

Análise da técnica de triangulação de imagens *all-sky* para estudo da altura das camadas de emissão do *airglow* atmosférico

D. Barbosa¹; A. F. Medeiros¹; R. A. Buriti¹

¹Unidade Acadêmica de Física/Aerolome, Universidade Federal de Campina Grande, 58429-900,

Campina Grande-PB, Brasil

dbarbosa@df.ufcg.edu.br

(Recebido em 10 de março de 2014; aceito em 18 de março de 2014)

O presente trabalho realiza um estudo sobre a aplicação do método da triangulação para inferir a altura da camada de emissão do *airglow* atmosférico. Este método determina a correlação máxima para regiões de interesse entre duas imagens consecutivas de uma mesma estrutura no *airglow*, obtidas por um imageador *all-sky*. O método consiste em fixar a altura de linearização da primeira imagem tomando com referência a altitude nominal da camada do *airglow* estudada e variar a altura de referência da outra imagem para várias altitudes. Em seguida, aplica-se a correlação cruzada em uma determinada área das imagens onde exista um evento nítido de onda de gravidade. Os perfis de altura/correlação mostram uma convergência da correlação máxima em torno das altitudes nominais fixadas na primeira imagem.

Palavras-chave: imageamento, *airglow*, ondas de gravidade.

Analysis of the all-sky images triangulation technique for study of the atmospheric airglow emission layers altitude

This paper performs a study on the application of the triangulation method to infer the height of the atmospheric airglow emission layer. This method determines the maximum correlation for regions of interest between two consecutive images of the same structure in the airglow, obtained by an all-sky imager. The method sets the linearization height of the first image taking with reference the nominal altitude of the studied airglow layer and varies the reference height of the second image to another various altitudes. Then, it is applied the cross correlation in a given area of the image where there is a gravity wave structure. The height/correlation profiles show a convergence of the maximum correlation around the nominal altitude fixed at the first image.

Keywords: imaging, airglow, gravity waves.

1. INTRODUÇÃO

O imageamento do *airglow* atmosférico tem sido utilizado na aeronomia como meio para traçar estruturas características das alturas de emissões. Esta técnica tem-se mostrado uma ferramenta importante no estudo de ondas de gravidade¹. O método escolhido para observação do *airglow* depende do propósito do trabalho. Para observação da distribuição global do *airglow*, usa-se imageamento a bordo de satélites (imageador e fotômetro), se o interesse é obter informações sobre a morfologia e a dinâmica das estruturas, usa-se fotometria de solo (imageador e fotômetro). A investigação do perfil vertical da emissão geralmente é realizada por imageamento a bordo de foguetes (fotômetro)².

Em especial, a obtenção da altura de emissão do *airglow* se faz necessária, uma vez que este afeta diretamente na análise de outros parâmetros, não menos importantes no estudo de fenômenos tanto na mesosfera quanto em outras regiões atmosféricas. Em alguns estudos da variação da altura de emissão OI 5577 mesosférico, observa-se que tal variação pode ser crítica nas medidas de temperatura e ventos na região³. Em trabalhos com emissões ionosféricas, variando a altura de linearização de imagens da emissão OI 6300 de 250 km para 300 km, verifica-se que as velocidades zonais das bolhas de plasma são inferidas com um acréscimo de 15%, evidenciando a necessidade da determinação da altura de emissão através de métodos alternativos⁴.

Vários métodos foram propostos para determinação da altura das camadas de emissão ao longo das décadas. As determinações diretas efetuadas a partir da década de 50 por instrumentos a bordo de satélites foram satisfatórias para emissões do OH, O₂ e Na no intervalo de 80 a 120 km. Porém, a grande dificuldade dessa prática está no elevado custo das campanhas, além da natureza extremamente localizada das medidas, tanto espacial como temporalmente. Instrumentos a bordo de satélites dão uma ideia global das emissões, permitindo análise das variações das alturas com relação à latitude, longitude, hora local, etc. As limitações atribuídas a medidas em satélites podem ser mencionadas principalmente pela impossibilidade dos mesmos de trabalhar com emissões fora da faixa do ultravioleta, principalmente em relação a emissões no visível que são espalhadas pela baixa atmosfera e pelo solo.

Tendo em vista a onerosidade para se conseguir informações referentes à altura das emissões a partir de foguetes e satélites, grande esforço tem sido empregado em obter as altitudes das emissões e as variações que ocorrem nelas a partir das imagens de airglow obtidas em solo, considerando também que a obtenção de dados por satélite e foguetes requer a presença destes na região e no horário de interesse, o que nem sempre acontece⁵. O monitoramento do airglow a partir de instrumentos baseados no solo exige apenas dois equipamentos óticos, no mínimo, e de desenvolvimento de rotinas computacionais relativamente simples. Esse método é denominado triangulação e foi empregado com sucesso na determinação da altura de emissão do OH⁶.

Alguns aspectos do método de triangulação para determinação das altitudes das camadas do airglow já estão bastante estabelecidos, no entanto, poucos trabalhos foram feitos nesse sentido¹, além de alguns trabalhos não levantarem as principais limitações encontradas na realização do mesmo⁷. Portanto, neste trabalho foram analisadas algumas condições impostas como parâmetros de entrada na utilização do método e interpretadas suas respostas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido a partir de imagens do airglow obtidas por imageador *all-sky* (Figura 1) proveniente do Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba (OLAP) situado em São João do Cariri (7,8° S; 36,5° O). A localização do observatório nessa região é adequada uma vez que oferece pouca luminosidade artificial no entorno e céu com pouca nebulosidade, ideais para a observação das emissões.

