



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.20.17.56-RPQ

**RELATÓRIO TÉCNICO: PERSPECTIVAS DA
MODELAGEM NUMÉRICA DOS PROCESSOS DE
MICROFÍSICA DE NUVENS NO BRASIL E SUAS
APLICAÇÕES NO MODELO COMUNITÁRIO MONAN**

Paulo Yoshio Kubota

Enver Manuel Amador Ramirez Gutierrez

Silvio Nilo Figueroa Rivero

Jhonatan Andres Aguirre Manco

Jorge Luis Gomes

José Paulo Bonatti

Chou Sin Chan

Saulo Ribeiro de Freitas

Dayana Castilho de Souza

Isabella Talamoni Lima

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49RSTC5>>

INPE

São José dos Campos

2023

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



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

sid.inpe.br/mtc-m21d/2023/09.20.17.56-RPQ

**RELATÓRIO TÉCNICO: PERSPECTIVAS DA
MODELAGEM NUMÉRICA DOS PROCESSOS DE
MICROFÍSICA DE NUVENS NO BRASIL E SUAS
APLICAÇÕES NO MODELO COMUNITÁRIO MONAN**

Paulo Yoshio Kubota

Enver Manuel Amador Ramirez Gutierrez

Silvio Nilo Figueroa Rivero

Jhonatan Andres Aguirre Manco

Jorge Luis Gomes

José Paulo Bonatti

Chou Sin Chan

Saulo Ribeiro de Freitas

Dayana Castilho de Souza

Isabella Talamoni Lima

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/49RSTC5>>

INPE

São José dos Campos

2023



Esta obra foi licenciada sob uma Licença Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.

RESUMO

Este documento cataloga as informações principais apresentadas e também discutidas no **primeiro Workshop do Estado a Arte das Parametrizações Físicas em Modelo Atmosférico Para Todas as Escalas de Previsão com foco em “Microfísica de Nuvens”**, que ocorreu na Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre vinculada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIMNT/INPE), no mês de março de 2023. No Workshop foram enfatizados os possíveis caminhos da Modelagem Numérica dos Processos de Microfísica de Nuvens no Brasil e conseqüentemente no modelo MONAN.

ABSTRACT

This document synthesizes the main presented and discussed information from the first Workshop on the State of the Art of Physical Parameterizations in Atmospheric Models for All Prediction Scales, focusing on “Cloud Microphysics”. This event took place in March 2023 at the Numerical Modeling Division of the Earth System Science Center affiliated with the National Institute for Space Research (DIMNT/INPE). During the workshop it was emphasized the potential pathways of Numerical Modeling of Cloud Microphysics Processes in Brazil and consequently in the Model for Ocean-laNd-Atmosphere predictionN (MONAN) model.

LISTA DE FIGURAS

Pág.

Figura 1 - Fluxograma do esquema de microfísica de nuvens de Ferrier.....28

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 1 - Descrição dos processos de microfísica de nuvens que afetam a razão de mistura dos hidrometeoros.....	29

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ARCSCM	Arctic Single Column Model
CFL	Condição de Estabilidade Numérica
CRM	Cloud Resolving Model
DIMNT	Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre
FIRE-ACE	Experiment-Arctic Clouds Experiment
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISCCP	International Satellite Cloud Climatology Project Regional
LES	Large Eddy Simulation
MPAS	Model for Prediction Across Scales
MONAN	Model for Ocean-land-Atmosphere prediction
NCN	Núcleos da Condensação de Nuvem
PDFs	Funções de Distribuição Probabilísticas
SHEBA	Surface Heat Budget of the Arctic
WSM	Single Moment
WDM	Double Moment
WRF	Weather Research and Forecasting

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	9
2 OBJETIVOS.....	10
3 MICROFÍSICA DE NUVENS	10
3.1 Discussões sobre os processos de microfísica básica (partículas)	12
3.2 Discussões Microfísica de Fase Quente (vapor-líquida).....	14
3.3 Discussões Microfísica de Fase Mista (vapor-líquido-gelo).....	17
3.4 Parametrizações de Microfísica de Nuvens.....	19
3.4.1 Esquema de microfísica de nuvens da família WSM-WDM	20
3.4.2 Esquema de microfísica de nuvens de Gregory Thompson.....	25
3.4.3 Esquema de microfísica de nuvens de Ferrier	27
3.4.4 Esquema de microfísica de nuvens de Morrison.....	33
4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS MAIS AMPLAS.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

1 INTRODUÇÃO

Os grandes centros de pesquisas em ciência atmosférica têm avançado muito no desenvolvimento de modelos numéricos para a simulação dos processos relacionados à dinâmica e termodinâmica da atmosfera. Entretanto, várias parametrizações físicas utilizadas nestes modelos são desenvolvidas e calibradas em regiões com características distintas às encontradas na América do Sul, principalmente no Brasil.

Baseado nestas características de desenvolvimento dos Modelos Numéricos da Atmosfera, a Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre vinculada ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DIMNT/INPE) realizou no mês de março de 2023 o **primeiro Workshop do Estado a Arte das Parametrizações Físicas em Modelo Atmosférico Para Todas as Escalas de Previsão**. Com foco na “**Microfísica de Nuvens**” foram discutidos vários temas relacionados à teoria e parametrizações de microfísica de nuvens. Os resultados destas discussões, descritas neste documento podem ser utilizados como base para definir os possíveis caminhos a serem adotados pelos grupos de pesquisa, que trabalham com processos físicos relacionados à microfísica de nuvens.

A parametrização de microfísica de nuvens é amplamente utilizada nos modelos atmosféricos para diferentes escalas. Entretanto, o uso da parametrização de microfísica de nuvens em diferentes escalas espaciais ainda é um desafio para a comunidade científica (MORRISON, et al., 2020) e requerem simplificações nas formulações físicas e computacionais dos processos de microfísica de nuvens, as quais ocorrem na escala do tamanho de partículas de nuvens e aerossóis. Outros fatores que devem ser considerados são a dependência da temperatura, regimes de supersaturação, concentração e tipo de aerossóis, tipos de nuvens, região de formação de nuvens, entre outros. Isso mostra a importância da interação de troca de informações entre os grupos de pesquisas que trabalham com microfísica de nuvens, instalados em diferentes regiões no planeta.

No Brasil existem alguns grupos de pesquisa vinculados às universidades que trabalham com este tema. O WorkShop serve como uma oportunidade de

agregar os grupos de pesquisa e melhorar a compreensão e o desenvolvimento dos processos relacionados à microfísica de nuvens sobre o território brasileiro. A vantagem de direcionar todos os grupos de pesquisa na área de microfísica de nuvens é aproveitar os conhecimentos obtidos com observações e os desenvolvimentos numéricos dos processos microfísicos. Assim, conseqüentemente incorporá-los ao Modelo para Previsão dos Oceanos, Superfícies Terrestres e Atmosfera (MONAN - Model for Ocean-land-Atmosphere prediction).

2 OBJETIVOS

Baseado nas discussões **do primeiro Workshop do Estado a Arte das Parametrizações Físicas em Modelo Atmosférico Para Todas as Escalas de Previsão**. Com a **“Microfísica de Nuvens”** pretende-se neste documento catalogar as informações principais apresentadas e também discutir os possíveis caminhos da Modelagem Numérica dos Processos de Microfísica de Nuvens no Brasil e conseqüentemente no modelo MONAN.

3 MICROFÍSICA DE NUVENS

A Microfísica de Nuvens é representada por um conjunto grande de processos físicos, que ocorrem na escala das moléculas de água ao tamanho das partículas de nuvens (micrômetros) até atingir o tamanho de gotas de chuva (da ordem ou menor que centímetros). A interação do vapor de água, aerossóis, partículas de nuvens, partículas de gelo e gotas de chuva é muito complexa. Teoricamente pode-se estudar esta interação considerando somente duas partículas individuais. Entretanto, a interação entre as partículas de nuvens e de gelo não ocorrem individualmente, as interações são simultâneas e com um número enorme de partículas.

Como a microfísica de nuvens tem muitos graus de liberdade, as formulações físicas ainda apresentam resultados com muita incerteza devido à complexidade em parametrizar em termos de um conjunto limitado de variáveis estes processos. Segundo Seifert (2011), há três temas que necessitam ser explorados: 1) existem lacunas na descrição empírica e teórica de processos de nuvens como nucleação de gelo, agregação e fragmentação de partículas de gelo, taxas de colisão em fluxos turbulentos e quebra de gotas. 2) A variabilidade natural de nuvens, partículas de nuvens e aerossóis é esmagadoramente grande, por exemplo, os diferentes hábitos (estados de fase) de partículas (incluindo graus de rimming), as estruturas espaciais temporais nas nuvens, bem como as distribuições de tamanho de partículas etc. 3) A forte não linearidade e a alta complexidade dos processos em nuvem dificultam qualquer abordagem analítica e teórica rigorosa. Mais recentemente, Morrison et al. (2020) mostraram as dificuldades e os desafios da modelagem numérica de nuvens e microfísica de precipitação para diferentes escalas espaciais.

A representação dos diferentes tipos de nuvens em modelos de previsão numérica de tempo e clima sempre foi um grande desafio, pois as dimensões horizontais e vertical das nuvens geralmente são menores que os espaçamentos de grade utilizados nos modelos numéricos. Em muitas aplicações, o volume da nuvem corresponde a uma fração e do volume da célula da grade computacional, em outras palavras, os processos físicos relacionados à microfísica de nuvens não podem ocorrer em toda a célula de grade. Portanto, os processos de microfísica de nuvens podem ser superestimados ou subestimados dependendo das condições de nebulosidade.

