



Universidade de São Paulo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas Departamento de Ciências Atmosféricas

Paulo Maurício Moura de Souza

Características 3D das Tempestades Elétricas na Região de Manaus

São Paulo

Paulo Maurício Moura de Souza

Características 3D das Tempestades Elétricas na Região de Manaus

Dissertação apresentada ao Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Carlos Augusto Morales Rodriguez

"Versão corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade."

São Paulo

2016

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por inúmeros motivos, até mesmo pela dádiva de eu saber reconhecer toda a ajuda e apoio que tive ao longo dessa jornada, na qual dedico esta página.

Aos meus pais Claudia Moura e Eládio Souza, por terem me motivado, aconselhado, ajudado e me amado, não apenas durante esta fase, mas durante toda a minha vida. A minha irmã Tayama Moura, por me incentivar, pelo seu carinho, companheirismo e por estar sempre comigo. A minha avó Glória Moura, por todo o seu carinho e preces. A Kátia Damasceno, por todo o seu carinho, ajuda, companheirismo e incentivo que tive ao longo desta jornada.

Ao meu grande tio e amigo Silvano Moura (em memória) por me incentivar e por ter estado sempre disposto a me ajudar.

Ao professor Dr. Carlos Augusto Morales Rodriguez por sua imensa paciência, atenção, compreensão e acolhimento, na qual sem ele eu não conseguiria terminar este trabalho.

Aos professores Dra. Rita Andereolli e Dr. Rodrigo Souza, por terem me incentivado a fazer este mestrado.

Aos grandes amigos que fiz em São Paulo, Flávio Oliveira, Gabriel Costa e Glauber Camponogara, que me deram muito incentivo e ajuda, além da da companhia que me fizeram ao longo desta fase.

Aos amigos da turma: Bionídio, Eliazar, Cristina, Kátia, Alexandre, Odete e Mirian, pela companhia, conversas, ajudas e histórias compartilhadas.

Aos meus amigos de infância Nelson Filho e Djalma Souza, pelo incentivo, companhia, conversas e por estarem sempre comigo independente se estou perto ou longe.

Aos meus amigos da UEA (Universidade do Estado do Amazonas): Luan Rogério, Cíntia Sarkis, Nikolai Espinoza, Leonardo Vergasta, Weslley Brito, Rafael Barbosa, Guilherme Figliolo, Thales, Frank Menezes e Amne Fredó, pelo incentivo, companhia e por terem mantido a amizade mesmo longe.

Resumo

Este estudo analisou a severidade das tempestades elétricas na região de Manaus durante o período de 2009 a 2011 a partir dos dados da rede de detecção de raios STARNET (Sferics Timing And Ranging NETwork) e do radar meteorológico Doppler Banda S do SIPAM de Manaus. As tempestades foram classificadas de acordo com a taxa diária de raios definida pela técnica dos percentis, como: 1º classe (0-25%) - atividade elétrica baixa (0 a 686 raios), 2º classe (25-75%) - moderada (687 a 6.385 raios), 3° classe (75-90%) - alta (6.386 a 14.370 raios) e 4° classe (>90%) - severa (> 14370 raios). Além da classificação de severidade, as tempestades elétricas foram analisadas em função de 3 estações do ano: seca (JJA - junho, julho e agosto), transição entre a estação seca e chuvosa (SON - setembro, outubro e novembro) e chuvosa (DJF - dezembro, janeiro e fevereiro). Baseado nestas classificações pode-se destacar que: A estação seca teve 146 dias com tempestades elétricas, sendo que a 1° classe - teve um total de 26 dias e uma taxa de raios média de 353,4 raios.dia-1 com uma densidade de 0,13 raios.km-2; a 2° classe - teve um total de 70 dias e uma taxa de raios média de 2.756 raios.dia-1 e densidade de 2.73 raios.km⁻²; a 3° classe - teve um total de 24 dias e uma taxa de raios média de 9.330 raios.dia⁻¹ e densidade de 3,16 raios.km⁻²; já a 4° classe - teve um total de 24 dias e uma taxa de raios média de 28.911 raios.dia-1 e uma densidade de 9,8 raios.km⁻². Para a estação de transição tivemos 172 dias com tempestades elétricas, sendo que a 1° classe - teve um total de 43 dias com uma taxa de raios média de 282,7 raios.dia⁻¹ e uma densidade de 0,17 raios.km⁻²; a 2° classe - teve um total de 73 dias e uma taxa média de raios de 2.686 raios.dia-1 e uma densidade de 2,77 raios.km⁻²; a 3° classe - teve um total de 32 dias e uma taxa média de 9.754 raios.dia-1 e densidade de 4,41 raios.km-2; já a 4° classe - teve um total de 24 dias e uma taxa de raios média de 31.879 raios.dia-1 e densidade de 10,8 raios.km⁻². Já a estação chuvosa teve 142 dias com tempestades elétricas, sendo que na 1° classe - teve um total de 40 dias com uma taxa de raios média de 282,7 raios.dia-1 e densidade de 0,16 raios.km-2; 2° classe - teve um total de 81 dias com uma taxa média de raios 2.544 raios.dia-1 e densidade de 2,91 raios.km⁻²; 3° classe - teve um total de 13 dias e uma taxa de raios média de 7.846 raios.dia-1 e densidade de 1,44 raios.km-2; já a 4° classe - teve um total de 8 dias e uma taxa média de raios de 23.468 raios.dia-1 e densidade de 2,65 raios.km⁻². As tempestades elétricas tiveram maior atividade de raios entre as 17:00 e 20:00 UTC (13-16 hora local) sendo que a densidade média de raios foi de 1,62 raios.km⁻².hora⁻¹ durante a estação de transição, 1,5 raios.km⁻².hora⁻¹ na estação seca e finalmente 0,37 raios.km⁻².hora⁻¹ na estação chuvosa. Neste intervalo de tempo também foi observado as maiores frequências de chuva e extensões verticais, independente da classe e da estação. Entretanto, para as tempestades severas, 4º classe, a fração de chuva associada à 20 dBZ em 2 km apresentou características diferentes, ou seja: uma fração diária média de 12,3 %.hora-1 durante a estação chuvosa; 9 %.hora-1 durante a estação de transição e 5,6 % hora-1 durante a estação seca. Já os topos das tempestades definidas pelas refletividades do radar de 35 e 40 dBZ chegaram a 18 km de altura na estação de transição. Os campos médios de temperatura indicaram que a estação de transição tinha a atmosfera mais quente quando comparada com as demais. No campo de vento em 850 mb, o fluxo era mais de nordeste durante a estação de transição e chuvosa e de leste na estação seca. Em 500 mb os ventos foram de leste para todas as estações, sendo mais intensos durante a estação seca e menos intensos durante a estação chuvosa. Em 250 mb, todas as estações apresentaram circulações anti-ciclonicas sobre a região de Manaus.

Abstract

Based on lightning measurements from Sferics Timing And Ranging Network (STARNET) and 3D rainfall observations from the SIPAM Doppler S Band weather radar from 2009 and 2011, this study analyzed the thunderstorm severity in the Amazon Region of Manaus. The thunderstorms were classified according to its daily lightning activity and season of occurrence. Percentile analysis were used to define the thunderstorm severity as: 1st class (0-25%) low lightning activity (0 to 686 strokes), 2nd class (25-75%) – moderate (687 to 6,385 strokes), 3rd class (75-90%) – high (6,386 to 14,370 strokes) e 4th class (>90%) - severe (> 14,370 strokes). The lightning activity is mainly concentrated in 3 seasons: dry (June, July and August), transition from dry to wet season (September, October and November), and wet season (December, January and February). Based on these classifications it was found: The dry season had 146 thunderstorms day, where the first class had 26 days with thunderstorms with a mean flash rate (FR) of 353.4 strokes.dia-1 and a mean density flash rate (DR) of 0.13 strokes.km⁻²; the second class had 70 days with thunderstorms with FR of 2.756 strokes.day-1 and DR of 2.73 strokes.km-2; the third class had 254 thunderstorms days with FR of 9,330 strokes.day⁻¹ and DR of 3.16 strokes.km⁻²; the fourth class had 26 thunderstorm days with FR of 28,911 strokes.day⁻¹ and DR of 9,8 strokes.km⁻². For the transition season it was found 172 days with thunderstorms, where the first class had 43 thunderstorm days with FR of 282.7 strokes.day-1 and DR of 0.17 strokes.km-2; the second class had 73 days of thunderstorms and FR of 2,686 strokes.day⁻¹ and DR of 2.77 strokes.km⁻²; the third class had 32 thunderstorm days with FR of 9,754 strokes.day⁻¹ and DR of 4.41 strokes.km⁻²; the fourth class had a total of 24 thunderstorm days with FR of 31,879 strokes.day⁻¹ and DR of 10.8 strokes.km⁻². Finally the wet season had 142 thunderstorms days, where the first class had a total of 40 days with thunderstorms with a FR of 282.7 strokes.day⁻¹ and a DR of 0.16 strokes.km⁻²; the second class had 81 thunderstorm days with a FR of 2,544 strokes.day⁻¹ and DR of 2.91 strokes.km⁻²; the third class had 13 days of thunderstorms with a FR of 7,846 strokes.day-1 and DR of 1.44 strokes.km-2; lastly the fourth class had 8

thunderstorm days with a FR of 23,468 strokes.day-1 and DR of 2.65 strokes.km⁻¹ ². The thunderstorms had the most lightning activity between 17:00 and 20:00 UTC (13-16 local time) where the mean stroke density was 1.62 strokes.km⁻ ².hour⁻¹ during the transition season, 1.5 strokes.km⁻².hour⁻¹ in the dry season and finally 0.37 strokes.km⁻².hour⁻¹ at the wet season. During this time interval it was observed most of the rainy fraction as well as vertical development independently of the severity class and season. Although, for the severe thunderstorms, forth class, the 20 dBZ rain fraction at 2 km height presented distinct features, i.e., a daily fraction of 12.3 %.hour⁻¹ during the wet season, 9 %.hour⁻¹ for the transition season and 5,6 %.hour⁻¹ for the dry season. During the transition season, the 35 and 40 dBZ reached as high as 18 km height during its maximum thunderstorm development. The mean fields of temperature showed that the transition season was warmer than the other seasons. The 850 mb wind field showed essentially that the flow was predominately from northeast during the transition and wet season and from east in the dry season. For 500 mb the winds were from east for all stations, but it was most intense during the dry season and weaker in the wet season. At 250 mb, all season showed an anticyclone circulation over the Manaus region.

Lista de Figura

Figura 1: Processo convectivo (painel a)): adaptado de Lutgen e. Processo orográfico (painel b)): adaptado de Ahrens (2009). Processo de convergência (painel c)): adaptado de Ahrens (2009)
Figura 2: Esquematização de uma nuvem de tempestade eletrificada com uma estrutura tripolar. Adaptada de Williams (1998)
Figura 3: Estrutura tripolar de uma nuvem de tempestade eletrificada idealizada através de medidas do campo elétrico dentro das nuvens. Adaptada de Stolzenburg et al. (1998)
Figura 4: Molécula da água. O esquema ilustra a geometria da molécula, onde os átomos na parte inferior são os hidrogênios e na parte superior o oxigênio. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998
Figura 5: Indução de uma gota d'água devido ao campo elétrico E. Com a presença do campo positivo, ar cargas negativas se concentram na parte inferior e as positivas na parte superior. Adaptada de MacGorman e Rust, 1998.
Figura 6: Dupla camada de uma gota d'água com uma interface com o ar. Adaptado de MacGorman e Rust, 199831
Figura 7: Captura seletiva de íons. No painel (a), a gota se encontra polarizada devido ao campo elétrico negativo E e ao colidir com um íon de carga negativa, acaba capturando. No painel (b), quando este íon possui uma carga positiva, este é repelido. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998
Figura 8: Nesta figura, tanto como a gota d'água como a gotícula de nuvem se encontram polarizadas. No painel (a), quando elas colidem, a carga negativa da partícula menor pode ser capturada pela maior, enquanto que, para o painel (b), se elas colidirem e ricochetearem, a particular maior pode perder a carga positiva para a partícula menor. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998.
Figura 9: no painel (a), as cargas positivas entram dentro da nuvem através de correntes ascendentes. No painel (b), as cargas negativas de maiores altitudes são atraídas por estas cargas negativas que são injetadas dentro da nuvem e vão alcançando altitudes maiores através das correntes ascendentes. Devido a divergência no topo da nuvem, o ramo descendente carrega as cargas negativas para a base da nuvem. No painel (c), devido ao aumento das cargas negativas na base da nuvem, forma-se um campo elétrico que favorece a um

aumento no fluxo de cargas positivas para dentro da nuvem. Adaptada de MacGorman e Rust, 1998
Figura 10: Gráfico do sinal adquirido pelo graupel em função da temperatura e do conteúdo de água liquida encontrado por: 1 – Saunders et al. (2006), 2 – Pereyra et al. (2000), 3 – Takahashi (1978) e 4 – Saunders e Peck (1998). No lado esquerdo de cada curva, o graupel adquire carga positiva e, no lado direito da curva, o graupel adquire sinal negativo. Adaptado de Saunders (2008)
Figura 11: Evolução das refletividades do radar meteorológico com o tempo durante uma tempestade. Adaptado de Williams et al. (1989)
Figura 12: Esquema do modelo 3D-box. Adaptado de Saraiva (2010).
Figura 13: Distribuição média de pontos com refletividades maior ou igual a 20 dBZ normalizada pela quantidade de horas de medições para cada dia ao longo da série
Figura 14: Esquema dos sferics causados pelos raios e que se propagam entre a superfície da terra e a ionosfera. O espectro eletromagnético presente na figura mostra as frequências geradas pelas descargas elétricas. Fonte: Pessi et al. (2009).
Figura 15: Acumulado diário de raios durante o período entre 1 de janeiro de 2009 até 31 de dezembro de 2011 em que a antena estava operando a partir de 5 sensores
Figura 16: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a primeira classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica
Figura 17: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a primeira classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.
Figura 18: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 19: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa

Figura 20: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 21: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 22: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 23: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 24: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 25: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a segunda classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica
Figura 26: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a segunda classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.
Figura 27: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 28: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 29: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 30: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa

Figura 31: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 32: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 33: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 34: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a terceira classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica
Figura 35: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a terceira classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.
Figura 36: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 37: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 38: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 39: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 40: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 41: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa

Figura 42: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 43: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a quarta classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica
Figura 44: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a quarta classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.
Figura 45: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 46: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 47: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 48: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 49: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 50: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 51: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa
Figura 52: Frequência da refletividade de 20 dBZ entre às 17:00 e 20:00 UTC para os níveis de 2 a 7 km durante a terceira classe, onde o painel (a) se refere a estação seca, o (b) a transição e (c) se refere a estação chuvosa 106

Figura 53: Frequência da refletividade de 20 dBZ entre às 17:00 e 20:00 UTC para os níveis de 2 a 7 km durante a quarta classe, onde o painel (a) se refere a estação seca, o (b) a transição e (c) se refere a estação chuvosa... 108

Lista de Tabela

Tabela 1: Elevações e raio de cobertura do radar40
Tabela 2: Número de cubos de refletividade por altura do CAPPI 42
Tabela 3: Valores dos percentis48
Tabela 4: Quantidades de dias durante cada estação para cada classe48
Tabela 5: Densidade de raios por área e dia (raios.km ⁻² .dia ⁻¹) 50
Tabela 6: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a estação seca
Tabela 7: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a transição entre a estação seca para a chuvosa
Tabela 8: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a estação chuvosa
Tabela 9: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a estação seca
Tabela 10: Tabela 9: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a transição entre a estação seca para a chuvosa
Tabela 11: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a estação chuyosa

Lista de Abreviaturas

CAPE Convective Available Potential Energy

CAPPI Constant Altitude Plan Position Indicator

CIN Convective Inhibition

DJF dezembro – janeiro - fevereiro

JJA junho – julho - agosto

LF Low Frequency

NCL Nível de Condensação por Levantamento

NCN Núcleos de Condensação de Nuvem

NE Nível de Equilíbrio

Radar Radio Detection and Ranging

SIPAM Sistema de Proteção da Amazônia

SON setembro – outubro - novembro

STARNET Sferic Timing and Ranging Network

VLF Very Low Frequency

Sumário

Capítulo 1: I	Introdução e Objetivos	18
1.	.1 Introdução	19
1.	.2 Objetivos	22
Capítulo 2:	Revisão Bibliográfica	23
2	2.1 Formação de nuvem e de tempestade	23
2	2.2 Processos de Eletrificação	26
2	.3 Características das tempestades elétricas	34
Capítulo 3:	Dados e Metodologia	37
3	3.1 Radar Meteorológico	38
3	3.2 – STARNET	44
3	3.3 Perfis termodinâmicos	47
3	3.4 Dados de reanálise	47
Capítulo 4:	Resultados	47
4	.1 Definições das classes	48
4	.2 Comportamento da 1° classe (baixa atividade elétrica)	50
4	Comportamento da 2° classe (moderada atividade elétrica)	63
4	.4 Comportamento da 3° classe (alta atividade elétrica)	75
4	.5 Comportamento da 4° classe (atividade elétrica severa)	90
Capítulo 5:	Discussões1	05
Capítulo 6:	Conclusões 1	11
6	3.1 Severidade das tempestades elétricas 1	12
6	3.1.1 Estações do Ano 1	12
6	i.1.2 Distribuição Espacial1	13
6	i.1.3 Ciclo Diurno1	14

6.1.4 Comportamento atmosférico e dinâmico	115
Referências Bibliográficas	118

Visto que a região Amazônia é uma das regiões com as maiores incidências de raios, vários estudos vem sendo feitos para entender a sazonalidade das tempestades elétricas sobre a região. Entretanto, poucos trabalhos foram feitos sobre a região de Manaus – AM, principalmente, usando dados de radar meteorológicos. Portanto, neste capítulo serão feitos levantamentos teóricos sobre: Formação de nuvem e de tempestade; Processos de Eletrificação e Características das tempestades elétricas.

