



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

100

*GREY ZONE, ENTRE A MICROFÍSICA E A  
CONVECÇÃO PROFUNDA E A SUA RELAÇÃO COM A  
SCALE-AWARE PARAMETERIZATION*

Alberto Afonso Júnior &  
Teófilo Mateus Pio Ferraz

Trabalho de conclusão da disciplina de Modelagem Numérica da Atmosfera do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, ministrada pelo Dr. Paulo Yoshio Kubota, entregue no dia 31 de agosto de 2024.

Cachoeira Paulista/SP

2024

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Objectivos</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>4</b>
<b>2.1</b>	<b>Classificação da <i>Grey Zone</i></b>	<b>5</b>
<b>2.2</b>	<b>Modelos de pequena grande escalas</b>	<b>6</b>
<b>2.2.1</b>	Large Eddy Simulation (LES) ou Cloud Resolving Models (CRM)	6
<b>2.2.2</b>	Weather Research and Forecasting (WRF)	7
<b>2.3</b>	<b>Scale Aware parameterization</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b>	<b>9</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>11</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Modelos numéricos de previsão de tempo estão se tornando indispensáveis fontes de conhecimento sobre estado atual e futuro do nosso planeta (Terra). Estas previsões desempenham um papel crucial na vida diária afetando áreas como economia, ambiente entre outras. Boa parte das previsões são feitas sobre terrenos acidentados (com uma estrutura complexa), onde a topografia e heterogeneidade do uso da terra impactam diretamente na evolução das condições atmosféricas. E para tal, devem ser levados em consideração três principais aspectos, representação precisa de processos turbulentos, parametrização dos processos convectivos e representação da topografia (CHOW et al., 2019).

A representação dos processos turbulentos com precisão é de extrema importância para modelos em todas as escalas, pois, dissipa corretamente a energia cinética e representa a mistura atmosférica. A influência de superfícies acidentadas (complexas) nas parametrizações de turbulência também deve ser considerada. A parametrização de processos convectivos é necessária em resoluções mais grosseiras, sendo impactada pelo desencadeamento orográfico da convecção sobre terrenos complexos, sendo difícil a sua captura porque os campos locais de umidade e temperatura são fortemente modulados pelas circulações montanhosas (CHOW et al., 2019).

Imagine que estejamos analisando o fluxo urbano e para tal precisamos transitar da meso-escala para escala local por forma a saber o que está acontecendo em volta de um determinado bairro usando um modelo de dossel urbano da ordem de 10 km ou talvez 50 km de resolução. E se estivermos interessados em fluxos (*Eddies*) que ocorrem em volta de cada um dos edifícios, precisamos de um modelo ainda mais refinado, com 01 ou 02 km de resolução, transitando dessa forma da escala local para micro-escala. Más todas essas escalas (Meso, Micro) estão conectadas e precisam ser incluídas no modelo através de aninhamento de grade.

Como intuito de saber qual é a influencia das diversas escalas, desde a global até a fina, na modelagem de certos fenômenos meteorológicos, vários projetos estão fazendo simulações com modelos cujos comprimentos de escala variam de 2000 km para 02 km, o correspondente a transição de Meso-escala para “Large Eddy Simulation (LES)”. Em vista disso, pretende-se saber o que ocorre entre estes comprimentos de escala, digamos entre 10 km e 100 m de resolução, conhecida como “*Grey Zone*” (*Zona Cinzenta*) ou “*Terra Incógnita*”, termos introduzidos por Wyngaard (2004).

O foco principal das últimas pesquisas na área de modelagem é saber o que ocorre na desconhecida *zona cinzenta*. Isso gerou algumas sugestões dos pesquisadores dessa área,

transitamos da meso-escala para escalas menores (alta resolução) ou deslocamos o LES para escalas maiores (baixa resolução)? Haverá algum conflito entre as escalas?

Portanto, o presente trabalho fará uma abordagem sobre o estágio das pesquisas actuais em torno da *Grey Zone e Scale Aware Parameterization*. O foco deste trabalho é estudar o que ocorre nesta região.

O trabalho será composto por três secções: Introdução, Revisão Bibliográfica e Considerações Finais onde é abordada a sistematização do estado de arte sobre o tema na perspectiva de vários autores.