Os desafios e as dificuldades em desenvolver as parametrizações de microfísica de nuvens para diferentes escalas de previsão ainda acompanhará a modelagem numérica da atmosfera ao longo dos próximos anos. Entretanto, neste documento será discutido os desafios dos processos de microfísica de nuvens na modelagem atmosférica.

3.1 Discussões sobre os processos de microfísica básica (partículas)

A microfísica de nuvens interage com vários campos da ciência atmosférica (sensoriamento remoto, radiação, ciclo hidrológico etc.) (TAO; MONCRIEFF, 2009). Entretanto, os processos de microfísica somente podem ocorrer onde há formação de nuvens. As nuvens podem se formar em qualquer parte da atmosfera terrestre (diferentes altitudes, regiões polares, latitude médias, e tropicais), estas regiões fornecem características distintas de temperatura e umidade que produzem diferentes tipos de nuvens (cirros, cirrostratus, stratus, cúmulos, alto cúmulos, cumulonimbus etc.). Uma descrição e classificação mais detalhadas podem ser encontrados no Cloud Atlas (www.clouds-online.com/).

Interações microscópicas entre vapor de água, gotículas e partículas de nuvens, cristais e partículas de gelo e gotas de chuvas de diferentes tamanhos ocorrem dentro destas nuvens. As físicas relacionadas à mudança de fase da água em conjunto com estas interações são definidas como os processos de microfísica de nuvens. Neste contexto, nota-se que a microfísica de nuvens é baseada na interação entre partículas (partícula de aerossol, gelo, nuvens, gotas, aglomerados).

As partículas presentes nas nuvens não possuem forma simétrica, esta característica dificulta o desenvolvimento de modelos numéricos. Uma aproximação matemática simples é aproximá-las a uma forma geométrica simétricas com dimensões conhecidas (esfera, cilindros, placas, etc.), estas formas geométricas simétricas são chamadas de formas equivalentes. Considera-se que as dimensões das partículas de nuvens são aproximadas às formas equivalentes, assim estas partículas são definidas como partículas equivalentes. Supõe-se que as partículas equivalentes possuem a mesma massa e densidade da partícula real. Desta forma, fica mais simples derivar o raio equivalente, diâmetro equivalente, massa equivalente, densidade equivalente e volume equivalente.

O tratamento de partículas equivalentes é razoável para o estudo teórico da interação entre duas partículas. Entretanto, não pode utilizar-se desta metodologia de modelagem para modelar grandes volumes de nuvens, onde

haverá um número muito grande de partículas de diversos tamanhos, interagindo umas com as outras. A nova metodologia utilizada é baseada nas funções de distribuição de tamanho das partículas de nuvens ou distribuição de massa das partículas de nuvens, muito semelhante à função de distribuição de probabilidade estatística. O tamanho da partícula (diâmetro equivalente) está relacionado a massa equivalente através da relação da densidade equivalente, portanto as duas distribuições são equivalentes e ambas podem ser utilizadas para o mesmo propósito.

A metodologia que utiliza a função de distribuição de tamanho das partículas é ideal para estudar a interação de partículas de diferentes tamanhos que estão dentro de um grande volume. Através da função de distribuição de tamanho das partículas é possível obter algumas grandezas importantes para a microfísica de nuvens. Dependendo das condições aplicadas na integração da função de distribuição de tamanho das partículas obtém-se o número de concentração, o raio e o diâmetro efetivo, o coeficiente de extinção, a refletividade, como exemplos, que estão relacionadas à ordem do momento da função de distribuição.

A maioria das partículas médias e grandes seguem uma função de distribuição exponencial (Marshall Power), entretanto, a função de distribuição exponencial para partículas pequenas, tais como aerossóis, núcleos de condensação e núcleos de gelo, apresenta algumas inconsistências em relação às distribuições reais de tamanho destas partículas, em um determinado volume. Devido a estas inconsistências, foram introduzidas as funções de distribuições gama e log-normal para representar a distribuição de partículas. Através das funções gama e log-normal, também se obtém grandezas importantes para a microfísica de nuvens.

Para a utilização da metodologia da função de distribuição de tamanho das partículas é necessário considerar um volume grande de ar atmosférico, de modo que os números de partículas seja o suficiente para representar os diferentes tamanhos das partículas observados na atmosfera real. Estas considerações mostram um problema em relação às medidas dos números de concentrações de partículas de nuvens, realizadas por instrumentos presentes em aviões. Devido às limitações dos equipamentos, alguns tamanhos de

partículas podem não ser considerados nas medições e outros podem estar sendo superestimados ou subestimados. Portanto, a relação entre as medições e a representação matemática do número de concentrações podem ter algumas divergências, levando a algumas interpretações físicas inconsistentes.

Mas a metodologia da função de distribuição de tamanho das partículas tem se mostrado robusta e é utilizada tanto na forma discreta na microfísica “bin” como na forma de função de distribuição na microfísica bulk. Os resultados encontrados na literatura mostram a eficácia do método.

3.2 Discussões Microfísica de Fase Quente (vapor-líquida)

Em temperaturas abaixo da temperatura de ponto de orvalho e na presença de partículas de aerossóis processos de microfísica de nuvens começam a ser ativados. Na faixa de temperaturas acima de 0°C, os processos microfísicos são classificados como pertencentes à fase quente e estes processos são representados pela interação entre as moléculas de vapor de água, água líquida de nuvens e chuva.

O início dos processos de microfísica de nuvens na fase quente ocorre através do processo de nucleação para a formação de gotículas de nuvens. Devido às características da atmosfera terrestre, a formação de gotículas de nuvens composta somente com as moléculas de vapor de água é muito improvável que ocorra. Portanto, para a formação de gotículas de nuvens há a necessidade da presença de partículas de aerossóis definidos como Núcleos da Condensação de Nuvem (NCN), que estão suspensos na atmosfera. Estas partículas de aerossóis constituídas de compostos orgânicos, sal marinho, poeira, bactérias e outros, propiciam superfícies onde as moléculas do vapor de água se condensam formando gotículas de nuvens. Processos adicionais envolvendo a interação de várias gotículas propiciam o desenvolvimento de gotas grandes que se precipitam, formando gotas de chuva.

A necessidade da presença de NCNs para geração de gotículas de nuvens é um grande problema para a modelagem numérica da microfísica de nuvens, pois quantificar estes aerossóis na atmosfera e determinar as taxas de emissão e

deposição na superfície terrestre são muito complexos e conseqüentemente são uma grande fonte de incertezas nos resultados numéricos. Muitas das parametrizações de microfísica de nuvens utilizadas nos modelos atmosféricos para previsão de tempo e clima definem a distribuição do número de concentração de NCNs na atmosfera como constante ou em função de parâmetros termodinâmicos da atmosfera, por exemplo a temperatura do ar, reduzindo a variabilidade e os graus de liberdade atribuídos aos NCNs. Entretanto, em diferentes regiões da superfície terrestre e em diferentes altitudes da atmosfera, o número de concentração de NCNs não deveria ser considerada constante. Esta consideração indica que as taxas de precipitação simuladas pelos modelos são influenciadas pelo tipo e pelo erro no número de concentração dos NCNs. O processo de nucleação, geralmente ocorre pelo processo de condensação ou difusão de moléculas de água sobre esta superfície dos aerossóis para geração das gotículas de nuvens.

Após o processo de nucleação, o crescimento das gotículas de nuvens é definido pelo critério de supersaturação na interface entre uma superfície de água condensada sobre o aerossol e as moléculas de vapor de água na atmosfera do entorno. O crescimento ocorre por condensação de moléculas de água sobre estas superfícies das gotículas de nuvens, e exige que o ambiente esteja supersaturado e que se mantenha supersaturado, durante o processo de crescimento das gotículas de nuvens. O processo de condensação de moléculas de água sobre a superfície das gotículas de nuvens reduz a supersaturação do ambiente, então deve haver uma fonte de molécula de vapor de água para suprir a queda da supersaturação do ambiente, ao redor das gotículas de nuvens. As gotículas de nuvens crescem até atingir um raio crítico e um determinado limiar de supersaturação crítica, cruzando estes limiares as gotículas de nuvens se tornam gotas maiores de água líquida (gotas de chuva). A parte até chegar a um limiar de raio crítico e a supersaturação crítica é definida como fase estável de crescimento e após ultrapassar este limiar é a fase instável de crescimento das gotículas de nuvens. Esses processos microfísicos são baseados na teoria de Köhler (Köhler, 1936). Na fase estável, as gotículas de nuvens usam a força da supersaturação para manter o crescimento e na fase instável, o crescimento

também ocorre forçado por outros processos como agrupamento de gotas e coleta realizado por gotas maiores.

Ao cruzar os limiares críticos, as gotículas de nuvens iniciam os processos de coalescência ou união [auto-conversão (gotículas de nuvens convertendo em gotas de chuva), colisão, coleta (gotas grandes varrem gotas menores) e auto-coleta (gotas de tamanhos iguais se unindo)] e fragmentação de gotas. Estes processos geralmente envolvem a interação de várias gotas de diferentes tamanhos e não podem ser resolvidos analiticamente, portanto, utiliza-se métodos estocásticos para obter os resultados das interações entre as partículas. Estes métodos estocásticos utilizam dois parâmetros, a eficiência de colisão e o kernel de colisão (coeficiente de coagulação). Os dois parâmetros são obtidos através de experimentos em túnel de vento e aplicados para a modelagem atmosférica. O processo de fragmentação ou quebra de gotas é um pouco diferente, ocorre a partir da desintegração de uma gota líquida em duas ou mais gotas. A fragmentação de gotas também é resolvida por método estocásticos e depende da probabilidade de uma gota de massa M_D se desintegrar e a probabilidade de uma gota de massa M_D se formar da desintegração de uma gota de massa M_D . Estes dois parâmetros do processo estocástico de fragmentação da gota são também obtidos de túnel de vento.