.1.1 Introdução

De acordo com Barthem et al. (2004), a bacia amazônica é a maior bacia hidrológica do planeta e está compreendida entre as latitude de 5° N e 17° S e corresponde a um terço de toda a área da América do Sul, abrangendo os países: Brasil, Peru, Colômbia, Equador, Bolívia, Venezuela e Guiana. De acordo com os autores, a bacia amazônica possui uma área estimada em 6.869.000 km², sendo que, 69,1% dessa área se encontra dentro do território brasileiro. A bacia amazônica é uma das regiões onde se tem uma das maiores médias de precipitações diárias, chegando a atingir 8 mm.dia-1 (Adler et al., 2003). Em regiões como a da fronteira entre Brasil, Colômbia e Venezuela, o total chega a atingir 3.500 mm.ano-1 (Fisch et al., 1998). Sistemas meteorológicos, tais como: linhas de instabilidades (Garstang et al., 1994; Cohen et al., 1995), zona de convergência intertropical (ZCIT) (Marengo et al., 2011) e brisa fluvial (Oliveira e Fitzjarrald, 1993), além da variabilidade intrasazonal como ENOS (El Niño/Oscilação Sul) (Villar et al., 2009), interferem na variabilidade da precipitação dentro da região amazônica.

De acordo com os estudos de Christian et al. (2003), Williams (2005), Zipser et al. (2006), Albrecht et al. (2011.a) e Cecil et al. (2015), os raios estão basicamente concentrados nas regiões tropicais e subtropicais. Trabalhos como os de Rasmussen et al. (2014), Anselmo e Morales (2014) e Ávila et al. (2015), mostram a distribuição dos raios para a América do Sul e indicam que a maior densidade de raios se encontram nas fronteiras entre o Brasil, Argentina e

Capítulo 1: Introdução e Objetivos

Uruguai. Apesar da maior densidade de raios ser observada na Argentina, é na bacia Amazônica que se encontra as maiores frequências de tempestades (Anselmo e Morales, 2014). Esta contradição deve estar relacionada com a eficiência com que as tempestades produzem a separação de cargas.

Em termos de atividade elétrica na Amazônia, temos que de acordo com Albrecht et al. (2016), a região amazônica apresenta uma densidade de raios entre 20 a 40 raios.km⁻².ano⁻¹, cujo horário com as maiores taxas de raios ocorre durante o período da tarde, entre às 12:00 até às 18:00 horas local. De acordo com os autores, as maiores taxas de raios dentro da região amazônica ocorrem entre agosto até novembro e, conforme Saraiva (2010), este período representa o fim da estação seca (agosto) e todo o período da transição entre a estação seca para a chuvosa (setembro até novembro). Este período de maior atividade elétrica foi encontrado também por Nunes (2015) e Anselmo (2015).

Zipser et al. (2006) mostraram que durante o período entre setembro até novembro a região amazônica é um dos lugares que apresentam as tempestades mais extremas dentro da região tropical chegando a ultrapassar 126 raios.min⁻¹. Christian et al. (2003) mostraram que durante este período, a região entre 10°N e 10°S (que cobre o Estado do Amazonas), podem atingir até aproximadamente 20 raios.s⁻¹. Nunes et al. (2016) encontram mais de 500 casos de tempestades severas, cuja áreas atingiram até 20.000 km² durante SON, em que, tiveram taxas de raios maiores que 190 raios.min⁻¹.

Anselmo (2015) notou que as frequências dessas tempestades elétricas eram maiores durante às 13:00 até às 17:00 no hora local e que se devia ao aquecimento da superfície do continente. Almeida et al. (2012) estudaram a distribuição de raios sobre a porção leste da região amazônica e encontram que os raios ocorreram com maior frequências às 15:00 horas local, enquanto que as menores incidência foram observadas às 07:00 até às 11:00 horas local. Os autores também mostram que entre 11:00 até às 18:00 horas local, os raios negativos eram mais frequentes do que os raios positivos, porém, para os demais horários, as frequências de ambos eram bem próximos.

Capítulo 1: Introdução e Objetivos

Albrecht (2008) e Albrecht et al. (2011.b), mostraram que as tempestades elétricas observadas durante o período seco mais ao sudoeste da Amazônia estavam associadas a processos dinâmicos, termodinâmicos e topográfico. Na estação chuvosa, por outro lado, Petersen et al. (2002), Williams et al. (2002) e Albrecht e Dias (2005) mostraram que os processos dinâmicos associados aos regimes de vento influenciavam na eficiência das tempestades elétricas, sendo que nos regimes de leste era bem mais favoráveis a levar ao desenvolvimento de fortes tempestades e consequentemente uma eficiência maior na produção de raios.

Petersen et al. (2002), estudaram as descargas elétricas na região Amazônia durante o período chuvoso e mostraram um aumento no número de descargas elétricas durante os regimes de vento de leste, em comparação ao regime de vento de oeste. Porém, independentemente dos regimes de vento na região amazônica, os autores mostram que as maiores ocorrências de raios ocorreram entre às 13:00 até às 19:00 horas local, que coincide com os horários encontrados por Cecil et al. (2015).

A cidade de Manaus (03°01'07"S, 60°01'34"W e altitude de 48 m), capital do Estado do Amazonas, situa-se na parte central da bacia Amazônica, onde é banhada pelo rio Negro. A sua extensão geográfica é de aproximadamente 11.401,092 km⁻². De acordo com Angelis et al. (2004), as precipitações na cidade de Manaus são mais frequentes durante o período da tarde, entre às 12:00 até às 14:00 horas, no horário local, durante o ano todo. Santos et al. (2014) e Tanaka et al. (2014), mostram que a brisa fluvial influência bastante na precipitação local sobre a cidade, pois, durante o dia, a brisa injeta umidade para dentro da cidade. Além disso, Santos et al. (2014) encontraram resultados de que o vento sobre a cidade de Manaus – AM sofrem mudanças de direção de acordo com a estações. Durante a estação chuvosa, os ventos são mais de nordeste, enquanto que durante a estação seca os ventos são mais de sudeste.

Capítulo 1: Introdução e Objetivos

1.2 Objetivos

Uma vez que existem poucos estudos sobre a atividade elétrica na região de Manaus e como eles estão relacionados com a precipitação, este estudo pretende caracterizar as propriedades 3D das tempestades elétricas via o radar meteorológico de Manaus – AM e com os dados de raios da STARNET. Para tanto, os seguintes objetivos específicos serão desenvolvidos:

- Analisar a taxa diária de raios e definir a severidade;
- Avaliar como a severidade da taxa de raios varia em função das estações;
- Analisar o ciclo diurno da precipitação e dos raios em função da taxa de raios;
- Analisar as características dinâmicas e termodinâmicas observadas durantes as tempestades elétricas;

Neste capítulo serão feito levantamentos teóricos sobre: Formação de nuvem e de tempestade; Processos de Eletrificação e Características das tempestades elétricas

2.1 Formação de nuvem e de tempestade

O processo de formação de nuvem consiste no levantamento de uma parcela de ar úmida que se encontra na superfície para níveis mais alto da atmosfera. De acordo com Ahrens (2009), este levantamento da parcela de ar pode ocorrer através de processo convectivo, orográfico e convergência de massa, por exemplo (Figura 1). O processo convectivo se dá através do aquecimento da superfície da terra pela radiação solar que conduz calor para o ar próximo a superfície que se torna menos denso que o ar ao seu arredor. O ar em contato com esta superfície se aquece, se tornando mais leve que o ar ao seu arredor e ascende.

A medida que a parcela ascende na atmosfera, ela expande sem trocar calor com o ambiente e, consequentemente, resfriando. Ao atingir o nível de condensação, o ar da parcela se torna saturado e, a partir daí, o vapor d'água começa a condensar, formando a nuvem (Figura 1 painel a)). O processo orográfico (Figura 1 painel b)), trata-se de uma barreira, como por exemplo uma montanha, que força o ar a subir ao longo da sua extensão vertical. Desta forma, como no caso convectivo, a parcela de ar se resfria com a altura até atingir a saturação e a partir do nível de condensação, ocorre a formação da nuvem (para mais informações sobre o efeito orográfico podem ser encontrados em Houze (2012)).

O processo de convergência de massa (Figura 1 painel c)), trata-se de uma região com baixa pressão em superfície que faz com que o ar se desloque para a sua direção. Desta forma, ao convergir para esta baixa pressão, o ar ascende na atmosfera se resfriando até atingir a saturação e a partir daí, começa a formar uma nuvem. De acordo com Wallace e Hobbs (2006), as gotas de nuvem crescem inicialmente por condensação e por colisão e coalescência após

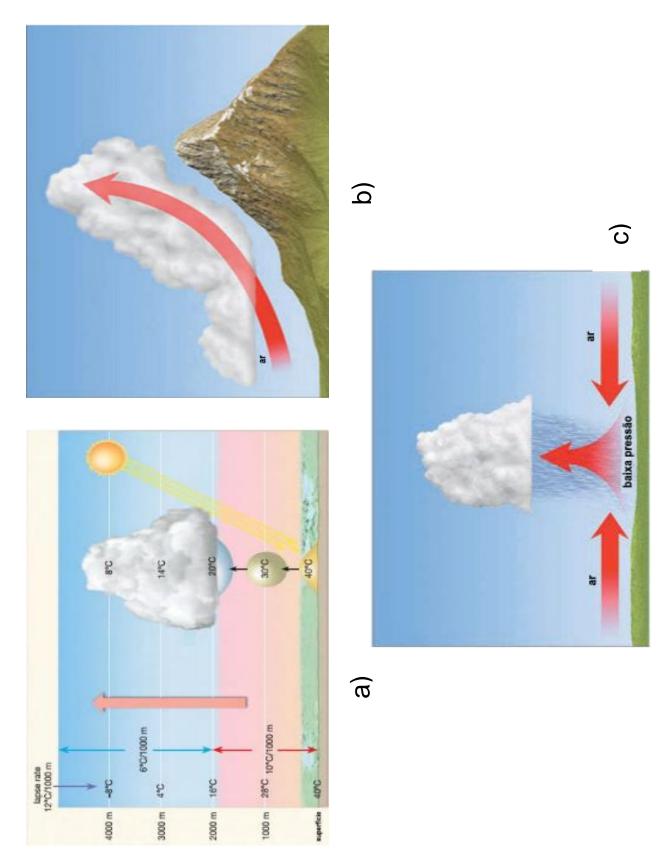


Figura 1: Processo convectivo (painel a)): adaptado de Lutgen e. Processo orográfico (painel b)): adaptado de Ahrens (2009). Processo de convergência (painel c)): adaptado de Ahrens (2009).

atingirem 20 µm de raio.

O processo de condensação consiste na ativação de núcleos de condensação de nuvem (NCN) em ambiente supersaturados. O processo de colisão e coalescência depende da presença de gotas maiores que ao caírem num ambiente com gotículas menores podem colidir com estas e capturá-las. Desta forma, a gota maior vai crescendo ao custo das gostas menores. Se a nuvem atingir uma temperatura abaixo de 0°C, pode a formação de cristais de gelo. De acordo com Houze (2014), o crescimento dos cristais de gelo pode ocorrer através de processo deposição, agregação e acreção. O processo de deposição consiste na difusão do valor sobre uma partícula de gelo. Caso a difusão ocorra da superfície do gelo para o ambiente, este processo recebe o nome de sublimação. Quando partículas de gelo colidem com outras partículas gelo e se juntam, tem agregação. Quando uma partícula de gelo colide com uma gota de água super-resfriada, tem acreção e, em geral, ocorre a formação de pedra de gelo (hailstone) conhecida como granizo. Se a água congela durante a colisão, ocorre a formação de rime.

De acordo com Rakov e Uman (2003) as nuvens do tipo cumulonimbus são as que produzem raios e são denominadas de tempestades elétricas ou nuvens com trovoadas. A definição de raio de acordo com: Dwyer e Uman (2013) - é uma faísca elétrica muito longa que pode ultrapassar 1 km de extensão, sendo que, em tempestade, a sua extensão é de 5 – 10 km; Houze (2014) - um canal de transferência de cargas entre regiões com cargas de sinais opostos. Além da corrente elétrica, uma descarga elétrica gera o trovão (*thunder*), que ocorre devido a uma expansão extremamente rápida do provocado pelo aquecimento de até 30.000°C em menos de um segundo (Rakov e Uman, 2003).

O desenvolvimento de uma nuvem de tempestade elétrica pode ser definido em 3 estágios (Byers e Braham, 1948). O primeiro estágio consiste na formação de uma nuvem do tipo cumulus. Nesse estágio pode ocorrer a formação de uma célula consistida de duas ou três nuvens do tipo cumulus, cujo diâmetro total pode variar entre 1 a 8 km e um altura de até 8 km. As correntes ascendentes de ar neste estágio atingem velocidade de 10 m.s⁻¹ e são compensadas por subsidências suaves de ar. Com o aumento da condensação

do vapor d'água neste estágio, as gotículas coalescem e formam gotas de chuva. Quando as gotas atingem tamanhos o suficiente para cair, inicia-se o segundo estágio de desenvolvimento, que é o estágio maduro. Durante o estágio maduro da célula (segundo estágio), o topo da célula pode atingir uma altitude de 12 km e surgem as correntes descendente de ar dentro da nuvem provocados pelas precipitações das gotas de chuvas. Neste estágio ocorre o processo de entranhamento, que consiste da penetração do ar ambiente para dentro da nuvem. A penetração deste ar mais frio para dentro da nuvem faz com que a corrente de ar ascendente seja modificada devido ao resfriamento do ar dentro da nuvem, tornando-a mais pesada, e desta forma, favorecendo a movimentos descendentes dentro da nuvem. Neste estágio, começam a surgir os núcleos de gelo, que crescem através da agregação, difusão do vapor do ambiente para o núcleo de gelo e acreção. Nesta fase temos uma região mista, onde água superresfriada e gelo coexistem. De acordo com a literatura, o processo de eletrificação se torna mais eficiente neste estágio (será abordado no tópico: 2.2). O terceiro estágio é chamado de dissipação ou de desenvolvimento da bigorna e os movimentos verticais dentro da nuvem são predominantemente descendente e não ultrapassam a 6 m.s⁻¹.

