



## ANÁLISE DA SIMULAÇÃO DO MODELO PALM PARA A CAMADA LIMITE CONVECTIVA NA AMAZÔNIA (GOAMAZON 2014/5)

Rayonil Gomes Carneiro<sup>1</sup>, Camilla Kassar Borges<sup>2</sup>, Alice Henkes<sup>1</sup> e Gilberto Fisch<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande, UFCG

<sup>3</sup>Universidade de Taubaté, UNITAU

### Resumo

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desenvolvimento da camada limite convectiva na região da Amazônia simulada pelo modelo PALM, para dias característicos das estações chuvosa e seca da região. O estudo utilizou dados proveniente do Projeto GOAmazon 2014/15 (*Green Ocean Amazon*), sendo que medidas obtidas por radiossondas e ceilometer foram utilizadas para comparar com as simulações realizadas. Os resultados demonstraram que, de forma geral, o ciclo da camada limite convectiva para a região Amazônica foi bem representado pelo PALM. Este apresentou superestimativa de  $\approx 35$  m no dia chuvoso e subestimativa de  $\approx 20$  m no dia seco, ambas na fase de desenvolvimento da camada convectiva. Foi observado que o perfil de fluxo de calor latente foi maior que o calor sensível na atmosfera, por se tratar de um dia da estação úmida, com a camada limite respondendo rapidamente aos máximos das forçantes da superfície.

**Palavras-chave:** camada limite planetária; fluxos Turbulentos; modelo LES

### Abstract

In the present work had as objective to evaluate the development of the convective boundary layer in the Amazon region simulated by the PALM model, for days characteristic of the region's rainy and dry seasons. The study used data from the GOAmazon Project 2014/2015 (*Green Ocean Amazon*). Using data from radiosondes and Ceilometer, to compare with the simulations performed through the PALM model. The results showed that, in general, the convective boundary layer cycle for the Amazon region was well represented by the PALM. This showed overestimation of  $\approx 35$  m in rainy day and underestimation of  $\approx 20$  m in dry day, both in development phase of the convective layer. It was observed that the latent heat flux profile was higher than the sensible heat in the atmosphere, because it is a day of the wet season, with the boundary layer responding rapidly to the maximum surface forcing.

**Keywords:** planetary boundary layer; turbulent flows; model LES

## 1. Introdução

A camada limite planetária (CLP) é a camada adjacente à superfície, onde ocorre o transporte turbulento de calor e *momentum* que ocorrem ao longo de um período da ordem de uma hora. O ciclo diário da CLP varia conforme o aquecimento da superfície terrestre em função da radiação solar incidente, o qual consiste de uma fase convectiva durante o dia (Camada Limite Convectiva - CLC) e uma fase estável durante à noite (Camada Limite Noturna - CLN). Estudos dos processos atmosféricos na baixa troposfera tem um impacto importante na sociedade e no meio ambiente, uma vez que os mesmo ocorrem dentro da CLP.

Um dos parâmetros fundamentais em estudos da CLP é a determinação de sua altura, uma vez que sua profundidade é uma medida da intensidade da interação superfície-atmosfera, além de

ser um parâmetro importante para a modelagem atmosférica (NEVES; FISCH, 2015). Entretanto a logística para as observações da altura da CLP é geralmente complicada. Desta forma, métodos para estimar sua altura a partir de simulações numéricas são importantes, sendo que com o avanço dos recursos computacionais permitiu melhorias na modelagem, no sentido de resolver as diferentes escalas de turbulência.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade de um modelo numérico de vórtices de grande escala, denominado PALM (*PARallelized Large-Eddy Simulation Model*), desenvolvido pela Universidade de Hannover na Alemanha e descrito em Raasch e Schröter (2001), no sentido de comparar com os dados observacionais (radiossondas e *ceilometer*), para um dia representativo das estações chuvosa e seca na região da Amazônia Central.

## 2. Material e Métodos

### 2.1 Área de Estudo

O sítio experimental denominado T3 com coordenadas geográficas ( $3^{\circ}12'6.0''S$ ,  $60^{\circ}36'0.0''W$ ) esteve localizado no Município de Manacapuru, no Estado do Amazonas (Figura 1), e fez parte campanha do Projeto Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon) realizado nos anos de 2014 e 2015. Este local consiste de uma área de vegetação de pequeno porte (pastagem) cercada por floresta nativa (MARTIN et al., 2016) e situa-se a sudoeste da cidade de Manaus (AM).