Os experimentos em túnel de vento são realizados em condições controladas, muitas vezes inconsistentes com a atmosfera real, por este motivo estes processos resolvidos utilizando métodos estocásticos são termos que geram grandes incertezas nas parametrizações de microfísica de nuvens.

O processo de ventilação é o resultado da interação da dimensão das gotas, massa das gotas, do arrasto produzido nas gotas pelo escoamento vertical ascendente. Este processo é caracterizado pelo coeficiente de ventilação, sendo muito importante no processo de evaporação das gotículas e gotas de líquida. A incerteza atribuída a este processo de ventilação está na dificuldade de determinar as velocidades de quedas (terminal) das gotas de diferentes tamanhos.

A taxa de precipitação pode ser obtida em função do espectro de gotas de chuva parametrizada em função do parâmetro de inclinação da curva de distribuição exponencial do tamanho de gotas de chuva.

A modelagem numérica dos processos físicos da fase quente de microfísica de nuvens que são utilizadas nas parametrizações de microfísica de nuvens é bem robusta apesar das dificuldades discutidas. Entretanto, alguns parâmetros e parametrizações dos processos de microfísica de nuvens da fase quente podem ser ajustadas e melhoradas sobre o território brasileiro.

3.3 Discussões Microfísica de Fase Mista (vapor-líquido-gelo)

A fase mista da microfísica de nuvens compreende a faixa de temperatura que está entre a fase líquida em torno de 0°C e a fase de gelo abaixo de -37°C . Nesta fase mista estão os processos microfísicos da fase quente e os processos microfísicos da fase de gelo. A fase de gelo é onde ocorre a formação de partículas de gelo através do congelamento de vapor de água sobre a superfície dos núcleos de gelo que são os aerossóis higroscópicos (principalmente como poeira).

A presença de aerossóis na atmosfera são as grandes responsáveis pela produção de partículas de gelo nas condições da atmosfera terrestre, entretanto, sob a condição de temperatura em torno de -40°C pode ocorrer a formação de partículas de gelo sem a presença de aerossóis, o vapor de água se agrupa, condensa, congela e assim inicia o processo de nucleação de partículas de gelo.

As partículas de gelo crescem formando partículas de gelo maiores (cristais de gelo) e dependendo das condições de temperatura e supersaturação da atmosfera definem a sua forma, tamanho e a densidade dos cristais de gelo.

A nucleação dos núcleos de gelo pode ocorrer através de diferentes processos físicos que são classificados em modos de nucleação homogênea e heterogênea (congelamento homogêneo, nucleação por deposição, congelamento por imersão, congelamento por condensação, congelamento por contato).

Após o processo de nucleação dos núcleos de gelo as partículas de gelo continuam o seu crescimento através do processo de difusão (crescimento por deposição, crescimento por condensação), que dependem principalmente da supersaturação e temperatura. Assim como, pelos processos de colisão: coleta de gotículas super-resfriadas por cristais de gelo (Rimming), coleta de gotículas super-resfriadas por precipitação congelada (Acreção), formação de conglomeração de cristais de gelo, flocos de neve, regime de crescimento úmido, regime seco (Agregação).

O número de concentração de partículas de gelo é muito maior do que a concentração do número de concentração de núcleos de gelo, medido em torno de (a) vezes no topo de nuvem com temperatura de -5°C e no topo de nuvens com temperatura em torno de -20°C . Estas diferenças sugerem que há outros mecanismos de produção de partículas de gelo. Estudos sugerem que o processo de multiplicação de partícula de gelo nas nuvens ocorre devido a interação de partícula de nuvens (fragmentação durante colisões entre cristal de gelo e gota líquida, produção de gelo secundário através de quebra de gelo por colisão e produção de cristais de gelo por congelamento por gotas).

As interações entre partículas de nuvens (gotas e partículas grandes e pequenas) são parametrizadas utilizando métodos estocásticos com dados obtidos no túnel de vento, portanto, pode não ser representativo para os diferentes tipos de nuvens presentes na atmosfera terrestre. Todos os processos de multiplicação de gelo alteram o número de concentração das partículas envolvidas nos processos, modificando a função de distribuição do tamanho das partículas. Em consequência da mudança da função de distribuição do tamanho das partículas, a massa e o diâmetro efetivo são modificados pois são dependentes da função distribuição do tamanho das partículas.

O processo de ventilação gerado pela interação da velocidade de queda das partículas de nuvens e o escoamento do ar ascendente presentes nas nuvens é importante para os processos de congelamento e derretimento das partículas de gelo e evaporação das gotas de chuva. A dificuldade de parametrizar este processo de ventilação está na incerteza nas estimativas da velocidade terminal das partículas de nuvens, devido ao seu tamanho, forma, massa e interação com o escoamento do ambiente.

A produção de partículas de gelo é a maior fonte de incerteza da parametrização de microfísica de nuvens e apesar dos desenvolvimentos recentes, ainda necessita de mais observações e novas formulações matemáticas para melhorar a produção secundária de partículas de gelo nas nuvens.

3.4 Parametrizações de Microfísica de Nuvens

Na literatura encontram-se várias parametrizações físicas de microfísica de nuvens que podem ser classificadas em momento simples e momento duplo. A microfísica de momento simples, somente prognóstica a massa dos hidrometeoros, o número de concentração é diagnosticado em função do número de concentração inicial calculada através da interceptação da curva de distribuição de tamanho de gotas sobre o eixo de concentração e do parâmetro de inclinação da curva de distribuição de tamanho de gotas. O número de concentração inicial e o parâmetro de inclinação da curva podem ser fixados ou parametrizados em função de alguma grandeza. A microfísica de momento duplo prognóstica a massa e o número de concentração dos hidrometeoros. As parametrizações de momento duplo utilizam uma função de distribuição de tamanho de partículas para cada hidrometeoros, onde os parâmetros da função de distribuição são ajustados independentemente.

A grande quantidade de tipos de parametrizações de microfísica de nuvens encontradas na literatura e utilizadas nos modelos numéricos de previsão de tempo e clima demonstra a deficiência das parametrizações de microfísica de nuvens, em simular os fenômenos atmosféricos em diferentes escalas espaciais. As considerações matemáticas e físicas utilizadas em cada um dos esquemas de parametrizações de microfísica de nuvens também são responsáveis pelas diferenças nos resultados entre cada um dos esquemas de microfísica de nuvens.

Para definir qual a parametrização de microfísica de nuvens é mais consistente com a atmosfera real é muito complexo. Um caminho mais simples é apresentar as principais diferenças entre os esquemas, para analisar as vantagens e

deficiências na simulação de sistemas e processos convectivos observados na atmosfera real.

3.4.1 Esquema de microfísica de nuvens da família WSM-WDM

Microfísica é uma das parametrizações de processos físicos utilizadas em modelos numéricos que é mais dispendiosa em termos computacionais. Por outro lado, o incremento de poder computacional tem impulsionado a implementação em modelos globais de parametrizações de nuvens e precipitação cada vez mais sofisticadas, parametrizações as quais têm sido desenvolvidas dentro de modelos de altíssima resolução (Cloud Resolving Models). Os modelos de microfísica de nuvens devem ser capazes de representar uma série de processos, os quais podem ser agrupados em três grandes grupos: a) liberação de calor latente; b) tipos de partículas; c) ciclo de vida dentro da atmosfera (Processos). No primeiro grupo (Liberação de calor latente), trata sobre a mudança de fase e podem ser incluídas: a condensação, evaporação, sublimação, deposição, congelamento e derretimento. No segundo grupo, trata do tipo de partículas que têm que ser consideradas pela microfísica, tais como: água de chuva, gotas de chuva, cristais de gelo, neve, graupel, hail. Já no terceiro grupo, trata sobre o ciclo de vida dos hidrometeoros e podem ser considerados: agregação, acreção, auto-conversão, rimming, sedimentação e determinam como os hidrometeoros podem evoluir. Torna-se importante ressaltar que as escalas dos hidrometeoros considerados pela microfísica vão desde uns poucos micrometros (gotas de nuvem) até a escalas de alguns centímetros (graupel e hail), a molécula da água é ainda menor como uma escala de uns 0.27 nanômetros e os aerossóis que é onde as moléculas de água vão se juntar através de difusão/deposição é de umas poucas décimas de micrometros até uns poucos micrometros. Dessa forma, como atualmente os modelos numéricos de previsão de tempo e clima são executados numa escala de uns poucos quilômetros (principalmente modelos de área limitada, embora existem modelos globais rodando em alta resolução, mas em uns poucos institutos de ponta), as escalas envolvidas pela microfísica são muito menores

comparadas com as escalas da resolução dos modelos numéricos. Embora o abismo entre as escalas dos modelos e dos processos, o tratamento via distribuições (bulk) permite descrever os processos microfísicos de forma detalhada se atentando para o monitoramento de um número de parâmetros reduzido (parâmetros da distribuição) e podendo fazer a equivalência dos efeitos da escala da microfísica para a escala em que o modelo é resolvido via integrais da distribuição. Tratamentos que não utilizam distribuições têm sido utilizados, como microfísica bin, a qual não pressupõe uma distribuição específica, mas que tratam a microfísica como caixas (ou bins) e cada um dos bins considerados tem que ser acompanhado em termos do seu desenvolvimento. Microfísica do tipo bin, é mais dispendiosa em termos computacionais.