2.1 Imageador *all-sky*

O imageador com detector CCD (do inglês: *Charge Coupled Device*) é uma versão moderna das câmeras de TV⁸ de alta sensibilidade e das câmeras fotográficas⁹ muito utilizadas no início das décadas de 70 e 80 para obter imagens das estruturas ondulatórias nas regiões de emissão do airglow¹⁰.

O imageador é composto basicamente de um sistema ótico e uma câmara CCD que é capaz de detectar variações no airglow noturno e registrá-las através de imagens como arquivos digitais. Especificamente, o imageador pode registrar imagens completas do céu (180°) nas emissões do airglow OI5577 A, OI6300 A, O₂ (0,1) (8655 A) e OH (7150 – 9300 A) e do fundo luminoso do céu noturno, e monitorar as variações do airglow em tempo real¹¹.

2.2 Método da triangulação

A triangulação é um dos métodos indiretos utilizados para determinar a altura das emissões e consiste em se fotografar a mesma porção do céu com pelo menos dois instrumentos situados em diferentes localidades para posterior análise de pares de imagens obtidas simultaneamente. O método é ilustrado esquematicamente na Figura 2. Nesse trabalho, porém, foram utilizados pares de imagens seguidas observadas em um mesmo sítio de observação, levando em consideração uma mínima variação de tempo entre elas. A utilização de dois imageadores será objeto da complementação deste estudo no futuro.

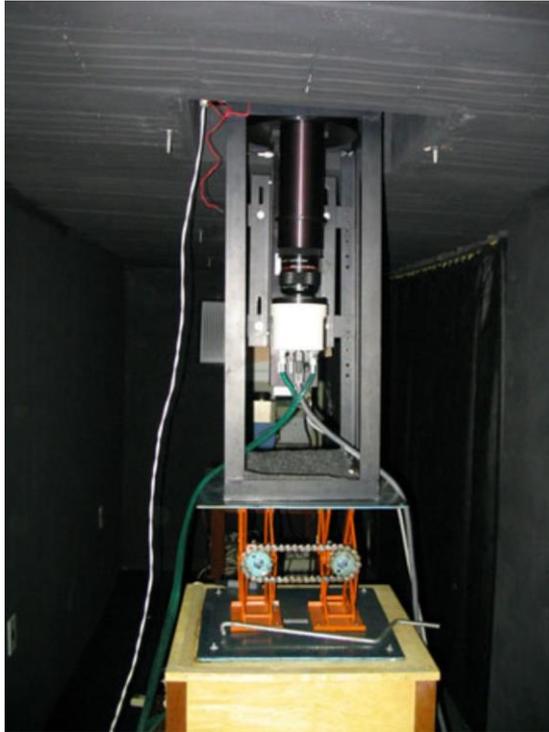


Figura 1. Imageador instalado em São João do Cariri.

O método computacional para estimar a altura de emissão máxima do airglow a partir da triangulação consiste, basicamente, na identificação da máxima correlação cruzada bidimensional entre as matrizes que definem uma determinada área de interesse em comum em um par de imagens linearizadas. Da primeira imagem extrai-se a subárea que define uma janela padrão, cujo tamanho pode variar de acordo com o fenômeno estudado. Na segunda imagem, uma subárea mais ampla é selecionada e definida como janela de procura, cujo ponto central coincide com o da janela padrão da primeira imagem. Adquirida a matriz padrão da imagem 1, representada por $A(x,y)$ e a matriz de procura da imagem 2, representada por $B(x,y)$, podemos definir a correlação cruzada entre as matrizes A e B como:

$$r = \frac{1}{\sigma_A \sigma_B} \sum \sum \{ [A(x,y) - A_m(x,y)] [B(x,y) - B_m(x,y)] \}, \quad (1)$$

onde σ_A e σ_B correspondem ao desvio padrão para as matrizes A e B respectivamente. Para o caso em que ocorra um deslocamento da janela de procura em relação à janela padrão, representaremos a matriz deslocada por $B(x+p, y+q)$. O somatório é feito sobre todos os valores de x e y compreendidos na matriz A . $A_m(x,y)$ e $B_m(x,y)$ são os valores médios para cada matriz. Finalmente, r corresponde à correlação cruzada obtida para as imagens analisadas.

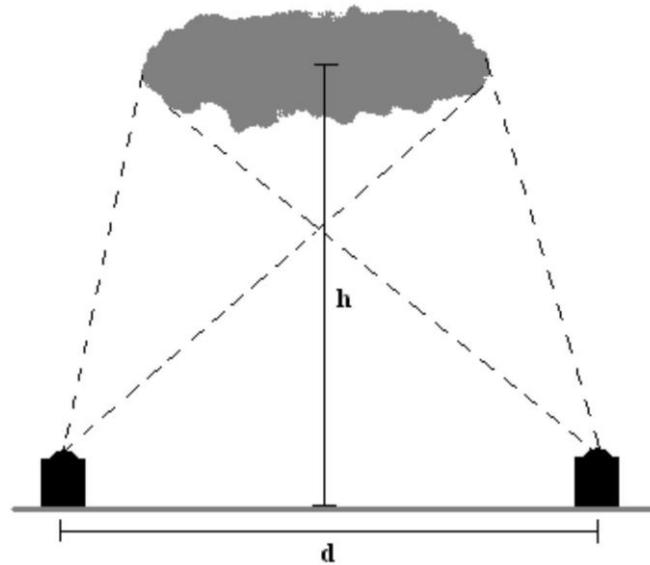


Figura 2. Esquema da disposição dos imageadores, ilustrando a região em comum visualizado por cada um. Neste trabalho, no entanto, foram utilizadas imagens obtidas por imageador localizado no mesmo sítio. Imagens obtidas na mesma localidade com defasagem mínima de tempo entre elas dão uma configuração que se aproxima da triangulação como ilustrado acima.