## 1.1 Objectivos

O objetivo principal deste estudo é analisar o estado de arte da *Grey Zone* e *Scale-Aware Parameterizations*, com base na revisão de literatura científica, dando maior ênfase em modelagem numérica da atmosférica. Para o efeito foram definidos os seguintes objetivos específicos:

1. Descrever as principais características da *Grey zone*;
2. Discutir com base na literatura sobre a resolução da malha (grade) para que esta seja considerada *Grey zone*;
3. Identificar os modelos que melhor representam a microfísica e a convecção, levando em consideração as limitações impostas quer pelo avanço da computação, quer pelo conhecimento da física envolvida;
4. Descrever critérios para a identificação da *Grey Zone*.

A luz do que foi exposto na introdução, a pesquisa estará voltada nas seguintes questões:

1. Como a *Grey Zone* é definida e abordada na literatura e quais as sugestões para torná-la mais clara?
2. Como identificar a *Grey zone*?
3. Qual seria a melhor parametrização para esta resolução?

Para a realização desta pesquisa será feita uma revisão da literatura existente em função do tópico apresentado. Tratando-se um tópico novo, o estudo estará mais voltado na análise crítica dos artigos publicados, comparando diferentes abordagens.

## 2 Revisão de literatura

A *gray zone* na modelagem numérica refere-se a uma faixa de resolução onde os processos convectivos começam a ser parcialmente resolvidos, desafiando as suposições tradicionais de parametrização. Nesse contexto, a transição entre a microfísica das nuvens e a convecção profunda se torna crítica, pois as escalas de resolução se aproximam da escala dos fenômenos convectivos (ROBERTS; LEAN, 2008).

Autores como Jeworrek, West e Stull (2019), destacam que, à medida que a resolução do modelo se torna mais fina, as parametrizações convencionais, que foram desenvolvidas para resoluções mais grossas, podem falhar em capturar adequadamente a dinâmica e a microfísica envolvidas na precipitação. Isso pode resultar em previsões de precipitação que não refletem com precisão a intensidade e a distribuição observadas, levando a erros significativos em eventos meteorológicos extremos.

Com o avanço sem precedentes da tecnologia computacional nos últimos anos, facilitou à **equipa** da previsão numérica do tempo **na** simulação dos fenômenos atmosféricos de maneira mais detalhada possível, considerando a capacidade computacional existente até hoje. Contudo, com este avanço surgiram novas limitações, que hoje conhecemos como zona cinzenta (*Grey Zone*, em Inglês), antes chamada de *Terra Incógnita*. Graças à rápida evolução da engenharia computacional, a previsão numérica de tempo (Numerical Weather Prediction, em Inglês) registrou uma notável evolução desde a década 50, ano da sua criação. Partindo do ENIAC1, com capacidade para fazer 357 operações aritméticas por segundo, para o Cray XC40 do Met Office com capacidade para 14 mil trilhões de operações por segundo, o que facilitou na redução do espaçamento de grades de diversos modelos meteorológicos e climáticos, abrindo possibilidades para representação de fluxos complexos sobre o terreno (KEALY, 2019).

Com tamanho de malhas na Zona Cinzenta mais finas do que a profundidade da troposfera, havia falsa impressão de que fenômenos como turbulência e transporte convectivo eram parcialmente resolvidos, mesmo com as parametrizações de convecção desligadas (HONNERT et al., 2020).

Com este avanço parece razoável concluir que ‘melhor precisão vem com melhor resolução’, em vista destes resultados surgem algumas questões: existe algum limite que podemos considerar de superior para tal resolução? Quão menor tem que ter de espaçamento uma grade para que se obtenha boa resolução tanto da microfísica como da convecção?

O termo “*Terra Incógnita*”, foi usado por Wyngaard (2004) para se referir à um regime numérico, recém-emergente, onde os movimentos atmosféricos na grade do modelo

eram parcialmente resolvidos, enquanto o esquema de parametrização (a física da “sub-grade”) continuaria a resolver a parte remanescente. Uma das razões indicadas por trás desta parcial resolução são as escalas de comprimento tanto da convecção (01 à 10 quilômetros) como da turbulência da camada limite (100 à 1000 metros), que podem ser similares ao espaçamento da grade do modelo. E provavelmente devido a falta de conhecimento do que realmente ocorre dentro desse intervalo, acabou sendo atribuído à este regime o termo “*Grey Zone*”, ou “*Zona Cinzenta*” em Português (KEALY, 2019).