As representações do tipo bulk são baseadas nos trabalhos de Lin et al. (1983) e Rutledge e Hobbs (1983) e têm sido centrais na representação de nuvens e processos de precipitação. Assim como também na representação de sistemas convectivos. Embora existem problemas reportados com a microfísica como a produção excessiva de cristais de gelo na alta troposfera, entre outros. Um tratamento da microfísica usando teoria do tipo bulk que é utilizado no WRF e no MPAS é a família WSM (single moment) e WDM (double moment); Estas famílias possuem uma característica incremental no nível de complexidade e o tipo de partículas ou hidrometeoros utilizados. A mais simplificada é a WSM3 que possui 3 variáveis prognósticas: vapor de água, água/gelo de nuvem e chuva/neve, ela faz um tratamento bastante simplificado na mudança de fase de água para gelo. O WSM5, que é a evolução do esquema anterior, tem vapor de água, água de nuvem, gelo, chuva e neve. Adicionalmente, o WSM5 tem uma melhor sedimentação do gelo de nuvem, melhoras na quantidade de gelo na parte superior da nuvem e uma melhor temperatura média de larga escala via uma melhor representação da retroalimentação do gelo de nuvem e a radiação. O esquema WSM6 inclui graupel na sua fase congelada. O estudo de Hong e Lim (2006) fizeram um estudo comparativo dos esquemas WSM3, WSM5 e WSM6. O WSM5 é caracterizado pela inclusão de fases mistas de gelo e água, entretanto o WSM6 é caracterizado pela inclusão de um tratamento mais complexo do gelo (com a adição do graupel). A comparação foi feita considerando a aplicação destes esquemas no estudo de uma tempestade

idealizada com desenvolvimento local e para um episódio de precipitação intensa, resultante de um sistema propagante. Para desenvolvimento local de precipitação intensa, a versão revisada da microfísica de gelo é relevante, isto inclui: a) a concentração em número dos núcleos de gelo foi posta como função da temperatura e b) a concentração em número dos cristais de gelo foi posta como função da quantidade de gelo. Para sistemas ciclônicos propagantes, os efeitos das modificações na sedimentação do gelo são mais importantes, isto inclui a implementação de uma velocidade terminal ponderada entre as espécies de hidrometeoros sólidos, estas implementações foram evoluindo entre as versões inicialmente contendo apenas a neve e o graupel. Na medida que o esquema foi evoluindo em complexidade incluiu-se também o hail, mas isto nos esquemas em que o hail é incluído tal como o WSM7, o qual será discutido mais adiante.

Listando os sistemas para os quais as modificações nos esquemas de microfísica são importantes, as referências em Hong e Lim (2006) sugerem também que a sedimentação de gelo de nuvem é crucial para a simulação de precipitação do tipo monção e de larga escala para a região leste da monção de verão na Ásia. Um outro ponto importante está relacionado com a sedimentação, brevemente discutida nas linhas acima. Isto é importante pois as variáveis microfísicas são integradas numericamente seguindo os seguintes processos: advecção pelo vento atmosférico, sedimentação com a velocidade terminal da partícula, difusão e mistura turbulenta com o ambiente, os processos de microfísica (linhas acima estes processos foram referidos como o ciclo de vida dentro da atmosfera). A sedimentação está sempre relacionada com a velocidade terminal do referido hidrometeoro. Hong e Lim (2006) ressaltaram que dentro dos processos que compõem a evolução das variáveis da microfísica, a sedimentação produz as mudanças de maior ordem e sugeriram que estes processos sejam computados primeiro, eles mencionam que outros esquemas de microfísica fazem o cômputo dos termos da microfísica primeiro (DUDHIA, 1989). Um outro aspecto que é usualmente aplicado são sub passos temporais para alguns processos dentro da microfísica, estes passos menores do que o passo de tempo do modelo servem com o propósito de estabilidade, evitam por exemplo que um hidrometeoro caindo na velocidade terminal possa atravessar

mais de um nível vertical por passo de tempo do modelo. Foi considerado conveniente que dentro destes sub passos temporais, processos como o congelamento ou derretimento sejam calculados, e desta forma, melhorar os perfis de aquecimento e umedecimento associados. Um outro fator importante é que a condensação é calculada por último para evitar que o estado atmosférico no final do passo de integração apresente vapor de água supersaturado e que isto seja levado para a dinâmica.

Ao efetuar as comparações entre os esquemas WSM3, 5 e 6; Hong e Lim (2006) concluíram que as características básicas das tormentas não mudam em relação ao número de hidrometeoros previstos, entretanto, os detalhes sobre a evolução ao longo do ciclo de vida da tormenta e da precipitação são afetados pela complexidade escolhida para a microfísica. Isto pode ser notado nas taxas de precipitação, na integração vertical dos hidrometeoros, na refletividade (que é uma medida do tamanho e do perfil vertical dos hidrometeoros). Nesse aspecto, os esquemas WSM5 e WSM6 permitem coexistência de diferentes fases da água e com isto uma maior interação entre os hidrometeoros, e conduzem à existência de água de nuvem, no WSM3 haveria apenas gelo. O crescimento dos hidrometeoros precipitantes pode ser associado com a coalescência ou também acreção devido a colisões e desta forma a coexistência de hidrometeoros potencializa o kernel de colisões que é proporcional ao kernel de coalescência. A autoconversão das gotas para um tamanho depois do qual a coalescência possa tomar conta, também é favorecido por esta coexistência. Toda esta conjunção de processos permite que movimentos verticais mais intensos possam ser gerados, podendo, em alguns casos, se contrapor às forças restauradoras da estabilidade atmosférica e permitindo, assim, o aprofundamento vertical para as camadas mais altas da atmosfera. O WSM5 e WSM6 produzem camadas de derretimento mais extensas verticalmente, resfriando as camadas e assim altera a re-evaporação de hidrometeoros precipitantes e a própria precipitação. Com o aumento na complexidade, outros processos precisam ser incorporados e compreendem diferentes casos específicos. Resumindo, temos:

- **WSM3** congelamento/derretimento em 0°C ;
- **WSM5** coexistem espécie líquida e congelada;

- **WSM6** foi adicionado o graupel e implementaram velocidade de queda ponderada (para snow e graupel);
- **WSM7** foi adicionado o hail (alguns pesquisadores estenderam a queda ponderada inclusive no hail também).

Em relação aos momentos com que as formulações de microfísica são desenvolvidas, nesta família temos as microfísicas de momento simples (WSM) e as de momento duplo ou duplo momento (WDM). As microfísicas de momento simples prognosticam a massa por espécie. As microfísicas de momento duplo em adição à massa, prevêem a concentração em número. Em geral, as microfísicas de duplo momento, podem ser de duplo momento apenas para algumas das partículas de hidrometeoros. Como os esquemas de duplo momento são mais sofisticados que os de momento simples, tratam alguns processos adicionais como o size-sorting during fall-out e os efeitos dos núcleos de condensação. O tamanho dos hidrometeoros realmente importa, quando a evaporação está sendo computado, assim como a quantidade de aerossóis é importante para a formação de gotas e a subsequentemente na formação de precipitação. Usualmente, as partículas da microfísica possuem velocidades de queda típicas: o Graupel/Hail variam tipicamente entre 5-10 m/s; chuva em torno de 5 m/s; neve 1-2m/s; cristais de gelo 0.5 m/s. Assim, uma partícula poderia deslocar-se para baixo à uma distância superior a uma camada do modelo, se o passo de integração fosse longo. A família de microfísicas WS(D)M têm adotado métodos numéricos lagrangianos para manter o esquema numérico estável. O WDM7 é um esquema de duplo momento que possui 7 espécies de hidrometeoros, onde o hail tem sido incluído. Jang et al. (2021) trabalharam na inclusão de uma relação melhorada entre a velocidade e o diâmetro (ou tamanho) das partículas, assim com a inclusão de uma velocidade terminal ponderada para partículas parcialmente líquidas/parcialmente sólidas (rimmed particles). Vale a pena mencionar que o esquema WSM7 (versão em momento simples) também introduz o hail, a introdução desta espécie é baseada em trabalhos de Tao et al. (2016) e Lang et al. (2014). De acordo com diversos estudos, os esquemas de duplo momento tem se mostrado superior em simular convecção profunda. Deficiências têm sido reportadas ao simular hidrometeoros na fase sólida em precipitação de tempo de inverno e em simular eventos de

precipitação intensa do tipo quente. Entre alguns dos trabalhos anteriores que motivaram os processos implementados na família WS(D)M7 temos: os trabalhos de Kim et al. (2020) notaram que a relação velocidade-diâmetro (V-D) desvia consideravelmente das relações observadas, e quando as relações observadas foram implementadas no modelo a precipitação obtida foi inferior. O trabalho de Dudhia et al. (2008) sugeriram um método para permitir que o graupel e a neve possam existir e impactar o modelo com uma natureza mista, mediante a implementação de uma velocidade ponderada pela massa das espécies em questão, esta inclusão impactou a precipitação de superfície. Por último, Grasso et al. (2014) notaram que modificando o kernel de colisão-coalescência, em particular diminuindo sua eficiência, tem um grande impacto na geração de hidrometeoros, em especial na fase sólida. Grasso et al. (2014) identificaram uma falta de hidrometeoros na fase fria (gelo) ao utilizar o WSM6. Ao implementar uma redução da eficiência de colisão-coalescência do gelo de nuvem pela neve permitiu um acréscimo do gelo de nuvem, principalmente na região da anvil (bigorna) das nuvens convectivas, o que sugeriu formas de melhorar o esquema.

