



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

50

**CARACTERIZAÇÃO DAS LIMITAÇÕES DA MODELAGEM DE CONVECÇÃO
ATMOSFÉRICA E A IMPORTÂNCIA NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS
ATMOSFÉRICAS**

Nedilson Sanches Ferreira

Roseli de Oliveira

Sindy Samantha de Sousa Almeida

Thaísa Giovana Lopes

Nota Técnica

INPE
Cachoeira Paulista
2024

RESUMO

A convecção é um processo dinâmico e essencial na atmosfera, impactando diretamente a formação e propagação de ondas, como as ondas de gravidade e de Rossby. No entanto, a modelagem precisa dessa interação, se torna desafiadora devido à complexidade dos processos físicos envolvidos e à necessidade de parametrizações que representem adequadamente a convecção em modelos atmosféricos. O estudo aborda as dificuldades inerentes à modelagem de convecção, incluindo a representação dos processos subescalares, a resolução espacial e temporal insuficiente, e a alta demanda por recursos computacionais. Essas limitações podem introduzir incertezas significativas nas previsões meteorológicas, impactando a precisão da simulação de fenômenos atmosféricos complexos, como tempestades severas e ciclones. O trabalho também discute como as parametrizações de convecção, embora essenciais, ainda apresentam desafios na representação de interações multiescalares e na transição entre diferentes regimes convectivos. A revisão sugere que avanços na compreensão e na modelagem da convecção são fundamentais para melhorar as previsões meteorológicas e a simulação de padrões climáticos.

Palavras-chave: Convecção Atmosférica, Modelagem Numérica, Ondas Atmosféricas, Parametrizações.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	4
2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA	5
2.1 SISTEMA ATMOSFÉRICO E CONVECÇÃO	5
2.2 IMPORTÂNCIA DA CONVECÇÃO NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATMOSFÉRICAS	6
2.3 LIMITAÇÕES DA MODELAGEM DE CONVECÇÃO	8
3 CONSIDERAÇÕES FINAIS	9
REFERÊNCIAS	10

1 INTRODUÇÃO

A atmosfera terrestre é um sistema dinâmico e complexo, onde processos como a convecção atmosférica e a propagação de ondas desempenham papéis fundamentais na determinação do clima e do tempo. Bjerknes (1904) define a previsão do tempo como a integração das equações de movimento da atmosfera, pois a mesma não apresenta periodicidades que permitem prever o tempo a partir de relações causais que relacionem o estado da atmosfera em determinado tempo com seu estado em outro.

Em certas regiões do globo há a presença de erros persistentes na maioria das simulações que envolvem precipitação e cobertura de nuvens, por exemplo. Tais erros na maioria das vezes ~~são obtidos devido a~~ **produzidos pelas** parametrizações físicas, esquema numérico ou representação incorreta do acoplamento oceano-atmosfera (BRUNET *et al.*, 2010; COELHO *et al.*, 2021). O problema de parametrização do cumulus é fundamentalmente um problema de fechamento. Isso significa que ele busca estabelecer um número limitado de equações que possam governar o comportamento estatístico de um sistema caracterizado por grandes dimensões. O desafio está em escolher suposições de fechamento apropriadas que reflitam com precisão as interações dentro do sistema atmosférico (ARAKAWA, 2004).

Uma das principais limitações da modelagem atmosférica é a ineficiência computacional em áreas como a química atmosférica e compreensão de ondas gravitacionais geradas por convecção, visto que há restrições de observação espaço-temporal e as parametrizações atuais de arrasto de ondas gravitacionais geralmente dependem de uma aproximação de coluna única, o que pode levar a erros significativos (YANG *et al.*, 2023; KRUSE *et al.* 2024). Além disso, a ~~existência de modelos globais que permitem a convecção oferece melhorias, entretanto~~ são computacionalmente mais caros que modelos de área limitada aninhados (MARCHOLL; JONES; LEWIS, 2023).

Este trabalho tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre a caracterização das limitações da modelagem de convecção atmosférica e sua importância na propagação de ondas atmosféricas. Pretende-se identificar os principais desafios enfrentados na modelagem atual, analisar como essas limitações afetam a simulação de ondas atmosféricas e discutir a importância de superá-las para avanços futuros na modelagem atmosférica.

2 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA

2.1 SISTEMA ATMOSFÉRICO E CONVECÇÃO

O sistema atmosférico é conceituado como tendo mecanismos de forçamento (controle) e feedback em grande escala (ajuste do cumulus). Essa dualidade é essencial para entender como a convecção cumulus influencia e é influenciada por processos atmosféricos maiores. A parametrização deve capturar com eficácia esses ciclos de feedback para garantir previsões precisas (ARAKAWA, 2004).