Neste trabalho a determinação da correlação r foi implementada a partir de rotinas desenvolvidas na linguagem computacional IDL (do inglês: *Interactive Data Language*), seguindo os seguintes passos:

1. Seleção de imagens obtidas consecutivamente, com defasagem de tempo mínimo entre elas, efetuando o processamento das imagens, de modo a obter projeções em mapas de coordenadas geográficas supondo-se diversas alturas para a camada emissora de uma das imagens (60 a 120 km, em passos de 1 km, por exemplo) e fixando a altura de linearização da outra imagem (imagem fixa) baseado na emissão estudada (96 km para OI 557,7, por exemplo) numa determinada área de interesse (512 x 512 km², 1024 x 1024 km², por exemplo), como mostra a Figura 3:

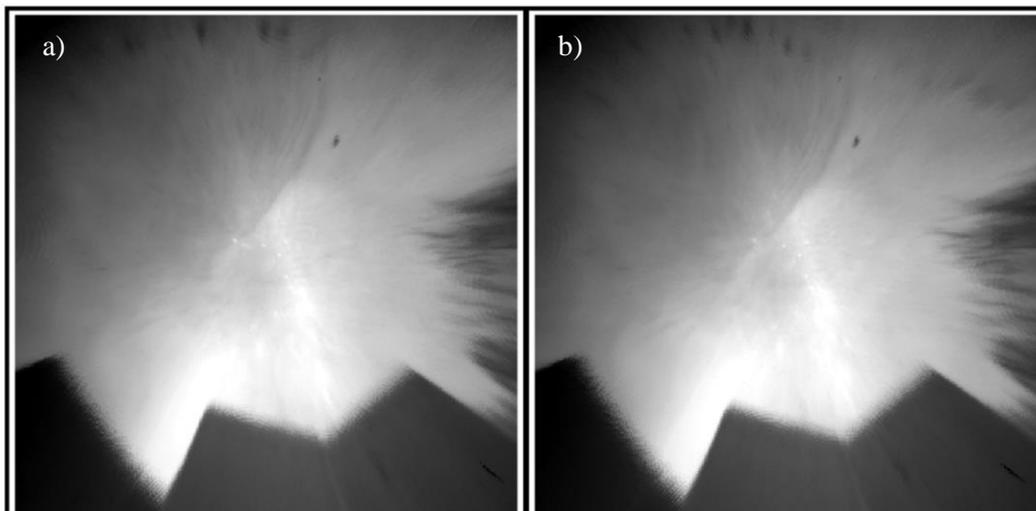


Figura 3. Imagens do OH, obtidas consecutivamente na noite de 01/dez/2005 a partir de 23:41:37 HL (hora local), com intervalo de tempo de 2 min. e 9 seg. entre elas, no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba (OLAP) em São João do Cariri, linearizadas considerando-se uma altura de 87 km e projetadas num mapa de coordenadas geográficas de 1024x1024 km². Seguindo o método de correlação adotado neste trabalho, a altura de linearização de uma das imagens (Figura (b)), por exemplo) deve variar com passo pré-definido.

2. Seleção da região de interesse na imagem 1, definindo o bloco padrão de acordo com o fenômeno estudado. Define-se também o bloco de procura na imagem 2, seguindo como parâmetro as dimensões do bloco padrão que trazem informações sobre o fenômeno que se deseja estudar. Para o caso de haver variação temporal na aquisição de uma imagem em relação à outra, é levado em consideração também o deslocamento do fenômeno para definição das dimensões do bloco de procura. O bloco padrão e o bloco de procura irão definir a matriz padrão $A(x, y)$ e a matriz de procura $B(x, y)$ respectivamente, como ilustrado na Figura 4.

