

## Relatório Final

Título do projeto de pesquisa: Fatores termodinâmicos associados à convecção profunda sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara

Bolsista: Gabriel Miller de Oliveira (UNIFEI)

Orientador: Marcos Daisuke Oyama

Período a que se refere o relatório: agosto 2014 a julho de 2015

### Resumo

Neste trabalho, abordou-se a questão do aprofundamento da convecção (convecção rasa *versus* profunda) sobre a região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA) por meio da implementação e do uso de um modelo de parcela de ar (*parcel model*). O modelo obtém o movimento vertical gerado pelo empuxo e inclui os processos de entranhamento e mudança de fase entre vapor e água líquida. Foram utilizados perfis verticais médios às 00, 06, 12 e 18 UTC obtidos de dados de radiossondagens coletados durante dois experimentos realizados no CLA, um na estação seca (Murici-2) e o outro na estação chuvosa (GPM-2010). Preliminarmente, concluiu-se que a convecção seca (ou seja, utilizando o modelo de parcela com ar seco somente) fica confinada em baixos níveis independentemente das condições do ambiente. Então, utilizando o modelo de parcela com ar úmido, os resultados mostraram que, sob condições secas, o aprofundamento da convecção dependeria, em geral, da existência de forçantes dinâmicas muito intensas (velocidades verticais  $> 8 \text{ m s}^{-1}$  em baixos níveis). Sob condições úmidas, ao contrário, a convecção profunda poderia ocorrer, em geral, sob forçantes dinâmicas menos intensas (velocidades verticais  $> 2 \text{ m s}^{-1}$  em baixos níveis). Logo, na região do CLA, a prevalência de convecção profunda (rasa) na estação chuvosa (seca) seria explicada pela existência (ausência) de uma forçante dinâmica intensa em baixos níveis quando pequena (grande) intensidade seria necessária para aprofundar a convecção.

**Palavras-chave:** modelo de parcela, instabilidade, precipitação.



## 1. Introdução

Na região do Centro de Lançamento de Alcântara (CLA), no trimestre de março a maio, que corresponde ao outono austral, ocorre a estação chuvosa, quando eventos de convecção profunda são frequentes, enquanto no trimestre de setembro a novembro, que corresponde à primavera austral, ocorre a estação seca, quando eventos de convecção profunda são raros (Pereira et al., 2002). Para explicar esse ciclo anual, considera-se que, na estação chuvosa, nuvens convectivas rasas encontrariam condições dinâmicas e termodinâmicas favoráveis ao seu aprofundamento; na estação seca, essas condições seriam desfavoráveis. Neste trabalho, o objetivo é verificar alguns aspectos dessa explicação por meio da implementação e do uso de um modelo de parcela de ar (*parcel model*). A motivação é que um melhor entendimento das condições associadas ao aprofundamento da convecção poderia assistir a previsão de precipitação durante as campanhas de lançamento de foguetes no CLA, pois a ocorrência de chuva tem o potencial de restringir as atividades durante as campanhas (Marques e Fisch, 2005).

O modelo de parcela de ar obtém o movimento vertical de uma parcela de ar devido ao empuxo resultante das diferenças de densidade entre a parcela e o ambiente ao seu redor. Pela sua simplicidade, esse tipo de modelo é atualmente empregado em testes iniciais de esquemas de microfísica de nuvens (p.ex., Diehl et al., 2006). Neste trabalho, o modelo de parcela não possui nenhum esquema de microfísica, pois o interesse está somente na altura final atingida por uma parcela que ascende a partir dos níveis troposféricos mais baixos sobre a região do CLA. Em tese, parcelas úmidas que conseguem vencer a barreira imposta pela CINE (*convective inhibition energy*) podem utilizar a CAPE (*convective available potential energy*) para atingir os altos níveis; as que não conseguem vencer ficam confinadas nos baixos níveis. As condições atmosféricas do ambiente são perfis médios obtidos de dados de radiossondagens coletados no CLA.