3.4.2 Esquema de microfísica de nuvens de Gregory Thompson

O esquema de microfísica de Gregory Thompson é baseado no esquema de Reisner et al. (1998), sobre este esquema foram realizadas várias modificações. Thompson direcionou o desenvolvimento do esquema de microfísica de nuvens para os processos de relacionados aos núcleos de gelo e núcleos de condensação de nuvens (NCNs). A nucleação de núcleos de gelo foi modificada por Thompson et al. (2004), onde foram testadas várias parametrizações para a obtenção do número de concentração de gelo. Foi constatada que a parametrização em função da supersaturação em relação ao gelo forneceu os melhores resultados.

A formulação do processo de autoconversão de água de nuvens em água de chuva, também foi modificada por Thompson (2004). A nova parametrização do processo de autoconversão foi baseado na parametrização de Walko (1995) e substituiu a formulação de Kessler (1969). A vantagem desta parametrização é

a dependência do diâmetro equivalente médio de gotas de nuvens, que pode ser relacionado ao número de concentração de espectro de gotas de nuvens.

A distribuição de tamanho de neve foi modificada para melhorar o déficit do número de concentração de agregado de neve e o processo de crescimento por deposição. A metodologia utilizada por Thompson et al (2004) parametriza o parâmetro de interceptação da distribuição do tamanho da neve em função da temperatura, que se mostrou superior à parametrização que utilizava a razão de mistura da neve. A função de distribuição do tamanho de agregados de neve também foi modificada, onde a nova função é a soma de uma função exponencial e uma função gama. Esta nova função melhorou o resultado da distribuição exponencial que subestima (superestima) o número de pequenas (grandes) partículas de gelo.

Para parametrizar o parâmetro de interceptação da distribuição do tamanho da gota de chuva utilizou-se uma função de interpolação trigonométrica. Nesta nova parametrização foram utilizados dois limiares para o parâmetro de interceptação da distribuição do tamanho da gota de chuva, onde o valor utilizado é função da tangente hiperbólica da razão de mistura de gotas de chuva e a diferença média destes dois limiares. Isso melhora a transição de chuva fraca (garoa) para chuva de maior intensidade.

Outros parâmetros de coleta e colisão baseados em métodos estocásticos também foram modificados por Thompson et al. (2004). Melhorando a estimativa do número de concentração de alguns hidrometeoros durante a simulação de alguns sistemas precipitantes.

Os últimos desenvolvimentos realizados por Thompson et al. (2015) estão relacionados ao aerossol higroscópico, como um aerossol “amigo da água” (N_{WFA}) e ao aerossol não higroscópico, de nucleação de gelo como “amigo do gelo” (N_{IFA}), embora o último seja considerado, principalmente como poeira. O desenvolvimento inclui em formular as novas equações prognósticas para o número de concentração de gotículas de nuvens N_c , e número de concentração de partículas de aerossóis N_{WFA} e N_{IFA} e os processos microfísicos que modificam estas concentrações. Esta parametrização é muito importante para acoplar a física e dinâmica dos aerossóis com os processos de microfísica de

nuvens em simulações de regiões com grande índice de poluição, queimadas e fontes de poeira.

O número de partículas de poeira que nucleiam em cristais de gelo é determinado seguindo a parametrização de DeMott et al. (2010). Thompson et al. (2015) agregou em intervalos de temperatura de 3 °C um conjunto de dados de número de concentração de núcleos de gelo $N_{IN,Te}$ e número de concentração de aerossóis $N_{IN,Te}$, obtidos de vários estudos para ajustar a relação entre $N_{IN,Te}$ e $N_{aer,0.5}$. Os resultados demonstram que a correlação entre os dados observados de $N_{IN,Te}$ e modelados foram superiores aos obtidos por Meyers et al. (1992) e Murray et al. (2012).

O esquema de microfísica desenvolvido por Thompson et al. (2015) é o mais indicado para modelagem de poluição atmosférica (urbano, agrícola, queimadas etc.) devido ao tratamento de interação com os aerossóis.

3.4.3 Esquema de microfísica de nuvens de Ferrier

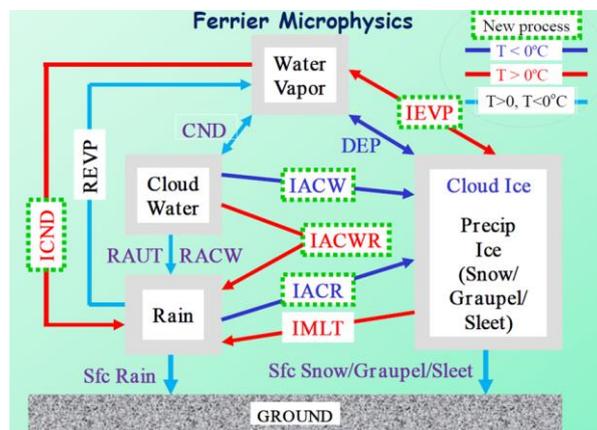
O esquema de microfísica Ferrier (Ferrier, 1994, 1995 e 2005) prevê mudanças no vapor de água e condensado nas formas de água de nuvem, chuva, gelo de nuvem e gelo de precipitação (neve/graupel/granizo). Os hidrometeoros são combinados em condensado total e vapor de água, que são advectados pelo núcleo dinâmico do modelo. Matrizes de armazenamento local retêm informações de uma primeira estimativa da razão de mistura total, e as contribuições de água da nuvem, chuva, gelo de nuvem e gelo de precipitação, de densidade variável, na forma de neve, graupel ou granizo, são diagnosticadas pelo esquema (FERRIER, 2005). As densidades, do gelo de precipitação, são estimadas a partir de uma matriz local, que armazena informações sobre o crescimento total do gelo por deposição de vapor e acréscimo de água líquida. A sedimentação da precipitação é feita na direção do topo para a base do modelo, dividida entre armazenamento local, fração que fica retida na camada, e o que sai pela base da camada, o armazenamento local é proporcional à espessura da camada (ROGERS et al., 2000). Esta abordagem, juntamente com

modificações no tratamento de processos microfísicos rápidos, garante estabilidade para grandes intervalos de tempo (FERRIER, 2005). O tamanho médio do gelo precipitado é assumido como uma função da temperatura, enquanto os processos de fase mista são considerados no intervalo entre 0°C a -40°C (FERRIER, 2005).

A Figura 1 mostra o fluxograma do esquema de Ferrier. As interações e direções dos processos, entre as fases da substância água estão indicadas pelas setas. As linhas azuis escuras indicam processos de fase de gelo, as vermelhas de fase líquida e as azuis claras fase mista.

A Tabela 1 contém uma descrição dos processos que afetam a razão de mistura dos hidrometeoros, a quarta coluna lista os processos, enquanto que, na segunda e na terceira coluna são listados, respectivamente, a fonte e o sumidouro dos hidrometeoros.

Figura 1. Fluxograma do esquema de microfísica de nuvens de Ferrier



Fonte: Ferrier (2005)

Tabela 1. Descrição dos processos de microfísica de nuvens que afetam a razão de mistura dos hidrometeoros.

Symbol	Source	Sink	Process
QCND	q_w q_v	q_v q_w	Condensation (QCND > 0) or evaporation (QCND < 0) of cloud water
QXEVP	q_v	q_x	Evaporation of rain and wet ice ($x = r, s, g, h$)
QINT	q_i	q_v	Nucleation of small ice
QXDEP	q_x q_v	q_v q_x	Deposition (QXDEP > 0) or sublimation (QXDEP < 0) of ice ($x = i, s, g, h$)
QIFM	q_i q_w	q_w q_i	Cloud water freezing (QIFM > 0) or melting of small ice (QIFM < 0)
QXFM	— q_{xw}	q_{xw} —	Freezing of liquid water on wet ice (QXFM > 0), melting of precipitation ice (QXFM < 0; $x = s, g, h$)
QXSHD	q_r	q_x	Raindrop shedding from wet ice ($x = s, g, h$)
QICNVS	q_x	q_i	Conversion of small ice to snow
QIHR	q_i	q_w	Hobbs–Rangno freezing of cloud water
QIHMX	q_i	q_x	Hallett–Mossop rime splintering of ice ($x = s, g, h$)
QRAUT	q_r	q_w	Cloud water autoconversion to rain
QXACW	q_x	q_w	Collection of cloud water ($x = r, i, s, g, h$)
QXACI	q_x	q_i	Collection of small ice ($x = r, s, g, h$)
QXACS	q_x	q_s	Collection of snow ($x = g, h$)
QIACR	q_h	q_r	Raindrop freezing by collection of small ice
QHACR	q_h	q_r	Collection of rain by frozen drops/hail
QXACRY	q_y	q_r	Raindrop freezing by collisions with q_x particles to form q_y particles ($x = s, g, h; y = s, g, h$)
QRACXY	q_y	q_x	Conversion from q_x particles to q_y particles by raindrop freezing ($x = s, g; y = g, h$)
QXACWY	q_y	q_w	Cloud water riming onto q_x particles to form q_y particles ($x = s, g; y = s, g, h$)
QWACXY	q_y	q_x	Conversion from q_x particles to q_y particles by cloud water riming ($x = s, g; y = g, h$)

Fonte: Ferrier (1994)

No esquema de Ferrier, as distribuições de tamanho para todas as categorias de hidrometeoros, gotas e gelo, são representadas pela função gama, representada pela equação abaixo:

$$n_x(D) = n_{0x} D_x^{\alpha_x} \exp(-\lambda_x D_x)$$

onde,

D é o diâmetro da gota, n_{0x} representa o parâmetro de interceptação, λ_x a inclinação, e α_x parâmetro de forma da distribuição.