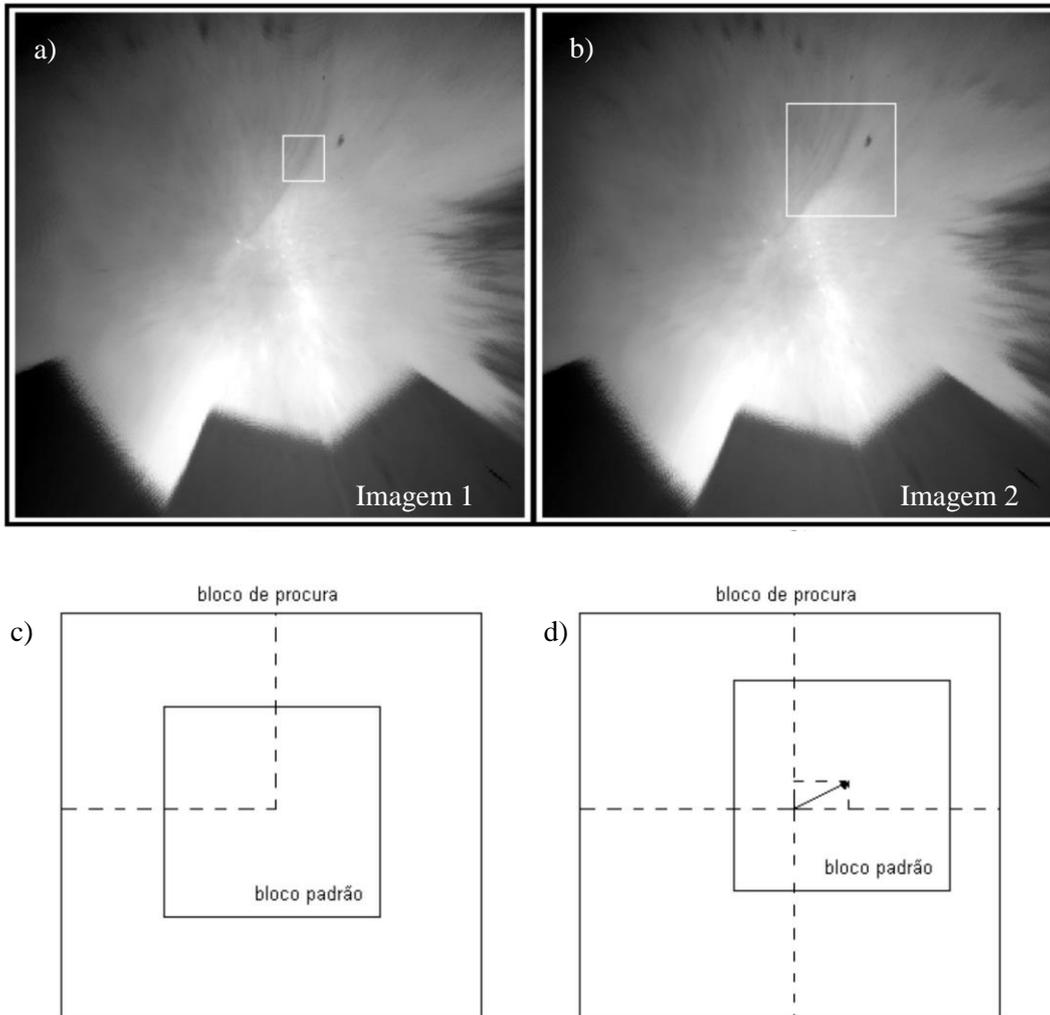


Figura 4. (a) Imagem 1 com o bloco padrão definido; (b) Imagem 2 com bloco de procura definido; (c) Bloco padrão e bloco de procura com os respectivos pontos centrais coincidindo; (d) Bloco padrão e bloco de procura com ligeira diferença entre seus pontos centrais. Nesse caso faz-se necessário avaliar as dimensões do bloco de procura considerando também o deslocamento entre elas.

3. A idéia de selecionar uma região é restringir a aplicação do método à porção da imagem que realmente se refere ao fenômeno reportado, evitando que o aplicativo faça cálculos desnecessários e tornando o processo mais rápido. A partir daí, o próprio método de obtenção da correlação irá selecionar dentro dos blocos definidos nas imagens outras regiões onde estará a melhor aproximação do parâmetro que se deseja inferir.
4. Ao final do processo, a partir do conjunto de coeficientes de correlação cruzada máximos encontrados, é obtido um gráfico desses coeficientes em função da altura de linearização das imagens, como ilustrado na Figura 5.

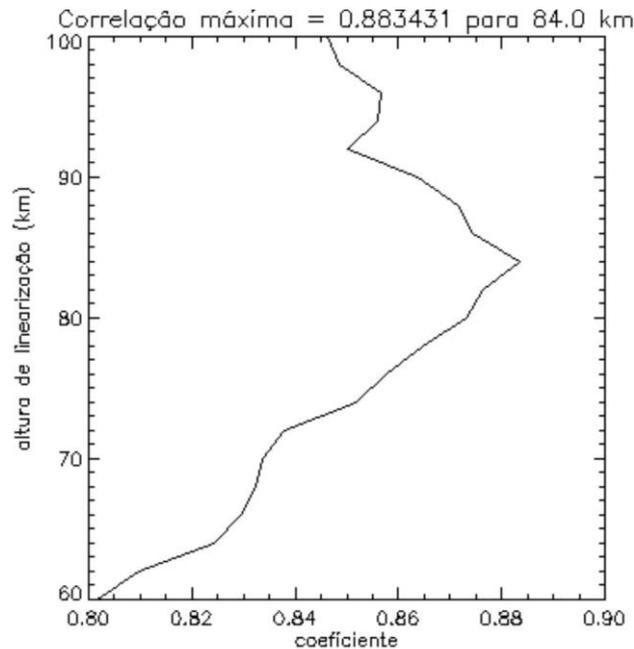


Figura 5. Aspecto do gráfico do coeficiente de correlação máximo em função da altura de linearização das imagens.