2.2 Processos de Eletrificação

De acordo com as teorias de eletrificação (MacGorman e Rust, 1998), os processos de eletrificação de nuvem tornam-se mais eficientes na região de fase mista da nuvem onde existe a presença de água super-resfriada e cristais de gelo. Para Takahashi (1978), as trocas de cargas entre os hidrometeoros ocorrem através de colisões.

Durante o congelamento da água super-resfriada após a colisão com um cristal de gelo, esta libera calor latente que faz com que a superfície do gelo se aqueça. Consequentemente, as cargas positivas tendem a se mover para o interior da partícula, enquanto que a carga negativa tende a ir para a superfície. Desta forma, quando os cristais de gelo colidem com graupels, pode ocorrer pequenas lascas de gelo carregados negativamente, deixando o graupel

carregado positivamente. Outra forma de troca de cargas a partir de colisões envolve o processo de *riming* com cristais de gelo. Neste processo, devido ao aquecimento da superfície do graupel, as cargas positivas são transferidas para os cristais de gelo.

Durante o processo de crescimento de uma nuvem de tempestade elétrica ocorrem acúmulos de cargas elétricas com sinais oposto dentro da nuvem que levam a formação de campos elétricos elevados que levam a quebrar a rigidez elétrica do ar daí ocorre a descarga elétrica. A descarga elétrica pode ocorrer entre a nuvem e o solo, do solo para a nuvem, dentro da nuvem e entre nuvens, bem como da nuvem para o ar (Walacce e Hobbs, 2006; Wang, 2013). Segundo o trabalho de Dwyer e Uman (2014), uma tempestade elétrica pode ter uma extensão de 100 a 300 km² e produzir uma descarga elétrica nuvem-solo a cada 20 – 30 segundos, durante um período de 40 – 60 minutos.

De acordo com MacGorman e Rust (1998), as tempestades elétricas apresentam as seguintes característica: uma camada de cargas negativas entre as temperaturas de -25°C e -10°C; uma região de cargas positivas acima da região de carga negativa; campo elétrico dentro da nuvem com diferentes polaridades; a nuvem pode ter mais de 3 regiões de cargas elétricas; no topo da nuvem pode existir uma camada estreita de cargas negativas; a precipitação carrega as cargas positivas para a base da nuvem; a duração da atividade elétrica e da precipitação para um célula é em torno de 30 minutos; as cargas que são geradas devem estar confinadas entre as isotermas de -5 a -40° C; o processo de geração e separação de cargas devem estar associados aos processos de formação de precipitação; o processo de geração e separação de cargas devem ocorrem de tal forma para que o primeiro raio ocorra entre 12 a 20 minutos após o aparecimento de partículas precipitantes no radar meteorológico (Mason, 1953).

Baseado em diversos estudos, Williams (1989) propôs que as tempestades elétricas podem ser representadas por uma estrutura tripolar (Figura 2), sendo que durante a fase de amadurecimento da tempestade ocorre a formação de uma camada de cargas negativa em torno de 6 km de altura a - 15° C. Esta camada de carga negativa observada durante o estágio maduro da

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

tempestade possui uma espessura de centenas de metros e está confinada por 2 camadas de cargas positivas na parte superior e inferior. A medida que a fase de dissipação da nuvem se estabelece, a concentração de cargas positivas na base da nuvem aumenta devido ao transporte dos hidrometeoros que precipitam.

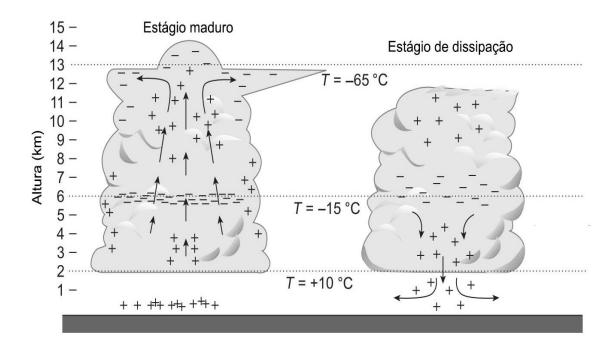


Figura 2: Esquematização de uma nuvem de tempestade eletrificada com uma estrutura tripolar. Adaptada de Williams (1998).

Em um estudo experimental com balões, Stolzenburg et al. (1998) sugerem que as nuvens de tempestades elétricas podem ter mais de 3 regiões de cargas e que dependem do movimento vertical (Figura 3). Na região da corrente ascendente existe mais de 3 regiões de cargas, enquanto que na região da corrente descendente pode ter mais de 6 regiões de cargas. Posteriormente, Stolzenburg e Marshall (2002, 2008) mostraram que estas regiões de cargas positivas e negativas associadas aos movimentos verticais são influenciadas pela temperatura, pela pressão de vapor em temperaturas abaixo de 0°C e magnitude da velocidade vertical.

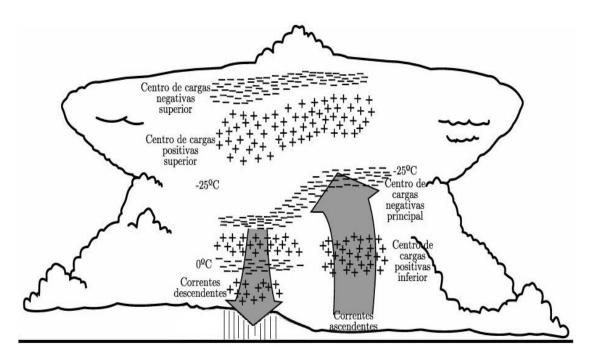


Figura 3: Estrutura tripolar de uma nuvem de tempestade eletrificada idealizada através de medidas do campo elétrico dentro das nuvens. Adaptada de Stolzenburg et al. (1998).

De uma forma simplificada, pode-se dizer que os hidrometeoros carregados eletricamente estão associados aos mecanismos indutivos e não-indutivos de transferência de cargas. (Barry e Chorley, 2013; MacGorman e Rust, 1998; Saunders, 1993; Kuettner et al., 1981; Rakov e Uman, 2003; Wang, 2013). O mecanismo indutivo necessita de um campo elétrico ambiente para que o hidrometeoro possa se polarizar, enquanto que o mecanismo não-indutivo não precisa de um campo elétrico ambiente. Porém, para que ambos os mecanismos sejam eficientes, os seguintes processos são necessários: as colisões entre os hidrometeoros não podem resultar em agregação, acreção ou coalescência e a transferência de cargas nas colisões deve ser rápida.

Antes de entender sobre os mecanismos de eletrificação, é importante saber que a molécula d'água é uma molécula polar e possui um dipolo permanente devido a duas razões: (1) a molécula d'água possui dois átomos de hidrogênio (H) com cargas positivas e um átomo de oxigênio (O) que tem carga negativa; e (2) a curvatura geométrica dos átomos (Figura 4), cria um gradiente de cargas, sendo que o átomo de oxigênio fica na parte externa da gota e o hidrogênio fica na parte interna. Portanto, quando a molécula d'água está sob a

ação de um campo elétrico ela se alinha conforme a orientação do vetor campo elétrico, sendo que um lado fica carregado positivamente e o outro negativamente (Figura 5). O efeito da polarização faz com que o campo elétrico dentro do hidrometeoro diminua e aumente o campo no lado de fora (MacGorman e Rust, 1998). Basicamente, esta estrutura angular rotacional faz com que o vértice do átomo de oxigênio gire para dentro para dentro ou para fora, de forma que será observado cargas negativas na parte externas da gota e positivas no lado oposto.

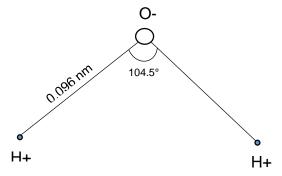


Figura 4: Molécula da água. O esquema ilustra a geometria da molécula, onde os átomos na parte inferior são os hidrogênios e na parte superior o oxigênio. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998.

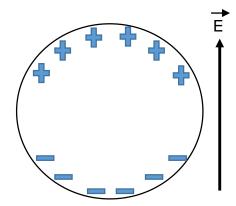


Figura 5: Indução de uma gota d'água devido ao campo elétrico E. Com a presença do campo positivo, ar cargas negativas se concentram na parte inferior e as positivas na parte superior. Adaptada de MacGorman e Rust, 1998.

Fletcher (1962,1968) ao estudar a estrutura molecular da agua e do gelo, sugeriu a existência de uma camada elétrica dubla (Figura 6). De acordo com o autor, esta camada pode ocorrer no contato da água com o ar, gelo com o ar, água com o gelo. Entretanto, do ponto de vista termodinâmico e molecular, esta camada tende a ter cargas negativas nas extremidades da molécula. Baker e Dash (1994) notaram que na interface entre gelo e o ar, pode ocorre uma camada quase-liquida cujas características se assemelhavam da fase liquida da água e portanto, similar a camada elétrica dupla. Esta camada aumentava conforme ocorria a deposição do vapor sobre o gelo, pois a liberação do calor latente do vapor fazia com que a superfície do gelo se aquecesse e assim aumentava a camada liquida sobre o gelo.

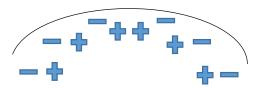


Figura 6: Dupla camada de uma gota d'água com uma interface com o ar. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998.

Quando os hidrometeoros se encontram polarizados, pode ocorrer o processo de captura de íons livres dentro da nuvem. Quando estes hidrometeoros caem, eles repelem íons de mesma polaridade e atraem íons de cargas oposta. Caso a velocidade dos íons seja maior que a velocidade de queda do hidrometeoro, os íons podem ser capturados na parte superior do hidrometeoro (Figura 7). Se estes íons forem mais lentos, eles não são capturados pelos hidrometeoros (MacGorman e Rust, 1998).

A medida que o hidrometeoro precipita, ele pode colidir com gotículas de nuvem, que também podem estar polarizadas. Durante as colisões, algumas cargas da partícula precipitante são transferidas para partícula de nuvem, e caso ocorra um ricocheteamento, esta partícula terá um excesso de cargas no seu topo de polaridade oposta à região de impacto (Figura 8).

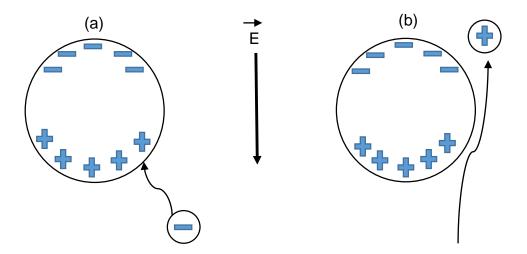


Figura 7: Captura seletiva de íons. No painel (a), a gota se encontra polarizada devido ao campo elétrico negativo E e ao colidir com um íon de carga negativa, acaba capturando. No painel (b), quando este íon possui uma carga positiva, este é repelido. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998.

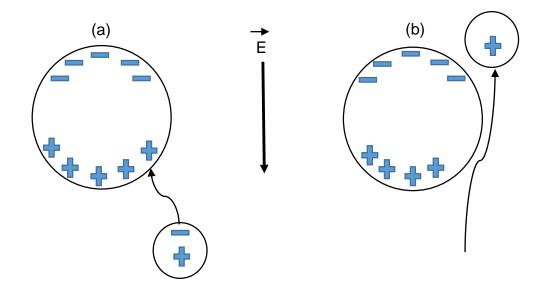


Figura 8: Nesta figura, tanto como a gota d'água como a gotícula de nuvem se encontram polarizadas. No painel (a), quando elas colidem, a carga negativa da partícula menor pode ser capturada pela maior, enquanto que, para o painel (b), se elas colidirem e ricochetearem, a particular maior pode perder a carga positiva para a partícula menor. Adaptado de MacGorman e Rust, 1998.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

De acordo com Vonnegut (1953, 1955), o campo elétrico de bom tempo proporciona uma concentração de íons positivos na baixa troposfera, que podem ser transportados para dentro da nuvem através de correntes ascendentes e que acabam sendo capturados pelos hidrometeoros e favorece o início de uma nuvem carregada positivamente. Além disso, na lonosfera temos o processo de ionização que disponibiliza cargas negativas para esta camada e para a troposfera. Logo, conforme a nuvem cresce verticalmente, os íons são atraídos pelas cargas positivas que estão dentro da nuvem o que leva a formação de uma camada de blindagem no topo da nuvem. Mais tarde, estes íons negativos são transportados para níveis mais baixos através das correntes descendentes da nuvem e também devido ao entranhamento lateral da nuvem (Figura 9).

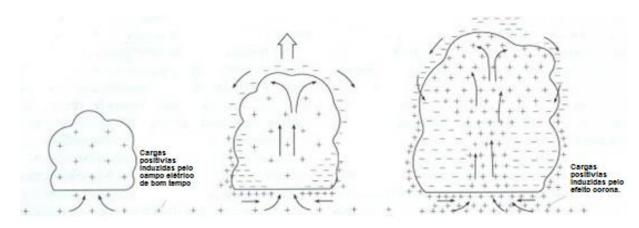


Figura 9: no painel (a), as cargas positivas entram dentro da nuvem através de correntes ascendentes. No painel (b), as cargas negativas de maiores altitudes são atraídas por estas cargas negativas que são injetadas dentro da nuvem e vão alcançando altitudes maiores através das correntes ascendentes. Devido a divergência no topo da nuvem, o ramo descendente carrega as cargas negativas para a base da nuvem. No painel (c), devido ao aumento das cargas negativas na base da nuvem, forma-se um campo elétrico que favorece a um aumento no fluxo de cargas positivas para dentro da nuvem. Adaptada de MacGorman e Rust, 1998.

MacGorman e Rust (1998) notaram que para o mecanismo indutivo se torne efetivo é necessário que ocorram 3 condições: 1) as partículas devem se separar após colidirem; 2) a condutividade elétrica e o tempo de colisão sejam suficientes para que ocorra a troca de cargas entre os hidrometeoros; 3) este mecanismo não pode aumentar a quantidade de cargas em duas regiões vizinhas, a não ser que uma colisão transfira um determinado sinal de carga para um hidrometeoro e que este se mova em direção para a região de mesma carga.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Porém, como o campo elétrico de bom tempo não é suficiente para polarizar os cristais de gelo e gotículas de água, este tipo de mecanismo não é tão eficiente para eletrificar as tempestades.

Na verdade acredita-se que a colisão entre os cristais de gelo e graupel seja responsável pelo aparecimento de campos elétricos da ordem de 100-300 kV.m⁻¹ (Rakov e Uman, 2003). Basicamente, as medidas de laboratório realizados por Saunders (1994), Takahashi (1978), Jayaratane et al. (1983), mostraram que a carga transferida durante a colisão do gelo com o graupel depende da temperatura e do conteúdo de água líquida. As medidas de laboratório de Jayaratne et al. (1983) indicaram que o graupel adquiria cargas positivas quando a temperatura era maior que -15°C e cargas negativas quando a temperatura era menor que -15°C. Saunders et al. (2006), Pereyra et al. (2000), Takahashi (1978) e Saunders e Peck (1998) também encontraram temperaturas similares, mas este limiar de temperatura variava em função do conteúdo de água liquido efetivo, diâmetro dos cristais de gelo e gotículas de água presentes. Pode-se notar na Figura 10 que a temperatura reversa (mudança de polaridade) encontrada em cada trabalho é diferente, porém, todos concordam que para temperaturas acima de -10°C o graupel fica carregado positivamente. Além disso, temos que as gotas super-resfriadas ao congelarem, podem criar estruturas que se rompem provocando estilhaços que podem ser carregados positivamente ou negativamente (Wang, 2003). Maiores detalhes podem ser encontrados em Saunders (2008) que apresenta uma boa revisão sobre os processos de eletrificação.

