

PRIMEIRA OBSERVAÇÃO DE CAMADAS DE INVERSÃO DE TEMPERATURA MESOSFÉRICAS SOBRE A REGIÃO EQUATORIAL DO BRASIL

J. Fechine¹, C. M. Wrasse¹, H. Takahashi¹, M. G. Mlynczak², J. M. Russell³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), CEP: 12.245-970, São José dos Campos, Brazil.
(joaquim@laser.inpe.br, cmw@laser.inpe.br, hisaotak@laser.inpe.br)

² Atmospheric Sciences Division, NASA Langley Research Center, Hampton, VA, U.S.A.
(m.g.mlynczak@larc.nasa.gov)

³ Center for Atmospheric Sciences, Hampton University, Hampton, VA, U.S.A.
(james.russell@hamptonu.edu)

Resumo- Perfis de temperatura obtidos pelo instrumento SABER a bordo do satélite TIMED foram analisados para se caracterizar as camadas de inversão de temperatura (MIL) observadas sobre o Cariri (7.4S, 36.5O) durante o ano de 2005. As amplitudes de temperatura destas camadas se mostraram um pouco menores do que as amplitudes medidas em latitudes médias. Foi observada também uma variação inter sazonal nas distribuições destas amplitudes. MILs de maiores amplitudes ocorreram com maior frequência durante os Equinócios evidenciando um comportamento semi-anual. Por fim, observou-se que a MIL sobre o Cariri é mais alta no mês que antecede os máximos de amplitude e espessura, característica ainda não reportada.

Palavras-chave: camada de inversão de temperatura, estrutura térmica atmosférica, sensoriamento remoto
Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra

Introdução

Camada de inversão de temperatura, do inglês *Mesospheric Inversion Layer* (MIL), é o nome dado ao *lapse rate* positivo observado nos perfis de temperatura em relação a sua média climatológica, e que é freqüentemente observado na região da mesosfera e baixa termosfera.

A existência deste fenômeno foi reportada pela primeira vez por Schimidlin, (1976) que usou experimentos de lançamento de esferas cadentes e de granadas acústicas para estudar perfis de temperatura mesosféricos. Após este primeiro trabalho inúmeras técnicas têm sido usadas para estudar as MILs como por exemplo, radar de laser Rayleigh (HAUCHECORNE et al., 1987; MERIWETHER et al., 1998), radar de laser de temperatura de Sódio (SHE et al., 1995; STATES E GARDNER, 1998) e fotometria por satélite (CLANCY et al., 1989; LEBLANC E HAUCHECORNE, 1997; FADNAVIS E BEIG, 2004).

Usando radar de laser Rayleigh no sul da França, Hauchecorne et al., (1987) realizaram um estudo estatístico das características de MIL inferiores, ou seja MIL que ocorrem tipicamente em torno de 70 km de altura. Este estudo demonstrou que as MILs inferiores em latitudes médias exibem amplitudes de temperatura acima de 10 K e são mais observadas durante o Inverno, enquanto as de menor amplitude ocorrem no Verão. A altitude de topo da MIL inferior também muda sazonalmente, sendo maior no Verão (~75

km) e menor no Inverno (~65 km) (HAUCHECORNE et al., 1991).

A maioria dos estudos sobre MIL foi conduzida em latitudes médias, entretanto recentemente alguns trabalhos também têm se dedicado a análise de MILs sobre os trópicos, tais como Leblanc e Hauchecorne, (1997), Kumar et al., (2001), Fadnavis e Beig, (2004).

Leblanc e Hauchecorne, (1997) desenvolveram uma detalhada climatologia de camadas de inversão de temperatura a partir de medidas obtidas com radar de laser Rayleigh e com os instrumentos *Improved Stratospheric And Mesospheric Sounder* (ISAMS) e o *Halogen Occultation Experiment* (HALOE) ambos a bordo do satélite *Upper Atmospheric Research Satellite* (UARS). Nesta climatologia eles observaram um forte ciclo anual na ocorrência de MIL em latitudes médias com um máximo durante o Inverno. Já para baixas latitudes foi observada uma variação semi-anual com o máximo tanto da ocorrência como da amplitude acontecendo um mês após os equinócios. Os eventos de inversões durante o Inverno localizaram-se em ~ 70 km de altitude, enquanto os eventos dos equinócios ocorreram de 5 a 10 km acima, sugerindo que diferentes processos físicos e/ou dinâmicos poderiam estar presentes.