Das informações obtidas a partir dos processos descritos acima, foi feita uma análise, tanto no sentido de aprimoramento do método quanto no sentido da própria validade dos parâmetros adotados como entradas no aplicativo. Fica bem claro, no entanto, que o trabalho apresentado aqui é mais voltado para o desenvolvimento do software de correlação, pois como dito anteriormente as imagens foram obtidas com imageador de um mesmo local, sendo impossível trabalhar com todos os aspectos do processo de obtenção da correlação via triangulação. Essa limitação, porém é superada pelos resultados que foram obtidos e que serão apresentados na próxima seção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o método da triangulação, foram selecionadas imagens nítidas das emissões OH, obtidas por imageador *all-sky* no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba (OLAP) em São João do Cariri. As imagens escolhidas foram aquelas em que um evento de onda de gravidade significativo foi observado¹². Essa escolha foi feita visto que o método além de contribuir com a inferência da altura da camada de emissão pode indicar também variações nessa altura por estruturas que perturbam o airglow. Foram adotadas alturas de referência para a camada de emissão seguindo a convenção da literatura (~87 km para o OH). Essas alturas de referência foram adotadas para a linearização da imagem fixa.

Uma análise sobre a qualidade das imagens, defasagem temporal entre elas, variação espacial do fenômeno entre cada momento em que foi imageado e dos procedimentos para triangulação e obtenção dos coeficientes de correlação é sequenciado para o par de imagens utilizadas e para a emissão, como se segue.

3.1 Triangulação com imagens da emissão OH 865,5 (OH)

Para ilustrar a aplicação do método, foram escolhidas duas imagens do OH da noite de 03 de outubro de 2005 obtidas a partir de 22:39 (HL). As imagens desse dia reportaram um evento classificado como uma frente mesosférica propagando-se para nordeste. Percebe-se claramente uma homogeneidade da emissão na região não perturbada pelo fenômeno, além de uma boa visualização da frente de onda como mostra a Figura 6.

Nessa emissão, foi adotado um intervalo entre as alturas de 60 km e 120 km para linearização da imagem onde se definiu o bloco de procura. Adotando em 87 km a emissão máxima do OH, definiu-se o bloco padrão na imagem 1 de forma que a parte do airglow perturbada pelo fenômeno e a parte não perturbada fossem avaliadas simultaneamente na determinação da correlação máxima. Tentou-se com isso definir inicialmente o bloco padrão de maneira que o método avaliasse a região da imagem que corresponde à frente de onda. Outras regiões, porém, foram avaliadas considerando apenas as perturbações do airglow ou a região não perturbada.

A Figura 6 também mostra as regiões das imagens avaliadas e os gráficos de correlação versus altura, obtidos a partir do método de triangulação.