## 2. Material e métodos

O modelo de parcela prognostica a velocidade vertical, a temperatura, a razão de mistura (de vapor) e razão de mistura de água líquida da parcela. O movimento vertical é forçado pelo empuxo, ou seja, pelas diferenças de temperatura virtual entre a parcela e o ambiente. Os

processos termodinâmicos incluem o resfriamento/aquecimento adiabático, o aquecimento (resfriamento) diabático devido à condensação (evaporação) e a mistura isobárica devido ao entranhamento de ar do ambiente. A formulação do modelo baseia-se na apresentada pelo Dr. Mark G. Lawrence<sup>1</sup>. O modelo é integrado numericamente com passo de tempo de 10 s. A taxa temporal de entranhamento é de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ , e somente 50% do condensado é retido a cada passo de tempo. Esses parâmetros são considerados fixos em todos os experimentos. O modelo é codificado em FORTRAN 90, e os gráficos são elaborados utilizando o pacote OriginPro 9.0.

Os perfis verticais médios às 00, 06, 12 e 18 UTC<sup>2</sup> (correspondentes ao ambiente) foram obtidos de dados de radiossondagens coletados durante dois experimentos realizados no CLA: Murici-2 (17-25/09/2008) e GPM-2010 (01-25/03/2010). As condições secas são representadas pelos perfis do experimento Murici-2 e dos 18 dias iniciais do experimento GPM-2010 (01-18/03/2010), quando ainda não havia se iniciado a estação chuvosa. As condições úmidas são representadas pelos últimos 7 dias do experimento GPM-2010 (19-25/03/2010). A descrição dos experimentos encontra-se em Reuters (2013).

A posição e a temperatura inicial da parcela correspondem à média dos primeiros 500 m (a partir da superfície) do ambiente. A velocidade inicial é ascendente e varia de 1 a  $10 \text{ m.s}^{-1}$  conforme o experimento.

### 3. Resultados

#### 3.1. Modelo de parcela de ar seco

Inicialmente, apresentam-se os resultados do modelo de parcela considerando o ar seco. O intuito é verificar se, sem a liberação de calor latente devido ao processo de condensação, seria possível às parcelas atingirem os níveis mais altos da troposfera. A Figura 1 mostra a cinemática da parcela de ar em ambientes diferentes às 12 UTC com entranhamento de ar seco. Na estação seca, a parcela de ar atinge altitudes mais elevadas (cerca de 800 m) e o

---

<sup>1</sup> <http://www.docstoc.com/docs/100875220/Chapter-1-The-cloud-parcel-model>

<sup>2</sup> Em Meteorologia, os horários são normalmente expressos em UTC (*Coordinated Universal Time*). Para o CLA, o horário local é obtido subtraindo-se 3 h do horário UTC.

período de oscilação é de aproximadamente 10 min (= 600 s), que corresponde ao valor típico da frequência de Brunt-Vaisala na média troposfera ( $\sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). No período seco da estação chuvosa, o comportamento é semelhante, com uma altitude máxima atingida menor (cerca de 600 m) e um período de oscilação um pouco maior (em torno de 15 min). O maior período de oscilação decorre de menor estabilidade na atmosfera livre (Figura 2), o que leva a uma menor frequência de Brunt-Vaisala. No período úmido da estação chuvosa, a parcela fica confinada nos níveis mais baixos (a altitude máxima que não ultrapassa os 300 m) com período de oscilação pouco menor que 10 min. Isso ocorre porque, diferentemente dos períodos secos, a camada residual é pouco profunda no período úmido (Figura 2).

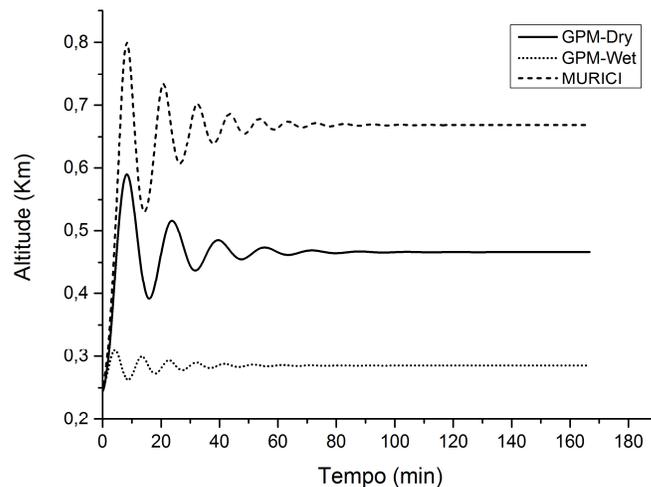


Figura 1 – Cinemática da parcela de ar às 12 UTC no experimento Murici-2 (traço) e GPM-2010: período seco (linha) e chuvoso (ponto) com taxa de entranhamento de  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

