

## Edição Especial

# Teoria Estatística da Turbulência aplicada ao modelo global BAM-INPE

## Statistical Theory of Turbulence applied to the BAM-INPE Global Model

Eduardo Rohde Eras<sup>1</sup> , Paulo Yoshio Kubota<sup>1</sup> ,  
Haroldo Fraga de Campos Velho<sup>1</sup> 

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil

## RESUMO

A teoria estatística da turbulência de G. I. Taylor é empregada como referência para parametrização da turbulência no modelo global de circulação atmosférica BAM (Brazilian global Atmospheric Model). O modelo BAM é utilizado operacionalmente para gerar dados de previsão numérica do tempo pelo INPE. As execuções de simulação do modelo BAM com parametrização baseada na teoria de Taylor é comparada com os resultados obtidos com a parametrização de Holtslag-Boville (1993). Um bom desempenho com a nova parametrização é observado a partir dos resultados.

**Palavras-chave:** Turbulência atmosférica; Parametrização pela teoria de Taylor; Modelo BAM

## ABSTRACT

Statistical theory of turbulence from the G. I. Taylor's is employed as a reference to parameterize the turbulence in the global atmospheric circulation model BAM (Brazilian Global Atmospheric Model). The BAM model is operationally used to generate numerical weather forecast data by INPE. Simulation for the BAM model with parameterization based on Taylor's theory are compared against the results obtained with the Holtslag-Boville (1993) parameterization. A good performance by using a new parameterization is obtained from the results.

**Keywords:** Atmospheric turbulence; Parameterization from the Taylor's theory; BAM model

## 1 INTRODUÇÃO

A turbulência é uma ação permanente na parte da dinâmica da atmosfera mais próxima ao solo, numa região denominada de Camada Limite Planetária (CLP). A produção da turbulência está associada ao cisalhamento do vento ou transporte de energia térmica entre o solo e a atmosfera. Se a temperatura do solo estiver mais baixa do que a da atmosfera, ter-se-á um fluxo de calor da atmosfera para o solo, removendo energia da CLP, uma situação comumente encontrada durante o período noturno. O comprimento de Monin-Obukov foi usado para tipificar a estabilidade da CLP.

Num escoamento turbulento, a hipótese de Reynolds considera que as propriedades do fluido podem ser descritas como a soma entre um comportamento médio (similar ao que se encontra num escoamento laminar), adicionado a uma variação aleatória. Embora a média da variação aleatória possa ser considerada nula, a média do produto destas quantidades aleatórias não se anulam. De fato, as médias dos produtos das quantidades aleatórias são denominados tensores de Reynolds. Estes tensores são parametrizados para representar a turbulência nos códigos de simulação. A parametrização da turbulência tem sido investigada usando diferentes técnicas de fechamento (Stull, 1988; Campos Velho, 2010) e distintas ordens de fechamento, seja de primeira ordem (Degrazia *et al.*, 2000; Holtslag-Boville, 1993), ou ordens superiores (Mellor-Yamada, 1982).

Este artigo descreve os primeiros resultados com a implementação da parametrização da turbulência baseada na teoria de Taylor (1921) para todas as condições de estabilidade da CLP no modelo global BAM (Brazilian global Atmospheric Model) – ver Figueroa *et al.* (2016). Os resultados com a nova parametrização são comparados com o esquema apresentado por Holtslag-Boville (1993) para representar a turbulência.

## 2 O MODELO ATMOSFÉRICO BAM

O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) é responsável pela execução operacional de modelos de previsão numérica do tempo, previsão climática e de previsão ambiental. O modelo BAM (Brazilian global Atmospheric Model) (Figueroa *et al.*, 2016) é um código hidrostático 3D, onde as equações são discretizadas espacialmente, utilizando um método espectral. Na operação do INPE, o modelo é executado com uma resolução espacial de aproximadamente 20 quilômetros, com 64 níveis verticais e um esquema semi-lagrangiano e semi-implícito para integração no tempo. Entre as parametrizações usadas, citam-se:

- Modelo de superfície: Integrated Biosphere Simulator, versão 2.6 (IBIS v.2.6), onde uma versão melhorada pelo INPE foi adaptada e implementada (Kubota, 2012).
- Radiação e propriedades de nuvens: esquemas de radiação de onda curta (SW) e de onda longa (LW) (Iacomo *et al.*, 2008).
- Microfísica de nuvens: esquema descrito por Morrison (Morrison *et al.*, 2009).
- Convecção: esquema de camada limite de Park e Bretherton [40].