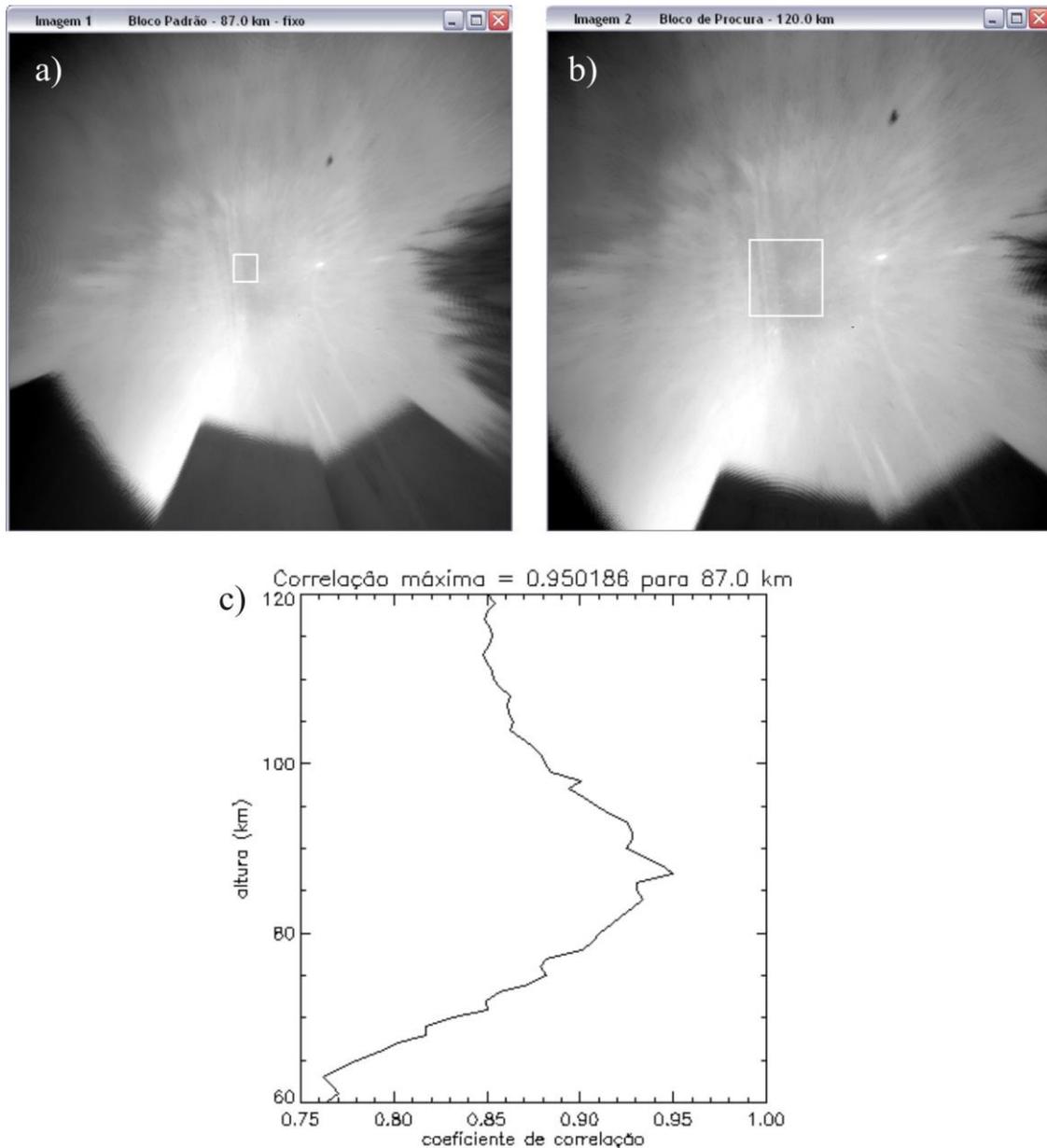


Figura 6. (a) Imagem 1, linearizada numa projeção $1024\text{km}^2 \times 1024\text{km}^2$ segundo a altura de 87 km para a emissão máxima do OH e com bloco padrão B1 definido, abrangendo a região afetada e não afetada pela perturbação do evento. (b) Imagem 2 em $1024\text{km}^2 \times 1024\text{km}^2$ com bloco de procura B2 definido, nesse caso linearizada para uma altura de 120 km. Para cada variação da altura de linearização da imagem 2 o programa calculou a correlação máxima entre B1 e B2 seguindo as dimensões de B1. (c) Gráfico do coeficiente de correlação versus altura para essa configuração.

O gráfico indica claramente a correlação máxima em 87 km, indicando o valor inferido para a altura da emissão convergindo para o valor adotado como referência na imagem 1. Utilizando outras regiões da imagem para o cálculo da correlação máxima, também foram obtidos valores exatamente iguais ao da altura de referência. Os gráficos a seguir (Figura 7) mostram os valores de correlação máximos encontrados a partir de outros pontos da imagem.