2.3 Características das tempestades elétricas

Williams et al. (1989) analisaram algumas tempestades no Alabama durante o verão de 1987 e notaram que as primeiras descargas elétricas estavam relacionados com o instante em que a nuvem apresentam a sua maior extensão vertical. Após instantes, inicia-se os primeiros raios do tipo nuvem-solo que estão relacionados com o decaimento da altura das refletividades do radar juntamente com o surgimento de refletividades maiores que 50 dBZ abaixo da

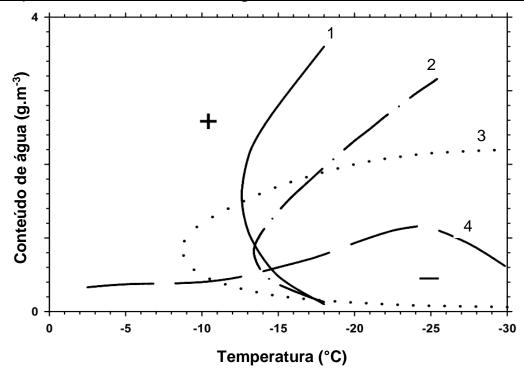


Figura 10: Gráfico do sinal adquirido pelo graupel em função da temperatura e do conteúdo de água liquida encontrado por: 1 – Saunders et al. (2006), 2 – Pereyra et al. (2000), 3 – Takahashi (1978) e 4 – Saunders e Peck (1998). No lado esquerdo de cada curva, o graupel adquire carga positiva e, no lado direito da curva, o graupel adquire sinal negativo. Adaptado de Saunders (2008).

região de cargas negativas (Figura 11).

Por outro lado, Hondl e Eilts (1994) mostraram relações entre a refletividade de 10 dBZ obtida por um radar meteorológico com os raios do tipo nuvem-solo. Neste trabalho foi observado que quando a refletividade do radar de 10 dBZ aparecia e que, quando esta se encontrava em torno da isoterma de 0°C, o primeiro raio nuvem-solo aconteceria 15 minutos após o aparecimento desta refletividade.

Dye et al. (1989) encontraram tempestades que tiveram aumentos nos campos elétricos (E > 1 kV m⁻¹) associados a presença da refletividade de 40 dBZ, sendo que, quando este valor de refletividade surge entre as alturas de 6 km até 7 km (-10 até -20°C), região preferencial de cargas negativas, é um grande indicativo de que ocorrerá uma descarga elétrica em até 15 minutos. Além disso, eles observaram que quando a refletividade de 40 dBZ aumentava mais rapidamente na altura, o campo elétrico também aumentava mais rapidamente. Para eles, esta relação está ligada com as correntes ascendentes

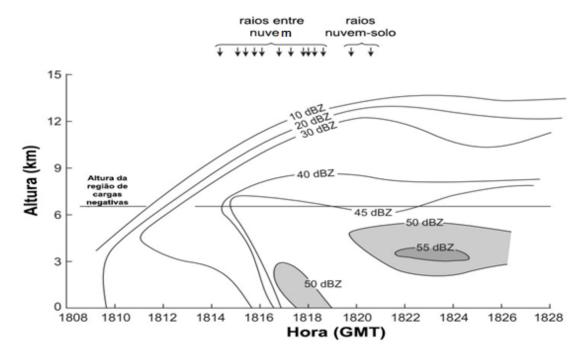


Figura 11: Evolução das refletividades do radar meteorológico com o tempo durante uma tempestade. Adaptado de Williams et al. (1989).

que é primordial para o aumento do campo elétrico. Mais tarde, Zipser e Lutz (1994) estudaram os perfis verticais de refletividades e as taxas de raios dentro de células convectivas e encontraram uma dependência de número de raios com o aumento da velocidade vertical.

Além da correlação com a velocidade vertical, os raios também estão associados com a precipitação e com as estações do ano. Katsanos et al. (2007) mostram que durante a estação chuvosa na parte central e leste do Mediterrâneo, mais de 50% dos casos de precipitações que não apresentaram raios do tipo nuvem-solo apresentavam acumulação inferior a 1 mm, enquanto que para precipitações com valores maiores que 10 mm apenas 6% dos casos não possuíram raios. Gungle e Krider (2006) mostraram que em eventos com grandes volumes de precipitação ocorria uma proporção entre 0,43 x 10⁴ a 4.9 x 10⁴ m³.raio⁻¹. Para Soriano et al. (2001), o comportamento dos raios tipo nuvem-solo variava com o ambiente sobre a Península Ibérica. Na parte mais úmida da Península, foi encontrado maiores valores de precipitação e um menor valor de raios, enquanto que na parte mais seca da região, houve menores valores de precipitação e um número maior de raios. Lal e Pawar (2009) mostraram que na

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica

Índia os raios se tornaram menos frequentes durante a monção da região, sendo que a maior frequência ocorre durante a fase pré moção e que os máximos das atividades elétricas não coincidiram com as maiores concentrações de gelo. Segundo estes autores, esse comportamento pode estar relacionado com a altura da base da nuvem, com a temperatura, com a umidade e com a altura da isoterma de 0°C. Para o Zhou et al. (2002), a quantidade de descargas elétricas do tipo nuvem-solo ocorridas sobre Pingliang durante uma tempestade é um bom estimador da taxa de precipitação ocorrida durante um sistema convectivo, tendo uma correlação de 85%.

Neste estudo serão utilizados os dados de refletividade do radar meteorológico de Manaus instalado no SIPAM, dados de raios da STARNET, dados de radio sondas da Universidade de Wyoming e dados do ERA-Interim. Os dados do radar serão utilizados para caracterizar a estrutura 3D da precipitação associada às tempestades elétricas. Os dados da STARNET serão utilizado para identificar os dias com em sem raios dentro da área de cobertura do radar, a severidade das tempestades elétricas e como é a variação diurna das descargas elétricas em função das estações do ano. Os dados de sondagem forneceram o comportamento termodinâmico médio das tempestades e os dados do ERA-Interim forneceram o comportamento dinâmico médio das tempestades.

3.1 Radar Meteorológico

A palavra radar é a abreviação de *Radio Detection and Ranging*. O radar emite uma radiação eletromagnética na faixa de frequência de microondas que é refletida, absorvida e espalhada pelos hidrometeoros suspensos na atmosfera. Uma vez que o radar emite um pulso de energia, este recebe uma fração de volta, que recebe o nome de *echo* (Rinehart, 2004). De acordo com Raghavan (2003), é possível determinar o alcance máximo (r_{max}) da cobertura do radar que depende da frequência de repetição do pulso (PRF - *pulse repetition frequency*), ou seja,:

$$r_{max} = \frac{c}{2.PRF} \tag{1}$$

onde c é a velocidade da luz. Para uma PRF de 1000 Hz, teremos um alcance máximo de 150 km.

De acordo com Rinehart (2004), a potência recebida Pr é proporcional à potência transmitida (P_t), ganho da antena (G), área efetiva da antena (A_e) e da seção transversal de retro espalhamento (A_σ) que está relacionada com o alvo espalhador:

$$P_{r} = \frac{P_{t}.G.A_{e}.A_{\sigma}}{(4\pi)^{2}.r^{4}}$$
 (2)

De acordo com Rinehart (2004), a área efetiva da antena pode ser expressa como:

$$A_e = \frac{G \cdot \lambda^2}{4\pi} \tag{3}$$

Logo a potência de retorno pode ser reescrita como:

$$P_{r} = \frac{P_{t}.G^{2}.\lambda^{2}.A_{\sigma}}{64.\pi^{3}.r^{4}}$$
 (4)

Levando em conta as características da antena e dos lóbulos secundários (Rinehart, 2004, Raghavan, 2003 e Doviak e Zrnic, 1993) é possível reformular a equação do radar como:

$$P_{r} = \frac{P_{t}.h.G^{2}.\lambda^{2}.\phi.\theta.\eta}{1024.\ln 2.\pi^{2}.r^{2}}$$
 (5)

onde h é largura feixe do radar que é também conhecido como *gate* ou *bin*, λ é o comprimento da onda, ϕ é largura do feixe do radar na horizontal e θ na vertical e η é a refletividade do radar que é seção transversal de retro espalhamento.

A energia retroespalhada por um determinado volume que é iluminado pelo radar, depende da concentração, estado, tamanho e forma dos hidrometeoros que estão presentes (Hong e Gourley, 2014). De acordo com Rinehart (2004) a energia retroespalhada ou o fator refletividade do radar pode ser expresso como:

$$z = \int_0^\infty N(D) \, \mathbf{D}^6 dD \tag{6}$$

onde *N(D)* representa a distribuição da concentração de tamanho de gotas D iluminada pelo radar. Nota-se que como Z depende do diâmetro a sexta potência, as gotas grandes tem um peso considerável na medida de Z.

Neste estudo utilizaremos dados do radar Doppler banda-S do SIPAM (Sistema de Proteção da Amazônia) que está instalado na cidade de Manaus - AM, localizado na respectiva coordenada (3°8'56"S e 59°59'29"W), situado na base aérea Ponta Pelada, a uma altitude de 102,4 metros. O radar tem uma antena de 4,2 metros de diâmetro o que lhe confere um ângulo de abertura de 1,8°. O radar foi configurado para amostrar a cada 500 metros, com uma a largura do pulso de 1µs, velocidade de rotação de 15°.s⁻¹, PRF de 621 Hz e varreduras azimutais a cada 1°. A Tabela 1 mostra as elevações configuradas para realizar as varreduras volumétricas dentro de uma área de cobertura de 150 km. O período de estudo inicia-se em 01 de janeiro de 2009 e vai até 31 de dezembro de 2011.

Tabela 1: Elevações e raio de cobertura do radar.

Elevação	Elevação (°)	Raio de Cobertura (km)
1	0,9	150
+2	1,5	150
3	2,0	150
4	3,0	150
5	4,0	150
6	5,0	148
7	6,0	148
8	7,0	147
9	8,0	147
10	9,0	146
11	10,5	144
12	12,0	142
13	13,5	139
14	15,0	135
15	16,5	130
16	18,0	123
17	19,0	115

Para este estudo, os dados volumétricos foram lidos e processados conforme a metodologia descrita por Saraiva (2016), sendo que nesta pesquisa foram utilizados os produtos CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) de 2 a 18 km de altura com 2x2 km de resolução horizontal, segundo a metodologia proposta por Anagnastou e Krajewski (1998) e processados por Saraiva (2016). Nestes CAPPIs, são definidos cubos de 3D que possuem 2 x 2 km de extensão horizontal e 1 km de extensão vertical. De acordo com Saraiva (2010), o número de volumes iluminados dentro de cada cubo depende da sua posição em relação ao radar e o ângulo de elevação. Caso estes estejam mais próximos do radar, mais *bins* são levados em consideração devido ao fato de que quanto menor a distância em relação ao radar, menor será o volume iluminado (Figura 12).

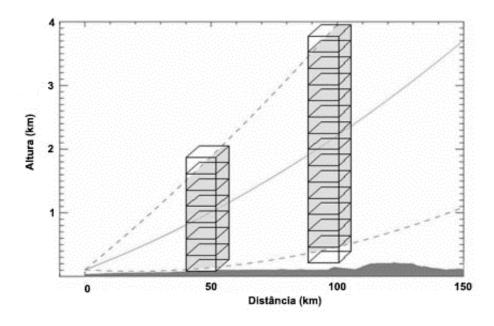


Figura 12: Esquema do modelo 3D-box. Adaptado de Saraiva (2010).

Para distâncias maiores, é possível que o 3D-box-pixel seja iluminado por apenas um *bin*. Para ponderar esta dependência, "pesos relativos" são calculados em função da fração volumétrica que cada *bin* ilumina o cubo 3D-box-pixel. Sendo assim, a refletividade do radar para cada 3D-box-pixel é obtida a partir da média ponderada determinada pelos pesos de cada *bin*. Uma vez que

o CAPPI depende da posição do feixe e do ângulo de elevação, cada altura terá um número diferente de 3D-boxes válidos. Portanto, a Tabela 2 mostra a quantidade de cubos 3D válidos em cada CAPPI, que acaba representando a área horizontal efetiva de varredura do radar naquela altura (2 x 2 km = 4 km²).

Tabela 2: Número de cubos de refletividade por altura do CAPPI

Altura CAPPI (km)	Número de cubos
2	17650
3	17622
4	17586
5	17528
6	17463
7	17377
8	17275
9	17159
10	17012
11	16828
12	16432
13	15987
14	15299
15	14483
16	13369
17	12028
18	10455

Para ilustrar as medidas de radar, a Figura 13 mostra a série temporal da fração de refletividade do radar de 20 dBZ para o CAPPI de 2 km de altura. O eixo da horizontal indica os dias ao longo do comprimento da série, que começa no dia 1 de janeiro 2009 e vai até 31 de dezembro de 2011. O eixo vertical mostra a porcentagem de pontos que tiveram refletividades de 20 dBZ, normalizado pela quantidade de horas de medições que cada dia teve, tendo a seguinte unidade: %.hora-1. Como se pode notar nesta figura, no ano de 2010

durante a estação chuvosa houve poucas medidas. Em relação ao comportamento sazonal da precipitação, nota-se que as chuvas são mais frequentes durante a estação chuvosa (DJF – barras vermelhas) sendo seguida pela estação de transição entre a estação chuvosa para seca, enquanto que se tornam menos frequentes durante a estação seca (JJA – barras azuis), sendo que durante a transição entre a estação seca para a chuvosa (SON – barras amarelas) a precipitação volta a subir. Pela distribuição das frequências das refletividades do radar, nota-se que o ano de 2011 teve uma frequência maior das refletividades em relação aos anos anteriores. Com base nesta figura, podese notar que o início da transição entre a estação chuvosa para a seca não houve medidas feitas pelo radar. Sendo assim, optamos por analisar apenas as estação seca, transição entre a estação seca para chuvosa e a estação chuvosa.

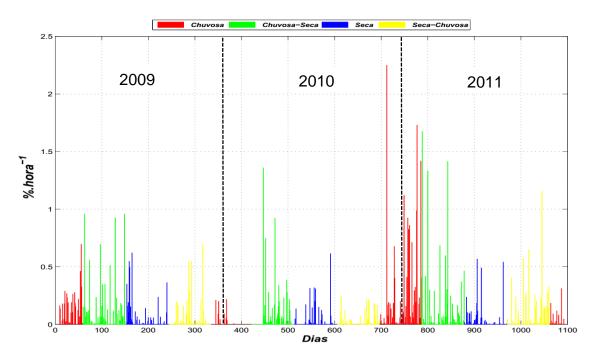


Figura 13: Distribuição média de pontos com refletividades maior ou igual a 20 dBZ normalizada pela quantidade de horas de medições para cada dia ao longo da série.

3.2 - STARNET

Para estudar a atividade das tempestades elétricas em Manaus, será utilizado a rede de detecção de raios Sferic Timing and Ranging Network (STARNET), Morales et al., (2014). A STARNET é um sistema de detecção de raios em VLF (Very Low Frequency) que conta com 12 antenas distribuídas no território brasileiro (Fortaleza, São Paulo, Campo Grande, São Martinho da Serra, Manaus, Brasília, Belém e Ilhéus), além de Cabo Verde, Argentina, Chile e Guadalupe. Estas antenas são capazes de registrar o ruído emitido pelas descargas elétricas que são conhecidas como "sferics" (Morales et al., 2014). Os sferics se propagam através de múltiplas reflexões dentro do guia de onda formado pela superfície terrestre e a ionosfera, podendo alcançar milhares de quilômetros de distância (Cummer e Inan, 2000; Pessi et al., 2009), Figura 14. De acordo com Cummins et al. (1998), descargas elétricas do tipo nuvem-solo emitem sferics principalmente na banda VLF e entre as bandas de 20 a 500 kHz (Low Frequency – LF). A STARNET opera na frequência de 7 – 15 kHz e seu sistema de aquisição de dados possibilita a captura de até 100 sferics por segundo (Morales et al., 2014). Os dados da rede STARNET estão disponibilizados através do portal: http://www.zeus.iag.usp.br/.