Kumar et al., (2001) usaram medidas de radar de laser Rayleigh para mostrar uma oscilação semi-anual na ocorrência de MIL sobre a região tropical da Índia. Seus resultados apresentaram um máximo nos equinócios e um mínimo nos

solstícios, além de valores de amplitude de temperatura em torno de 20 K.

Fadnavis e Beig, (2004), usando dados do HALOE de 1991 a 2001, também mostraram este ciclo semi-anual com máximo em Maio e Novembro em baixas latitudes sobre a Índia. As MIL por eles detectadas se concentraram entre 70 e 85 km de altura, com a altitude de topo entre 80 e 83 km e a altitude de base entre 72 e 74 km.

Assim, o presente estudo se concentrará na detecção e caracterização pela primeira vez de eventos de MILs inferiores sobre a região equatorial brasileira a partir de dados do satélite TIMED/SABER. Na seção 2 serão discutidas as observações do instrumento SABER e o método desenvolvido para a detecção de MILs inferiores. A terceira seção trará as características principais das MILs detectadas, a saber amplitude, espessura, altitude e temperatura em comparação com os estudos anteriores. Na última seção se encontra um sumário dos principais resultados deste trabalho.

Instrumentação e Metodologia

Durante os últimos 6 anos a atividade de ondas de gravidade na mesosfera equatorial brasileira têm sido monitorada usando um imageador all-sky no Observatório de Luminescência Atmosférica da Paraíba localizado em São João do Cariri (7.4S, 36.5O) (daqui em diante denominado apenas de Cariri) (MEDEIROS et al., 2004; WRASSE et al., 2006; FECHINE et al., 2006). Entretanto uma investigação mais detalhada das condições de propagação das ondas de gravidade requer o conhecimento da estrutura térmica da região da MLT, cujos perfis de temperatura apenas agora estão disponíveis a partir de dados de satélite.

No presente trabalho foram usados dados de temperatura cinética obtida pelo instrumento *Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry* (SABER) a bordo do satélite *Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics Satellite* (TIMED).

O satélite TIMED realiza uma órbita circular em torno da Terra em ~102 min, a 625 km de altitude e 74.1° de inclinação, isto sob uma orientação que aponta para o nadir. Sendo um dos quatro instrumentos a bordo do TIMED o SABER observa emissões do limbo terrestre em 10 canais espectrais de banda larga entre 1.27µm e 17µm. (RUSSEL et al., 1999).

Perfis verticais de temperatura no intervalo de 10 a 135 km de altitude com resolução vertical de ~0.4 km são derivados de medidas de radiancia do canal de CO₂ em 15 µm (MERTENS et al., 2004). A acurácia destas medidas são de 1.5K entre 15 e 80 km, e 4 K entre 80 e 100 km, enquanto as precisões são de 0.5K, 2 K e 2 K para 15 – 70 km, 70 – 80 km e 80 – 100 km, respectivamente. Neste

estudo foram usados dados do SABER de Novembro de 2004 a Dezembro de 2005 sobre a região equatorial brasileira, na versão 01.06 do produto nível 2A.

A Figura 1a mostra a densidade de sondagens anual do TIMED/SABER, 3437 sondagens, sobre uma área de ± 20° centrada no Cariri. Esta área foi escolhida para assegurar pelo menos 10 sondagens diárias sobre esta região, e a partir destas determinar o perfil vertical médio de temperatura sobre o Cariri.

A Figura 1b mostra a distribuição sazonal das sondagens sobre o Cariri. Os meses de Novembro de 2004 a Fevereiro de 2005 foi considerado como Verão, Março e Abril de 2005 como Outono, de Maio a Agosto de 2005 como Inverno, e Setembro e Outubro de 2005 como Primavera. Assim, pode-se observar que se tem mais de 1,100 sondagens durante os Solstícios e ~ 550 sondagens durante os equinócios, ou seja, cerca de 280 sondagens em média por mês nesta região.

