



## Pororocas Mesosféricas Equatoriais

Fechine<sup>1</sup>, J. Medeiros<sup>2</sup>, A. F., Buriti<sup>2</sup>, R. A. Takahashi<sup>1</sup>, H., Wrasse<sup>1</sup>, C. M., Gobbi<sup>1</sup>, D.

(1) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Brasil

(2) Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Brasil

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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.

### Resumo

Baseado na observação de inúmeras pororocas mesosféricas em São João do Cariri, Brasil (7,4°S 36,5°O), foi realizada uma verificação das previsões do modelo de Dewan e Picard (1998, 2001). No presente trabalho foram utilizados dois anos de dados de um imageador *all sky* e um fotômetro que operam rotineiramente no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba observando as camadas de airglow OH, O<sub>2</sub> e OI5577. Vários aspectos do modelo foram investigados, a saber: a ausência de sazonalidade e a alta atividade de ondas de gravidade registrada antes dos eventos, a direção preferencial de propagação e o horário de maior ocorrência do fenômeno, as primeiras observações de pororocas em formação e/ou dissipação e de pororocas não ondulares, uma estatística dos parâmetros físicos observados, as variações na intensidade de emissão e na temperatura rotacional das camadas de airglow em resposta à passagem das pororocas, o comportamento do ducto mesosférico e as suas implicações para os efeitos de complementaridade previstos e não previstos pelo modelo, e finalmente, saltos na intensidade de emissão simultâneos a diminuição na temperatura rotacional, que também não são previstos pelo modelo.

### Introdução

Depois da observação realizada por Taylor et al. (1995) durante a campanha ALOHA-93, cinco outras pororocas mesosféricas foram reportadas na literatura, a saber: Medeiros et al., 2001, Smith et al., 2003, 2005, Brown et al., 2004, She et al., 2004. Após as observações de Taylor et al., (1995) foram feitas algumas tentativas de modelagem do fenômeno por Munasinghe et al (1998) e Swenson et al (1998), porém o modelo mais discutido, nas observações subseqüentes foi o de Dewan e Picard, que baseando-se no princípio de salto hidráulico em pororocas fluviais, apresentou uma teoria simples nos artigos de 1998 e 2001. Nestes trabalhos os autores previram uma série de características físicas para pororocas mesosféricas, além de sugerirem experimentos para elucidar alguns de seus peculiares aspectos.

A primeira observação no Brasil foi feita por Medeiros et al. (2001) em Cachoeira Paulista, SP (23°S) usando um fotômetro zenital multicanal, um imageador All-sky com filtros para as emissões OH, OI5577 e O<sub>2</sub> e um radar

meteorológico SKYmet, além de observações de radar de laser de sódio em São José dos Campos. Na noite de 13 de julho de 1999, às 02:28 UT, uma pororoca foi observada exibindo uma frente, estendendo-se ao longo da direção E-O e propagando-se para o Sul com registros simultâneos da existência de uma camada esporádica no airglow sódio.

Em 2003 Smith et al. analisou uma pororoca que foi observada a partir de dois diferentes observatórios distante 500 km um do outro, no sudoeste dos EUA. A pororoca apresentou uma característica praticamente monocromática exibindo efeitos de complementaridade entre as emissões OI5577/Na e OH, e foi observada na camada do airglow OH apenas 45 min depois de atingir as outras camadas, comportamento ainda não explicado.

Brown et al., 2004 também observaram uma pororoca a partir de imagens de airglow em outubro de 2001 sobre o território da Carolina do Sul, EUA. Neste artigo os autores discutem uma distinção entre tipos de eventos classificando-os em: pororocas mesosféricas, ondas de gravidade canalizadas, eventos tipo "wall" mesosférico (tal como o observado por Batista et al., 2002), e interações não-lineares entre ondas de gravidade. Usando a técnica de "ray tracing" os autores também propuseram uma seqüência de eventos que seriam responsáveis pela geração da pororoca.