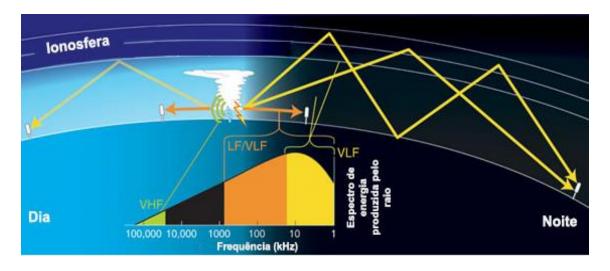


Figura 14: Esquema dos sferics causados pelos raios e que se propagam entre a superfície da terra e a ionosfera. O espectro eletromagnético presente na figura mostra as frequências geradas pelas descargas elétricas. Fonte: Pessi et al. (2009).

De acordo com Dentel (2013) e Dentel et al. (2014), a eficiência de detecção de raios do tipo nuvem-solo em 2008 e parte de 2009 está diretamente ligada ao pico de corrente gerado pelos raios. Para este período, os autores encontraram que a eficiência de detecção de raios do tipo nuvem-solo com pico de corrente entre 0 a 20 kA era menor que 10% e para pico de corrente maior que 40 kA variava entre 30% e 55%. Além disso, também verificaram que a eficiência de detecção dependia do número de sensores disponível na solução. Na verdade em estudo mais recente, Rodriguez et al. (2015) mostraram que a partir de 2013, quando a rede tinha mais de 10 sensores, a eficiência de detecção era similar à rede GLD360 da Vaisala (Demetriades et al, 2010) e era superior a 70%, enquanto que a localização tinha uma precisão de 2 a 5 km.

Para integrar as medidas de raios com as do radar meteorológico do SIPAM, as medidas de raios da STARNET observadas em um raio de cobertura de 150 km a partir da cidade de Manaus – AM foram acumulados em medidas horárias. Uma vez que a eficiência de detecção depende do número de sensores, somente os dias com mais 5 sensores foram utilizados. Além disso, como este estudo utiliza os dados entre 1 de janeiro de 2009 a 31 de dezembro de 2011, o modelo de eficiência de detecção apresentado por Rodriguez et al. (2015) foi aplicado à base de dados de forma a normalizar as observações horárias a uma rede de mais de 11 sensores.

A Figura 15 mostra a distribuição do acumulado diário de raios durante o período entre 1 de janeiro de 2009 até 31 de dezembro de 2011 em que as antenas estavam trabalhando com no mínimo 5 sensores. Nesta figura é possível observar que as atividades elétricas variam em função da estação do ano, ou seja, apresentando uma sazonalidade. Nota-se que as atividades mais intensas ocorreram durante a estação seca (JJA -barras azuis), entretanto, as atividades elétricas são mais frequentes durante a estação de transição entre a estação seca para a chuvosa (SON – barras amarelas). Durante a estação chuvosa (DJF – barras vermelhas), as atividades elétricas são bem mais baixas em comparação com as demais estações. Comparando-a com a Figura 13, nota-se que nos dias em que ocorreram as maiores frequências das refletividades do radar não coincidiram com os maiores valores de raios diários.

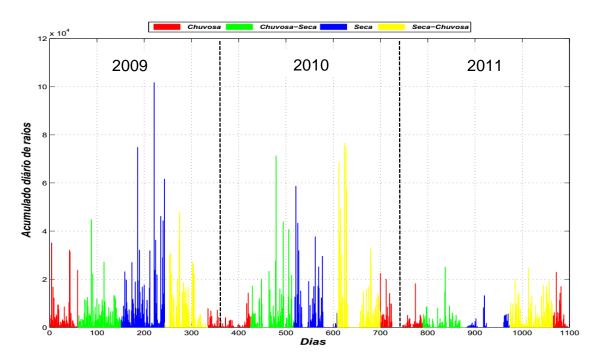


Figura 15: Acumulado diário de raios durante o período entre 1 de janeiro de 2009 até 31 de dezembro de 2011 em que a antena estava operando a partir de 5 sensores.

3.3 Classificação das severidades das tempestades

Para avaliar as características das tempestades, optou-se por utilizar as análises dos percentis para definir categorias das atividades elétricas na região. De acordo com Navidi (2010), o percentil consiste numa divisão de 100 partes iguais de um dado. Desta forma, definindo o valor p que está entre 0 e 100, este valor representará uma porcentagem do total da quantidade de dados, ou seja, se p for igual a 50, ele corresponderá a 50% dos dados. Portanto, para cada valor de p estará associado com um valor pth. Com isso, escolhendo um valor para p, isto significará que p% dos dados são menores ou iguais a pth. Trabalhos como de Cecil et al. (2002), Stolz et al. (2014), Steiger et al. (2007(a), 2007(b)) e Toracinta et al., (2002), utilizaram esta ferramenta estatística para fazer classificações de tempestades. Desta forma, os autores conseguiram separar as tempestades conforme as suas severidades.

Uma vez que estamos interessados em avaliar a severidade das tempestades elétricas, adotou-se a seguinte classificação: baixa atividade

elétrica – dias em que o acumulado diário de raios foi menor ou igual ao percentil de 25%; moderada atividade elétrica – dias em que o acumulado diário de raios foi maior que o percentil de 25% e menor que o de 75%; alta atividade elétrica - dias em que o acumulado diário de raios foi maior que o percentil 75% e menor que 90%; atividade elétrica severa - dias em que o acumulado diário de raios foi maior que o percentil de 90%.

3.4 Perfis termodinâmicos

Como discutido na introdução, as tempestades elétricas se formam em ambientes instáveis, logo é necessário analisar o comportamento médio da atmosfera observado nas 4 categorias propostas. Para este estudo, foram utilizados os dados da radio sonda de Manaus que estavam disponíveis no portal da Universidade de Wyoming, http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html. Os dados são da estação 82332 que se localiza no aeroporto internacional Eduardo Gomes para o horário das 12:00 UTC. Nestas análises são calculados os perfis médios de temperatura do ar e do ponto de orvalho, bem como NCL (nível de condensação por levantamento), NE (nível de equilíbrio), CAPE (convective available potential energy) e o CIN (Convective Inhibition) para os dias dentro de cada uma das 4 categorias de tempestades elétricas.

3.5 Dados de reanálise

Os dados de reanálise são usados para entender o campo básico de escoamento durante os dias com atividade elétricas. Para tanto foram usados os dados ERA-Interim com uma resolução de 0.75° x 0.75° disponíveis no portal do ECWMF: http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=pl/). Os dados utilizados são de temperatura do ar (°C), velocidade do vento (m.s⁻¹), e umidade específica (g.kg⁻¹) nos níveis de pressão 850 mb, 500 mb e 250 mb, para o horário das 12:00 UTC.

Neste estudo, as tempestades elétricas ocorridas durante a estação seca, transição entre a estação seca para a chuvosa e chuvosa, foram classificadas a partir do número de raios diário observado dentro de uma área circular de 150 km de raio, cobrindo a cidade de Manaus – AM e regiões vizinhas.

4.1 Definições das classes

A severidade da atividade elétrica foi feita através dos percentis de 25, 75 e 90%, que podem ser observados na Tabela 3. A primeira classe (1° classe), classificada como baixa atividade elétricas, consiste nos dias em que o total de raios diário foi menor ou igual ao valor de 686 raios (percentil de 25%). A segunda classe (2° classe), classificada como moderada atividade elétrica, consiste nos dias em que o total diário de raios foi maior que 686 (percentil de 25%) e menor ou igual a 6385 (percentil de 75%) raios. A terceira classe (3° classe), classificada como alta atividade elétrica, consiste nos dias em que o total diário de raios que tiveram um valor maior que 6385 (percentil de 75%) e menor ou igual a 14370 raios (percentil de 90%). Já a quarta classe (4° classe), classificada como atividade elétrica severa, consiste nos dias em que o total de raios diário ultrapassaram a 14370 raios (percentil de 90%). A Tabela 4 mostra a quantidade de dias para cada classe conforme a estação do ano.

Tabela 3: Valores dos percentis

	Percentil de 25%	Percentil de 75%	Percentil de 90%
Raios diário	686	6385	14370

Tabela 4: Quantidades de dias durante cada estação para cada classe

	1° classe - dias	2° classe – dias	3° classe – dias	4° classe - dias
Seca	26	70	24	24
Transição	43	73	32	24
Chuvosa	40	81	13	8

Como se pode observar através da Tabela 4, a primeira classe apresentou um número maior de dias durante a estação de transição e um menor número durante a estação seca, tendo 43 e 26 dias, respectivamente. Entretanto, como se pode notar na Tabela 5, a estação seca apresentou a maior densidade de raios para a primeira classe, onde teve um valor de aproximadamente 5 x 10⁻¹ ³ raios.km⁻².dia⁻¹, enquanto que durante a estação de transição e a chuvosa tiveram o mesmo valor, 4 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹. Para a segunda classe, a estação chuvosa apresentou 81 dias de tempestades, sendo a que apresentou o maior valor. Por outro lado, a estação seca apresentou o menor número, com 70 dias. Em relação as densidades de raios, todas as estações apresentaram praticamente o mesmo valor, sendo 39 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹ durante a estação seca, 38 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹ durante a estação de transição e 36 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹ para a estação chuvosa. A terceira classe esteve mais presente durante a estação de transição, na qual houve 32 dias de tempestades classificadas como alta atividade elétrica, enquanto que a estação chuvosa apresentou 13 dias. Em relação a densidade elétrica, a estação de transição apresentou o maior valor, com uma média de 138 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹, 132 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹ durante a estação seca e 111 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹ durante a estação chuvosa. Para a quarta classe, as estação seca e transição apresentaram o mesmo número de dias de tempestades que foi de 24 dias. Para a estação chuvosa, houve apenas 8 dias com tempestades classificadas como alta atividade elétrica. Entretanto, a maior densidade ocorreu durante a estação de transição entre a estação seca para a chuvosa, que teve 451 x 10⁻³ raios.km⁻ ².dia⁻¹. A estação seca apresentou uma densidade de 409 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹, sendo um pouco menor em comparação com a transição. A estação chuvosa apresentou a menor densidade de raios que foi de 332 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹.

Como se pode notar através da Tabela 4 e 5, fica claro que as atividades elétricas na região apresentam uma sazonalidade. Desta forma, se torna evidente que durante a estação chuvosa as altas e severas atividades elétricas se tornam bem menos frequentes em comparação com as demais. Para estas classes de severidade, nota-se uma maior frequência e maiores densidades de raios durante a estação de transição entre a estação seca para a chuvosa.

Tabela 5: Densidade de raios por área e dia (raios.km⁻².dia⁻¹)

	1° classe	2° classe	3° classe	4° classe
Seca	5 x 10 ⁻³	39 x 10 ⁻³	132 x 10 ⁻³	409 x 10 ⁻³
Transição	4 x 10 ⁻³	38 x 10 ⁻³	138 x 10 ⁻³	451 x 10 ⁻³
Chuvosa	4 x 10 ⁻³	36 x 10 ⁻³	111 x 10 ⁻³	332 x 10 ⁻³

4.2 Comportamento da 1° classe (baixa atividade elétrica)

A Figura 16 mostra o ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico e da densidade média de raios por área para a primeira classe. Cada coluna representa uma estação e cada linha representa as refletividades de 20 dBZ, 25 dBZ, 30 dBZ, 35 dBZ e 40 dBZ. Em relação a distribuição da densidade média de raios por área, nota-se que entre às 00:00 até às 06:00 UTC, essas médias foram maiores durante a estação seca e menores durante a estação chuvosa, onde a densidade média sofreu diminuições ao longo do tempo. Em relação a distribuição de frequência na vertical do fator refletividade, normalizada pela quantidade de dias, neste intervalo de tempo, nota-se que durante a estação seca, a refletividade de 20 e 25 dBZ atingiram o nível de 15 km, enquanto que para as demais estações, chegou a 18 km. Entre às 00:00 e 03:00 UTC, nota-se que estas refletividades foram mais frequentes durante a estação chuvosa em todas alturas, enquanto que, durante a estação seca, essas frequências foram menores. Entretanto, para o intervalo das 03:00 às 06:00 UTC, entre os níveis de 2 km a 7 km, as refletividades foram mais frequentes durante a estação chuvosa (o mesmo ocorre para as outras refletividades), enquanto que, acima de 7 km, as refletividades foram maiores durante a transição entre a estação seca para a chuvosa e menor durante a estação seca.

No intervalo das 06:00 até às 12:00 UTC, as densidades médias de raios foram um pouco maiores durante a estação chuvosa e menores durante a transição entre a estação seca para a chuvosa. Neste intervalo de tempo, durante a estação seca, as densidades permaneceram sem muitas variações ao

longo do período, enquanto que, durante a estação de transição a partir das 09:00 UTC, as densidades apresentaram diminuições até às 12:00 UTC, enquanto que durante a estação chuvosa houve pequenas oscilações. Comparando a estação seca com a transição, as frequências das refletividades de 20, 25, 30 e 35 dBZ, entre os níveis de 2 km e de 7 km de altura, foram maiores durante a transição da estação seca para a chuvosa, entre o intervalo de tempo das 06:00 até às 12:00 UTC.

Entre às 12:00 até às 18:00 UTC, a densidade média de raios aumentou na estação seca e transição, enquanto que na estação chuvosa, ficou com os valores próximos entre às 12:00 até às 15:00 UTC, e somente após, ocorreu aumentos. Neste intervalo de tempo, as densidades médias apresentaram ser maiores durante a transição, sendo seguida pelas médias da estação seca. Em relação das frequências das refletividades dentro deste intervalo de tempo, notase que em todas as estações as frequências aumentaram juntamente com o aumento das densidades médias de raios. Entre às 12:00 até às 15:00 UTC, nota-se que durante a estação seca e chuvosa, as refletividades de 20 até 35 dBZ atingiram alturas menores do que as atingidas durante a transição. Entretanto, entre os níveis de 2 km e 7 km, as frequências das refletividades foram maiores durante a estação chuvosa.

Das 18:00 até às 23:00 UTC, o máximo da densidade média de raios ocorreu às 19:00 UTC durante a estação seca e transição e às 20:00 UTC durante a estação chuvosa, na qual tiveram as respectivas densidades de raios acumuladas por área: 27 x 10⁻³, 31 x 10⁻³ e 24 x 10⁻³ raios.km⁻². Para o fator refletividade, nota-se que todas as refletividades foram mais frequentes durante a estação chuvosa e menos frequentes durante a estação seca em todas as alturas atingidas. Entre os níveis de 2 km e de 7 km, todas as refletividades possuíram as suas maiores frequências exatamente no momento em que ocorre os máximos das densidades médias de raios. Durante a estação seca e chuvosa, os maiores níveis de altura das frequências das refletividades ocorreram no momento do pico da densidade de raios para todas as refletividades, diferentemente da transição, na qual, a refletividade de 40 dBZ teve um nível de altura maior antes do pico da densidade.