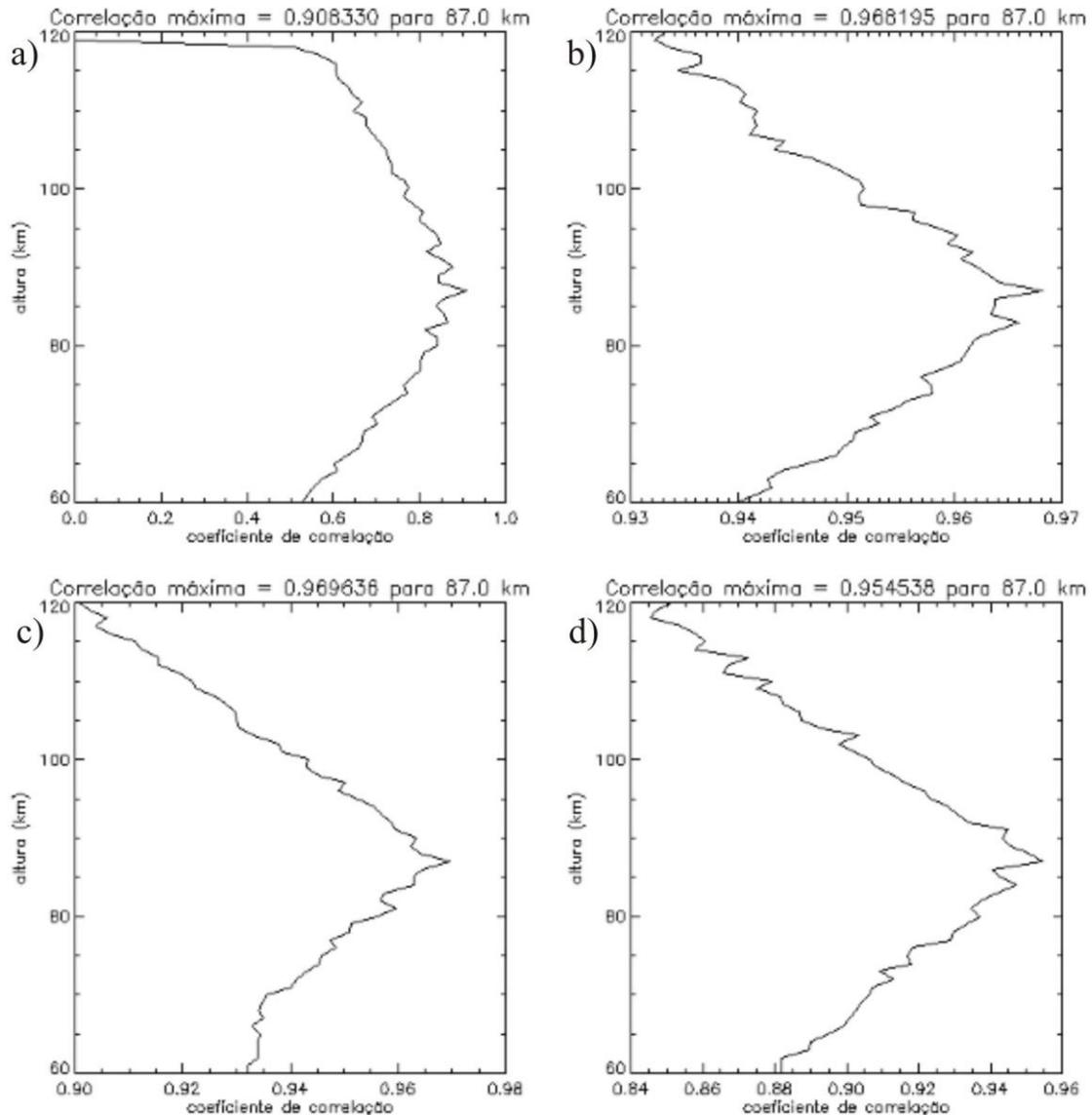


Figura 7. Gráficos dos coeficientes de correlação máximos encontrados para pontos da imagem periféricos ao considerado na Figura 6(a). Os gráficos são referentes a blocos tomados acima (a), abaixo (b), à esquerda (c) e à direita (d) do primeiro bloco. Todos os gráficos foram obtidos para uma altura fixa de 87 km na imagem 1.

Podemos considerar que o tempo entre o momento de aquisição das imagens (26 segundos), a boa qualidade das imagens obtidas nessa noite e a nitidez com que o fenômeno foi registrado na emissão facilitou a busca das regiões de maior correlação, uma vez que esses fatores acentuam as estruturas que são necessárias para a comparação entre a matriz $A(x, y)$ referente ao bloco padrão e a matriz $B(x, y)$ referente ao bloco de procura. Contudo, não podemos dizer com as ferramentas apresentadas aqui se a projeção adotada ($1024\text{km}^2 \times 1024\text{km}^2$) e o tamanho do bloco padrão escolhido tem alguma relação com a qualidade da resposta dada pelo método.

A altura adotada como referência na imagem 1, em especial, pode ser avaliada como um parâmetro válido ou não para o método de triangulação a partir das ferramentas dispostas aqui. Para tal verificação, foram adotados valores de altura que não estão em acordo com o valor

nominal de altura do OH (87 km segundo a literatura) para linearização da imagem 1. Com todos os outros procedimentos inalterados, verificou-se que os valores de correlação máxima indicavam sistematicamente a altura de referência como a altura de emissão máxima do OH (Figura 8), embora esta não fosse a altura da emissão estudada como dito anteriormente.