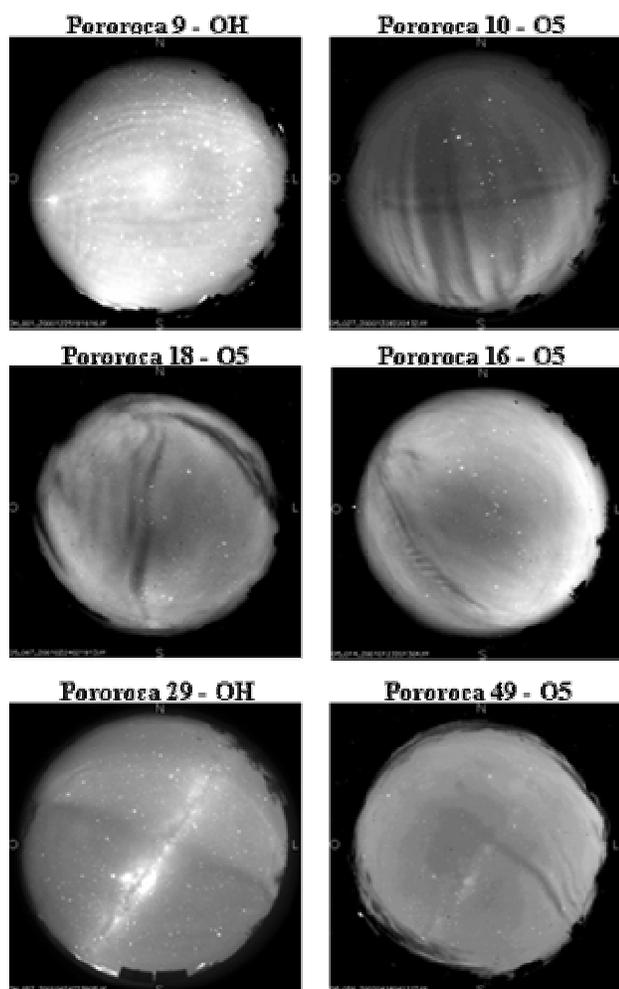
She et al., 2004 discutiram uma pororoca observada sobre Fort Collins/Platteville em outubro de 2002. Os autores mediram a temperatura e os ventos meridional e zonal a partir de um lidar de sódio confirmando a existência de uma camada de inversão de temperatura que servia de ducto ao fenômeno. Eles também observaram a transição desta pororoca ondular para uma pororoca turbulenta.

Recentemente, usando medidas por imageador e lidar, Smith et al., 2005 observaram uma pororoca mesosférica sobre o Observatório de Arecibo, apresentando uma forte evidência da geração de pororocas a partir de uma quebra de onda de gravidade.

Diante destes fenômenos reportados na literatura vem sendo realizado um estudo do perfil de ocorrência e do comportamento de pororocas mesosféricas na região equatorial, pois uma longa série de observações, desde setembro de 2000, como é o caso do observatório em São João do Cariri, é rara e pode fornecer uma importante contribuição em termos não apenas de dados obtidos, mas de parametrização e modelagem do fenômeno das pororocas mesosféricas em busca de uma maior compreensão de sua importância na dinâmica da média atmosfera.

## Metodologia e Instrumentação

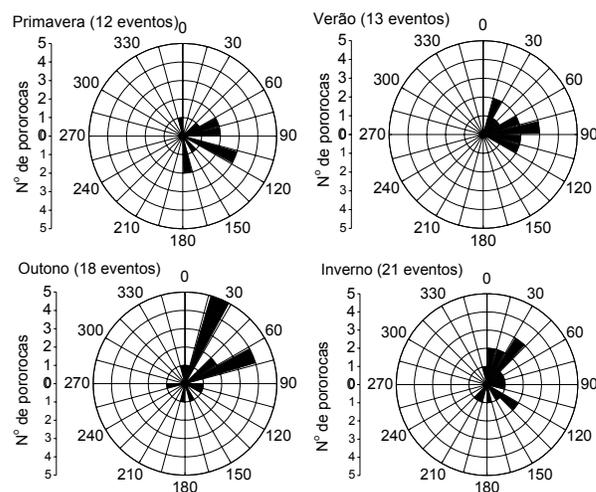
Um extenso estudo de ocorrência de pororocas mesosféricas foi realizado no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba em São João do, Paraíba, Brasil (7.4°S 36.5°O). Foram analisados 64 eventos em 2 anos de dados obtidos a partir de um fotômetro multicanal e um imageador *all sky*, durante o período de setembro de 2000 a setembro de 2002, operando mensalmente nas 13 noites em torno de cada lua nova. Através do fotômetro foram realizadas medidas de intensidade de emissão do airglow OI 557,7 nm, O<sub>2</sub> (0,1) (864,0 nm), OH (520 – 4000 nm) e de *background*, além das temperaturas rotacionais do O<sub>2</sub> e do OH. Com o imageador foram registradas as variações do airglow noturno sob a passagem de pororocas mesosféricas em imagens digitais. Neste trabalho foram usadas imagens completas do céu nas emissões OI 557,7 nm, O<sub>2</sub> (0,1) (865,5 nm) e OH (715,0 – 930,0 nm), além do *background*. Os tempos de integração foram de 15 s para o OH e 90 s para o OI5577 e O<sub>2</sub> (para detalhes ver Medeiros, 2003). A Figura 1 mostra seis exemplos de pororocas observadas .