Figura 1 – Localização do sítio experimental T3 no município de Manacapuru-AM, Brasil. FONTE: Adaptado Martin et al. (2016)

### 2.2 Dados Micrometeorológicos

Durante a campanha do GOAmazon, foram utilizados diversos instrumentos para observações das grandezas atmosféricas. Neste estudo foram utilizados os dados obtidos através dos lançamentos de radiossondagem (RS), que ocorreram às 02, 08, 11, 14 e 20 Hora Local (HL), através dos quais foram extraídos perfis das componentes  $u$  e  $v$ ,  $\theta$  e  $q$ , utilizados para determinar a altura da CLP. Também foi utilizadas medições do sensor Ceilometer, que fornece medidas diretas da altura da

CLP, com uma resolução temporal de 16 s (mais detalhes em: Shukla et al. (2014), Carneiro, Fisch e Kaufmann (2016)).

### 2.3 Modelo PALM

O modelo PALM utilizado neste trabalho foi implementado por Raasch e Schröter (2001), sendo uma versão do modelo LES (*Large Eddy Simulation*) cujo os cálculos são paralelizados, e baseado nas equações de Navier-Stokes, assumindo hipóteses não hidrostática, fluido incompressível e aproximação de Boussinesq. O modelo PALM tem sido uma ferramenta muito útil em várias aplicações geofísicas incluindo estudos da camada limite convectiva e noturna, modelagem de dispersão de poluentes, dentre outros (LETZEL; RAASCH, 2003; KANDA et al., 2004; RAASCH; FRANKE, 2011; MARONGA; RAASCH, 2013; MARONGA et al., 2015; NEVES; FISCH; RAASCH, 2018).

As simulações foram realizadas utilizando um domínio de 10 km x 10 km na horizontal e aproximadamente 5 km na vertical, com um espaçamento de grade de 50 m, tanto nas escalas horizontal quanto na vertical. O modelo simulou 12 horas (compreendendo o período das 08 às 19 HL), com tempo de *spin-up* de 1 hora, que é o tempo que o modelo leva para criar os primeiros vórtices turbulentos e atingir o equilíbrio estatístico dadas as condições iniciais. As simulações foram realizadas com a inicialização através dos perfis de temperatura potencial ( $\theta$ ), umidade específica ( $q$ ) e as componentes do vento ( $u$  e  $v$ ) obtido pela radiossondagem das 8 HL, para um dia típico da estação chuvosa (21 de março de 2014) e um dia da estação seca (26 de setembro de 2014).

As simulações foram realizadas utilizando um domínio de 10 km x 10 km na horizontal e aproximadamente 5 km na vertical, com um espaçamento de grade de 50 m, tanto nas escalas horizontal quanto na vertical. No qual o modelo simulou 12 horas (compreendendo o período das 08 às 19 HL), com tempo de *spin-up* de 1 hora, isto é, o tempo que o modelo leva para criar os primeiros vórtices turbulentos e atingir o equilíbrio estatístico dadas as condições iniciais.

## 3. Resultados e Discussões

A Figura 2A apresenta a evolução temporal do perfil vertical do fluxo de calor sensível ( $\overline{w'\theta'}$ ) obtidos através da simulação do modelo PALM, em que se observou valores positivos superiores  $10 \text{ W m}^{-2}$  à superfície, após às 10 HL, com início do desenvolvimento vertical da CLC. O fluxo máximo ocorreu entre as 12 e 15 HL com valores levemente superiores a  $100,0 \text{ W m}^{-2}$  e atingindo uma profundidade de 600 m. Esta altura foi estimada em função do nível em que o fluxo de calor sensível troca de sinal (de positivo para negativo). Verificou-se a presença de uma camada de  $\overline{w'\theta'}$  negativo (transporte de calor descendente), representando o fluxo de entranhamento situado acima da CLC, em torno de  $-50 \text{ W m}^{-2}$ . A partir das 17 H constatou-se que já ocorre a presença de  $\overline{w'\theta'}$  negativo ao longo do perfil vertical, induzindo a formação de uma camada limite estável.