Segundo Arakawa (1975), embora a insolação solar seja a principal fonte de energia, sua influência na atmosfera é indireta devido ao acoplamento com os oceanos e à presença de nuvens. As interações entre o movimento do ar e o calor produzido pela condensação nas nuvens devem ser compreendidas de forma que o aquecimento e o movimento da parcela de ar devam fazer parte de um sistema complexo onde se influenciam mutuamente, sendo essa interação crucial para representar com precisão as complexidades do sistema climático (EMANUEL, 1994).

O movimento convectivo é descrito pela teoria do comprimento de mistura porque a estrutura vertical da atmosfera é pautada pelo equilíbrio entre os fluxos de energia da radiação e da convecção. O impacto desse movimento é equivalente a mudar o perfil de temperatura para um perfil adiabático. ~~No entanto, a teoria do comprimento de mistura não leva em consideração a assimetria do movimento ascendente e descendente, que é ignorada ao criar um modelo cumulus baseado no movimento característico da convecção úmida na natureza.~~ Como resultado, temos de reconsiderar o efeito da convecção úmida sobre o perfil de temperatura em uma atmosfera úmida (SARACHIK 1978; LINDZEN *et al.*, 1982).

A parametrização do cumulus em modelos climáticos envolve mecanismos complexos de feedback que ajudam a estabilizar o sistema. No entanto, esses mecanismos também podem ocultar problemas nos modelos, levando a um foco em soluções de engenharia em vez de uma compreensão científica mais profunda. Ao reconhecer esses problemas, os cientistas podem trabalhar para melhorar os modelos climáticos para melhores previsões (MOORTHY, 2000).

2. 2 IMPORTÂNCIA DA CONVECÇÃO NA PROPAGAÇÃO DE ONDAS ATMOSFÉRICAS

A convecção exerce um papel fundamental na dinâmica atmosférica, exercendo uma influência direta na reprodução de ondas atmosféricas, tais como as ondas de Rossby e gravidade. Esses processos convectivos, que envolvem o movimento vertical do ar devido às diferenças de temperatura e densidade, são essenciais para a transferência de energia e momento na atmosfera. Para compreender a formação e evolução de características meteorológicas de grande escala, como tempestades severas, ciclones e padrões de bloqueio atmosférico, é crucial interagir a convecção e a propagação de ondas atmosféricas.

A convecção é uma fonte primária de geração de ondas de gravidade na atmosfera. Essas ondas são geradas quando o ar quente ascendente dentro de uma célula convectiva perturba as camadas de ar circundantes, criando oscilações que se propagam tanto vertical quanto horizontalmente (Fritts e Alexander, 2003). Como consequência, as ondas gravitacionais têm a capacidade de se estender por grandes distâncias e alturas, transportando energia e influenciando a circulação atmosférica em níveis mais elevados. capacidade de se estender por grandes distâncias e alturas, transportando energia e influenciando a circulação atmosférica em níveis mais elevados. Esse processo é especialmente importante em regiões tropicais onde a convecção profunda é comum, e as ondas gravitacionais podem desempenhar um papel significativo na redistribuição de energia e tempo. é comum, e as ondas gravitacionais podem desempenhar um papel significativo na redistribuição de energia e tempo (Holton, 2004).

A influência da convecção na propagação de ondas atmosféricas não se limita às ondas de gravidade, processos convectivos também modulam as ondas de Rossby, que controlam as latitudes médias e altas. A propagação das ondas de Rossby pode ser modificada pela convecção, pois ela pode variar a distribuição de vorticidade e o campo de pressão na troposfera (Wallace e Hobbs, 2006). Particularmente, dependendo do estágio e da amplitude da onda em relação à estrutura convectiva, uma convecção intensa pode atenuar ou amplificar essas ondas. Por exemplo, as interações entre convecção e ondas de Rossby podem levar à formação de sistemas climáticos persistentes, como bloqueios atmosféricos, em regiões de intensa atividade convectiva, como zonas de convergência intertropicais (Vallis, 2006).

As ondas de Kelvin acopladas à convecção (CCKW) são distúrbios que se propagam para leste sem dispersão e contribuem significativamente para a variabilidade da convecção tropical.