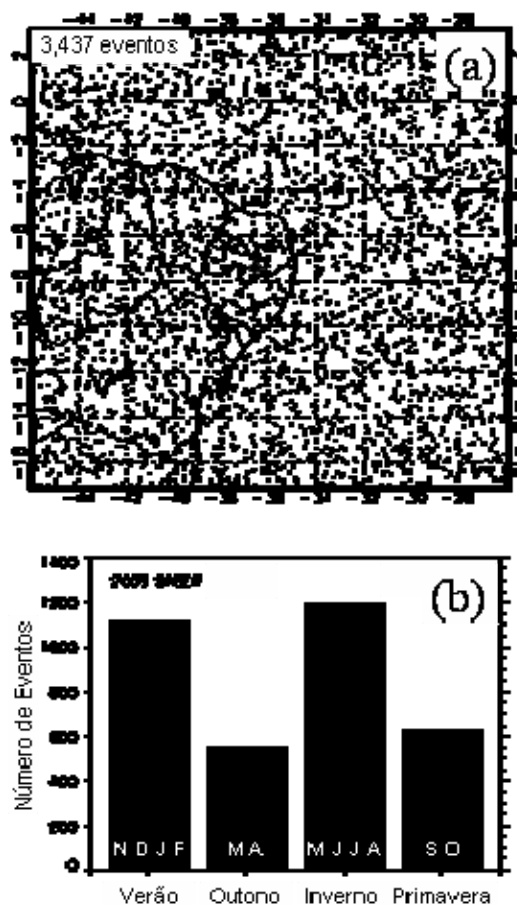


Figura1. (a) Densidade de sondagens do TIMED/SABER sobre o Cariri (17S–3N, 26–46°) durante 2005. A estrela mara a posição do observatório. (b) Distribuição sazonal de sondagens.

A Figura 2 mostra um exemplo de um perfil médio diário de temperatura sobre o Cariri em 10 de Abril de 2005. A partir da Figura 2 pode-se

observar um decréscimo da temperatura na alta troposfera até atingir a tropopausa a ~18 km. Acima da tropopausa observa-se o característico aumento de temperatura na estratosfera até ~50 km onde ocorre a estratopausa, e novamente registra-se um decréscimo de temperatura na região da mesosfera até cerca de 76 km onde se observa o nível de base de uma camada de inversão com ~ 25 K de amplitude de temperatura. Acima de ~83 km, que é o nível de topo da MIL, verifica-se uma segunda inversão de menor amplitude, e acima desta um aumento monotônico da temperatura na região da baixa termosfera.

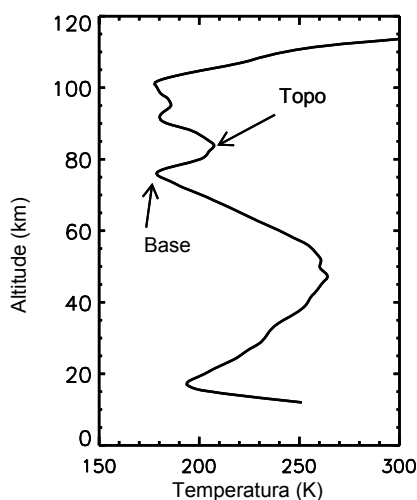


Fig 2. Exemplo de estrutura vertical de temperatura sobre o Cariri obtida a partir de dados do TIMED/SABER em 10 de Abril de 2005 exibindo uma típica MIL com amplitude de 25 K. Os níveis de topo e de base da camada de inversão são indicados pelas setas.

A partir dos perfis de temperatura médios diários foi desenvolvido um algoritmo capaz de detectar a MIL inferior e suas principais características: altitude e temperatura dos níveis de topo e de base. O método utilizado foi baseado em Leblanc e Hauchecorne, (1997) e possui os seguintes critérios de busca de MIL: a base de uma inversão deve estar pelo menos 5 km acima da estratopausa e o seu topo abaixo de 90 km; a diferença da temperatura no topo e na base, ou seja a amplitude da MIL deve ser maior que 10 K e menor que 100 K; a espessura da MIL, i.e., a diferença entre a altitude do topo e da base deve ser maior que 4 km; e apenas a inversão de maior amplitude é considerada. Por fim, para perfis sem inversão a amplitude é considerada como sendo zero.

Resultados e Discussão

Os resultados do algoritmo de busca de camadas de inversão apresentaram uma total de 175 eventos de MIL inferior sobre o Cariri durante

o ano de 2005. As Figuras 3a e 3b apresentam as distribuições mensais e sazonais, respectivamente, de ocorrência de MIL inferior, isto é, o percentual de dias num dado mês (estação) nos quais MIL inferior foi observada sobre o Cariri. Na Figura 3a verifica-se que o máximo de observações de MIL inferior foi em Abril (90%) e em Outubro (87%), ou seja um mês após os Equinócios, e o mínimo foi registrado em Janeiro (12%) e Julho (16%), um mês após os Solstícios. Este fato é mais evidente na Figura 3b onde se observa que embora o Verão e o Inverno tenha uma maior quantidade de dados (ver Figura 1b) as MILs inferiores ocorrem mais no Outono e na Primavera (~70%) do que no Verão e no Inverno (~40%).