Na Figura 2B é apresentada a evolução temporal do perfil vertical do fluxo de calor latente ( $\overline{w'q'}$ ), em que este mostrou valores positivos elevados (acima de  $200 \text{ W m}^{-2}$ ) a partir das 09 HL, sendo o máximo detectado após as 12 HL, de  $\approx 400,0 \text{ W m}^{-2}$ . Por se tratar de um dia referente a estação chuvosa da região, no qual existe grande disponibilidade hídrica para os processos de evapotranspiração, o fluxo  $\overline{w'q'}$  se mostrou intenso até o final do período diurno (17 HL).

Para o dia característico da estação seca foi verificado que o  $\overline{w'\theta'}$  (Figura 3A) mostrou valores positivos à superfície superiores  $10 \text{ W m}^{-2}$  no início do período simulado (09 HL). A partir das 11 HL,  $\overline{w'\theta'}$  exibiu maior emissão da superfície com intensidade máxima superior a  $150 \text{ W m}^{-2}$  entre 14 e 15 HL, com profundidade de 1000 m. Ao passo que, o fluxo de entranhamento foi de aproximadamente  $-45 \text{ W m}^{-2}$ . De acordo com Neves, Fisch e Raasch (2018), o motivo físico para os máximos ocorrerem neste horário (14 HL) deve-se a presença de movimentos verticais mais intensos no período vespertino da CLC, transportando mais calor da superfície para o interior da camada, juntamente com os fluxos negativos dos movimentos da penetração convectiva da atmosfera livre para o interior da camada.

O  $\overline{w'q'}$  para a estação seca (Figura 3B) começou a mostrar valores positivos após as 10 HL em que o máximo estimado superior a  $300 \text{ W m}^{-2}$ , entre 14 e 16 HL, estendendo-se por uma profundidade em torno de 1.000 m. Após as 18 HL,  $w'q'$  exibiu uma diminuição, tornando-se negativo às 19 HL.

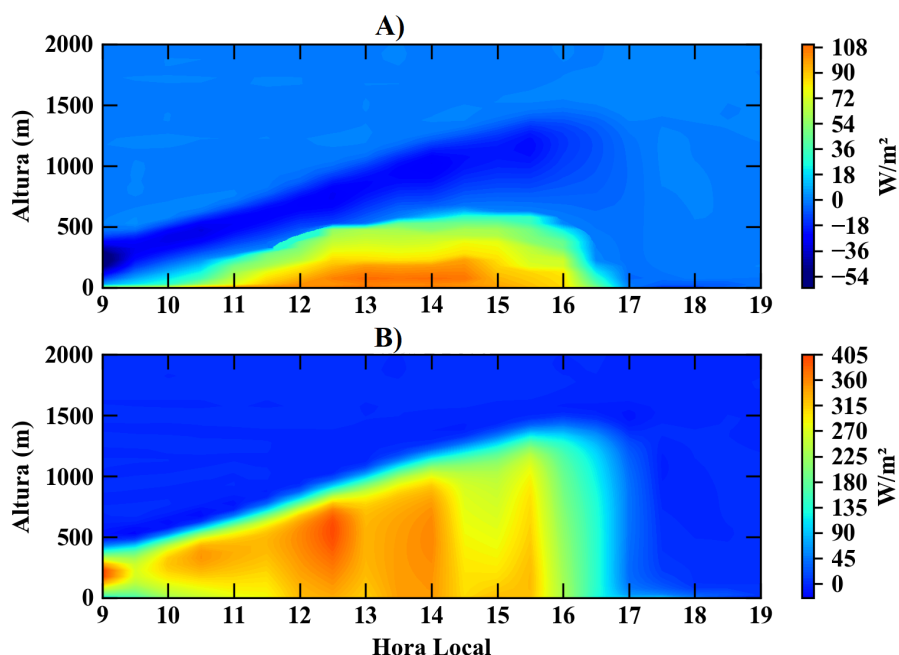


Figura 2 – Evolução horária dos perfis de A) fluxo de calor sensível ( $\overline{w'\theta'}$ ) ( $W m^{-2}$ ) e B) fluxo de calor latente ( $\overline{w'q'}$ ) ( $W m^{-2}$ ) obtidos através do PALM para dia 21 de março de 2014.