## 3 PARAMETRIZAÇÃO DA TURBULÊNCIA VIA TEORIA ESTATÍSTICA DE TAYLOR

Degrazia e coautores têm desenvolvido um esquema para representar a difusividade turbulenta para todas as condições de estabilidade (Degrazia *et al.*, 2000). A difusividade turbulenta é descrita como (Degrazia *et al.*, 2000):

$$K_{\alpha\alpha} = \frac{\sigma_i^2 \beta_i}{2\pi} \int_0^\infty F_i(n) \left[ \frac{\sin(2\pi n t / \beta_i)}{n} \right] dn \quad (1)$$

onde  $\alpha = (x, y, z)$  e  $i = (u, v, w)$ ,  $\sigma^2$  é a variância do vento,  $\beta_i$  é a relação entre a escala do

espectro lagrangiano e espectro euleriano,  $F_i(n)$  é o espectro euleriano adimensional da energia cinética,  $n$  é uma frequência adimensional e  $t$  é o tempo. Para longos tempos de difusão ( $t \rightarrow \infty$ ), uma expressão assintótica pode ser escrita como:

$$K_{\alpha\alpha} = \frac{1}{4} [\sigma_i^2 \beta_i F_i(0)] \quad (2)$$

Com expressões apropriadas para os espectros, é possível descrever formulações para cada tipo de estabilidade na CLP: camadas convectiva, estável e neutra. Fazendo as substituições para  $\sigma_i^2$ ,  $\beta_i$  e  $F_i$  usando de argumentos de similaridade local e dados experimentais, é obtida a equação para difusividade vertical turbulenta para as CLP estável e neutra:

$$\frac{K_{zz}}{u_* h} = \frac{0.33(1 - z/h)^{\alpha_1/2} (z/h)}{1 + 3.7(z/h)(h/\Lambda)} \quad (3)$$

onde  $u_* = \sqrt{\tau_s/\rho_{ar}}$  é uma escala de velocidade (velocidade de fricção),  $h$  é a altura da camada limite e  $\Lambda$  é o comprimento de Monin-Obukov local. Da mesma forma, é obtida também equação para difusividade vertical turbulenta para a CLP convectiva:

$$\frac{K_{zz}}{w_* h} = 1.6\psi^{1/3} \left[ 1 - \exp\left(-4\frac{z}{h}\right) - 0.0003 \exp\left(8\frac{z}{h}\right) \right]^{4/3} \quad (4)$$

sendo  $w_*$  uma escala de velocidade convectiva e  $\psi$  uma função de dissipação adimensional.

## 4 SIMULAÇÃO COM MODELO BAM USANDO A TEORIA ESTATÍSTICA DE TAYLOR

Nos experimentos numéricos, o modelo BAM foi executado com resolução horizontal de TQ62 (aproximadamente 215 km) e 28 níveis verticais, para dois períodos de simulação de 48 horas (2 dias) cada, com as parametrizações mencionadas na

Seção 2. As condições iniciais (dados de reanálise do ERA5<sup>1</sup> (Hersbach *et al.*, 2020)) foram tomadas às 12h do dia 15 de Janeiro de 2014 (período seco - *dry*) e às 12h do dia 15 de Setembro de 2014 (período úmido - *wet*)<sup>2</sup>. Os mapas de precipitação total simulados para 48<sup>a</sup> hora (condição final) para os períodos seco e úmido são vistos para parametrização de Taylor nas Figuras 1<sup>a</sup> e 1b e para Holtslag-Boville nas Figuras 1c e 1d, nota-se uma diferença na posição dos sistemas convectivos na Oceania e América do Sul, em especial no período úmido.