As CCKWs apresentam velocidades de propagação de 10 a 20 m/s e comprimentos de onda zonais de 3300 a 6600 km (Straub e Kiladis 2002). As CCKWs modulam a localização e a intensidade da convecção tropical e interagem com a Oscilação Madden-Julian (MJO) (Straub et al. 2006) e a ciclogênese tropical (Frank e Roundy 2006; Ventrice et al. 2012). No entanto, há uma **falta geral de variância** de ondas equatoriais acopladas à convecção em modelos de circulação geral (GCMs), que apresentam convecção irrealisticamente estacionária (Dias et al. 2018). Esses modelos geralmente apresentam pouca potência espectral no domínio número de onda-frequência de Kelvin ou simulam uma estrutura de CCKW irrealista (Straub et al. 2010). A representação insatisfatória das CCKWs em modelos de tempo e clima sugere a necessidade de maior compreensão dos mecanismos responsáveis pela manutenção das CCKWs e de como a fidelidade dessas ondas varia com a resolução do modelo e as parametrizações físicas.

A modulação da propagação de ondas de gravidade em escalas menores é outra função crucial da convecção. Essas ondas, geradas principalmente por convecção, podem ser refletidas ou dissipadas quando interagem com outras ondas de convecção ou variações na estabilidade atmosférica (Gil, 1982).

A interação entre ondas gravitacionais e convecção pode levar a feedbacks complexos, onde as ondas aumentam a convecção em certas regiões enquanto a suprimem em outras. A convecção pode levar a feedbacks complexos, onde as ondas aumentam a convecção em certas regiões enquanto a suprimem em outras. A formação de supercélulas e outros tipos de tempestades severas é essencial neste processo, pois são características meteorológicas complicadas a prever em modelos numéricos (Fritts e Alexander, 2003).

Para prever corretamente a evolução dos sistemas meteorológicos, é crucial que uma interação entre convecção e interação de ondas seja representada precisamente nos modelos atmosféricos. Tanto os modelos numéricos modelos de previsão do tempo de previsão (PNT) quanto os modelos climáticos globais (GCM) dependem de parametrizações que descrevem os efeitos da convecção na propagação de ondas atmosféricas, particularmente em escalas de sub-grade, onde a resolução do modelo é limitada. e o modelo climático global (GCM) dependem de parametrizações que descrevem os efeitos da convecção na propagação de ondas atmosféricas, particularmente em escalas de sub-grade onde a resolução do modelo é limitada (Trenberth et al., 2002). No entanto, a complexidade dessas interações torna difícil capturar todos os detalhes desse processo, o que pode introduzir incertezas significativas nas previsões.

Um dos principais desafios na modelagem dessas interações é a representação da convecção profunda e sua influência na propagação de ondas de gravidade e de Rossby. A convecção intensa, especialmente em regiões tropicais, pode gerar ondas de gravidade de alta amplitude, que podem se propagar verticalmente até a estratosfera e influenciar a dinâmica atmosférica em grandes escalas. Além disso, a interação entre convecção e ondas de Rossby pode levar a mudanças na trajetória e na intensidade dessas ondas, afetando padrões climáticos de longo prazo (Wallace e Hobbs, 2006).

2.3 LIMITAÇÕES DA MODELAGEM DE CONVECÇÃO

Os processos de convecção dependem da escala considerada, das forçantes locais, dos sistemas meteorológicos, da região de ocorrência (oceano e/ou continente), e ainda dependem do período do dia, como convecção diurna (aquecimento da superfície) ou noturna (resfriamento radiativo) (YANG E SMITH, 2006). Sendo assim, a modelagem da convecção atmosférica enfrenta diversas limitações como exemplo: os processos subescalares, resolução espacial e temporal insuficiente, complexidade nos processos físicos, incerteza nos parâmetros de entrada, a complexidade das interações multiescalares, a alta demanda por recursos computacionais (FIGUEROA, 1997; ROCHA, 2001).

Como a maioria dos modelos globais e regionais não possui resolução espacial suficiente para resolver explicitamente a convecção, é necessário utilizar esquemas de parametrização para representar os efeitos médios desse processo na escala do modelo. As parametrizações tradicionais de convecção, são divididas em dois grupos: os esquemas de convecção profunda e de convecção rasa (Houze, 1997). No primeiro grupo, encontram-se os esquemas de Kuo (1965), Arakawa e Schubert (1974), e Betts e Miller (1986). No segundo, estão os esquemas de Fritsch e Chappell (1980), Tiedke, (1989), Gregory e Rowntree (1990), Kain e Fritsch (1990, 2004) (KF) e Emanuel (1991). Os esquemas de Kuo, Betts-Miller e Arakawa-Schubert, têm dificuldade em representar adequadamente a variabilidade espacial e temporal da convecção, muitas vezes não conseguem simular corretamente a organização das nuvens convectivas, a interação entre convecção e ambientes circundantes, e a transição entre diferentes regimes convectivos, como convecção profunda e a convecção rasa, levando a erros significativos nas previsões de precipitação e outros parâmetros meteorológicos (FIGUEROA, 1997).