Como mencionado na seção 2 (Material e Métodos), o entranhamento é incluído nos cálculos da dinâmica da parcela. Trata-se de uma melhoria em relação ao trabalho anterior de Daher (2011). Para fins de ilustração, a Figura 3 mostra o comportamento de uma parcela de ar no período seco com diferentes magnitudes de taxa de entranhamento. Como esperado, quando se diminui (aumenta) o valor do entranhamento, maior (menor) é a altitude atingida pela parcela, devido à maior (menor) amplitude de oscilação, e maior (menor) é o período de oscilação.

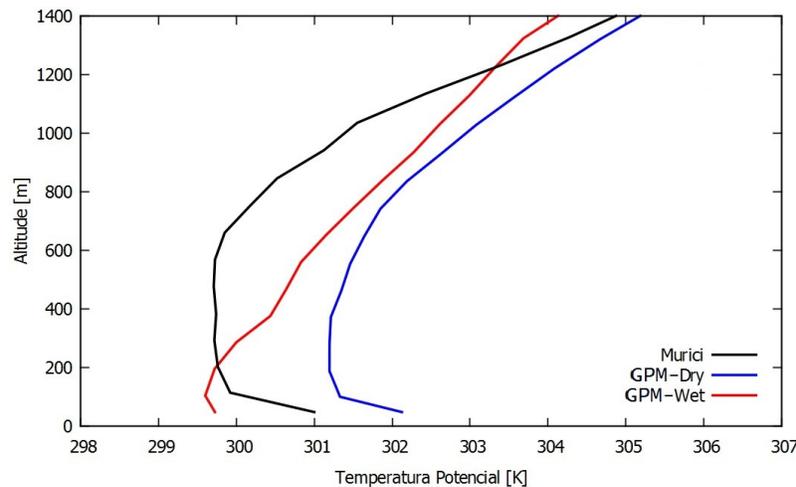


Figura 2 – Perfil de temperatura potencial do ambiente nos experimentos Murici-2 e GPM-2010: período seco (azul) e chuvoso (vermelho). Horário: 12 UTC.

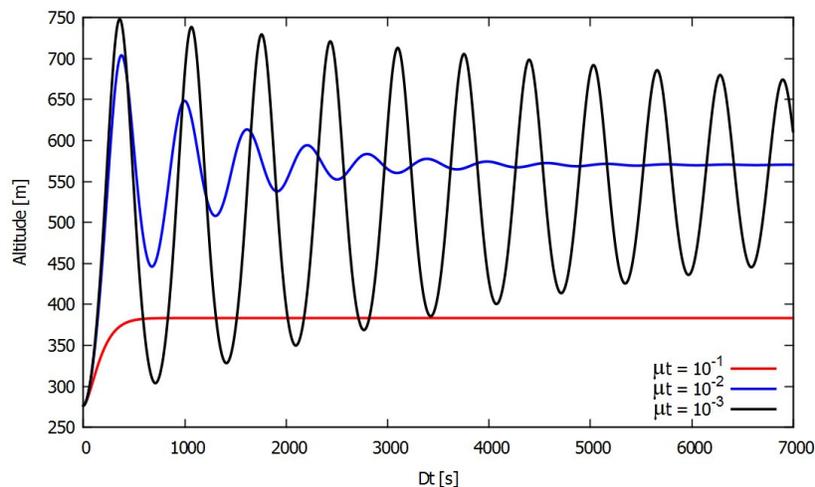


Figura 3 – Variação da oscilação de uma parcela de ar a diferentes valores de entranhamento às 12 UTC da estação seca.