A seguir, como descritas em Huang e Mielikainen (2012), seguem as equações utilizadas pelo esquema de microfísica de Ferrier para os processos envolvendo a substância água. Uma descrição completa dos processos e as equações associadas podem ser encontradas no Appendix B em Ferrier (1994).

No processo de condensação de nuvens, o esquema usa o algoritmo proposto por Assai (1965) e é expressa por:

$$Cb = \frac{q - q_s}{(1 + 3,148 \times 10^6 - 2370T) \left(\frac{q_s}{T^2}\right)}$$

onde T é a temperatura em Kelvin, q a umidade específica e q_s a umidade específica de saturação.

A taxa de evaporação E_c , se assumirmos que o processo de evaporação ocorre em um intervalo de tempo, é determinada por:

$$E_c = \frac{q_s(f_0 - f)}{\Delta t}$$

onde, q_s é a umidade específica de saturação, f_0 é o valor crítico da umidade relativa para condensação, f é a relativa umidade, e Δt o intervalo de tempo de chamada do esquema.

No código do modelo, o parâmetro umidade relativa crítica f_0 foi implementado através de uma função que leva em consideração a resolução horizontal do modelo,

expressa por:

$$f_0 = 0,90 + 0,08 \sqrt{\left(\frac{(100 - \text{MIN}(100, \text{MAX}(5, d_x)))}{95}\right)}$$

Onde d_x representa a resolução horizontal do modelo, assumindo os valores de $f_0 = 0,90$ para resoluções horizontais maiores ou iguais a 100km e $f_0 = 0,98$ para resoluções horizontais menores ou iguais a 5km.

A evaporação da chuva é permitida neste esquema em pontos, onde a umidade relativa $f < f_0$ e é calculada usando a equação:

$$Err = k_e(f_0 - f)(P_r)^\beta$$

Onde k_e e β são parâmetros determinados empiricamente, P_r é a taxa de precipitação.

A evaporação da neve em pontos com umidade relativa $f < f_0$ é calculada usando a equação:

$$E_{rs} = k_e(C_{rs1} + C_{rs2}(T - 273.15)) \left(\frac{f_0 - f}{f_0} \right) P_s$$

onde, $C_{rs1} = 5 \times 10^{-6} m^2 kg^{-1} s^{-1}$, $C_{rs2} = 6,67 \times 10^{-10} m^2 K^{-1} s^{-1}$ e P_s a taxa de precipitação da neve.

A autoconversão da água da nuvem em chuva, P_{raut} , pode ser parametrizada a partir da taxa de mistura de água da nuvem m e da cobertura de nuvem b , expressa por:

$$P_{raut} = c_0 m \left(1 - \exp \left(- \left(\frac{m}{m_r b} \right) \right) \right)$$

onde as constantes c_0 e m_r são, respectivamente, $1,0 \times 10^{-4} s^{-1}$ e $3,0 \times 10^{-4}$

A autoconversão de gelo em neve é calculada usando a equação:

$$P_{saut} = a_1 (m - m_{i0})$$

Onde m_{i0} é o limite, da taxa de mistura de gelo de nuvem, para início da produção de neve a partir do gelo de nuvem, a_1 é definido em função da temperatura dado por:

$$a_1 = 10^{-3} \exp(0,025(T - 273,15))$$

Em regiões onde coexistem água de nuvem e chuva, o acréscimo de água de nuvem pela chuva, P_{racw} , é expressa como:

$$P_{racw} = C_r m P_r$$

onde C_r é o coeficiente de coleta.

O processo de coleta de gelo de nuvem pela neve é definido de forma similar ao processo de coleta de água de nuvem e é definido como:

$$P_{saci} = C_s m P_s$$

onde P_s é a taxa de precipitação da neve, C_s é definida em função da temperatura e é expressa por:

$$C_s = 1,25 \times 10^{-3} \exp(0,025(T - 273,15))$$

Semelhante à coleta de água da nuvem pela chuva, a coleta da água da nuvem pelo derretimento da neve é proporcional à taxa de mistura de água da nuvem m e a taxa de precipitação da neve P_s , ou seja:

$$P_{sacw} = C_r m P_s$$

A primeira aproximação do processo de fusão é parametrizada em função da temperatura e da taxa de precipitação da neve, definida pela equação:

$$P_{sml} = C_{sm} (T - 273,15)^\alpha P_s$$

Onde os valores dos parâmetros são definidos como: $C_{sm} = 5,0 \times 10^{-8} m^2 kg^{-1} K^{-2} s^{-1}$ e $\alpha = 2$

A taxa de derretimento da neve pode ser calculada a partir da equação:

$$P_{sm2} = C_{ws} P_{sacw}$$

onde, $C_{ws} = 0.025$

Em testes de sensibilidade, Efstathiou, et al. (2013) utilizando o modelo WRF simularam um evento extremo de precipitação sobre a península de Chalkidiki, região norte da Grécia. Para este estudo, utilizaram dois esquemas de camada limite planetária, Yonsei University YSU (HONG et al., 2006) e Mellor-Yamada-Janjic MYJ (JANJIC, 2002), e três esquemas de microfísica de nuvens, Purdue Lin (CHEN; SUN, 2002), WRF Single Moment-6 class (HONG; LIM, 2006; DUDHIA et al., 2008) e microfísica Eta-Ferrier (FERRIER et al., 2002). Os resultados indicaram que as configurações que utilizaram o esquema de camada limite planetária YSU indicaram os melhores scores, para precipitações intensas utilizando o esquema de microfísica Eta, enquanto que os acumulados em 24h foram melhores representados em conjunto com o esquema Purdue Lin. Huang e Mielikainen (2012), implementaram no modelo WRF, utilizando GPU, uma abordagem para aceleração do esquema microfísico Eta Ferrier. A GPU

utilizada para o desenvolvimento e testes foi a NVIDIA GTX590. Usando a transferência de dados assíncrona e acesso à memória não coalescente, obtiveram um aumento de velocidade de 37 vezes, quando comparado com uma única CPU. Entretanto, os autores fazem a ressalva de que, o esquema microfísico é apenas um módulo intermediário, portanto, o GPU I/O não deve ocorrer, por consequência, os dados de entrada devem estar disponíveis na memória global da GPU, para uso posterior por outros módulos. Nos testes, onde os dados estão disponíveis na memória global, o aumento de velocidade encontrado foi de 272 vezes, em relação a uma única CPU. Essa abordagem, de aceleração do esquema utilizando GPU, credencia o esquema de microfísica Ferrier para o uso em previsões em horizontes climáticos.

3.4.4 Esquema de microfísica de nuvens de Morrison

Os esquemas conhecidos como microfísica de Morrison, são uma família de esquemas para parametrizar os processos físicos de mudança de fase que ocorrem dentro das nuvens, sejam quentes, mistas ou frias.

Esta família de esquemas começou seu desenvolvimento com o esquema de Morrison et al. 2005 (M2005), onde é apresentada uma microfísica de dois momentos tanto para modelos de alta resolução, como CRM (em inglês, cloud resolving model) e LES (em inglês, large eddy simulation), assim como modelos de circulação global (MCG) ou de larga escala.

O esquema de alta resolução utiliza uma equação prognóstica para supersaturação, que leva em conta difusão de vapor em gotas, o resfriamento diabático (radiativo) e o resfriamento adiabático, causado pela velocidade vertical da parcela, que em esquemas de alta ordem é resolvida. Uma vez obtido o campo de supersaturação, a teoria de nucleação de Kohler pode ser aplicada para uma determinada distribuição de aerossóis.

Contrariamente, no esquema para alta resolução, o campo supersaturado é diagnóstico, a supersaturação não é resolvida e é assumida como zero. A velocidade vertical é parametrizada com os parâmetros da camada limite atmosférica, usando um fechamento de primeira ordem. Consequentemente, a

condensação de gotas é feita como o método do ajuste quase-estacionário da saturação onde o excesso de vapor (supersaturação) é convertido instantaneamente em água e é usado para calcular a taxa de condensado. Para evaporação/deposição, o método da difusão não estacionária do vapor é usado.

O esquema M2005, tanto para alta e baixa resolução, resolve 4 espécies de hidrometeoros, sendo água, gelo, chuva e neve. Uma vez que é um esquema de dois momentos existem 8 equações prognósticas, tanto para razão de mistura como para o número de concentração. O uso de dois momentos melhora a representação da distribuição do espectro do tamanho dos hidrometeoros, melhorando a transferência radiativa.

M2005 usa parametrizações existentes para:

- 1- Coleção de hidrometeoros (BEHENG, 1994);
- 2- Fusão e solidificação (YOUNG, 1974);
- 3- Autoconversão (HARRINGTON et al., 1995);
- 4- Multiplicação do Gelo (HALLET; MOSSOP, 1974);

E propõe modificações para:

- 1- Supersaturação prognóstica,
- 2- Ativação de gotas,
- 3- Nucleação do gelo: Heterogênea e Homogênea,
- 4- Índice espectral.