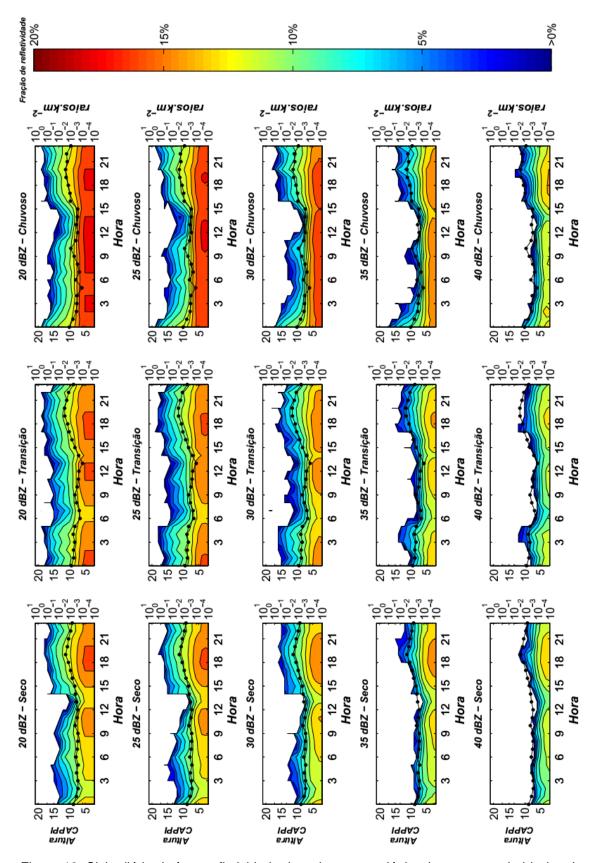


Figura 16: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a primeira classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica.

A Figura 17 mostra o perfil da temperatura média do ar e do ponto de orvalho de cada estação durante a primeira classe às 12:00 UTC. A temperatura média do ar é um pouco mais alta durante a transição e menor na estação chuvosa, na qual, observa-se que a isoterma de 0°C esteve em níveis de pressão mais baixos (aproximadamente 560 mb) durante a transição e mais alto durante a estação seca e chuvosa (aproximadamente 600 mb). Para a isoterma de -10°C, esta se encontrou em 450 mb em todas as estações. Entre os níveis de 1000 e 300 mb, nota-se que a atmosfera esteve mais seca durante a transição e mais úmida na estação chuvosa. O fato de notar que a atmosfera se encontra mais seca ou úmida está ligada ao distanciamento do perfil da temperatura do ponto de orvalho em relação a temperatura do ar, isto é, se ambos perfis estão próximos, mais úmida a atmosfera se encontra, enquanto que mais afastada indica uma atmosfera mais seca. Já para os níveis entre 300 a 100 mb, a atmosfera estava mais seca durante a estação seca, seguida da estação chuvosa e da transição. O nível de condensação por levantamento (NCL) e o nível de equilíbrio (NE) durante a estação seca foram de 977,4 mb e 175 mb, durante a transição foi de 949,5 mb e 135 mb, durante a estação chuvosa foi de 986 mb e 175 mb. Em relação ao CAPE, nota-se que a energia média disponível para convecção foi bem maior durante a transição, onde atingiu um valor médio de 3.393 J/kg, sendo seguido pelo da estação seca, cujo valor foi de 1.548 J/kg e 1.349 J/kg durante a estação chuvosa. Em relação ao CINE médio, o maior valor ocorreu durante a estação chuvosa com o valor de -32,5 J/kg, seguido pelo CINE médio durante a estação seca com valor de -23,7 J/kg e durante a transição, cujo o valor foi de -11,4 J/kg.

A Figura 18 mostra a fração de ocorrência de 20 dBZ dentro da área de cobertura do radar para o CAPPI de 3km para a primeira classe. O painel (a) é referente a estação seca, o painel (b) é referente a transição e o painel (c) é referente a estação chuvosa. Como pode-se notar, a estação de transição apresenta a menor fração de refletividade de 20 dBZ, na qual, a parte central da região apresenta valores nulos. Nesta estação, as frequências da refletividade se manteve nas bordas da região. Já para a estação seca, as frequências da refletividade de 20 dBZ na região se manteve por volta de 2% e possuiu uma co-

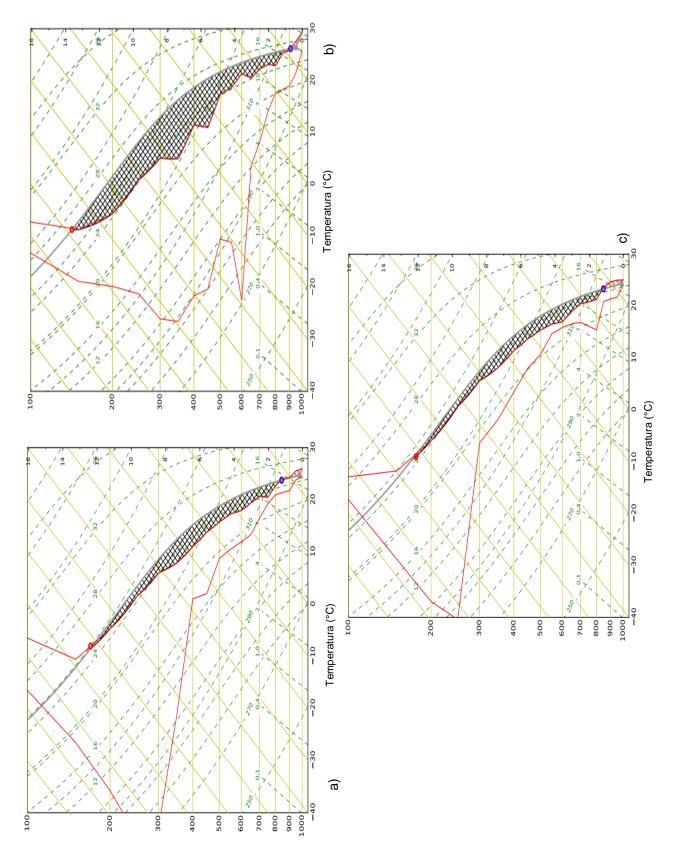


Figura 17: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a primeira classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

bertura maior do que na estação de transição. Durante a estação chuvosa, observa-se no quadrante norte-leste, as maiores ocorrências das frequências da refletividade de 20 dBZ, sendo que o pico máximo ocorre bem próximo ao rio Uatumã, cujo valor chega a 9%.

A Figura 19 mostra os campos de temperatura e do vento médio no nível de 850 mb para o horário das 12:00 UTC. A área circular representa a área de cobertura do radar meteorológico. Como se pode notar, os ventos são predominantemente de nordeste durante a transição (painel (b)) e durante a estação chuvosa (painel (c)), onde não há muita diferença na intensidade do vento em ambas estações. Já para a estação seca (painel (a)), os ventos são de leste. Em relação a temperatura média, nota-se que durante a estação de transição apresentou maior valor, perto de 19°C, sendo mais quente que as demais estações. Já para a estação chuvosa, a temperatura foi mais baixa do que nas demais estações, tendo um valor de aproximadamente 17°C. Já para a estação seca, a temperatura ficou entre 17 e 18°C.

A Figura 20 mostra o campo médio de temperatura e vento ao nível de 500 mb para o horário das 12:00 UTC para a primeira classe. Em relação a intensidade do vento, nota-se que eles foram mais intensos durante a estação seca e mais fracos durante a estação chuvosa. Em relação a direção do vento, nota-se que durante a estação de transição e a estação chuvosa, os ventos são de leste, enquanto que durante a estação seca, é perceptível uma pequena inclinação do vento, não deixando de ser totalmente de leste. Para a temperatura, a estação chuvosa se apresentou um pouco mais fria do que as demais, tendo o seu valor entre -6 a -5,5°C, enquanto que, para a estação seca a temperatura ficou por volta de -5,5°C. Para a transição, a temperatura se apresentou um pouco mais alta, ficando por volta de -5°C.

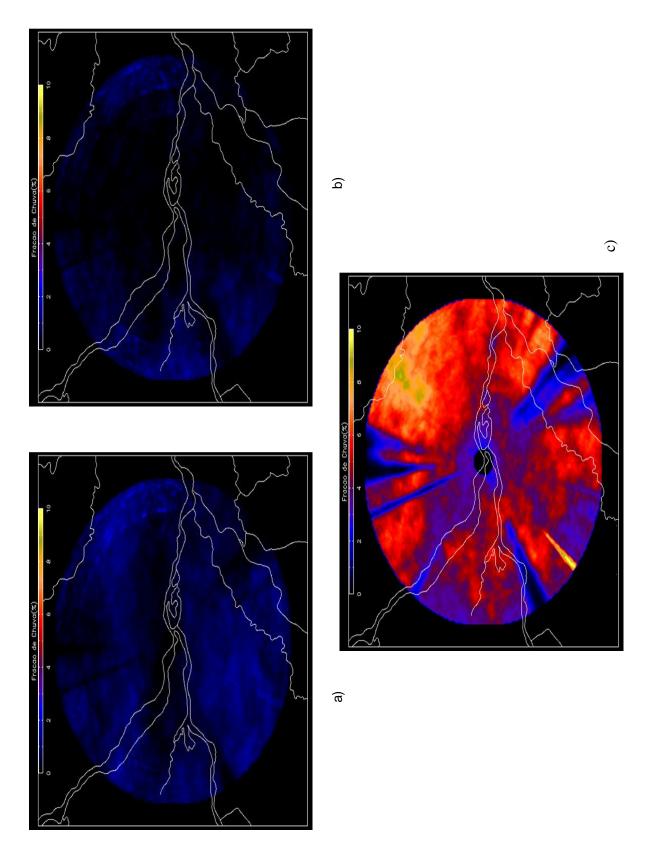


Figura 18: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

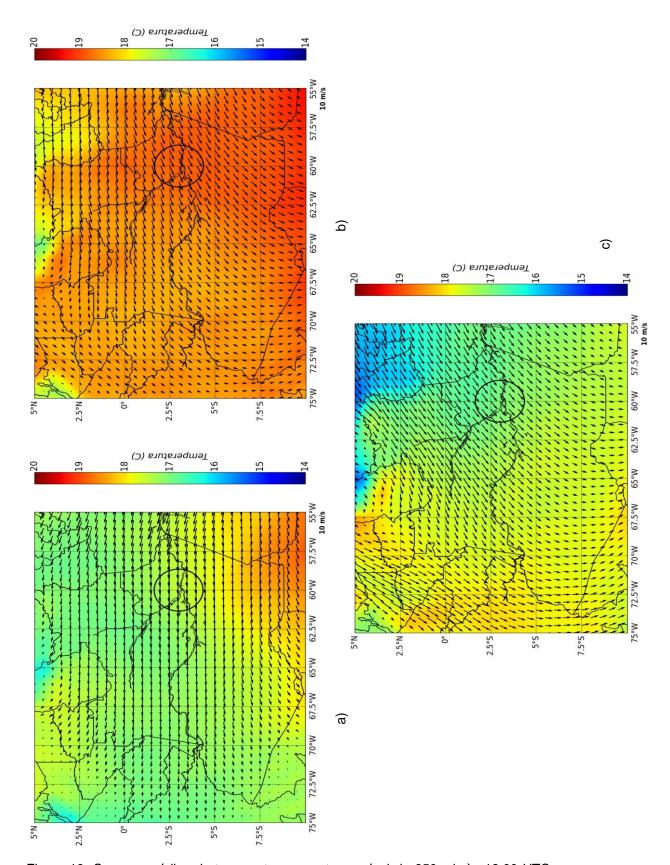


Figura 19: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

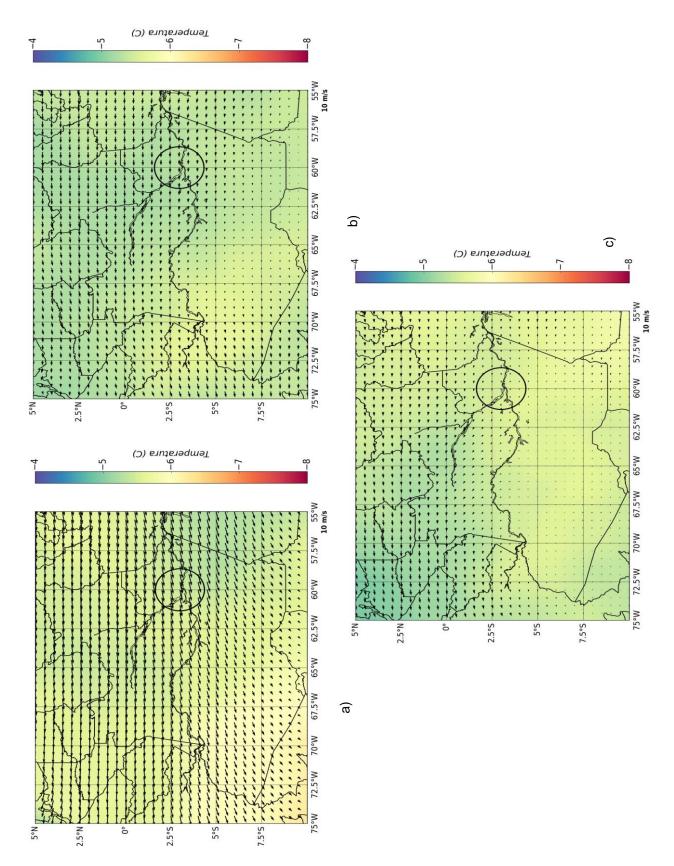


Figura 20: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 21 apresenta o campo médio de temperatura e do vento no nível de 250 mb para o horário das 12:00 UTC para a primeira classe. Neste nível, nota-se que os ventos mais intensos não são observados na estação seca (possui os menores valores), mas sim na estação chuvosa, tendo um comportamento inverso em comparação ao nível de 500 mb (Figura 5). Para a direção do vento, nota-se que os ventos se tornaram um pouco mais inclinados pra nordeste durante a estação seca e durante a transição, os ventos se mantiveram de leste. Já para a estação chuvosa, os ventos mudaram bastante de direção, sendo de sudeste. Para a temperatura, os maiores valores se encontraram durante a transição, que teve um valor próximo de -40,75°C e -41°C, sendo que durante a estação seca e chuvosa tiveram os valores de aproximadamente -41,5°C e -41,25°C.

A Figura 22 ilustra a umidade específica média durante cada estação dentro da primeira classe para às 12:00 UTC, para o nível de 850 mb. A estação chuvosa (painel (c)) apresenta maiores valores, onde o valor da umidade específica ficou entre 13 e 14 g/kg, que na qual, apresentou a menor temperatura neste nível (Figura 19). Entre a estação seca (painel (a)) e a transição (painel (b)), nota-se que durante a estação seca apresentou um valor um pouco menor, sendo em torno entre 10 e 11 g/kg, enquanto que para a transição, o valor ficou por volta de 11 e 12 g/kg.

A Figura 23 é referente a umidade específica ao nível de 500 mb para a primeira classe. Neste nível, a umidade específica se encontrou maior durante a estação chuvosa (painel (c)), onde o valor ficou entre 3 e 4 g/kg. Para a estação seca (painel (a)) e durante a transição (painel (b)), nota-se que a umidade não teve muita diferença entre elas. Para a estação seca, o valor da umidade específica média ficou entre 1.5 a 1 g/kg, enquanto que para a transição, o valor ficou entre 1.5 a 2 g/kg.