Esta variação difere das observações feitas em médias latitudes que mostram um ciclo anual com um máximo no Inverno (HAUCHECORNE et al., 1987) e concorda com Leblanc et al., (1997) que encontraram um ciclo semi-anual na ocorrência de MILs inferiores em baixas latitudes, também com um máximo um mês após os Equinócios.

Fadnavis e Beig, (2004), que estudaram a ocorrência de MIL em baixas latitudes, também observaram um máximo nos Equinócios, porém nos meses de Maio e Novembro. Já o mínimo por eles observado foi em torno de 40 – 50% nos meses de Janeiro e Julho, ou seja, menos pronunciado do que no Cariri.

Kumar et al., (2001) observaram esta mesma oscilação semi-anual com um máximo nos Equinócios, porém em Março e Outubro, e também com um mínimo de ~40% em Janeiro e Julho que é menos pronunciado do que o mínimo no Cariri.

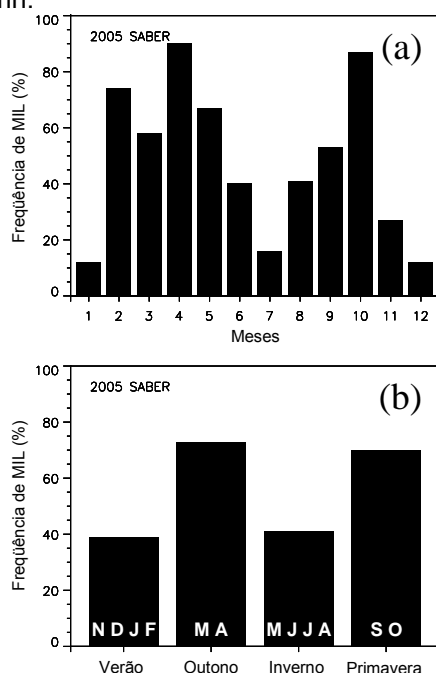


Figura 3. Variação (a) mensal e (b) sazonal da ocorrência de MIL inferior sobre o Cariri.

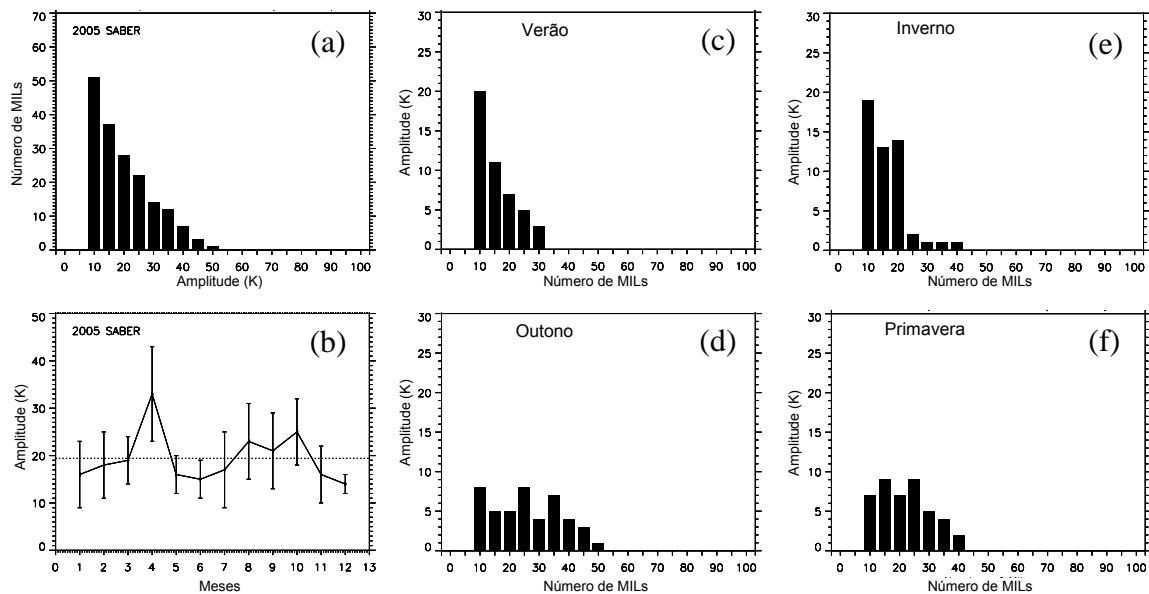


Figura 4. (a) Distribuição anual das amplitudes de MIL inferior sobre o Cariri em 2005. (b) Variação da amplitude média mensal de MIL. Distribuição das amplitudes de MIL durante (c) o Verão, (d) o Outono, (e) o Inverno e (f) a Primavera.