**Figura 1** – Alguns exemplos de pororocas mesosféricas observadas em S. J. do Cariri (os subtítulos informam o n° de ordem cronológica do evento e a camada de emissão na qual a imagem foi registrada).

## Resultados e Discussão

A despeito do que ocorre com os outros tipos de ondas de gravidade, *ripples* e bandas, que apresentam maior atividade no verão e no inverno, não foi observada sazonalidade na ocorrência de pororocas mesosféricas na região equatorial brasileira, o que pode ser notado a partir da Figura 2, que mostra o número de eventos e suas direções de propagação para cada estação do ano. Verificou-se que a direção preferencial de propagação das pororocas foi para NE – L, direção similar àquela observada para os outros tipos de ondas de gravidade.



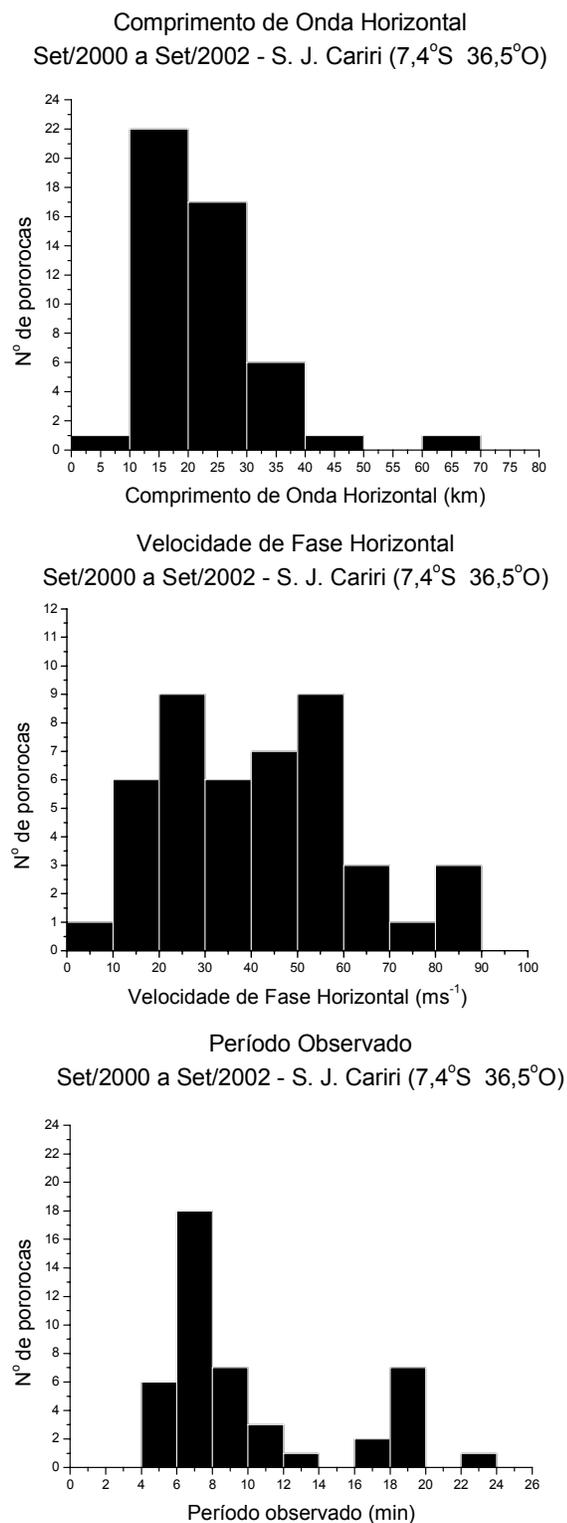
**Figura 2** – Número de eventos e direção de propagação das pororocas mesosféricas para as estações do ano.