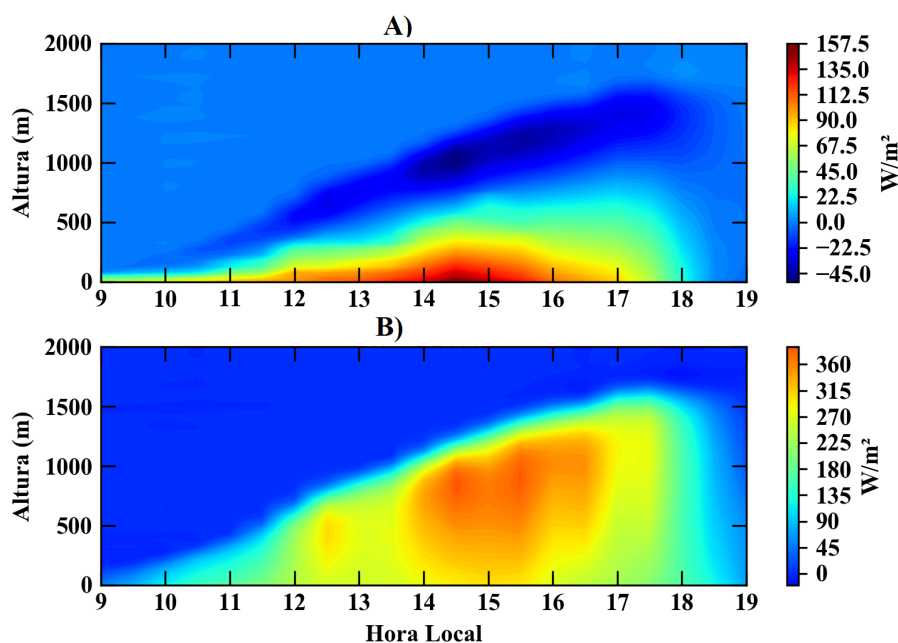


Figura 3 – Evolução horária dos perfis de A) fluxo de calor sensível ( $\overline{w'\theta'}$ ) ( $W m^{-2}$ ) e B) fluxo de calor latente ( $\overline{w'q'}$ ) ( $W m^{-2}$ ) obtidos através do PALM para dia 26 de setembro de 2014.

A evolução temporal da profundidade da CLP para os dois dias simulados foi comparada com os estimativas da mesma usando dados do *ceilometer* e radiossonda. No dia representativo da estação chuvosa (Figura 4A) foi possível verificar que a CLN (entre 00 e 06 HL) apresentou oscilação em sua profundidade, de 150 m (entre 00 e 02 HL) a 450 m (05 HL). Ao passo que, para o dia da estação seca (Figura 4B) a CLN mostrou um leve incremento em suas alturas de 150 m (00 HL) até 250 m (entre 03 a 06 HL). Estas informações serviram de dados de entrada para as simulações numéricas.

Os primeiros horários simulados para a estação chuvosa mostraram uma taxa média de crescimento de  $\approx 75,5 m h^{-1}$  (entre 08 e 09 HL) e  $150 m h^{-1}$  (entre 09 e 10HL), semelhante ao encontrado nos dados do *ceilometer*, de  $72 m h^{-1}$  (entre 08 e 09HL) e  $125 m h^{-1}$  (entre 09 e

10 HL). Os valores observados estão em conformidade com os resultados obtidos por Carneiro, Fisch e Kaufmann (2016), no qual os autores descrevem uma baixa taxa de crescimento da CLC nas primeiras horas da manhã para a estação chuvosa, por se tratar do fim da erosão da CLN, estimada para ocorrer as 9 HL. Nota-se ainda, que o PALM apresentou pequena superestimativa da profundidade da CLC em formação ( $\approx 35$  m) entre 09 e 10 HL. Entretanto, na estação seca a taxa horário média de crescimento calculada para o ceilometer e simulação PALM foram de  $\approx 200$  m h<sup>-1</sup> (08 e 10 HL), com subestimativa da profundidade da CLC em formação, em cerca de 20 m (10 e 11 HL). De modo geral, na fase de desenvolvimento rápido da CLC, o PALM apresentou desempenho satisfatório em comparação com as observações *in situ*, resultado este também encontrado por KAUFMANN e FISCH (2016), posto que o modelo respondeu satisfatoriamente as forçantes da superfície.