Na Figura 4a tem-se a distribuição de amplitudes de temperatura das MIL inferiores observadas sobre o cariri em 2005. A amplitude de MIL mais freqüentemente observada foi de 15 ± 5 K, mas também se observou amplitudes entre 10 K (que foi o limite inferior do critério de busca) e 50 K. A amplitude de MIL também apresentou uma distribuição bastante concentrada nos menores valores, em contraste com a distribuição reportada por Kumar et al., (2001) que foi mais larga e com a maioria das amplitudes entre 18 e 20 K.

A Figura 4b apresenta a variação da amplitude média mensal de MIL. Esta série temporal mostra um comportamento de oscilação semi-anual com as máximas amplitudes nos Equinócios (Abril e Outubro) e mínimas nos Solstícios (Janeiro e Julho). As barras verticais representam o desvio padrão das amplitudes médias. Este resultado concorda com Fadnavis e Beig, (2004), mas difere do de Kumar et al., (2001) que observaram uma oscilação anual na amplitude de MIL com máximo em Maio e mínimo em Dezembro.

Analisando as Figuras 4c, 4d, 4e e 4f observa-se uma variação intersazonal nas distribuições das amplitudes de MIL sobre o Cariri. Nos Solstícios a amplitude mais observada foi de 15 ± 5 K (Figura 4e e 4f), mas com uma distribuição num intervalo mais estreito de valores no Inverno do que no Verão. Já nos Equinócios se observaram distribuições de amplitudes mais largas, com médias de 30 ± 20 K para o Outono (Figura 4d) e 25 ± 15 K para a Primavera (Figura 4e). Tal variação não foi reportada em outros trabalhos na literatura, sendo esta, a sua primeira verificação experimental.

Na Figura 5a tem-se a distribuição das espessuras de MIL inferior observadas sobre o Cariri em 2005. A espessura de MIL mais observada foi 5 ± 1 km, mas ocorreram espessuras entre 4 km (que foi o limite inferior do critério de busca) e 12 km.

Foi observada apenas uma discreta variação sazonal nas distribuições de espessura de MIL. Nos Equinócios a distribuição foi mais larga com espessura média de 6 ± 2 km. A distribuição para o Verão concordou com a distribuição anual, enquanto a distribuição para o Inverno foi mais estreita com uma espessura média de 4 km (gráfico não mostrado aqui).

Na Figura 5b temos a variação da espessura média mensal de MIL apresentando uma oscilação semi-anual similar a da amplitude de MIL. O máximo das espessuras ocorreu nos Equinócios (Abril e Setembro) e o mínimo nos Solstícios (Janeiro e Julho). Fadnavis e Beig, (2004) também reportaram espessuras de 5 a 8 km com picos de ~ 7 km nos meses de Abril e Setembro.

Na Figura 6a temos a distribuição das altitudes de topo de MIL observadas sobre o Cariri em 2005, enquanto que a Figura 6b mostra a distribuição das altitudes de base de MIL. A maioria das MIL apresentou uma altitude de topo de 83 ± 4 km, o que concorda com Fadnavis e Beig, (2004) que reportaram 80 – 84 km e Leblanc et al., (1997) que observaram a maioria entre 75 e 85 km para baixas latitudes. A altitude de base de MIL mais freqüentemente observada foi 75 ± 3 km.