Algumas pororocas observadas exibiram alta definição do trem de ondas que as seguiam, entretanto em alguns casos este trem de ondas apresentou-se apenas como um campo claro (ou escuro), sendo possível detectar algum movimento ondulatório somente após uma análise espectral por FFT (*Fast Fourier Transform*). Em outros casos porém foi observada uma pororoca sem qualquer indício de trem de ondas sugerindo que se tratasse de uma pororoca do tipo não-ondular, ou turbulenta. Observou-se também que a maioria das pororocas ocorreu antes da meia noite local deslocando-se de horizonte para horizonte sem indícios de formação e/ou dissipação. Porém, em alguns casos, foram observados pela primeira vez eventos de formação e dissipação de pororocas.

Não foi detectado qualquer um indício de defasagem temporal da passagem das pororocas pelas camadas de airglow, ou seja, as pororocas observadas atingiram as camadas de airglow praticamente ao mesmo tempo, e as pequenas defasagens temporais observadas foram devidas ao tempo de geração e processamento das imagens (no caso do imageador), ao tempo de troca de filtro e registro de dados (no caso do fotômetro) e à diferenças entre a localização dos zênites do imageador e do fotômetro.

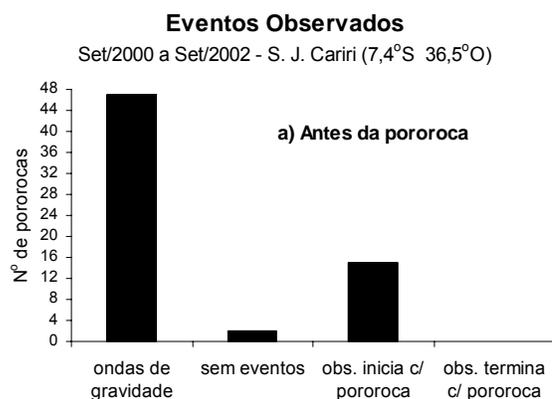
Um outro resultado interessante foi o levantamento dos parâmetros que caracterizam as pororocas. Cerca de 94% das pororocas analisadas apresentaram um comprimento de onda entre 10 e 40 km (Figura 3); em

89%, a velocidade observada se encontrou entre 10 e 70  $\text{ms}^{-1}$  e 76% apresentaram um período observado entre 4 e 12 min. Estes parâmetros concordam com os valores previstos por Dewan e Picard (1998).



**Figura 3** - Gráfico da distribuição dos comprimentos, das velocidades, dos períodos e do número de ondas no trem as pororocas em S. J. do Cariri.

A Figura 4 mostra outro resultado também inédito na literatura. Dewan e Picard (2001) lamentam a inexistência de dados que apoiariam, a sua hipótese de geração de pororocas no que se refere à atividade de ondas de gravidade na noite do evento de Taylor et al. (1995). O presente trabalho lança uma luz sobre esta questão quando se verificou que antes das observações das pororocas foi observada uma alta atividade de ondas de gravidade, principalmente de bandas, em cerca de 73 % dos casos, concordando com os dados de Medeiros et al. (2003). Mais que isso, em apenas 3% dos casos não foram observadas ondas de gravidade, sugerindo uma estreita relação entre estas e o mecanismo de geração das pororocas mesosféricas. Naquelas noites em que a observação já se iniciou (ou se encerrou) com o registro da pororoca não foi possível se avaliar a atividade antes (ou depois) da pororoca.



**Figura 4** - Estatística da ocorrência de ondas de gravidade antes da observação das pororocas mesosféricas.

Resultados consistentes também foram obtidos a partir dos dados de fotômetro. A taxa de variação na intensidade de airglow em  $\text{Rayleigh min}^{-1}$  exibiu um comportamento característico do nível de intensidade medido para cada camada. Camadas que apresentam uma alta intensidade de emissão, como a camada OH, por exemplo, também apresentaram, em valores absolutos, uma alta taxa de variação na intensidade ( $\Delta I_{OH} = \pm 50 \text{ R min}^{-1}$ ), isto, em comparação com camadas que apresentam uma baixa intensidade de emissão, como é o caso da camada de OI5577, cuja variação na intensidade de emissão foi de apenas  $\Delta I_{O5} = \pm 5 \text{ R min}^{-1}$ . Porém, observou-se que a resposta em termos percentuais à mudança na intensidade de emissão sob a passagem da pororoca foi similar para as três camadas, com uma forte distribuição (cerca de 82 % dos casos observados) em torno de  $\pm 20\%$ , ou seja, a intensidade de emissão imediatamente após a passagem da pororoca foi de  $\pm 20\%$  da intensidade imediatamente anterior ao fenômeno, independente da camada de airglow observada.