A Turbulência da camada limite gerada por céus ensolarados é definida como aquela parte da atmosfera que é diretamente afetada pela superfície da Terra e desta depende a convecção profunda, que ocorre em níveis logo acima desta.

A *Grey Zone* pode também ser concebida como uma faixa onde resoluções de grade <sup>as</sup> ~~onde~~ características particulares (turbulência, convecção e topografia) não são nem de sub-grade nem totalmente resolvidas, mas sim parcialmente resolvidas. Portanto, a definição de uma zona cinzenta depende fortemente da característica sendo representada e de sua relação com a resolução do modelo, abrindo possibilidade para mais de uma Zona Cinzenta (Turbulência, Convecção e Topografia), passando a ser chamada de contínuo cinzento (CHOW et al., 2019).

De acordo com Gerard et al. (2009), *Grey Zone* refere-se a uma faixa de resolução em modelos numéricos onde as dimensões das células de convecção profunda se aproximam do tamanho da grade do modelo. Essa faixa geralmente ocorre em resoluções entre 4 km e 1 km, onde as parametrizações convencionais de convecção profunda não conseguem capturar adequadamente a dinâmica e a microfísica envolvidas. A inadequação das parametrizações tradicionais resulta em simulações que não representam fielmente a precipitação e outros fenômenos meteorológicos.

Chow et al. (2019) considera em seu estudo, resoluções de grade horizontal de aproximadamente 10 km a 10 m. O que mais importa é a forma como os modelos numéricos são projetados para atravessar essas zonas cinzentas para aplicações em terrenos complexos na previsão numérica do tempo, previsão de recursos eólicos e modelagem climática regional, entre outros.

Dada a complexidade do tópico, existe alguma discrepância entre o comprimento da escala da grade para cada uma das características, ou seja, zonas cinzentas.

## 2.1 Classificação da *Grey Zone*

A *Grey Zone* entre microfísica e convecção profunda apresenta desafios significativos para a modelagem numérica do tempo. O que torna a *Grey Zone* interessante não é apenas a necessidade prática das parametrizações, mas sim questões científicas relacionadas com

processos convectivos e de camada limite, e a relação destes com a grande escala.

Encontram-se muitas dessas *Grey Zones* a medida que atravessamos diferentes resoluções na modelagem atmosférica. Os modelos de previsão numérica podem ter hoje um espaçamento de grade em torno de 10 km (NCEP - NAM  $\sim 12$  km e ECMWF  $\sim 11$  km) e os mais avançados nas próximas décadas para  $\sim 01$  km (MeteoSwiss - COSMO  $\sim 01$  km e NOAA - HRRR  $\sim 03$  km).

Para grades aninhadas, com espaçamento de grade ainda menor, pode-se considerar a transição de Meso-escala para LES, começando de:

$$12 \text{ km} \xrightarrow{\text{Meso-escala}} 04 \text{ km} \rightarrow 1,3 \text{ km} \xrightarrow{\text{Grey Zone}} 450 \text{ m} \rightarrow 150 \text{ m} \xrightarrow{\text{LES}} 50 \text{ m}$$

## 2.2 Modelos de pequena grande escalas

### 2.2.1 Large Eddy Simulation (LES) ou Cloud Resolving Models (CRM)

Os modelos LES ou CRM não carecem de parametrizações dos processos físicos porque a mais importante escala terá sido resolvida, uma vez que o espaçamento da grade do modelo é muito inferior ao comprimento de escala da característica de interesse ( $\Delta_{\text{LES/CRM}} \ll L$   $\Delta_{\text{CRM}} \approx 100\text{m}$ ), diferentemente do que ocorre num modelo de circulação geral, onde a resolução do modelo é muito superior à escala de interesse ( $\Delta_{\text{GCM}} \gg L$ ).

Dependendo da resolução da grade do modelo, podemos representar diversos fenômenos atmosféricos. Imagine que estejamos interessados em simular a representação de uma estrutura, uma nuvem com 01 km escala de comprimento, por exemplo. Para um modelo de circulação geral da atmosfera (GCM), com uma célula de grade de aproximadamente 100 km de comprimento. Dada a magnitude da escala do modelo relativamente à característica de interesse (nuvem), é imprescindível a parametrização do efeito desta.