Em relação ao ciclo diário, na Figura 4, há um padrão geral, com menores valores de altura (em que a parcela de ar se estabiliza) durante a noite (00 e 06 UTC), e maiores valores durante o dia (12 e 18 UTC). A altura máxima ocorre às 18 UTC, coincidindo com o horário de maior instabilização da atmosfera em baixos níveis, exceto na estação seca (quando a altura máxima é atingida às 12 UTC). Durante a noite, as alturas permanecem praticamente constantes (pouca diferença entre as altitudes em 00 e 06 UTC). Logo, considerando todos os

horários do dia, as alturas atingidas pela parcela variam de 400 a 700 m, ou seja, parcelas de ar seco provenientes de baixos níveis não são capazes de atingir os altos níveis da troposfera.

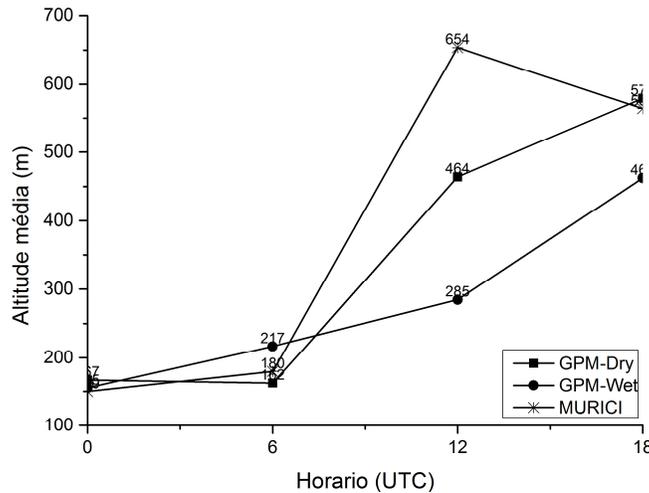


Figura 4 – Alturas atingidas pelas parcelas em função do horário para os experimentos Murici-2 e GPM-2010: período seco e úmido, utilizando o modelo de ar seco.

### 3.2. Modelo de parcela de ar úmido

Utilizando o modelo de ar úmido, a cinemática da parcela de ar às 12 UTC está mostrada na Figura 5. A parcela de ar atinge maiores altitudes, em relação ao modelo de ar seco, em todos os períodos analisados devido à liberação de calor latente associada à condensação de vapor d'água (não mostrado).

Com a variação dos valores de velocidade vertical foram obtidas as Figuras 6, 7 e 8, que mostram a altura final da parcela em função da velocidade vertical inicial (aplicada no instante inicial, quando a parcela se encontra nos níveis troposféricos mais baixos).

Para a estação seca (Figura 6), nota-se que há a possibilidade de ocorrência de convecção profunda às 00, 06 UTC e 12 UTC. Para 06 e 12 UTC, a velocidade vertical precisa ser superior a  $8 \text{ m s}^{-1}$  para haver convecção profunda. Trata-se de um valor muito alto, ou seja, seria necessária uma forçante dinâmica muito intensa para aprofundar a convecção. Para 00 UTC, pode haver ocorrência de convecção profunda para velocidades verticais maiores que 2

$\text{m s}^{-1}$ . Para 18 UTC, as parcelas ficam confinadas em baixos níveis para todas as velocidades verticais  $\leq 10 \text{ m s}^{-1}$ .

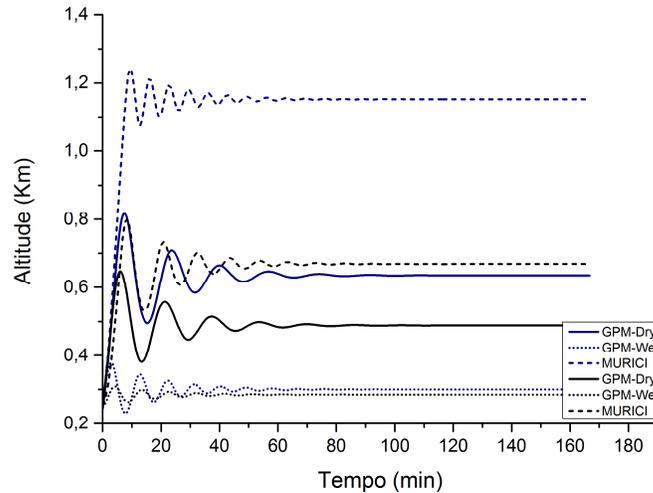


Figura 5 – Comparação da cinemática da parcela de ar do modelo de ar seco (preto) e do modelo de ar úmido (azul) com a mesma velocidade vertical inicial ( $1 \text{ m s}^{-1}$ ).