A partir do momento em que a CLC encontra-se bem estabelecida na estação chuvosa (entre 11 e 16 HL), verificou-se que as simulações apresentaram profundidade máxima de 1.250 m às 14 HL. Os resultados encontrados estiveram satisfatórios em comparação a estimativa realizada pelo RS das 14 HL (1.280 m) e pelas medidas do *ceilometer* (1.230 m). Os resultados das simulações PALM na estação seca, também estiveram em consonância com os dados observacionais, com máximo de 1.510 m às 14 HL, enquanto que a estimativa de altura por RS teve máximo de 1.545 m e pelo *ceilometer* igual a 1.530 m. Estes resultados satisfatórios do PALM concordam com os obtidos por MARONGA e RAASCH (2013), HEINZE et al. (2017), mesmo sendo realizadas em condições distintas da Amazônia..

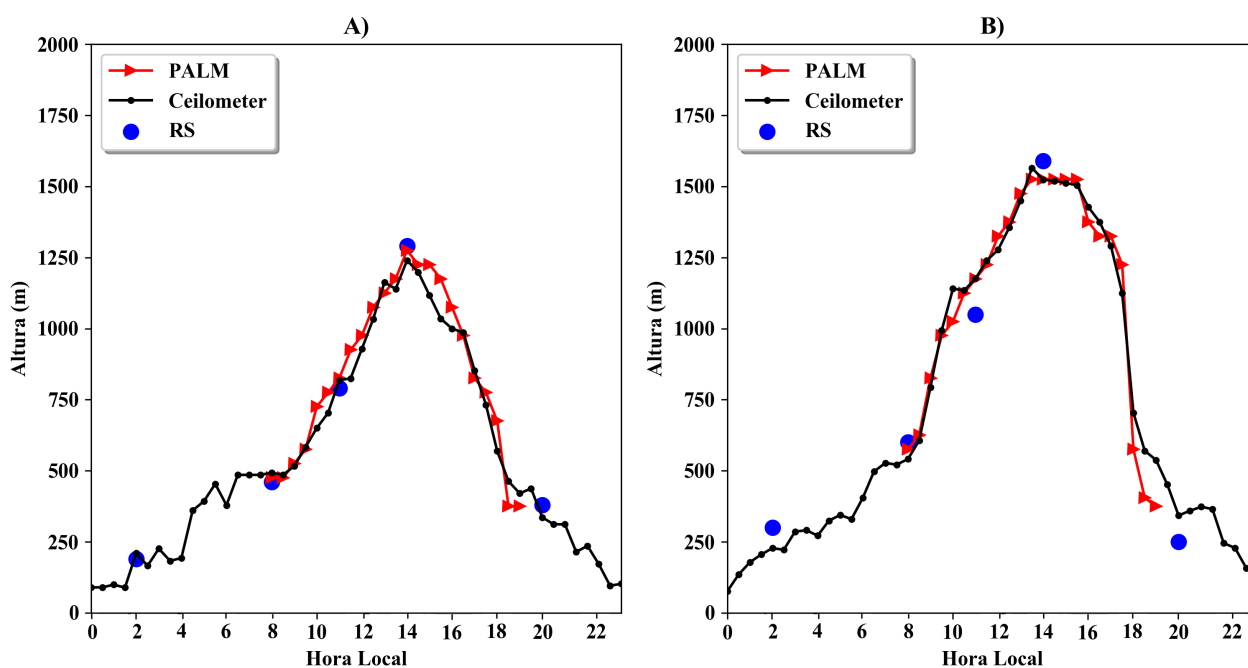


Figura 4 – Altura da Camada Limite Planetária (m) para os dias A) 21 de março de 2014 (período chuvoso) e B) 26 de setembro de 2014 (período seco).

Após às 16 HL, período em que a insolação decresce, em ambas as datas se observa um decaimento da profundidade da CLC. EM que, o PALM representou de forma adequada neste intervalo, entretanto ao fim da simulação (18 e 19 HL) se constatou subestimativa, em torno de 30 e 50 m para o dia chuvoso e seco, respectivamente, em relação aos dados *in situ*.