No caso de LES ou CRM, com espaçamento de grade da ordem de aproximadamente 100 m você não precisa parametrizar porque as características da nuvem e os movimentos convectivos serão explicitamente resolvidas na mais importante escala do fluxo, dado que o espaçamento da grade do modelo é muito inferior à escala de comprimento da característica de interesse (nuvem), ou seja,  $0,1 \text{ km} \ll 1 \text{ km} \rightarrow \Delta_{\text{CRM}} \ll L_{\text{nuvem}}$

E para modelos com espaçamento de grade aproximadamente igual ao comprimento da característica de interesse ( $\Delta_{\text{GZ}} \sim L_{\text{nuvem}}$ ) têm-se uma pobre representação da nuvem nesta região e a parametrização seria inapropriada neste caso porque estão sendo resolvidas algumas características de escala fina. A parametrização desenvolvida para 100 km de resolução não seria válida neste, quando se tem uma resolução de 01 km. Portanto, este é o conceito de *Grey Zone* e pode ser aplicado à outras características de interesse, dependendo do fluxo a ser levado em consideração.



### 2.2.2 Weather Research and Forecasting (WRF)

Liu et al. (2021) estudou o impacto da resolução horizontal e a parametrização da convecção na região do *Grey Zone* fazendo simulações com o modelo WRF para estudar a convecção tropical. O propósito deste estudo era de investigar a dependência da resolução nas simulações da convecção tropical associada ao modo de variabilidade climática Oscilação de Madden e Julian (MJO em inglês) usando domínios maiores, 01 km à 10 km, pertencente à *Grey Zone*.

Alguns autores sugerem enfrentar os desafios da *Zona Cinzenta* criando novos fechamentos de turbulência “sensíveis à escala”. E esses fechamentos, junto com técnicas para melhorar a transição nas fronteiras de aninhamento, podem permitir uma representação mais precisa das estruturas turbulentas em grades aninhadas dentro da *Zona Cinzenta* (CHOW et al., 2019).

## 2.3 Scale Aware parameterization

As *scale-aware parameterizations* oferecem uma solução promissora para os desafios da *Grey Zone*, pois são projetadas para reconhecer e integrar tanto os processos resolvidos quanto os não resolvidos. A abordagem do *Complementary Subgrid Updraft* (CSU), conforme discutido por Gerard et al. (2009), exemplifica como essas parametrizações podem ser implementadas, permitindo uma transição gradual para a convecção totalmente resolvida à medida que a resolução do modelo aumenta.

A microfísica, que trata da formação e evolução das partículas de nuvem, deve ser integrada de forma mais eficaz com a convecção profunda para melhorar a precisão das previsões. A literatura sugere que abordagens específicas, como as *scale-aware parameterizations*, são necessárias para lidar com essa complexidade, permitindo que os modelos se adaptem às características dinâmicas e microfísicas da atmosfera em diferentes resoluções.

Essa parametrização não apenas melhora a representação da convecção profunda, mas também assegura que a quantidade total de precipitação seja mantida, o que é crucial para a modelagem hidrológica. Ao integrar a microfísica e a convecção de maneira mais coesa, as *scale-aware parameterizations* têm o potencial de melhorar significativamente a precisão das previsões em escalas de tempo e espaço onde a *Grey Zone* é predominante, contribuindo para uma melhor compreensão e previsão dos fenômenos meteorológicos. As modificações nos esquemas de parametrização para acomodar tamanhos de grade variados são chamadas de “*Scale Aware*”, cuja função principal é resolver os processos mal resolvidos da *Grey Zone* (ANGEVINE et al., 2020).

Apesar do contínuo avanço da ciência e tecnologia permitindo o aumento da resolução horizontal para previsão do tempo e de modelos climáticos para escala de quilômetros,

muitos processos físicos que ocorrem entre 01 – 10 km são parcial, não totalmente resolvidos, o que abre espaço para novas e apropriadas parametrizações (FRASSONI et al., 2018).

Como visto na secção anterior modelos de resolução de nuvens (CRMs) e modelos de simulação de grandes redemoinhos (LES), juntamente com modelos de coluna única (SCMs), são amplamente utilizados para desenvolver e melhorar as parametrizações físicas na região de *Grey Zone*.