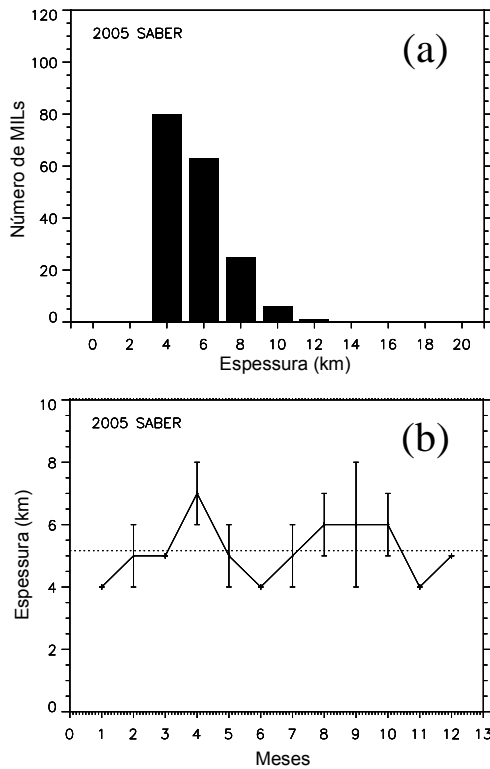


Figura 5. (a) Distribuição anual das espessuras de MIL inferior sobre o Cariri. (b) Variação das espessuras médias mensais de MIL.

Um resultado interessante, também não reportado na literatura foi que as altitudes de topo e de base de MIL também apresentaram uma oscilação semi-anual, com picos um mês antes dos Equinócios e mínimos um mês antes dos Solstícios (gráfico não mostrado aqui). Isto significa que um mês antes de atingir as máximas amplitude e espessura as MIL inferiores sobre o Cariri estavam mais altas. O que sugere o envolvimento de processos dinâmicos mesosféricos no estabelecimento das principais características das MIL.

Já para o caso das distribuições anuais de temperaturas de topo e base de MIL apresentadas na Figura 7a e 7b o valor mais observado foi 205 ± 5 K e 185 ± 5 K. Este parâmetro não exibiu evidências de oscilação semi-anual.

Finalmente, a Figura 8 mostra uma seqüência de perfis médios mensais de temperatura sobre o Cariri durante 2005. Os perfis estão deslocados de 40 K um do outro. Pode-se observar a presença persistente da MIL inferior nos perfis médios mensais de Fevereiro a Maio e de Agosto a Outubro. Esta presença concorda com as variações mensais e sazonais na ocorrência de MIL apresentadas na Figura 3a e 3b. Além disso, observa-se um rebaixamento da MIL (indicado pelas setas) de ~5 km nestes períodos. Observa-se também que a MIL inferior sobre o Cariri é mais fraca, mais estreita e mais alta em Março (Setembro) do que em Abril (Outubro).

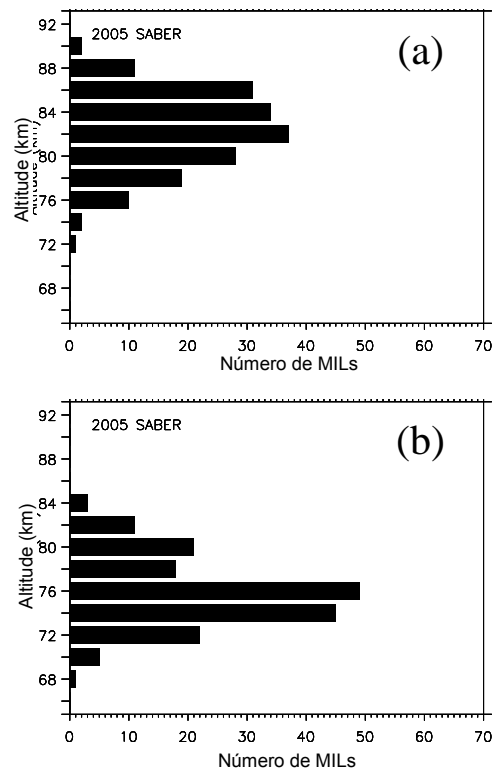


Figura 6. Distribuição anual das altitudes de (a) topo e de (b) base de MIL inferiores sobre o Cariri.

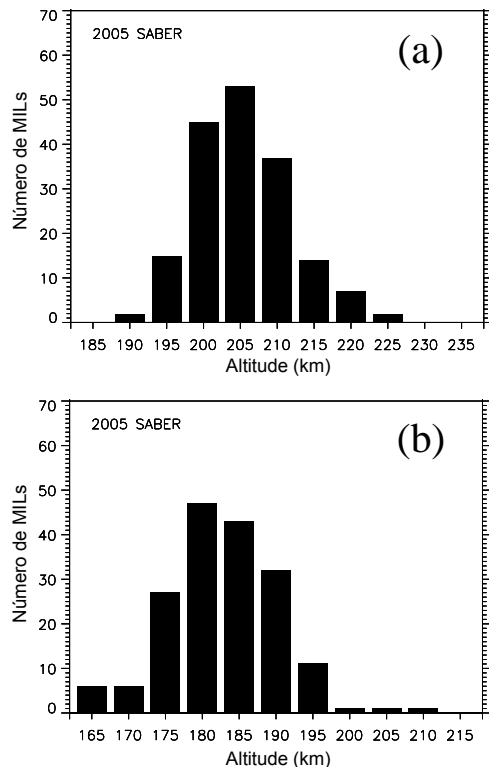


Figura 7. Distribuição anual das temperaturas de (a) topo e (b) base de MIL inferior sobre o Cariri.