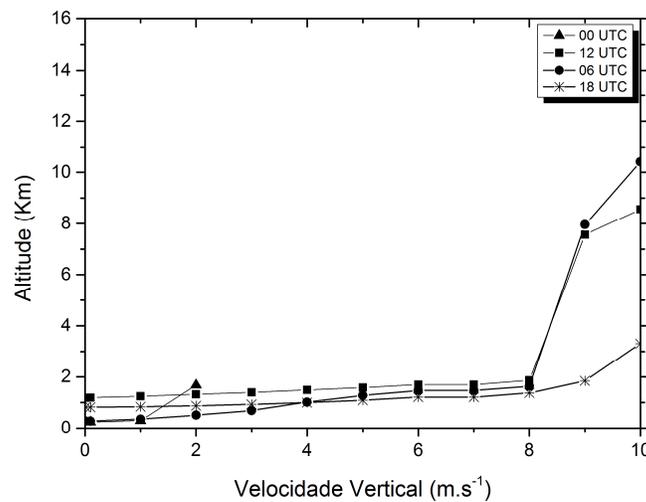


Figura 6 – Altitude da parcela de ar em função da variação de velocidade vertical inicial na estação seca (Murici-2).

Para o período seco da estação chuvosa (Figura 7), o comportamento em todos os horários é similar ao da estação seca nos horários de 06 e 12 UTC: pode haver ocorrência de convecção profunda quando a velocidade vertical é superior a  $8 \text{ m s}^{-1}$ .

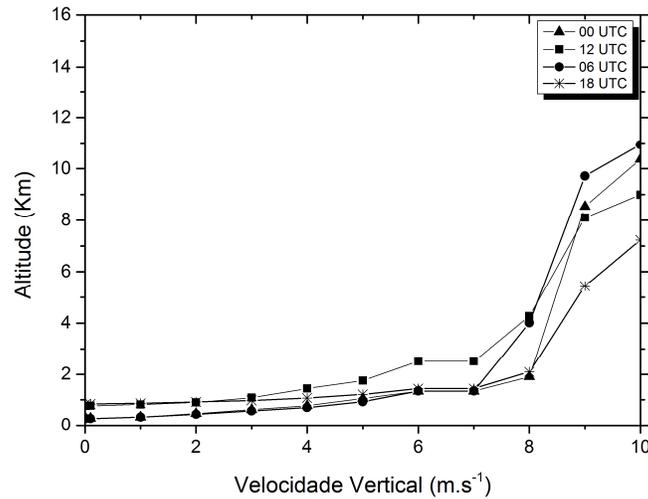


Figura 7 – Altitude da parcela de ar em função da variação de velocidade vertical inicial no período seco da estação chuvosa (GPM-Dry).

Período úmido da estação chuvosa (Figura 8), com velocidade vertical  $> 2 \text{ m s}^{-1}$  já se observa predisposição à ocorrência de convecção profunda em todos os horários, exceto às 18 UTC, quando a convecção é aprofundada somente para velocidades verticais  $> 8 \text{ m s}^{-1}$ . Em relação aos períodos secos, a possibilidade de convecção profunda ocorre na maior parte do dia durante o período úmido. Isso concorda com os resultados de Oliveira e Oyama (2009).

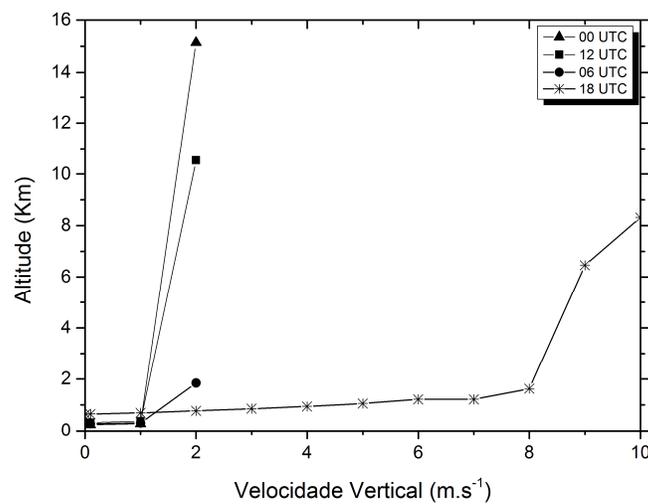


Figura 8 – Altitude da parcela de ar em função da variação de velocidade vertical inicial no período úmido da estação chuvosa (GPM-Wet).