Com o aumento da resolução horizontal, há necessidade, especialmente na *Grey Zone*, de esquemas conscientes da escala, nos quais eles possam se autoajustar em situações em que as circulações convectivas estão sendo explicitamente resolvidas, total ou parcialmente, deixando a microfísica das nuvens assumir a produção da precipitação convectiva e a distribuição vertical de massa, momento e energia (FRASSONI et al., 2018).

O artigo de revisão de Chow et al. (2019) defende a ideia de que as formulações de *scale-aware* para aninhamento de grades e fechamentos de turbulência em modelos atmosféricos com resoluções de 10 km à 10 m, abordando a *Zona Cinzenta*. Ele destaca a necessidade de transições suaves de fechamentos do tipo *Planetary Boundary Layer* (PBL) para *Large Eddy Simulation* (LES), incorporando anisotropia e retrodispersão na turbulência não resolvida. A complexidade da topografia e a interação com a convecção são discutidas, especialmente em terrenos complexos e precipitação orográfica. Sugere-se igualmente o uso de novas técnicas de grade e coordenadas híbridas para melhor representar a topografia em diferentes escalas.

Há necessidade de se garantir para o futuro que os modelos de meso-escala utilizem as melhores parametrizações físicas e métodos numéricos. Projetos de inter-comparação bem organizados ajudarão a comunidade a avançar e a identificar as melhores estratégias de modelagem para simulações fisicamente consistentes em diferentes escalas sobre terrenos complexos.

A complexidade da “*Grey Zone*” é acentuada pela necessidade de equilibrar a precisão das previsões com a eficiência computacional. À medida que os modelos de previsão numérica do tempo avançam para resoluções mais finas, como 3 a 4 km, a representação de processos convectivos se torna cada vez mais desafiadora. Estudos, como os de Kain (2004) e Schwartz (2014), indicam que, em algumas situações, a ativação de parametrizações convencionais em escalas que não foram projetadas para isso pode resultar em previsões de precipitação inferiores às obtidas em resoluções mais grossas. As parametrizações *Scale-Aware* oferecem uma abordagem inovadora para mitigar esses desafios, permitindo que os modelos se adaptem às características dinâmicas e microfísicas dos fenômenos convectivos em diferentes escalas.

### 3 Considerações finais

Várias definições foram atribuídas a *Grey Zone*, diante da literatura procuramos trazer a mais aproximada e fazendo a combinação entre diferentes autores. Ela é definida, como a faixa de resolução em que o comprimento da grade do modelo numérico se aproxima das dimensões das células de convecção profunda. Essa região é problemática porque as parametrizações convencionais de convecção, que funcionam bem em resoluções mais grossas, não conseguem capturar adequadamente os processos convectivos que ocorrem em escalas menores.

A literatura sugere que, para tornar a definição da *Grey Zone* mais clara, é necessário desenvolver abordagens específicas que considerem as características únicas da convecção em escalas intermediárias, como as *Scale-Aware Parameterizations*, que se adaptam à resolução do modelo e reconhecem a importância tanto dos processos resolvidos quanto dos não resolvidos.

Para identificar a *Grey Zone*, é importante observar a relação entre a resolução do modelo e as dimensões típicas das células de convecção. Quando a resolução do modelo (ou seja, o comprimento da grade) se aproxima de 1 a 8 km, é um indicativo para identificar a *Grey Zone*. Além disso, a análise do comportamento das previsões em diferentes resoluções pode ajudar a identificar essa região, especialmente se houver uma transição nas características da convecção e na quantidade de precipitação prevista.

A melhor parametrização para essa resolução, conforme discutida pela literatura, é a abordagem conhecida como *Complementary Subgrid Updraft* (CSU). Essa parametrização combina a representação de convecção profunda com a microfísica, permitindo uma transição gradual para a convecção totalmente resolvida à medida que a resolução do modelo aumenta. A CSU é projetada para manter a quantidade total de precipitação e melhorar a precisão das previsões, adaptando-se às características específicas da convecção em escalas intermediárias.

Em vista do que foi nas páginas anteriores exposto, fica claro que a faixa de resolução da *Grey Zone* depende do tipo de Turbulência e Convecção em causa, considerando o fato de que as contribuições tanto resolvidas quanto as de sub-grade para o transporte Turbulento e Convectivo dão uma contribuição não negligenciável.