Os dados da variação de temperatura rotacional sob a passagem das pororocas também foram bastante consistentes com os dados previstos pela literatura. A despeito de se tratar de duas camadas de airglow distintas (OH e O<sub>2</sub>), e com modelos distintos para o

cálculo da temperatura rotacional, observa-se uma boa concordância entre as medidas absolutas de TO<sub>2</sub> e TOH, com 95 % de pororocas que provocaram uma taxa de variação na temperatura entre  $\pm 10\text{K}/\text{min}$ . Este valor concorda com os valores previstos por Hines (1965) ao avaliar o impacto que ondas de gravidade provocariam na temperatura medida em camadas de airglow.

Dewan e Picard (1998) também explicaram que pororocas mesosféricas poderiam apresentar uma frente clara, com um aumento na intensidade de emissão, (ou escura, com uma diminuição na intensidade de emissão) se o suposto ducto no qual ela se propagasse estivesse acima (ou abaixo) da camada de airglow. A este fenômeno eles denominaram de “efeito de complementaridade”. No presente trabalho também foi discutido o efeito de complementaridade nas camadas de airglow OH-O<sub>2</sub>-OI5577, observando se houve um aumento (efeito claro ou, simplesmente C) ou uma diminuição na intensidade de emissão das camadas de airglow (efeito escuro, ou E). Os dados mostraram que das 64 pororocas observadas, 68% apresentaram um efeito de complementaridade dentre os previstos pelo modelo de Dewan e Picard, a saber: CCC (9%), CCE (8%), CEE(28%) e EEE(23%). Dentre estes observa-se que o padrão CEE seguido pelo EEE foram os que exibiram a maior frequência de ocorrência sugerindo uma suposta maior incidência de formação de ducto à 87 km, a altitude nominal do airglow OH. Considerações acerca da região onde ocorreria uma maior deposição de momentum e conseqüente inversão de temperatura e aceleração do ar mesosférico, poderiam ser levadas adiante a partir das indicações de maior incidência deste ou daquele padrão de complementaridade.

Porém, em 11% das pororocas observadas (ou 7 eventos) ocorreram os efeitos de complementaridade, ECC e EEC, que não são previstos pelo modelo e, em 13 eventos não foi possível dispor dos dados das três camadas de emissão. Nos efeitos não previstos ECC e EEC a dificuldade está em localizar o ducto, e, por conseguinte, a pororoca. Isso ocorre porque o modelo de Dewan e Picard prevê uma aparência clara para as camadas que estão abaixo do ducto e escura para as camadas acima do ducto, que é o oposto do que foi observado, tomando-se a frente de onda como o referencial. Tais efeitos não previstos pelo modelo permanecem ainda inexplicados.

Outro comportamento interessante e também não esperado para o impacto das pororocas nas camadas de airglow foram as diferentes respostas da temperatura rotacional e da intensidade de emissão à passagem da pororoca. Em alguns casos a intensidade de emissão da camada aumentou simultaneamente a um aumento na sua temperatura rotacional, porém em outros casos tal comportamento não se repetiu, e um aumento na intensidade de emissão ocorreu simultaneamente a uma diminuição na temperatura da camada. Este resultado sugere que as reações químicas de produção e perda envolvidas em cada camada de airglow têm se ser consideradas no modelo dinâmico de pororoca mesosférica para que se possa discutir com uma maior generalidade e acurácia os efeitos de complementaridade previstos pela teoria.

## Conclusões

Baseado na observação de 64 pororocas entre setembro de 2000 e setembro de 2002 em São João do Cariri, Brasil (7,4°S 36,5°O), foi realizado um estudo de ocorrência e caracterização das pororocas mesosféricas equatoriais utilizando o modelo proposto por Dewan e Picard (1998, 2001). Os principais resultados do presente trabalho foram os seguintes: a direção preferencial de propagação dos eventos foi para NE-L, com uma maior ocorrência antes da meia noite local. Não houve sazonalidade na ocorrência das pororocas e diante da quantidade de eventos observada não se sustenta a hipótese de raridade do fenômeno, sugerida na literatura, ao menos na região estudada. Esta alta incidência de pororocas pode estar relacionada com a grande atividade convectiva da Zona de Convergência Intertropical e da Floresta Amazônica. Também foram observadas pororocas em formação e/ou dissipação, pororocas não ondulares e uma alta atividade de ondas de gravidade antes dos eventos, corroborando o mecanismo de interação ondas de gravidade – nível crítico, proposto por Dewan e Picard (2001), como o responsável pela geração do fenômeno. Os comprimentos de onda, velocidades de fase e períodos observados, além das características de trem de ondas concordaram com o modelo de Dewan e Picard (1998). Foi verificado também que em 82% dos casos a variação na intensidade de emissão do OH, O<sub>2</sub> e OI5577 sob a passagem da pororoca foi de  $\pm 20\%$ , enquanto que 95% das pororocas alteraram a temperatura rotacional entre  $\pm 10\text{K min}^{-1}$ , concordando com Hines (1965). O comportamento do ducto mesosférico foi discutido, e em 68% das pororocas observou-se efeitos de complementaridade previstos pelo modelo, enquanto 11% apresentaram efeitos não previstos. Por fim foram observadas pororocas cujo aumento na intensidade de emissão ocorreu simultâneo a uma diminuição na temperatura rotacional, sugerindo uma contribuição da química da camada de airglow para efeito de complementaridade proposto pelo modelo puramente dinâmico.