Em todos os períodos, há maior dificuldade de aprofundamento da convecção no horário de 18 UTC. Isso não era esperado, visto que 18 UTC é o horário de maior instabilização da atmosfera. Uma explicação é que a circulação de brisa traz ar oceânico mais frio para a região do CLA durante a tarde, deixando os níveis mais baixos da troposfera menos instáveis.

#### **4. Conclusões**

Para a região do CLA, no caso do ar seco, existe um padrão geral no ciclo diário das alturas atingidas pela ascensão de uma parcela de ar que representa as condições médias da camada de 500 m a partir da superfície. Os menores valores de altura ocorrem durante a noite (00 e 06 UTC), enquanto os maiores valores ocorrem durante o dia (12 e 18 UTC). As alturas, no entanto, ficam confinadas em baixos níveis, ou seja, a convecção seca não consegue se aprofundar.

No caso do ar úmido, tanto na estação seca quanto no período seco da estação chuvosa, a possibilidade de ocorrência de convecção profunda em geral depende de velocidades verticais muito altas ( $> 8 \text{ m s}^{-1}$ ), ou seja, de forçantes dinâmicas muito intensas. No período úmido da estação chuvosa, ocorre o contrário: na maior parte do dia, a convecção profunda pode ocorrer sob forçantes dinâmicas menos intensas (velocidades verticais  $> 2 \text{ m s}^{-1}$ ).

Os resultados obtidos permitem concluir que, na região do CLA, a prevalência de convecção profunda na estação chuvosa seria explicada pela existência de uma forçante dinâmica intensa em baixos níveis, como a Zona de Convergência Intertropical, quando pequena intensidade seria necessária para aprofundar a convecção. Na estação seca, a prevalência de convecção rasa seria explicada pela ausência de uma forçante dinâmica intensa em baixos níveis quando isso seria necessário para aprofundar a convecção.

#### **5. Divulgação dos Resultados**

O trabalho “Eventos extremos de precipitação na região do Centro de Lançamento de Alcântara: caracterização estatística preliminar” (referente ao período anterior), de Gabriel Miller de Oliveira e Marcos Daisuke Oyama, foi apresentado na forma de pôster no XVIII

Congresso Brasileiro de Meteorologia, realizado no período de 3 a 6 de novembro de 2014 em Recife (PE).

## Referências

- DAHER, V. Movimento vertical das parcelas de ar sobre o Centro de Lançamento de Alcântara a partir de dados de radiossondagens. **Relatório parcial de iniciação científica**. São José dos Campos, 2011.
- DIEHL, K.; SIMMEL, M.; S. WURZLER. Numerical sensitivity studies on the impact of aerosol properties and drop freezing modes on the glaciation, micro physics, and dynamics of clouds. **Journal of Geophysical Research**, n.1, v. 111, p. 1-15. 2005.
- MARQUES, R. F. C.; FISCH, G. F. As atividades de meteorologia aeroespacial no Centro Técnico Aeroespacial (CTA). **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 3, p. 21-25, 2005.
- OLIVEIRA, F. P.; OYAMA, M. D. Radiosounding-derived convective parameters for the Alcântara Launch Center. **Journal of Aerospace Technology and Management**, v. 1, p. 211-216, 2009.
- PEREIRA, E. I.; MIRANDA, I.; FISCH, G. F.; MACHADO, L. A. T.; ALVES, M. A. S. **Atlas climatológico do Centro de Lançamento de Alcântara**. São José dos Campos: Centro Técnico Aeroespacial, 2002.
- REUTER, E. D. J. **Sensibilidade do modelo MM5 no prognóstico do vento às diferentes parametrizações de camada limite planetária no centro de lançamento de Alcântara**. Tese de Doutorado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.