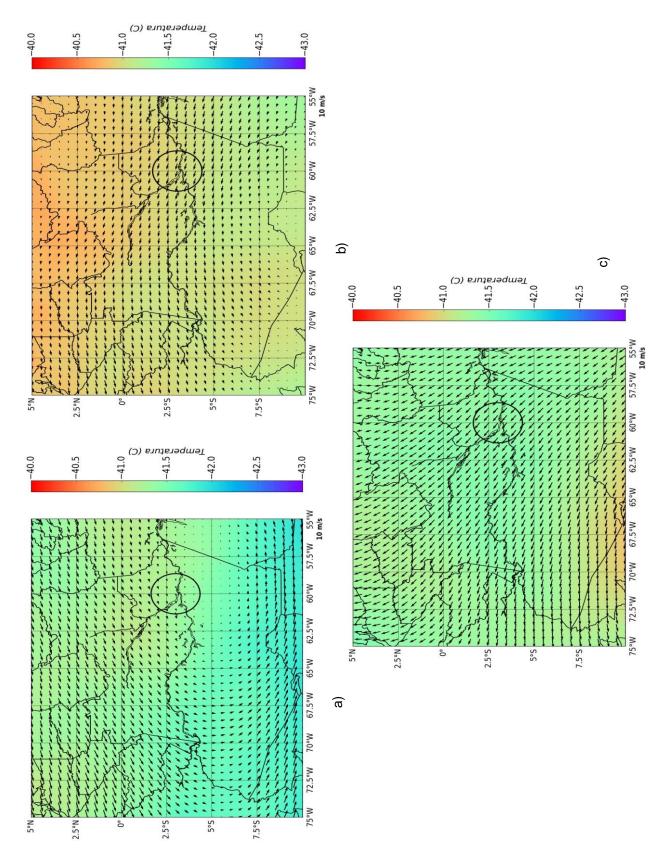


Figura 21: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

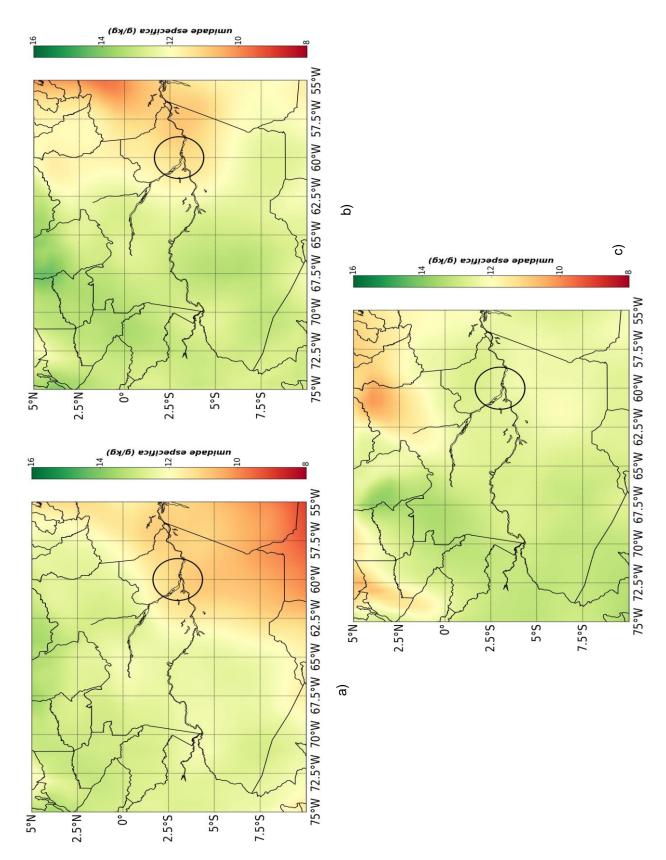


Figura 22: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

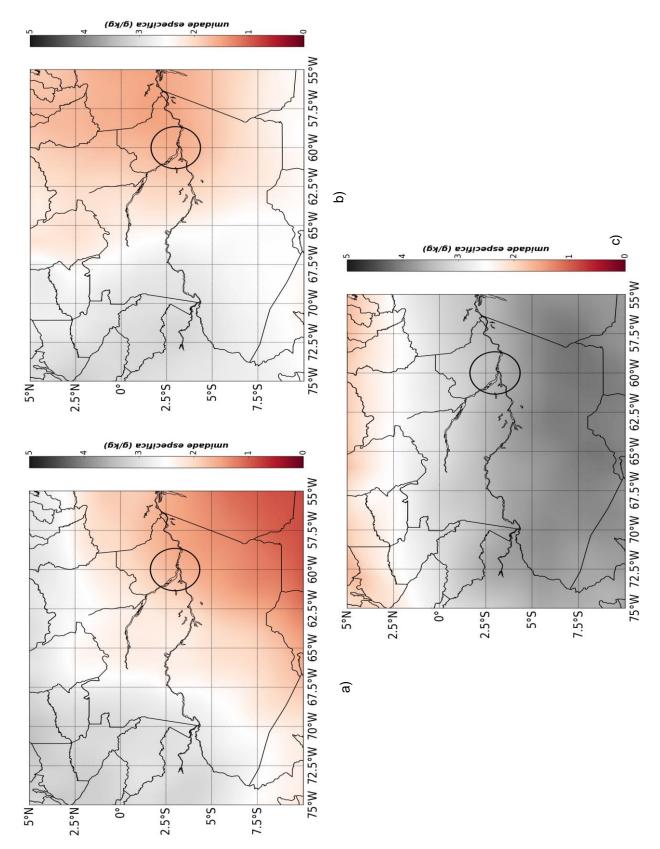


Figura 23: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 24 mostra a umidade específica ao nível de 250 mb para a primeira classe, durante às 12:00 UTC. Neste nível, como pode ser visto através da barra de cores, a umidade específica é baixa todas as estações, onde o intervalo vai de 0 até 0.30 g/kg. Embora os limiares não se distanciam muito, os menores valores de umidade específica ocorreram durante a estação seca (painel (a)), onde os valores ficaram entre 0.10 a 0.15 g/kg. Para a transição entre a estação seca para a chuvosa (painel (b)), os valores médios ficaram entre 0.15 a 0.20 g/kg. Para a estação chuvosa, onde ocorreu os maiores valores, a média ficou entre 0.25 a 0.30 g/kg.

4.3 Comportamento da 2° classe (moderada atividade elétrica)

A Figura 25 mostra o ciclo diurno da distribuição da densidade de raios médio por área e a distribuição vertical das frequências das refletividades durante a segunda classe. Como pode ser observado através da Tabela 5, a segunda classe apresentou aumento na densidade média de raios para todas as estações, o que pode ser observado pela Figura 25 que mostra aumentos em todos os horários em comparação a classe anterior.

Analisando o comportamento das densidades de raios durante a segunda classe, as estação seca e transição sofreram diminuições entre às 00:00 UTC até às 05:00 UTC (20:00 até às 01:00 hora local), enquanto que, para a estação chuvosa, as densidades sofreram pequenos aumentos até às 03:00 UTC e logo decaiu até às 05:00 UTC.

Entre às 06:00 até às 23:00 UTC, as distribuições tiveram praticamente o mesmo comportamento, ou seja, foram aumentando ao longo deste intervalo até por volta das 20:00 UTC, e logo após, sofreram diminuições para restante do intervalo. Neste período de tempo, nota-se que as maiores densidades acumuladas de raios ocorreram entre às 18:00 e 20:00 UTC em todas as estações, o mesmo comportamento da primeira classe. Para a distribuição vertical das refletividades, houve um aumento de frequência comparação com a classe anterior e também ocorreu uma elevação da altura, ou seja, as tempestades atingiram níveis mais altos. De uma forma geral, todas as refletivi

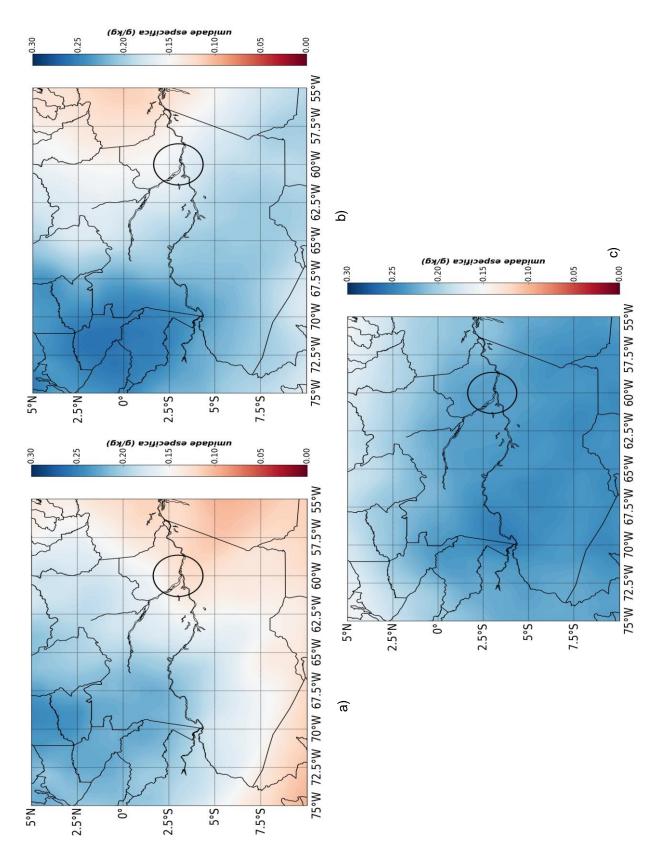


Figura 24: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a primeira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

-des foram mais frequentes durante a estação chuvosa entre os níveis de 2km e 5 km de altura e, sendo a estação seca a que apresentou as menores frequências.

Em relação ao desenvolvimento vertical, observa-se que em todas as estações entre às 00:00 e 06:00 UTC e das 18:00 às 23:00 UTC foi possível observar frequências de 20 e 25 dBZ em 18 km de altura. Entretanto, todas refletividades foram mais frequentes durante o segundo intervalo de tempo para todas as estações, sendo que, para as refletividades de 30 até 40 dBZ as suas maiores frequências ocorreram durante a transição a partir de 6 km de altura entre os intervalos das 15:00 UTC até às 23:00 UTC, intervalo que houve as maiores densidades de raios em todas as estações. Desta forma, nota-se que as maiores elevações, juntamente com as maiores frequências, coincidiram com as maiores densidades de raios, da mesma forma que ocorreu durante a primeira classe (Figura 16). Em todas as estações nota-se também que entre às 07:00 UTC até por volta das 15:00 UTC, as tempestades tem baixo desenvolvimento vertical, se tornando menores.

A Figura 26 mostra o perfil termodinâmico para a segunda classe às 12:00 UTC. De um modo geral, comparando a segunda classe com a primeira, nota-se que em todas as estações, a atmosfera se encontrou mais úmida. Durante a estação chuvosa, a atmosfera estava mais úmida, enquanto que durante a transição, a atmosfera estava mais seca do que as demais estações. Para o nível da isoterma de 0°C, a estação seca e de transição não apresentaram muitas mudanças em relação a classe anterior, ficando por volta de 600 e 550 mb. Para a estação chuvosa, a isoterma se encontrou em níveis mais baixos de pressão, por volta de 550 mb. Para a isoterma de -10°C, não houve mudanças entre as classes e estações, estando localizada aproximadamente no nível de 450 mb. O CAPE médio sofreu diminuição em todas as estações em comparação com a classe anterior, que foram: seca -1.548 J/kg, transição – 3.393 J/kg, chuvosa – 1.350 J/kg e passaram a ser: seca - 1.441 J/kg, transição - 2.214 J/kg, chuvosa - 591 J/kg. O CINE médio também sofreu diminuições, exceção para a transição, que houve um pequeno aumento, que antes foi de -11,4 J e passou para -20,6 J. Em relação ao nível de condensa-

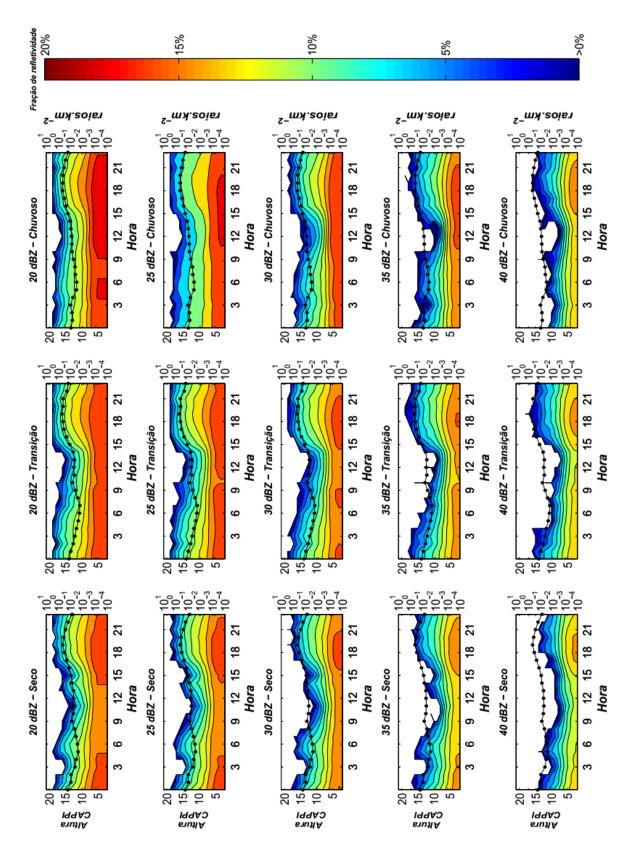


Figura 25: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a segunda classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica.

ção por levantamento (NCL) e o nível de equilíbrio (NE), nota-se que o NCL durante a estação de transição e estação chuvosa, estava em um nível de pressão mais baixo, sendo 928,4 mb e 800 mb, respectivamente, enquanto que, para o NE foi de 150 mb e 300 mb, respectivamente. Durante a estação seca para segunda classe, o NCL ocorreu em níveis de pressão mais baixo em comparação a classe anterior, que foi em 977,4 mb e passou para 936 mb. Em relação ao NE, ele ocorreu em nível maior de pressão, que em torno de 190 mb e na classe anterior foi de 185 mb.

A Figura 27 mostra a distribuição espacial da refletividade de 20 dBZ para o CAPPI de 3 km de altura para a segunda classe. Como foi visto através da Figura 13, a refletividade de 20 dBZ se tornou bem mais frequente durante a segunda classe em comparação com a primeira. Durante a segunda classe, nota-se que para a estação seca, as maiores frações estão situados nos extremos nordeste e sul, enquanto que na transição agrupam-se a sudoeste de Manaus, inclusive atingindo o máximo de 6%. Na estação chuvosa as chuvas se concentram a leste e, os mais preponderantes (10%), a sul.

A Figura 28 mostra a temperatura e o vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Comparando a primeira classe (Figura 19) com a segunda, nota-se que os campos de ventos foram praticamente o mesmos, tanto em direção como em magnitude do vento. A predominância da direção dos ventos foi respectivamente de: leste para a estação seca, nordeste para a transição e chuvosa. Outro ponto de igualdade entre as classes é que, durante a estação chuvosa, os ventos se apresentaram mais intensos do que nas demais estações. Em relação a temperatura média, a segunda classe apresentou valores um pouco menores em todas as estações em comparação com a primeira classe. A estação seca apresentou um valor médio de entre 17°C e 17,5°C, a transição apresentou um valor de 18,5°C e a estação chuvosa apresentou uma temperatura por volta de 17°C.