#### 4. Conclusão

De uma forma geral, o modelo PALM se mostrou eficiente em simular o ciclo da camada limite convectiva para a região Amazônica, sendo que esta apresentou um pequena superestimativa (de aproximadamente 35 m) no crescimento da CLC para o dia chuvoso e de uma pequena subestimativa (de aproximadamente 20 m) para o dia seco. Nas fases em que a CLC está bem estabelecida

(entre 11 e 16 h) e no decaimento da convecção (entre 17 e 18 h), o modelo PALM mostrou melhores resultados para o dia seco em relação ao dia chuvoso, em decorrência da maior nebulosidade.

Verificou-se também que o crescimento da CLC no modelo PALM respondeu rapidamente as forçantes superficiais, o que é uma característica da CLP em áreas de floresta tropical, o que o demonstra como uma boa ferramenta de análises de turbulência.

## Referências Bibliográficas

CARNEIRO, R. G.; FISCH, F.; KAUFMANN, T. Determinação da Altura da Camada Limite Planetária na Floresta Amazônica Utilizando um Ceilometer. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 460–466, 2016.

HEINZE, R.; MOSELEY, C.; BÖSKE, L. N.; MUPPA, S. K.; MAURER, V.; RAASCH, S.; STEVENS, B. Evaluation of large-eddy simulations forced with mesoscale model output for a multi-week period during a measurement campaign. **Atmospheric Chemistry and Physics**, v. 17, p. 7083–7109, 2017.

KANDA, M.; INAGAKI, A.; LETZEL, M.; RAASCH, S.; WATANABE, T. LES study of the energy imbalance problem with eddy covariance fluxes. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 110, p. 381–404, 2004.

KAUFMANN, T.; FISCH, G. Validação do modelo LES PALM por meio de dados de radiosondagens e de aeronave coletados durante o Experimento GoAmazon. **Ciência e Natura**, v. 38, p. 38–40, 2016.

LETZEL, M. O.; RAASCH, S. Large Eddy Simulation of Thermally Induced Oscillations in the Convective Boundary Layer. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 60, p. 2328–2341, 2003.

MARONGA, B.; GRYSCHKA, M.; HEINZE, R.; HOFFMANN, F.; KANANI-SÜHRING, F.; KECK, M.; KETELSEN, K.; LETZEL, M. O.; SÜHRING, M.; RAASCH, S. The Parallelized Large-Eddy Simulation Model (PALM) version 4.0 for atmospheric and oceanic flows: model formulation, recent developments, and future perspectives. **Geoscientific Model Development**, v. 8, p. 2515–2551, 2015.

MARONGA, B.; RAASCH, S. Large-eddy simulations of surface heterogeneity effects on the convective boundary layer during the LITFASS-2003 Experiment. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 46, p. 17–44, 2013.

MARTIN, S.; ARTAXO, P.; MACHADO, L. A. T.; MANZI, A. O.; SOUZA, R. A. F.; SCHUMACHER, C.; WANG, J.; ANDREAE, M. O.; BARBOSA, H. M. J.; FAN, J.; FISCH, G.; GOLDSTEIN, A. H.; GUENTHER, A.; JIMENEZ, J. L.; POSCHL, U. AND SILVA DIAS, M. A.; SMITH, J. N.; WENDISEH, M. Introduction: Observations and Modeling of the Green Ocean Amazon (GoAmazon 2014/5). **Atmospheric Chemistry Physics**, v. 16, p. 4785–4797, 2016.

NEVES, T.; FISCH, G.; RAASCH, S. Local Convection and Turbulence in the Amazonia Using Large Eddy Simulation Model. **Atmosphere**, v. 9, p. 1–13, 2018.

NEVES, T. T. de A. T.; FISCH, G. The Daily Cycle of the Atmospheric Boundary Layer Heights over Pasture Site in Amazonia. **American Journal of Environmental Engineering**, v. 5, p. 39–44, 2015.

RAASCH, S.; FRANKE, T. Structure and formation of dust devil-like vortices in the atmospheric boundary layer: A high-resolution numerical study. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 116, p. 1–16, 2011.

RAASCH, S.; SCHRÖTER, M. PALM – A large-eddy simulation model performing on massively parallel computers. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 10, p. 363–372, 2001.

SHUKLA, K. K.; PHANIKUMAR, D. V.; NEWSOM, R. K.; KUMAR, K. N.; RATNAM, M. V.; NAJA, M.; SINGH, N. Estimation of the mixing layer height over a high altitude site in Central Himalayan region by using Doppler lidar. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 109, p. 48–53, 2014.