E para superar os problemas causados por estruturas espúrias nas grades da *Grey Zone*, uma abordagem é eliminar a convecção nessa área ajustando o fluxo da *Grey Zone* para uma solução *Meso-escalar* mais grosseira. Isso é feito aumentando a difusividade turbulenta horizontal para evitar que a convecção ocorra na grade da *Grey Zone*, o que elimina características de fluxo errôneas, mas demanda maior custo computacional devido à

resolução espacial mais alta (CHOW et al., 2019). Muñoz-Esparza et al. (2017) adotaram uma abordagem similar aumentando a constante de Smagorinsky no domínio *Meso-escalar* de alta resolução para combater a convecção sub-resolvida.

# Referências

- ANGEVINE, W. M.; OLSON, J.; GRISTEY, J. J.; GLENN, I.; FEINGOLD, G.; TURNER, D. D. Scale awareness, resolved circulations, and practical limits in the mynn–edmf boundary layer and shallow cumulus scheme. *Monthly Weather Review*, v. 148, n. 11, p. 4629–4639, 2020.
- CHOW, F. K.; SCHÄR, C.; BAN, N.; LUNDQUIST, K. A.; SCHLEMMER, L.; SHI, X. Crossing multiple gray zones in the transition from mesoscale to microscale simulation over complex terrain. *Atmosphere*, MDPI, v. 10, n. 5, p. 274, 2019.
- FRASSONI, A.; CASTILHO, D.; RIXEN, M.; RAMIREZ, E.; MATTOS, J. G. Z. D.; KUBOTA, P.; CALHEIROS, A. J. P.; REED, K. A.; DIAS, M. A. F. da S.; DIAS, P. L. da S. et al. Building the next generation of climate modelers: Scale-aware physics parameterization and the “grey zone” challenge. *Bulletin of the American Meteorological Society*, American Meteorological Society, v. 99, n. 11, p. ES185–ES189, 2018.
- GERARD, L.; PIRIOU, J.-M.; BROŽKOVÁ, R.; GELEYN, J.-F.; BANCIU, D. Cloud and precipitation parameterization in a meso-gamma-scale operational weather prediction model. *Monthly weather review*, v. 137, n. 11, p. 3960–3977, 2009.
- HONNERT, R.; EFSTATHIOU, G. A.; BEARE, R. J.; ITO, J.; LOCK, A.; NEGGERS, R.; PLANT, R. S.; SHIN, H. H.; TOMASSINI, L.; ZHOU, B. The atmospheric boundary layer and the “gray zone” of turbulence: A critical review. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 125, n. 13, p. e2019JD030317, 2020.
- JEWORREK, J.; WEST, G.; STULL, R. Evaluation of cumulus and microphysics parameterizations in wrf across the convective gray zone. *Weather and Forecasting*, American Meteorological Society, v. 34, n. 4, p. 1097–1115, 2019.
- KAIN, J. S. The kain–fritsch convective parameterization: an update. *Journal of applied meteorology*, v. 43, n. 1, p. 170–181, 2004.
- KEALY, J. C. Probing the ‘grey zone’ of nwp—is higher resolution always better? *Weather*, Wiley Online Library, v. 74, n. 7, p. 246–249, 2019.
- LIU, C.; DUDHIA, J.; WANG, W.; MONCRIEFF, M. Tropical convection simulation in the grey zone: Impact of horizontal resolution and convective parameterization. In: *AGU Fall Meeting Abstracts*. [S.l.: s.n.], 2021. v. 2021, p. A45O–2050.
- MUÑOZ-ESPARZA, D.; LUNDQUIST, J. K.; SAUER, J. A.; KOSOVIC, B.; LINN, R. R. Coupled mesoscale-les modeling of a diurnal cycle during the cwex-13 field campaign: From weather to boundary-layer eddies. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, Wiley Online Library, v. 9, n. 3, p. 1572–1594, 2017.
- ROBERTS, N. M.; LEAN, H. W. Scale-selective verification of rainfall accumulations from high-resolution forecasts of convective events. *Monthly Weather Review*, American Meteorological Society, v. 136, n. 1, p. 78–97, 2008.

SCHWARTZ, C. S. Reproducing the september 2013 record-breaking rainfall over the colorado front range with high-resolution wrf forecasts. *Weather and forecasting*, v. 29, n. 2, p. 393–402, 2014.

WYNGAARD, J. C. Toward numerical modeling in the “terra incognita”. *Journal of the atmospheric sciences*, American Meteorological Society, v. 61, n. 14, p. 1816–1826, 2004.