Utilizando os dados de reanálise do ERA5 para comparação, é feito um campo de precipitação com a diferença (ou viés - Bias) mostrados na Figura 2, subtraindo os dados da reanálise dos dados do BAM, sendo possível observar os pontos onde a precipitação total se difere dos dados de reanálise para os períodos seco e úmido com simulações utilizando ambas as parametrizações.

Fazendo a média dos erros entre os dados de reanálise e as simulações do BAM para as 48 horas simuladas, os dados da Tabela 1 mostram uma vantagem para parametrização de Holtslag-Boville quanto ao Erro Relativo Médio:  $média((BAM - ERA5) / ERA5)$ . Porém, as simulações com a parametrização de Taylor apresentam um erro menor para Diferença Média:  $média(BAM - ERA5)$  e para o Erro Quadrático Médio:  $raiz(média(BAM - ERA5)^2)$ .

Tabela 1 – Média do erro nas 48 horas simuladas para os períodos seco e úmido com as parametrizações de Taylor e Holtslag-Boville

Estação	Parametrização	Erro Relativo Médio	Diferença Média	Erro Médio Quadrático
seca	Holtslag-Boville	213,57	2,198591	6,588693
	Taylor	221,31	2,164725	6,009749
úmida	Holtslag-Boville	149,68	2,302464	7,029135
	Taylor	153,36	2,232146	6,493362