Em relação aos processos subescalares e a interação multiescalar, muitos esforços são voltados para melhorar o entendimento da interação entre a circulação de grande escala e a convecção cúmulos, principalmente os esquemas que a parametrizam (KUO et al.,1997).

A resolução espacial dos modelos atmosféricos é outro fator limitante na modelagem da convecção. Modelos globais típicos têm uma resolução horizontal de cerca de 50 a 100 km, o que é insuficiente para resolver explicitamente a maioria dos processos convectivos, que ocorrem em escalas de 1 a 10 km. Mesmo em modelos regionais com resoluções mais altas, como 1 a 10 km, a convecção ainda pode ser parcialmente resolvida, exigindo a utilização de parametrizações. Segundo PREIN et al, 2015 que consideraram a modelagem climática regional usando modelos que permitem a convecção (CPMs; espaçamento horizontal da grade <4 km). Os autores afirmam que os CPMs surgem como uma estrutura promissora para fornecer informações climáticas mais confiáveis em escalas regionais para locais em comparação com modelos de grande escala tradicionalmente usados (LSMs; espaçamento horizontal da grade >10 km). Além disso, os CPMs permitem uma representação mais precisa dos campos de superfície e orografia. A desvantagem dos CPMs é a alta demanda por recursos computacionais. Mesmo assim, os CPMs são uma ferramenta muito promissora para futuras pesquisas climáticas.

3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A convecção é caracterizada por correntes ascendentes e descendentes e que promovem transporte de propriedades atmosféricas, como calor, momento e massa. Seu comportamento é influenciado por diversos processos termodinâmicos e físicos, que podem atuar em diferentes escalas e intensificar-se na presença de perturbações atmosféricas. A influência da convecção também se manifesta nas ondas atmosféricas, onde a intensidade da convecção pode amplificar essas ondas, mas também complicar a modelagem precisa dessas ondas devido à complexidade envolvida. A utilização de métodos como a parametrização se mostra essencial para representar adequadamente a convecção nos modelos atmosféricos, especialmente para processos de subgrade que não podem ser resolvidos diretamente, como as ondas curtas. Apesar de sua importância, as parametrizações envolve mecanismos complexos que podem introduzir incertezas, demandando aplicação cuidadosa. Em resumo, a compreensão e representação precisas da convecção são fundamentais para melhorar a precisão dos modelos atmosféricos, e

avanços nesse campo podem contribuir significativamente para previsões meteorológicas mais confiáveis.

REFERÊNCIAS

ARAKAWA, A.; SCHUBERT, W. H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, part I. *J. Atmos. Sci.* v. 31, n. 3, p. 674-701, 1974.

ARAKAWA, A. Modelling clouds and cloud processes for use in climate model. *The Physical Basis of Climate and Climate Modelling*, GARP Publication Series, No. 16, WMO, 181–197.

BETTS, A. K.; MILLER, M. J. A new convective adjustment scheme. Part II: single column tests using GATE wave, BOMEX, ATEX and arctic air-mass data sets. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v.112, p. 693-709, 1986.

Bjerknes, V., 1904: Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik. *Meteor. Zeits.* 21, 1-7.

BRUNET, G.; SHAPIRO, M.; HOSKINS, B.; MONCRIEFF, M.; DOLE, R.; KILADIS, G. N.; KIRTMAN, B.; LORENC, A.; MILLS, B.; MORSS, R. et al. Collaboration of the weather and climate communities to advance subseasonal-to-seasonal prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 91, n. 10, p. 1397–1406, 2010.

COELHO, C. A.; SOUZA, D. C. de; KUBOTA, P. Y.; COSTA, S.; MENEZES, L.; GUIMARÃES, B. S.; FIGUEROA, S. N.; BONATTI, J. P.; CAVALCANTI, I. F.; SAMPAIO, G. et al. Evaluation of climate simulations produced with the brazilian global atmospheric model version 1.2. *Climate Dynamics*, Springer, v. 56, n. 3, p. 873–898, 2021. 1

EMANUEL, K. A., 1991: A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *J. Atmos. Sci.*, v.48, p. 2313-2335.