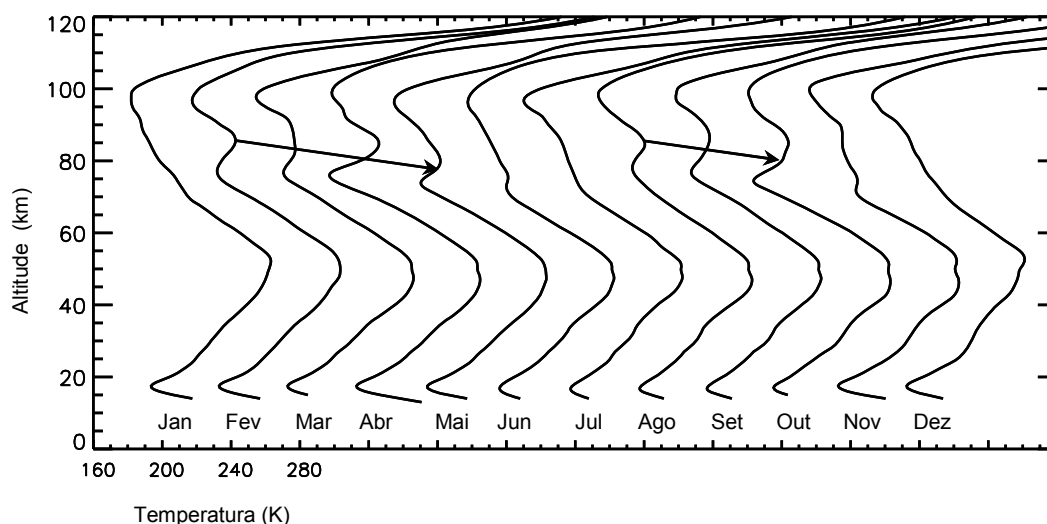


Figura 8. Perfis médios mensais de temperatura sobre o Cariri em 2005. As setas mostram um rebaixamento da MIL inferior durante dois períodos distintos do ano. Os perfis de temperatura estão deslocados de 40 K um do outro.

Conclusão

Perfis de temperatura obtidos pelo instrumento SABER a bordo do satélite TIMED foram analisados com o objetivo de se caracterizar as camadas de inversão de temperatura (MIL) observadas sobre o Cariri (7.4S, 36.5O) durante o ano de 2005. O algoritmo desenvolvido se mostrou capaz de detectar e quantificar as principais características das MIL inferiores sobre a região estudada.

As amplitudes de temperatura de MIL observadas concordam com aquelas reportadas para baixas latitudes sendo um pouco menores que as observadas em latitudes médias. Porém, foi observada uma variação inter sazonal nas distribuições de amplitudes de MIL não reportada na literatura.

No Cariri houve uma maior ocorrência de MILs, inclusive com maiores amplitudes, durante os Equinócios e um mínimo no Solstícios, evidenciando um claro comportamento semi-anual.

As altitudes nas quais as MIL ocorreram no Cariri foram mais altas nos Equinócios e mais baixas nos Solstícios estando também sob um regime semi-anual, resultado similar aos reportados na literatura. Observou-se também um rebaixamento da MIL inferior durante os Equinócios.

Observou-se também que a MIL inferior sobre o Cariri é mais alta no mês que antecede as máximas amplitude e espessura, característica também não reportada na literatura.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos grupos do SABER e do TIMED por fornecerem os dados de temperatura, além da NASA e do *Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory* responsáveis pelo sucesso da missão.

J. Fachine agradece ao apoio da CAPES e CNPq.

C.M. Wrasse agradece ao apoio da Fapesp através do projeto número 05/50482-5.