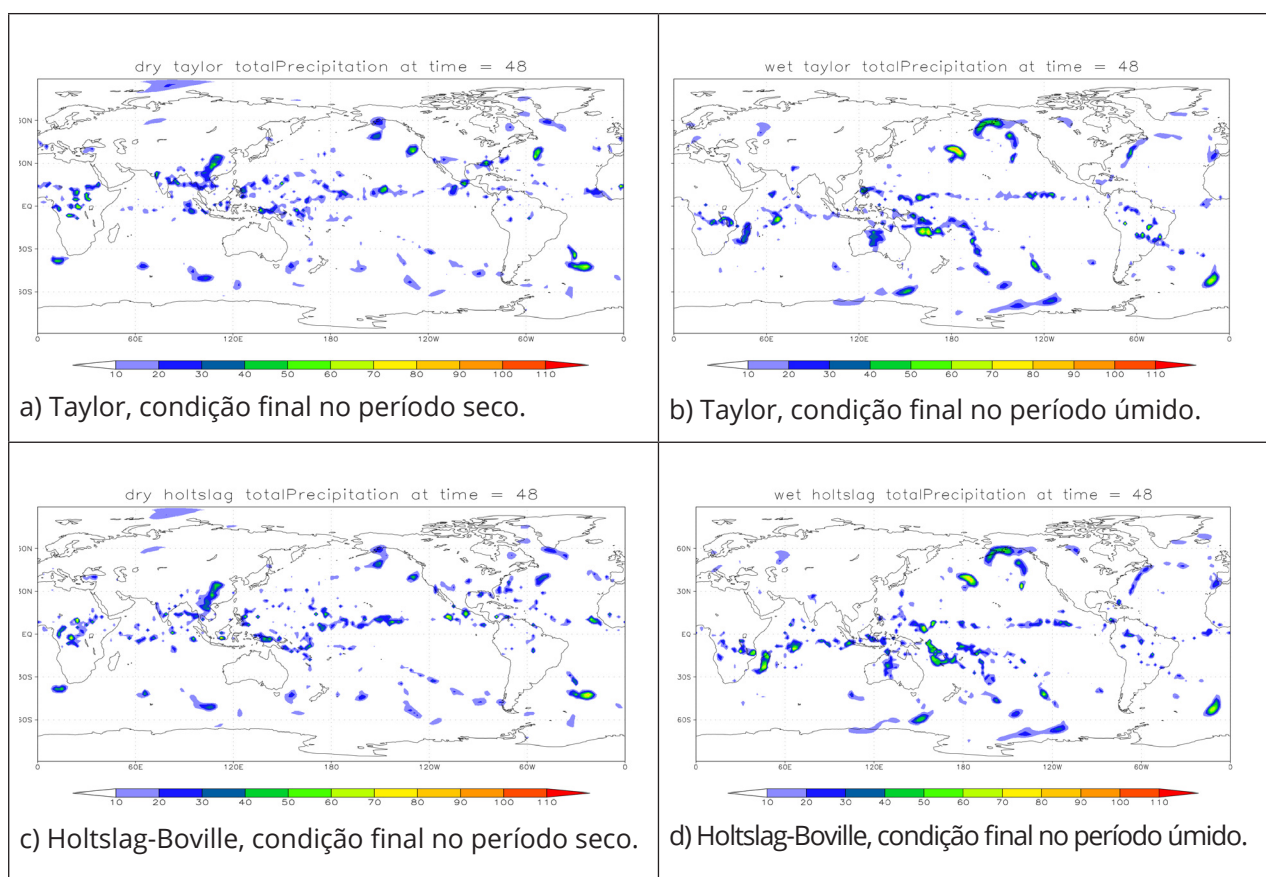
Fonte: Autores

<sup>1</sup> Dados de reanálise do ERA5 (hourly data on single levels from 1959 to presente); disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>.

<sup>2</sup> Períodos seco úmido são assim denominados de acordo com as chamadas estações 'seca' e 'úmida' do Amazonas, equivalente as estações de inverno e verão.

Nas figuras 1a-1d, são mostrados os campos de precipitação ao final da execução das simulações com as parametrizações baseadas da teoria estatística de Taylor e de Holtslag-Boville, para 2 períodos distintos: estações secas (1a, 1c) e úmidas (1b, 1d). A localização dos campos de precipitação foram relativamente similares para ambas parametrizações. Mas, sobre a América do Sul para a estação úmida, a parametrização com a teoria de Taylor (Fig. 2b) apresenta uma maior intensidade do que a registrada com a parametrização de Holtslag-Boville (Fig. 2d). Para o domínio global, a parametrização com a teoria de Taylor obteve um erro médio quadrático menor para ambas as estações – ver Tabela 1.