## Agradecimentos

O presente trabalho recebeu o apoio do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, UFCG – Universidade Federal de Campina Grande, do CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, além da Prefeitura Municipal de São João do Cariri.

## Referências

- Batista, P. P., Clemesha, B. R., Simonich, D. M., Taylor, M. J., Takahashi, H., Gobbi, D., Batista, I. S., Buriti, R. A., Medeiros, A. F., Simultaneous lidar observation of a sporadic sodium layer, a “wall” event in the OH and OI5577 airglow images and the meteor winds. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 64, 1327-1335, 2002.
- Dewan, E. M., Picard, R. H., Mesospheric bores. *Journal of Geophysical Research*, 103, 6295-6305, 1998.

**Dewan, E. M., Picard, R. H.**, On the origin of mesospheric bores. *Journal of Geophysical Research*, 106, 2921-2927, 2001.

**Hines, C. O.**, Atmospheric gravity waves: a new toy for the wave theorist. *Radio Science*. 69D, 375-380, 1965.

**Medeiros, A. F., Taylor, M. J., Takahashi, H., Batista, P. P., Gobbi, D.**, A unusual airglow wave event observed at Cachoeira Paulista 23°S. *Adv. Space Research*, 27, 1749-1754, 2001.

**Medeiros, A. F.; Taylor, M. J.; Takahashi, H.; Batista, P. P.; Gobbi, D.**, 2003. An Investigation of gravity wave activity in the low-latitude upper mesosphere: propagation direction and wind filtering. *Journal of Geophysical Research*, 108, 4411-4418.

**Munasinghe, G., Hur, H., Huang, T. Y., Bhattachryya, A., Tuan, T. F.**, Application of the dispersion formula to long- and short-period gravity waves: Comparisons with ALOHA-93 data and an analytical model. *Journal of Geophysical Research*, 103, 6467-6481, 1998.

**Smith, S. M., Taylor, M. J., Swenson, G. R., She, C., Hocking, W., Baumgardner, J., Mendillo, M.**, A multidagnostic investigation of the mesospheric bore phenomenon. *Journal of Geophysical Research*, 108, 2003.

**Taylor, M. J., Turnbull, D. N., Lowe, R. P.**, Spectrometric and imaging measurements of a spectacular gravity wave event observed during the ALOHA-93 campaign. *Geophysical Research Letters*, 20, 2849-2852, 1995.

**She, C. Y., T. Li, B. P. Williams, T. Yuan, and R. H. Picard**, Concurrent OH imager and sodium temperature/wind lidar observation of a mesopause region undular bore event over Fort Collins/Platteville, Colorado. *Journal of Geophysical Research*, 109, D22107, 2004.

**Swenson, G. R., Qian, J., Plane, J. M. C., Espy, P. J., Taylor, M. J., Turnbull, D. N., Lowe, R. P.**, Dynamical and chemical aspects of the mesospheric Na "wall" event on October 9, 1993, during the Airborne Lidar and Observations of Hawaiian Airglow (ALOHA) campaign. *Journal of Geophysical Research*, 103, 6361, 1998.

**Brown, L. B., A. J. Gerrard, J. W. Meriwether, and J. J. Makela**, All-sky imaging observations of mesospheric fronts in OI 557.7 nm and broadband OH airglow emissions: Analysis of frontal structure, atmospheric background conditions, and potential sourcing mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 109, D19104, 2004.

**Smith, S.M., Friedman, J., Raizada, S., Tepley, C., Baumgardner, J., Mendillo, M.**, Evidence of mesospheric bore formation from a breaking gravity wave event: simultaneous imaging and lidar measurements. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, in press, 2005.