Referências

- CLANCY, R. T.; RUSH, D. W.: Climatology and trends of mesospheric (58–90) temperatures based upon 1982–1986 SME limb scattering profiles, *J. Geophys. Res.*, V. 94, p. 3377–3393, 1989.
- FADNAVIS, S.; BEIG, G. Mesospheric temperature inversions over the Indian tropical region. *Annales Geophysicae*. V.22, p. 3375–3382, 2004.
- FECHINE, J.; MEDEIROS, A.F.; BURITI, R.A.; TAKAHASHI, H.; GOBBI, D. Mesospheric bore events in the equatorial middle atmosphere. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. V. 67, p. 1774–1778, 2005.
- HAUCHECORNE, A.; CHANIN, M. L.; WILSON, R., Mesospheric temperature inversion and gravity wave breaking, *Geophys. Res. Lett.*, V. 14, p. 933–936, 1987.
- HAUCHECORNE, A., CHANIN, M. L.; P. KECKHUT, Climatology and trends of the middle

atmospheric temperature (33 – 87 km) as seen by Rayleigh lidar over the south of France, **J. Geophys. Res.**, V. 96, p. 15,297–15,309, 1991

- KUMAR, V. S.; KUMAR, Y. B.; RAGHUNATH, K.; Rao, P. B.; Krishnaiah, M.; MIZUTANI, K.; AOKI, A.; YASUI, M.; ITABE, T. Lidar measurements of mesospheric temperature inversion at a low latitude, **Ann. Geophys.**, V. 19, p. 1039–1044, 2001.

- LEBLANC, T.; HAUCHECORNE, A. Recent observations of mesospheric temperature inversions, **Geophys. Res. Lett.**, 102, V. 19, p. 471–19 482, 1997.

- MEDEIROS, A.F.; BURITI R.A.; MACHADO, E.A.; TAKAHASHI, H.; BATISTA, P.P.; GOBBI, D.; TAYLOR M.J. Comparison of gravity wave activity observed by airglow imaging at two different latitudes in Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. V. 60, p. 647 – 654, 2004.

- MERIWETHER, J. W.; GAO, X.; WICKWAR, V.; WILKERSON, T.; BEISSNER, K.; COLLINS, S.; HAGAN, M., Observed coupling of the mesospheric inversion layer to the thermal structure, **Geophys. Res. Lett.**, V. 25, p. 1479–1482, 1998.

- MERTENS C. J.; SCHMIDLIN, F. J.; GOLDBERG, R. A.; REMSBERG, E. E.; PESNELL, W. D.; RUSSELL III, J. M.; MLYNCZAK, M. G.; LÓPEZ-PUERTAS, M.; WINTERSTEINER, P.P.; PICARD, R. H.; WINICK, J. R.; GORDLEY, L. L. SABER observations of mesospheric temperatures and comparisons with falling sphere measurements taken during the 2002 summer MaCWAVE campaign. **Geophys. Res. Lett.**, V. 31, p. 3105 - 3110, 2004

- RUSSELL, J. M., III; MLYNCZAK, M. G.; GORDLEY, L. L.; TANSOCK, J.; ESPLIN, R. An overview of the SABER experiment and preliminary calibration results, **Proceedings of the SPIE**, 44th Annual Meeting, Denver, Colorado, July 18– 23 , V. 3756, p. 277– 288, 1999.

- SCHMIDLIN, F. J.: Temperature inversions near 75 km, **Geophys. Res. Lett.**, p. 3173–3176, 1976.

- SHE, C. Y.; KRUEGER, D. A.; ROBLE, R.; KECKHUT, P.; HAUCHECORNE, A.; CHANIN, M. L. Vertical structure of midlatitude temperature from stratosphere to mesosphere (30–105 km). **Geophys. Res. Lett.** V. 22, p. 377–380, 1995.

- STATES, R. J.; GARDNER, C. S. Influence of the diurnal tide and thermospheric heat sources on the formation of mesospheric temperature inversion layers. **Geophys. Res. Lett.** V. 25, p. 1483-1491, 1998.

- WRASSE, C. M.; NAKAMURA, T.; TSUDA, T.; TAKAHASHI, H.; MEDEIROS, A. F.; COSTA, R. B. A.; TAYLOR, M. J.; GOBBI, D.; SALATUN, A.; SURATNO; A., E; ADMIRANTO, A. G. Climatology of atmospheric gravity wave propagation observed in equatorial and middle latitudes regions. **Proceedings of XX General Assembly of The International Union of Geodesy and Geophysics**, Sapore, 2003.