Para ambos esquemas todos os hidrometeoros são representados por esferas, também as taxas de nucleação homogênea e heterogênea do gelo usam a teoria de Khvorostyanov e Sassen (1998).

Morrison et al. (2005-2), realiza os testes do esquema M2005 usando o modelo unidimensional ARCSCM (em inglês, Arctic Single Column Model, MORRISON et al., 2003) para simular as nuvens e a radiação observada no Ártico, medidas durante o período 1 Abril–15 Maio de 1998 pelas campanhas experimentais SHEBA (em inglês, the Surface Heat Budget of the Arctic) e FIRE–ACE (em

inglês, Experiment–Arctic Clouds Experiment), e dados do projeto ISCCP (em inglês, International Satellite Cloud Climatology Project Regional).

Modelos de uma coluna representam um único ponto de grade de um MCG, permitindo uma primeira avaliação rápida e pouco custosa das parametrizações físicas, sem as complicações da dinâmica de larga escala, possibilitando testar diferentes parâmetros para ajustar a parametrização. Uma vez que os primeiros testes sejam feitos e o esquema mostre-se satisfatório, a implementação no modelo 3D é o seguinte passo.

Parâmetros como o caminho líquido de água e a fase da nuvem foram melhorados significativamente com o novo esquema M2005 em relação a esquemas de um único momento. Os resultados indicaram um tratamento realista da concentração em número do gelo, uma vez que é prognóstico.

Em 2008, Morrison e Gettelman (2008) (MG2008), propõe novas modificações para implementar o esquema M2005 como o modelo de microfísica de nuvens estratiformes de dois momentos no modelo CAM3 (em inglês, Community Earth System Model-The atmospheric component). O novo esquema passa a revolver prognosticamente gotas e gelo de nuvem, entretanto a chuva e a neve passam a ser diagnosticadas. Usar a precipitação diagnóstica permite usar o passo temporal maior, uma vez que a condição de estabilidade numérica (CFL) é limitado pela sedimentação.

Outra grande modificação proposta por MG2008 é o tratamento explícito da água de nuvem sub-malha, usada para calcular taxas processos da microfísica, usando funções de distribuição probabilísticas (PDFs). As PDFs são muito usadas para representar variabilidade de água de nuvem, uma vez que são variáveis difíceis de serem medidas.

No esquema são usadas PDFs de nuvens estratiformes acima da camada limite marinha. Seu uso para outras nuvens é incerto, mas é melhor que definição de parâmetros arbitrários para melhorar os processos individuais. O esquema propõe que essas PDFs podem ser obtidas de campanhas observacionais ou usando esquemas de alta resolução como LES/CRM.

Gettelman e Morrison (2014) (MG2014) modificaram o esquema MG2008 propondo usar a precipitação prognóstica. MG2014 propõem uma nova arquitetura do código, onde modificam métodos numéricos de solução na integração das taxas.

Este esquema é avaliado novamente no modelo 1D do CAM5 SCAM, e uma vez comprovados os bons resultados é implementado na versão disponível do CAM5, (GETTELMAN; MORRISON, 2014-2). A implementação do modelo SCAM no CAM5 mostraram que a nova microfísica consegue simular o caso de chuva restrita de nuvens stratocumulus.

Os esquemas Morrison et al. (2005) e Morrison e Gettelman (2008; 2014) são os resultados de anos de aprimoramento das parametrizações físicas de mudança de fase dentro das nuvens. O aprimoramento contínuo de um único esquema desenvolvido no ano 2005 (M2005), disponível para duas resoluções, junto com o amplo uso de modelos unidimensionais levou a novas versões que ao passar dos anos foram sendo aperfeiçoadas, como é o caso da versão de 2008 implementada no MCG CAM3, e disponível nas versões CAM5. A versão mais moderna de 2014 foi implementada no modelo operacional BAM em 2014.

Assim, para uma correta implementação e uso de qualquer esquema de microfísica, é necessário um conhecimento amplo do esquema, uso de ferramentas como modelos de alta resolução e modelos de uma coluna, para uma ótima implementação no novo modelo do CPTEC, MONAN. Passos estão sendo dados nesta direção no grupo de modelagem atmosférica da DIMNT, porém é necessário um melhor planejamento de desenvolvimento, definição de metodologias dos processos e testes das parametrizações.

4 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS MAIS AMPLAS

Este workshop em torno do tema de microfísica de nuvens foi esclarecedor em relação aos desafios em selecionar as formulações atuais que podem vir a compor a base inicial das suítes de parametrizações físicas do MONAN. Vários aspectos devem ser considerados nesta escolha que envolve um delicado balanço de complexidade da formulação, quantidade de processos físicos envolvidos e o seu custo computacional. Em um ambiente em que o uso e ocupação do solo é modificado e, portanto, tem o potencial de alterar as características e concentrações naturais de aerossóis de uma dada região, formulações que envolvem explicitamente prognóstico em número (duplo momento, 2M) podem ser necessárias, apesar de seu maior custo computacional. Da mesma forma, aplicações que envolvem poluição do ar e ciclos biogeoquímicos, os processos de formação e remoção de aerossóis requerem formulações em 2M. Em aplicações de previsão de tempo severo, envolvendo chuvas intensas por nuvens convectivas com fase de gelo, complexidade em termos de tipos de hidrometeoros também é requerido. Como exemplo, a previsão de queda de granizo é relevante para a mitigação de danos materiais e mesmo proteção das pessoas e outros seres vivos.

Por outro lado, aplicações de previsão do clima em escalas temporais mais longas (meses a anos), requerendo domínios espaciais globais, podem facilmente inviabilizar o uso de tal nível de sofisticação de formulação da microfísica de nuvens.

Aspectos outros relevantes na escolha da formulação são àqueles associados, por exemplo, à assimilação de dados. A aplicação em previsão de tempo severo em escala temporal de horas requer a funcionalidade de assimilar dados de radares meteorológicos e converter consistentemente essas informações em conteúdos de hidrometeoros para a iniciação do estado de microfísica de nuvens do MONAN.

Um adicional aspecto a ser considerado é o acoplamento entre o esquema de radiação e o de microfísica através dos raios efetivos, caminho óptico e fração

de ocupação na célula computacional dos hidrometeoros. Estes são fatores fundamentais na simulação do balanço radiativo do planeta e, portanto, para as questões de tempo e clima, incluindo os aspectos de ciclo hidrológico e aquecimento global.

Aspectos de qualidade e eficiência de software e adequação para diferentes arquiteturas computacionais não são menos importantes como critérios de definição inicial das formulações candidatas. O Grupo de Computação Científica no âmbito da colaboração existente com a comunidade nacional (por exemplos, o Laboratório Nacional de Computação Científica e a UNIFESP de São José dos Campos) estará a cargo de produzir versões de códigos em arquiteturas tradicionais baseadas em CPU's bem como em GPUs.

Das discussões ocorridas no workshop emanaram os seguintes tópicos como necessários e prioritários:

- a) Formação de técnicos e pesquisadores qualificados na área de modelagem de microfísica de nuvens;
- b) Criação de um curso de modelagem numérica em microfísica de nuvens na pós-graduação em Meteorologia do INPE;
- c) Para a difusão de conhecimento concluiu-se que há necessidade de realização anual de WorkShops e Cursos de modelagem e aplicação da parametrização de microfísica de nuvens em diferentes escalas;
- d) Colaboração com outros grupos nacionais e internacionais que trabalham com microfísica de nuvens, com o objetivo de troca de informações e dados para melhorar o desenvolvimento da parametrização de microfísica para as condições atmosféricas sobre a América do Sul;
- e) A curto prazo, não será investido no desenvolvimento de uma parametrização de microfísica que resolva todas as escalas;
- f) Considerando todos os esquemas apresentados neste relatório, seu uso nos diferentes modelos meteorológicos e o escopo de trabalho do modelo MONAN, recomenda-se ter um **esquema de alta resolução** que cumpra com as características apropriadas para previsão de tempo (11 dias) e nowcasting (previsão do tempo em um período de mesoescala de prazo muito curto de até 6 horas) e um **esquema de**

baixa resolução para previsão sub-sazonal, sazonal e cenários climáticos;

- g) Definir um responsável para os futuros avanços na definição do esquema de microfísica para o MONAN. Este responsável deve levar uma discussão mais ampla dos diferentes esquemas apresentados, podendo ser promovido outros workshop ou treinamentos nas parametrizações apresentadas;
- h) Parte do desenvolvimento dos esquemas apresentados se fez uso de modelos unidimensionais. Desta forma, para uma escolha adequada da microfísica do novo modelo do CPTEC, MONAN, se recomenda contar com um modelo unidimensional, para posterior desenvolvimentos e pesquisas;

Por fim, recomenda-se a continuação desta discussão para melhor delimitar e definir as parametrizações de microfísica de nuvens que irão compor as suítes físicas do MONAN.

5 REFERÊNCIAS

ASAI, T. A numerical study of air-mass transformation over the Japan sea in winter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 43, 1-15, 1965.

Beheng, K. D. A parameterization of warm cloud micro- physical conversion processes. *Atmos. Res.*, 33, 193–206, 1994.

CHEN, S.-H.; SUN, W.-Y. A one-dimensional time dependent cloud model. *J. Meteorol. Soc. Jpn* 80, 99–118, 2002.

DEMOTT, P. J. et al. Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate. *Proc.Natl. Acad. Sci. USA*, 107, 11 217–11 222, 2010.

DUDHIA, J.; HONG, S.-Y.; LIM, K.-S. A new method for representing mixed-phase particle fall speeds in bulk microphysics parameterizations. *J. Meteorol. Soc. Jpn* 86A, 33–44, 2008.