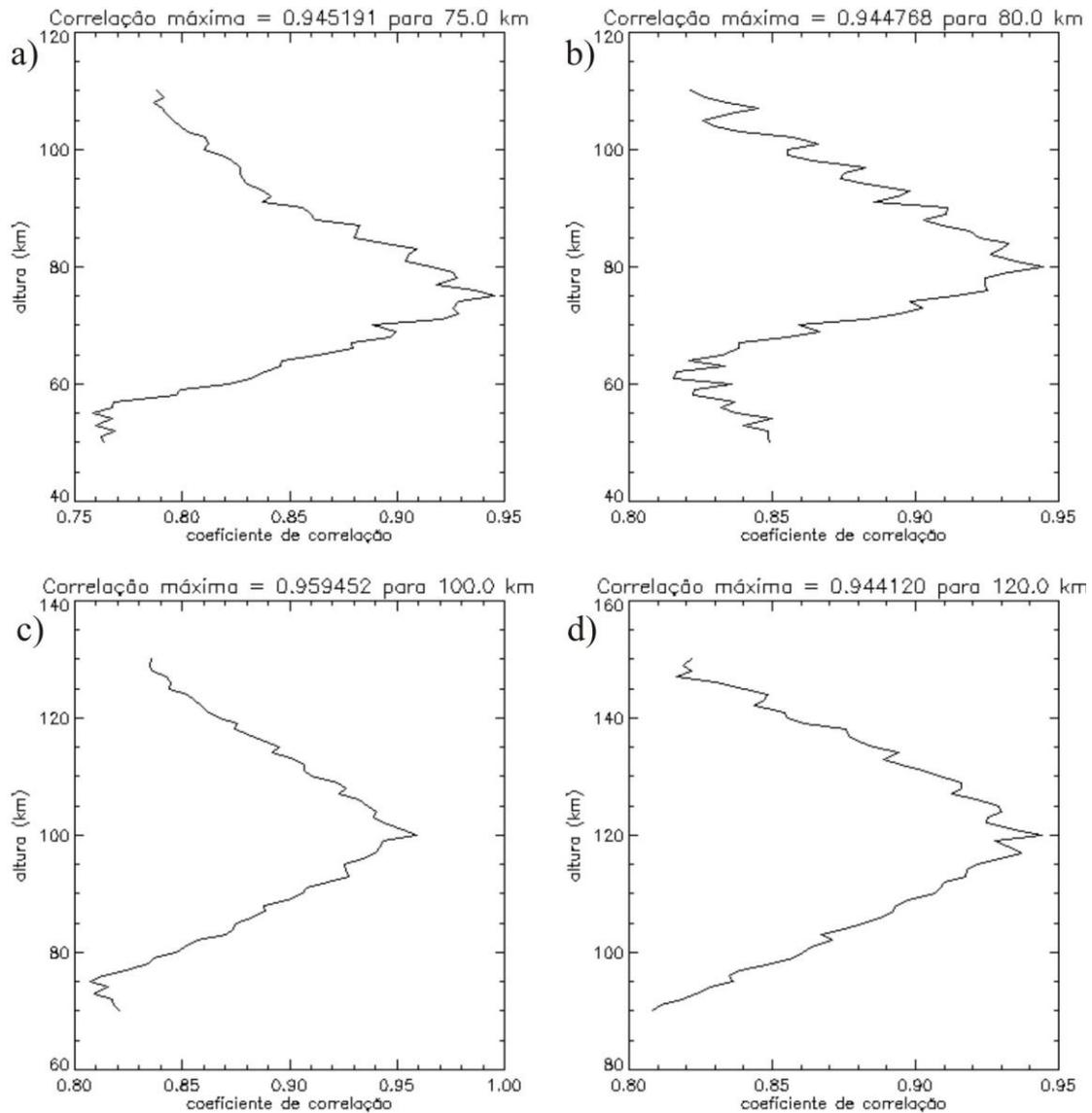


Figura 8. Gráficos obtidos para alturas de referência diferentes das adotados pela literatura e para o bloco padrão representado pela Figura 6(a). A correlação máxima é encontrada para valores de altura que não estão de acordo com o esperado.

A partir da Figura 8, no gráfico (a) verifica-se que a altura onde se obteve a correlação máxima é de 75 km, exatamente o valor adotado como referência na imagem 1 desse processo. A mesma tendência é verificada nos outros gráficos, (b), (c), (d), onde se obteve a correlação máxima em 80 km, 100 km e 120 km respectivamente. Estes também são os valores respectivos de altura adotados para linearização da imagem 1 em cada processo. Não fica claro, portanto, a validade desse parâmetro na inferência da altura de emissão, sugerindo um estudo mais detalhado dos possíveis resultados.

4. CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos a partir do método da triangulação aqui aplicado às imagens do OH, concluímos que um estudo estatístico dos resultados do método aplicado a várias imagens contribuirá com uma melhor compreensão das respostas obtidas como inferência das alturas de emissão não só do OH como também de outras emissões, além de possibilitar um melhor entendimento sobre a validade dos parâmetros adotados.

Propomos para trabalhos futuros estudos sobre a triangulação utilizando parâmetros evidenciados pela própria geometria do problema na disposição dos imageadores (Figura 2), que aqui não foi possível devido à utilização de apenas um imageador.

5. AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela bolsa de pesquisa concedida.

Ao grupo de pesquisa Aerolume pelo apoio durante a realização deste trabalho.

-
1. Kubota M, Ishii M, Shiokawa K, Ejiri MK, Ogawa T. Height measurements of nightglow structures observed by all-sky imagers. *Adv. Sp. Res.* 1999;24(5):593–6.
 2. Medeiros AF, Taylor MJ, Takahashi H, Batista PP, Gobbi D. An unusual airglow wave event observed at Cachoeira Paulista 23° S. *Adv. Sp. Res.* 2001;27(10):1749–54.
 3. Candido CMN, Pimenta AA, Bittencourt JA, Becker-Guedes F. Statistical analysis of the occurrence of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Brazilian low latitudes using OI 630.0 nm emission all-sky images. *Geophys. Res. Lett.* 2008;35(17).
 4. Pimenta AA, Fagundes PR, Sahai Y, Bittencourt JA, Abalde JR. Equatorial F-region plasma depletion drifts: latitudinal and seasonal variations. *Ann. Geophys.* 2003;21(12):2315–22.
 5. Peterson AW, Kieffaber LM. Infrared Photography of OH Airglow Structures. *Nature.* 1973;242(5396):321–2.
 6. Taylor MJ, Bishop MB, Taylor V. All-sky measurements of short period waves imaged in the OI(557.7 nm), Na(589.2 nm) and near infrared OH and O2(0,1) nightglow emissions during the ALOHA93 campaign. *Geophys. Res. Lett.* 1995;22(20):2833–6.
 7. Shiokawa K, Ejiri MK, Otsuka Y, Ogawa T, Kubota M, Igarashi K, et al. Multipoint observation of short-period mesospheric gravity waves over Japan during the FRONT campaign. *Geophys. Res. Lett.* 2000;27(24):4057–60.
 8. Crawford J, Rothwell P, Wells N. Airborne television observations of airglow clouds in the near infrared. *Nature.* 1975;257(5528):650–1.
 9. Hersé M, Moreels G, Clairemidi J. Waves in the OH emissive layer: photogrammetry and topography. *Appl. Opt.* 1980;19(3):355–62.
 10. Taylor MJ, Hapgood MA, Rothwell P. Observations of gravity wave propagation in the OI (557.7 nm), Na (589.2 nm) and the near infrared OH nightglow emissions. *Planet. Space Sci.* 1987;35:413–27.
 11. Medeiros AF, Fachine J, Buriti RA, Takahashi H, Wrasse CM, Gobbi D. Response of OH, O 2 and OI5577 airglow emissions to the mesospheric bore in the equatorial region of Brazil. *Adv. Sp. Res.* 2005;35(11):1971–5.
 12. Wrasse CM, Takahashi H, de Medeiros AF, Lima LM, Taylor MJ, Gobbi D, et al. Determinação dos parâmetros de ondas de gravidade através da análise espectral de imagens de aeroluminescência. 2007;25(3).