANÁLISES

Foram selecionadas 185 datas de processamento entre os anos de 2013 e 2022, contemplando os ápices dos ciclos solares 24 e 25. 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 rede INCT GNSS-NavAer mais próximas do aeroporto de Presidente Prudente/SP, e que também estejam operantes nas datas selecionadas: DMC1, GALH, PRU1, PRU2, PRU3 e PRU4. A Figura 3 apresenta as localizações.

Figura 3 – Estações da rede INCT GNSS-NavAer mais próximas ao aeroporto



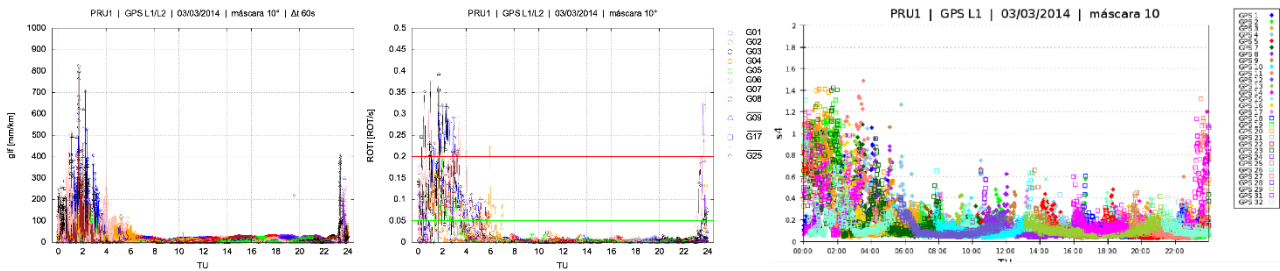
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Para o conjunto de datas e estações foram realizados os *downloads* dos arquivos RINEX de observação a partir do banco de dados do INCT GNSS-NavAer: <https://ismrquerytool.fct.unesp.br/is/>.

Assim, utilizando o *Ion_Index*, foram calculados os gradientes e o ROTI para os satélites GPS nas portadoras L1/L2. Para tanto foi considerado uma resolução amostral de 60 segundos, máscara de elevação de 10° e 350 km para a altura da camada ionosférica.

Uma vez que os receptores das 6 estações fornecem o índice de cintilação S4, foi possível realizar uma validação dos gradientes. Tal validação consiste em comparar os horários de ocorrências dos elevados gradientes com os valores de S4 e ROTI. Para fins de exemplificação a Figura 4 apresenta os valores da estação PRU1 para 03/03/2014.

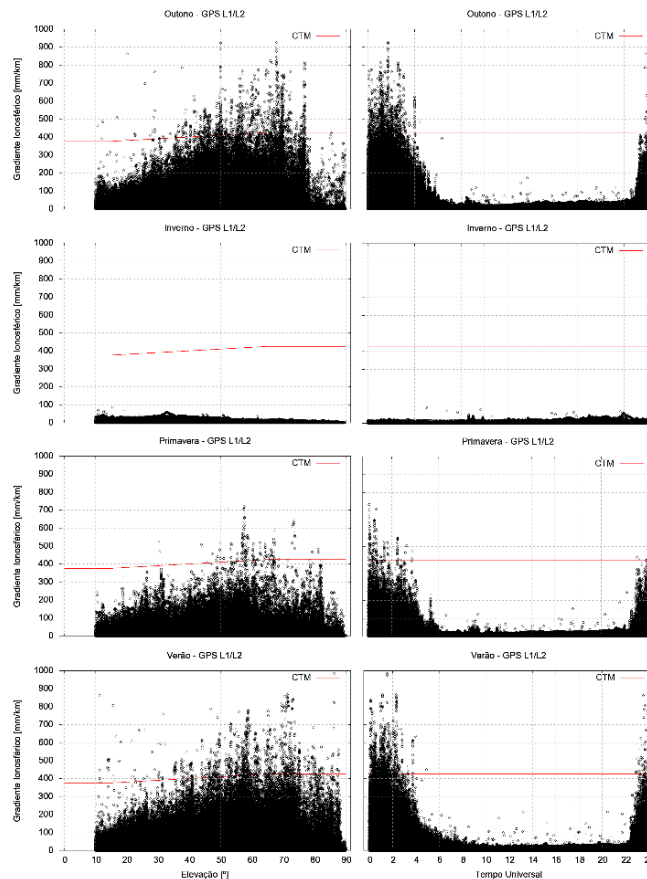
Figura 4 – Gradiente ionosférico, ROTI e S4 da estação PRU1 para o dia 03/03/2014



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Por fim, foi construído o modelo de risco temporal (sazonal – estações do ano) para o aeroporto (gráfico que relaciona os gradientes com o ângulo de elevação dos satélites para todas as datas selecionadas). Tal modelo é apresentado na Figura 5, em que CTM corresponde ao limiar do *CONUS Threat Model*. Também é apresentado o gráfico relacionando os gradientes com o Tempo Universal (TU).

Figura 5 – Modelo de risco ionosférico temporal para o aeroporto de Presidente Prudente



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A partir da Figura 5 observa-se que os gradientes foram superiores ao limiar máximo de 425 mm/km do *CONUS Threat Model*, o que inviabiliza, em um primeiro momento, a utilização do GBAS para pouso preciso em Presidente Prudente/SP; a exceção ocorre para o inverno, em que os valores foram inferiores. Entretanto, ao analisar os 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 (Tabela 1).

Tabela 1 – Prováveis janelas de restrições ao uso do GBAS no aeroporto de Presidente Prudente

| Período | Janela de Restrição |
|-----------|------------------------------|
| Outono | 23h-4h30 TU (20h-1h30 local) |
| Inverno | sem restrição |
| Primavera | 22h30-4h TU (19h30-1h local) |
| Verão | 22h30-5h TU (19h30-2h local) |

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

CONCLUSÃO

A pesquisa proporcionou a construção de um modelo de risco ionosférico temporal para o aeroporto estadual de Presidente Prudente/SP (SBDN), conforme demanda repassada do SENAV.

Com base no modelo pode-se verificar que os gradientes extrapolam o limite do *CONUS Threat Model*, inviabilizando o uso do GBAS da Honeywell em um primeiro momento (exceção para o inverno).

No entanto, analisando os horários de ocorrência, verifica-se que é possível estabelecer prováveis janelas de restrições quanto ao uso do Sistema de Aumento, possibilitando assim uma futura certificação temporal.

AGRADECIMENTOS

À UTFPR pela bolsa de iniciação científica e pela estrutura de pesquisa, e ao INCT GNSS-NavAer pelo fornecimento dos dados GNSS das estações.

CONFLITO DE INTERESSE

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

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**, v. 47, n. 4, 2010. pp. 1141-1151

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**, v. 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.; CAMARGO, P. O. Brazilian active GNSS networks as systems for monitoring the ionosphere. **GPS Solutions**, v. 21, n. 3, p. 1013–1025, 2017.