DUDHIA, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *J. Atmos. Sci.*, 46, 3077-3107, 1989.

EFSTATHIOU, G.A.; ZOUMAKIS, N.M.; MELAS, D.; LOLIS, C.J.; KASSIMENOS, P. Sensitivity of WRF to boundary layer parameterizations in simulating a heavy rainfall event using different microphysical schemes. Effect on large-scale process. *Atmospheric Research*, 132-133, 125-143, 2013.

FERRIER, B. S. A double-moment multiple-phase four-class bulk ice scheme. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, 51, 249–280, 1994.

FERRIER, B. S. et al . A Double-Moment Multiple-Phase Four-Class Bulk Ice Scheme. Part II: Simulations of Convective Storms in Different Large-Scale Environments and Comparisons with other Bulk Parameterizations. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1001-1033, 1995.

FERRIER, B.S.; JIN, Y.; LIN, Y.; BLACK, T.; ROGERS, E.; DIMEGO, E. Implementation of a new grid-scale cloud and precipitation scheme in the NCEP Eta Model. 19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting/15th Conf. on Numerical Weather Prediction, San Antonio, TX: Amer. Meteor. Soc., pp. 280–283, 2002.

FERRIER, B. S. An efficient mixed-phase cloud and precipitation scheme for use in operational NWP models, *Eos Trans. AGU*, 86(18), Jt. Assem. Suppl., A42A- 02, 2005.

GRASSO, L.; LINDSEY, D.T.; LIM, K.-S.S.; CLARK, A.; BIKOS, D.; DEMBEK, S.R. Evaluation of and Suggested Improvements to the WSM6 Microphysics in WRF-ARW Using Synthetic and Observed GOES-13 Imagery. *Mon. Weather Rev.* 142, 3635–3650, 2014.

GETTELMAN, A.; MORRISON, H. Advanced Two-Moment Bulk Microphysics for Global Models. Part I: Off-Line Tests and Comparison with Other Schemes. *J. Climate*, 28, 1268–1287, 2014.

GETTELMAN, A.; MORRISON, H.; SANTOS, S. Bogenschutz, P.; Caldwell, P. M. Advanced Two-Moment Bulk Microphysics for Global Models. Part II: Global Model Solutions and Aerosol–Cloud Interactions. *J. Climate*, 28, 1288–1307, 2014.

HALLET, J.; MOSSOP, S. C. Production of secondary ice particles during the riming process. *Nature*, 249, 26–28, 1974.

HARRINGTON, J. Y.; MEYERS, M. P.; WALKO, R. L.; COTTON, W. R. Parameterization of ice crystal conversion process due to vapor deposition for mesoscale models using double-moment basis functions. Part I: Basic formulation and parcel model results. *J. Atmos. Sci.*, 52, 4344–4366, 1995.

HONG, S.-Y.; LIM, J.-O.J. The WRF Single-Moment 6-Class microphysics scheme (WSM6). *J. Korean Meteorol. Soc.* 42, 129–151, 2006.

HONG, S.-Y.; NOH, Y.; DUDHIA, J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon. Weather Rev.* 134, 2318–2341, 2006.

HONG S.-Y.; LIM, K.-S. S.; LEE, Y.-H.; HA, J.-C.; KIM, H.-W.; HAM, S.-J.; DUDHIA, J. Evaluation of the WRF double moment 6-class microphysics scheme for precipitation convection. *Advances in Meteorology*, 2010.

Hong S.-Y.; Lim, J.-O. J. The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6). *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42, p. 129-151, 2006.

HUANG, M. et al. On the acceleration of the Eta Ferrier Cloud Microphysics Scheme in the Weather Research and Forecasting (WRF) Model using a GPU. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012.

JANJIC, Z.I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Mesoscale model. NCEP Office Note No. 437. NOAA/NWS61, 2002.

JANG, S.; LIM, K.-S. S.; KO, J.; KIM, K.; LEE, G. W.; CHO, S.-J.; AHN, K.-D.; LEE, Y.-H. Revision of WDM7 microphysics scheme and evaluation for precipitation convection over the Korean peninsula. Remote Sens., 13, 3860, 2021.

KESSLER, E. On the Distribution and Continuity of Water Substance in Atmospheric Circulations. Meteor. Monogr., No. 32, Amer. Meteor. Soc., 84 pp, 1969.

KHVOROSTYANOV; SASSEN. K. Cirrus cloud simulation using explicit microphysics and radiation. Part I: Model description. J. Atmos. Sci., 55, 1808–1821, 1998.

KIM, D.-S.; LIM, K.-S.S.; KIM, K.-I.; LEE, G.-W. Effects of the Realistic Description for the Terminal Fall Velocity-Diameter Relationship of Raindrops on the Simulated Summer Precipitation over South Korea. Atmosphere, 30, 421–437, 2020.

LANG, S.; TAO, W.-K.; CHERN, J.-D.; WU, D.; LI, X. Benefits of a Fourth Ice Class in the Simulated Radar Reflectivities of Convective Systems Using a Bulk Microphysics Scheme. J. Atmos. Sci. 2014, 71, 3583–3612, 2014.

LIN, Y.-L.; RARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. J. Appl. Meteor., 22, 1065-1092, 1983.

MEYERS, M.P.; DEMOTT, P.J.; COTTON, W.R. New primary ice nucleation parameterizations in an explicit cloud model, *J. Appl. Meteorol*, 31, 708–721, 1992.

MURRAY, B. J.; O’SULLIVAN, D.; ATKINSON, J. D.; WEBB, M. E. Ice nucleation by particles immersed in supercooled cloud droplets. *Chem. Soc. Rev.*, 41, 6519–6554, 2012.

MORRISON, H.; VAN LIER-WALQUI, M.; FRIDLIND, A. M.; GRABOWSKI, W. W.; HARRINGTON, J. Y.; HOOSE, C. et al. Confronting the challenge of modeling cloud and precipitation microphysics. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 12, e2019MS001689, 2020.

Morrison, H.; Curry, J. A.; Khvorostyanov, V. I. A new double-moment microphysics scheme for application in cloud and climate models. Part I: Description. *J. Atmos. Sci.*, 62, 1665–1677, 2005.

MORRISON, H.; CURRY, J. A.; SHUPE, M. D.; ZUIDEMA, P. A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part II: Single-column modeling of Arctic clouds. *Journal of the atmospheric sciences*, 62(6), 1678-1693, 2005.

MORRISON, H.; GETTELMAN, A. A new two-moment bulk stratiform cloud microphysics scheme in the community atmosphere model, version 3 (CAM3). Part I: Description and numerical tests. *Journal of Climate*, 21, 3642–3659, 2008.

REISNER, J.; RASMUSSEN, R. M.; BRUINTJES, R. T. Explicit forecasting of supercooled liquid water in winter storms using the MM5 mesoscale model. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 124, 1071–1107, 1998.

ROGERS, E., BLACK, T., COLLINS, W.; MANIKIN, G.; MESINGER, F.; PARRISH, D. AND DIMEGO, G. Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System : Assimilation of satellite radiances and increase in resolution.

NWS Technical Procedures Bulletin No.473. [Available at <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/eta22tpb/> or from the National Weather Service, Office of Meteorology, 1325 East-West Highway, Silver Spring, MD 20910], 2000.

RUTLEDGE, S. A.; HOBBS, P. V. The mesoscale and microscale structure and organization of clouds and precipitation in midlatitude cyclones Part VIII: A model for the “seeder feeder” process in warm-frontal rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 40, 1185-1206, 1983.

SEIFERT, A. Uncertainty and complexity in cloud microphysics. InProc. ECMWF Workshop on Model Uncertainty, Reading, United Kingdom, ECMWF, 2011.

TAO, W.-K.; MONCRIEFF, M.W. Multiscale cloud system modeling. *Rev. Geophys.*, 47, RG4002, 2009.

TAO, W.-K.; WU, D.; LANG, S.; CHERN, J.-D.; PETERS-LIDARD, C.; FRIDLIND, A.; MATSUI, T. High-resolution NU-WRF Simulations of a Deep Convective Precipitation System during MC3E: Further Improvements and Comparisons between Goddard Microphysics Schemes and Observations. *J. Geophys. Res.* 2016, 121, 1278–1305, 2016.

THOMPSON, G.; RASMUSSEN, R. M.; MANNING, K. "Explicit Forecasts of Winter Precipitation Using an Improved Bulk Microphysics Scheme. Part I: Description and Sensitivity Analysis". *Monthly Weather Review* 132.2, 2004.

THOMPSON, G.; FIELD, P. R.; RASMUSSEN, R. M.; HALL, W. D. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Monthly Weather Review*, 136, 5095-5115, 2008.

THOMPSON, G.; EIDHAMMER, T. "A Study of Aerosol Impacts on Clouds and Precipitation Development in a Large Winter Cyclone", *Journal of the Atmospheric Sciences* 71, 10 (2014): 3636-3658, accessed Jan 23, 2023.

WALKO, R. L., COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. *Atmos. Res.*, 38, 29–62, 1995.

WALKO, R. L.; COTTON, W. R.; MEYERS, M. P.; HARRINGTON, J. Y. New RAMS cloud microphysics parameterization. Part I: The single-moment scheme. *Atmos. Res.*, 38, 29–62, 1995.

YOUNG, K. C. The role of contact nucleation in ice phase initiation in clouds. *J. Atmos. Sci.*, 31, 768–780, 1974.