Emanuel, K., 1994: *Atmospheric Convection*. Oxford University Press, New York, 580 pp.

FRITSCH, J. M.; CHAPPELL, C.F. Numerical prediction of convectively driven mesoscale pressure systems. Part I: Convective Parameterization. *J. Atmos. Sci.*, v. 37, n. 8, p. 1722-1733, 1980.

Fritts, D. C., & Alexander, M. J. (2003). Gravity wave dynamics and effects in the middle atmosphere. *Reviews of Geophysics*, 41(1), 1003.

Gill, A. E. (1982). Atmosphere-Ocean Dynamics. Academic Press.

GREGORY, D.; ROWNTREE, P. R. A mass flux convection scheme with representation of cloud ensemble characteristics and stability-dependent closure. Mon. Wea. Rev., v.118, p.1483-1506, 1990.

HOUZE, R. A. Jr. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? Bulletin of American Meteorology Society, v. 78, p. 2179-2196, 1997.

Holton, J. R. (2004). An Introduction to Dynamic Meteorology (4th ed.). Elsevier Academic Press.

KAIN, J.S. The Kain-Fritsch convective parameterization: An Update. J. Appl. Meteorol., v. 43, n.1, p. 170-181, 2004.

KAIN, J. S.; FRITSCH, J.M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. J. Atmos. Sci., v. 47, n. 23, p. 2748- 2802, 1990.

KUO, H. L. On the formation and intensification of tropical cyclones through latent heat release by cumulus convection. J. Atmos. Sci., v. 22, p. 40-63, 1965.

KUO, Y. H.; BRESCH, J.F.; M. D; KAIN, J.; PARSONS, D. B.; TAO, W. K.; ZHANG, D. L. Summary of a mini workshop on cumulus parameterization for mesoscale models. Bulletin of American Meteorology Society, v.78, p. 475-491, 1997.

FIGUEROA, S. N. Estudo dos sistemas de circulação de verão sobre a América do Sul e suas simulações com modelos numéricos. 1997-08. 181 p. (INPE-7121- TDI/672). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1997.

C., G., Kruse., M., J., Alexander., Martina, Bramberger., A., Chattopadhyay., P., Hassanzadeh., B., Green., A., Grimsdell., L., Hoffmann. Recreating Observed Convection-Generated Gravity Waves From Weather Radar Observations via a Neural Network and a Dynamical Atmospheric Model. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, (2024). doi: 10.1029/2023ms003624

Lindzen, R. S., Hou, A.Y., and Farrell, B. F., 1982: The role of convective model choice in calculating the climate impact of doubling CO₂. J. Atmos. Sci., 39, 1189–1205.

Macholl, J., Jones, R. e Lewis, H.: Modelagem global de convecção explícita: como ela se compara à abordagem do modelo de área limitada aninhada em altas resoluções horizontais?, EGU General Assembly 2023, Viena, Áustria, 24–28 de abril de 2023, EGU23-7082, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-7082>, 2023.

Moorthi, S., 2000: Application of relaxed Arakawa–Schubert cumulus parameterization to the NCEP climate model: Some sensitivity experiments. General Circulation Model Development: Past, Present, and Future, D. A. Randall, Ed., Academic Press, 257–284.

PREIN, Andreas F. et al. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of geophysics*, v. 53, n. 2, p. 323-361, 2015.

ROCHA, R. P. Impacto de parametrizações de convecção em ciclogênese sobre o oceano. 2000-08. 181 p. (INPE-7505-TDI/720). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São Jose dos Campos. 2000.

Sarachik, E. S., 1978: Tropical sea surface temperature: An interactive one-dimensional atmosphere-ocean model. *Dyn.Atmos. Oceans*, 2, 455–469.

Trenberth, K. E., Fasullo, J., & Smith, L. (2002). Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Climate Dynamics*, 24(1), 741-758.

Vallis, G. K. (2006). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics*. Cambridge University Press.

Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric Science: An Introductory Survey* (2nd ed.). Elsevier Academic Press.

Xuefei, Yang., Guo, Lin., Zhong, Zheng., Nicole, Riemer., Christopher, W., Tessum. Atmospheric chemistry surrogate modeling with sparse identification of nonlinear dynamics. (2023). doi: 10.48550/arxiv.2401.06108

YANG, S.; SMITH, E. A. Mechanisms for diurnal variability of global tropical rainfall observed from TRMM. *J.Climate*, v.19, p. 5190-5226, 2006.