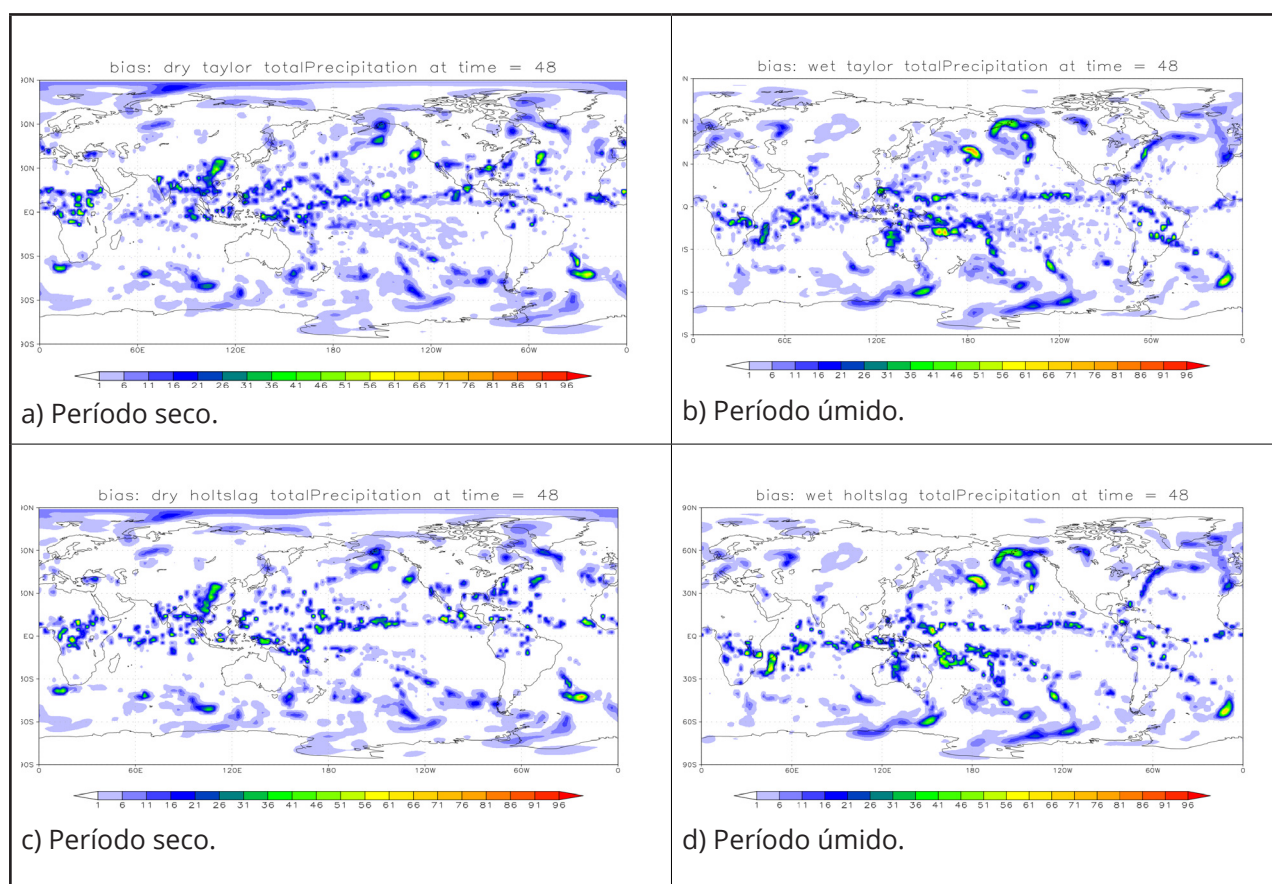
Figura 1 – Mapas de precipitação total ( $\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$ ) para execução do modelo BAM para as parametrizações de Taylor (1a e 1b) e Holtslag-Boville (1c e 1d): Condição final, após 48 horas de simulação ( $t = 48$ ) nos períodos seco e úmido



Fonte: Autores

O erro médio quadrático nos informa da diferença entre a simulação/previsão e a observação para todo o domínio. Entretanto, uma análise do comportamento da simulação no interior do domínio é realizada estruturando-se mapas de erro. As diferenças entre a precipitação simulada e a observação estão mostradas nas Figuras 2a-2d, para as estações secas e úmidas, considerando as execuções com as parametrizações da teoria de Taylor e de Holtslag-Boville.

Figura 2 – Mapas de diferença precipitação total ( $\text{Kg.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ ) para execução do modelo BAM com relação aos dados de reanálise do ERA5 para parametrizações de Taylor (2a e 2b) e Holtslag-Boville (2c e 2d), após 48 horas do estado inicial



Fonte: Autores

## 5 COMENTÁRIOS FINAIS

O novo esquema de fechamento da camada limite (Taylor) implementado no modelo BAM leva em conta processos físicos como o máximo do espectro de

energia cinética turbulenta e o comporta-se seguindo a Lei de Kolmogorov de  $-5/3$  no subdomínio inercial do espectro, que difere das considerações da parametrização de Holtslag-Boville. O esquema de fechamento da camada limite de Taylor trata, de forma distinta, diferentes condições de estabilidade, proporcionando uma melhor representação dos processos difusivos da CLP. Portanto, com a implementação no modelo BAM era esperado uma melhoria na simulação dos campos meteorológicos – em especial o campo de precipitação. Este campo em particular foi escolhido porque mais de 65% da matriz elétrica do Brasil tem origem em usinas hidráulicas (<https://www.portalsolar.com.br/matriz-energetica-e-eletrica-brasileira>).

Analisando a simulação com resolução TQ62L28 em relação aos dados de precipitação da reanálise do ERA5, verificou-se um ganho na qualidade da previsão, como mostrado na Tabela 1. Os resultados obtidos são animadores, entretanto ainda é necessário novos testes com maior resolução e avaliação dos demais campos meteorológicos.

## REFERÊNCIAS

CAMPOS VELHO, H. F.: Modelagem Matemática em Turbulência Atmosférica. Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional (SBMAC): **Notas em Matemática Aplicada** - No. 48, 2010. Disponível em: [https://proceedings.science/series/23/proceedings\\_non\\_indexed/53](https://proceedings.science/series/23/proceedings_non_indexed/53)

DEGRAZIA, G. A.; ANFOSSI, D.; CARVALHO, J. C.; MANGIA, C.; TIRABASSI, T; CAMPOS VELHO, H. F.; Turbulence parameterization for PBL dispersion models in all stability conditions. **Atmospheric Environment**, v. 34, p. 3575-3583, 2000.

DUEBEN, P. D.; BAUER, P. Challenges and design choices for global weather and climate models based on machine learning. **Geoscientific Model Development**, p. 3999-4009, 2018.

FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P. Y.; GRELL, G. A.; MORRISON, H.; BARROS, S. R.; FERNANDEZ, J. P.; RAMIREZ, E.; SIQUEIRA, L.; LUZIA, G.; *et al.*: The Brazilian global atmospheric model (BAM): performance for tropical rainfall forecasting and sensitivity to convective scheme and horizontal resolution. **Weather and Forecasting**, v. 31, 1547–1572, 2016.

HERSBACH, H; BELL, B; BERRISFORD, P, *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Q J R Meteorol Soc.** 2020; 146: 1999– 2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>



HOLTSLAG, A.; BOVILLE, B. A.; Local versus nonlocal boundary-layer diffusion in a global climate model. **Journal of Climate**, v. 6, n. 10, 1825–1842, 1993.

IACONO, M. J.; DELAMARE, J. S.; MLAWER, E. J.; SHEPHARD, M. W.; CLOUGH, S. A.; COLLINS, W. D.: Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. **Journal of Geophysical Research Atmospheres**, v. 113, n. 13, 2008.  
KUBOTA, P.Y.: Variabilidade de Energia Armazenada na Superfície e seu Impacto na Definição do Padrão de Precipitação na América do Sul. **Tese de doutorado**, INPE, 2012.

MELLOR, G. L.; YAMADA, T.; Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems. *Reviews of Geophysical Physics and Space Physics*, v. 20, 851-875, 1982.

MORRISON, H.; THOMPSON, G.; TATARSKII, V.: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one- and two-moment schemes. **Monthly Weather Review**, v. 137, n. 3, 991–1007 (2009).

STULL, R. B.: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. **Springer Science & Business Media**, 1988.

TAYLOR, G. I.: Diffusion by continuous movements. **Proceedings of London Mathematical Society**, v. 20, 196–211, 1921.

## Contribuições de Autoria

### 1 – Eduardo Rohde Eras:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, Discente de doutorado em computação aplicada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Mestre em computação aplicada  
<https://orcid.org/0000-0002-5159-3569> • [eduardorohdeeras@gmail.com](mailto:eduardorohdeeras@gmail.com)  
Contribuição: Escrita – Primeira Redação

### 2 – Paulo Yoshio Kubota:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Docente de meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Doutor em Meteorologia  
<https://orcid.org/0000-0003-4858-1337> • [paulo.kubota@inpe.br](mailto:paulo.kubota@inpe.br)  
Contribuição: Supervisão e Revisão

### 3 – Haroldo Fraga de Campos Velho

Instituto de Pesquisas Espaciais, Pesquisador Sênior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Doutor em Engenharia Mecânica  
<https://orcid.org/0000-0003-4968-5330> • [haroldo.camposvelho@inpe.br](mailto:haroldo.camposvelho@inpe.br)  
Contribuição: Escrita, Supervisão e Revisão

## Como citar este artigo

ERAS, E. R.; KUBOTA, P. Y.; VELHO, H. F. C.; Teoria Estatística da Turbulência aplicada ao modelo global BAM-INPE. **Ciência e Natura**, Santa Maria, v. 45, n. esp. 2, e78815, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5902/2179460X78815>. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/78815>. Acesso em: dia mês abreviado ano.