A Figura 29 mostra a temperatura e o vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Ao comparar a primeira classe com a segunda, nota-se que em relação ao vento, não houve variações tanto na direção como

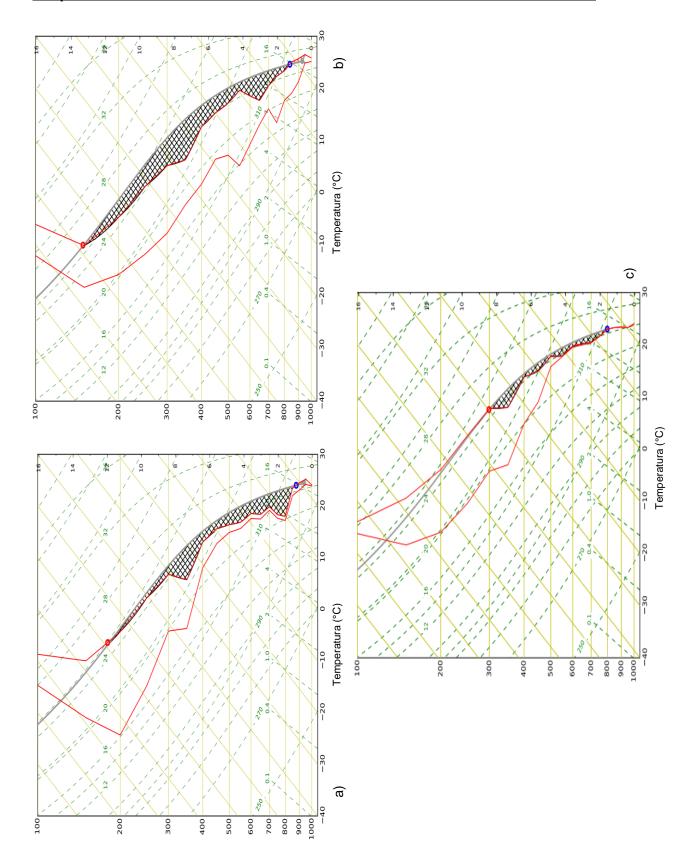


Figura 26: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a segunda classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

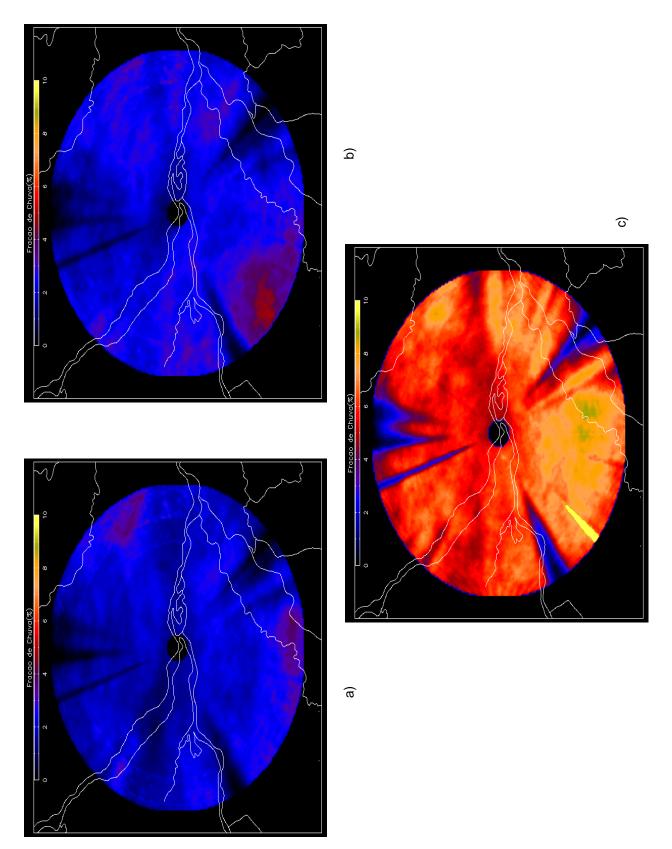


Figura 27: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

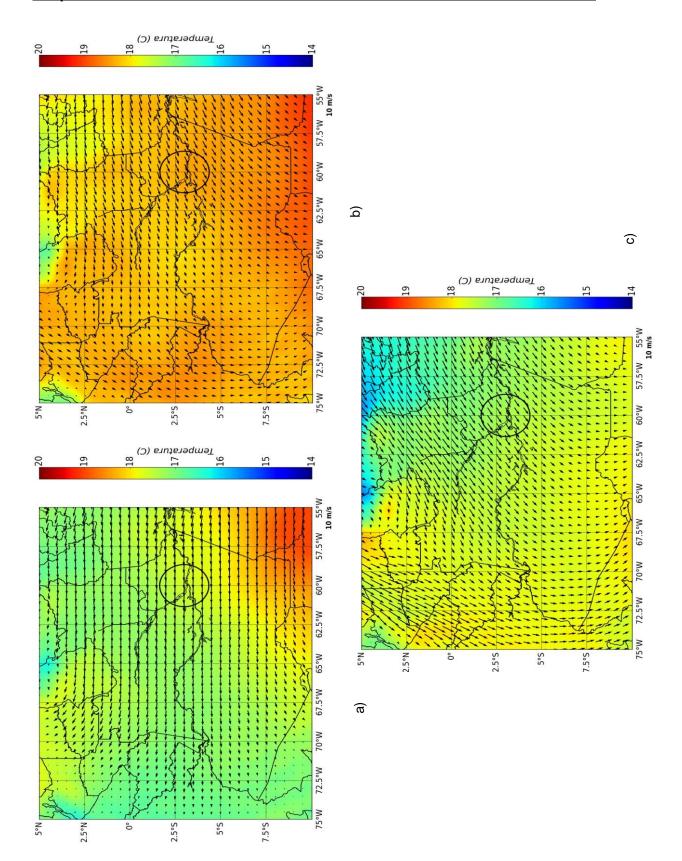


Figura 28: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

na magnitude deste. De uma forma geral, em todas as estações durante a segunda classe, os ventos se apresentaram mais de leste, sendo mais intenso durante a estação seca. Em relação a temperatura, a segunda classe apresentou um pequeno resfriamento durante a estação seca e durante a transição, tendo uma temperatura entre -6°C e -5,5°C em ambas as estações. Já para a estação chuvosa, nota-se que não houve muita mudança da temperatura, ficando em torno de -5.5 °C em ambas classes.

A Figura 30 mostra a temperatura e o vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Neste nível, assim como nos demais níveis, o comportamento dos ventos em cada estação foram praticamente iguais. Durante a estação seca, o ventos foram predominantemente de nordeste, assim como na primeira classe (Figura 21). Durante a transição entre a estação seca para a chuvosa, os ventos se tornaram um pouco inclinado na direção sudeste. Durante a estação chuvosa, os ventos durante a segunda classe tiveram praticamente o mesmo comportamento da primeira, sendo ventos de sudeste. Em relação a intensidade do vento, nota-se que as maiores velocidades médias ocorreram durante a estação chuvosa. Em relação a temperatura, a estação seca e a transição tiveram uma pequena diminuição em relação a primeira classe, tendo os seguintes valores aproximadamente: -41,75°C para estação seca e -41°C para a transição, enquanto que, para a estação chuvosa, houve um pequeno aumento desta, ficando um pouco abaixo de -41°C.

A Figura 31 mostra a umidade específica no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Ao compararmos a segunda com a primeira, notase que a umidade específica em todas as estações sofreram aumentos, em torno de 1 g/kg na estação seca, 1,5 g/kg na transição e 0,5 g/kg na chuvosa. Para a estação seca, por exemplo, os valores estão abaixo de 12 g/kg, enquanto que na chuvosa, nas proximidades de Manaus, os valores ficaram no intervalo de 12 a 14 g/kg.

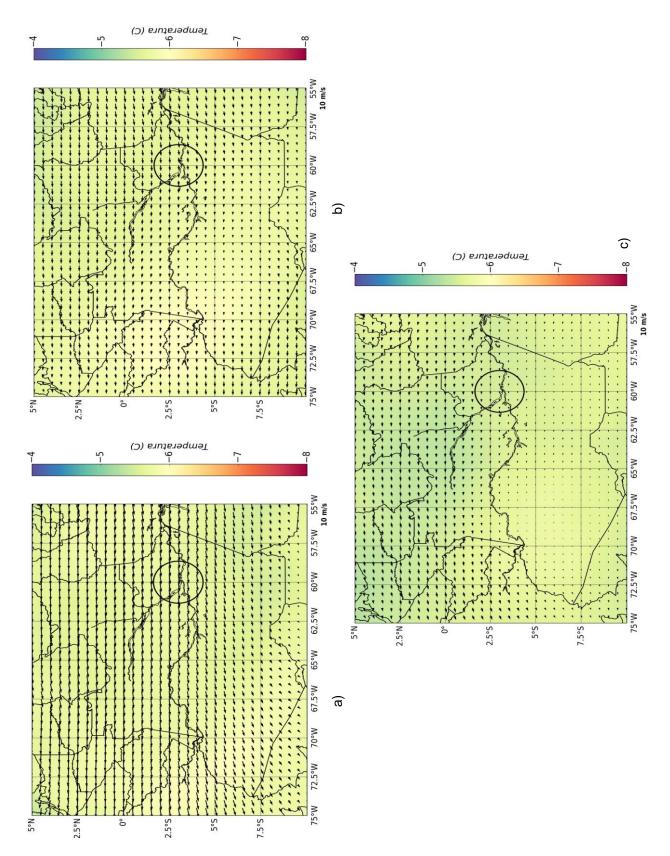


Figura 29: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

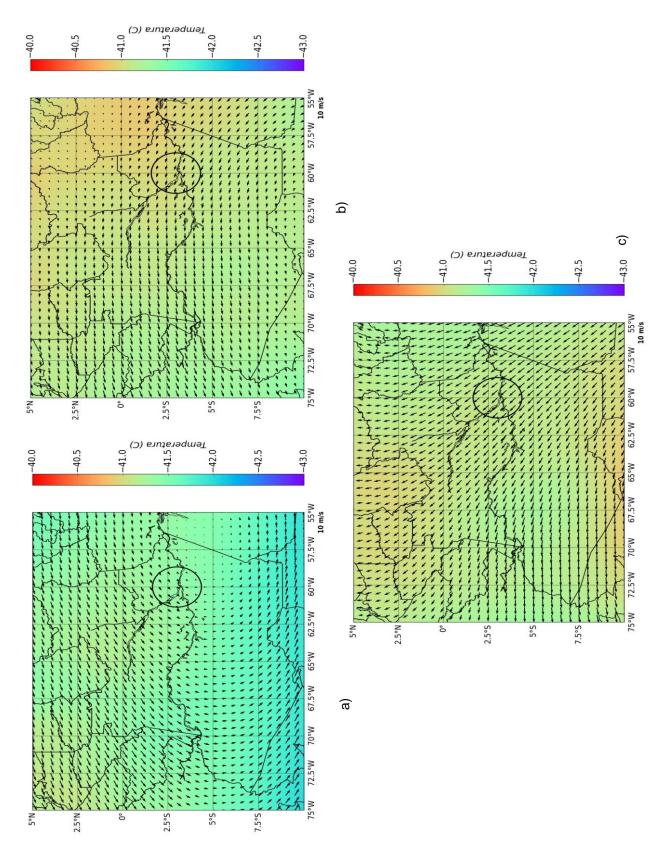


Figura 30: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

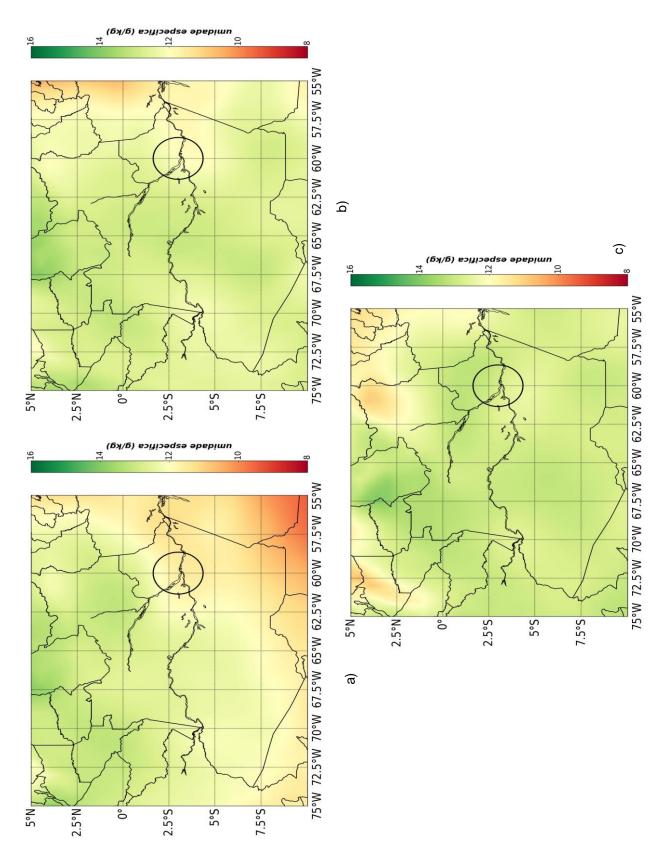


Figura 31: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 32 mostra a umidade específica no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Nesta, durante a estação seca e durante a transição, nota-se que houve aumentos na umidade específica em comparação com a primeira classe (Figura 23), em torno de 0,5 g/kg. Para estas estações, a umidade ficou entre 1 a 2 g/kg durante a estação seca e 2 a 3 g/kg durante a transição. Para a estação chuvosa, nota-se que ocorreu uma pequena diminuição desta variável em comparação a primeira classe, que teve um valor entre 3 e 4 g/kg e passou a ter um valor entre 3 a 3.5 g/kg.

A Figura 33 mostra a umidade específica no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. Para este nível, a específica aumentou em todas as estação para a segunda classe em comparação com a primeira classe (Figura 24). No geral, em todas as estações houve um aumento de em torno de 0.05 g/kg.

4.4 Comportamento da 3° classe (alta atividade elétrica)

A Figura 34 mostra o ciclo diurno da distribuição da densidade de raios médio por área e a distribuição vertical das frequências das refletividades durante a terceira classe. Para a estação seca, entre o período das 00:00 até às 12:00 UTC, as densidade médias de raios sofreram diminuições em relação a segunda classe. Durante este intervalo de tempo, a segunda classe apresentou níveis de altura um pouco mais elevado. Entretanto, em todos os níveis atingidos por ambas as classes, nota-se valores maiores de frequência durante a terceira classe. Entre às 12:00 e 23:00 UTC as densidade elétricas sofreram aumentos, assim como na segunda classe, porém, as refletividades foram mais frequentes durante a terceira classe, que na qual, os seus maiores valores coincidiram com as maiores densidades de raios. Para a transição, as densidades de raios sofreram aumentos durante todo o período do dia. Em relação as frequências das refletividades, nota-se que para as refletividades de 20 a 30 dBZ, atingiram alturas mais altas do que na segunda classe, fincado entre 16 e 18 km durante todo o período do dia. Para as refletividades de 35 a 40 dBZ, estas também foram

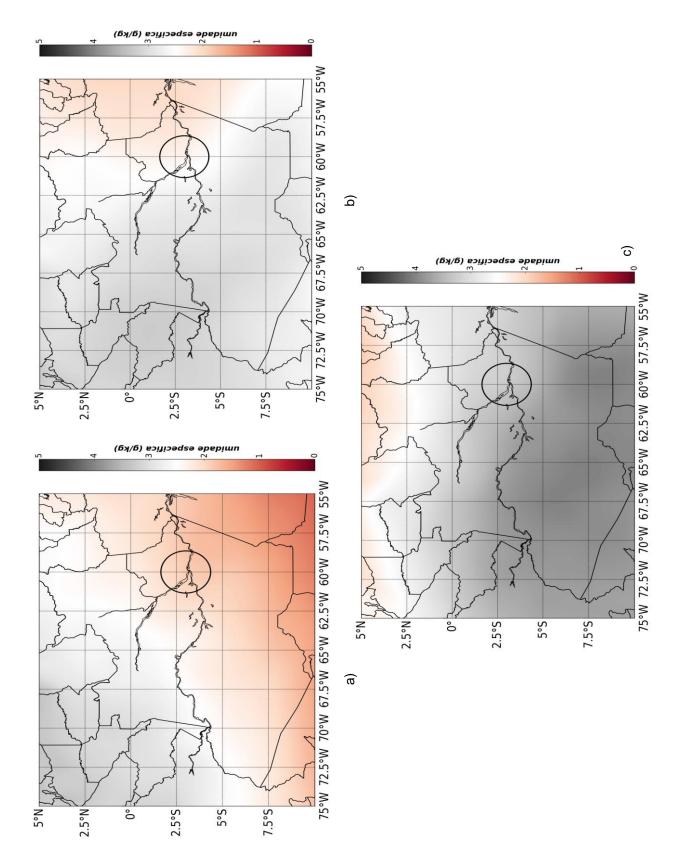


Figura 32: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

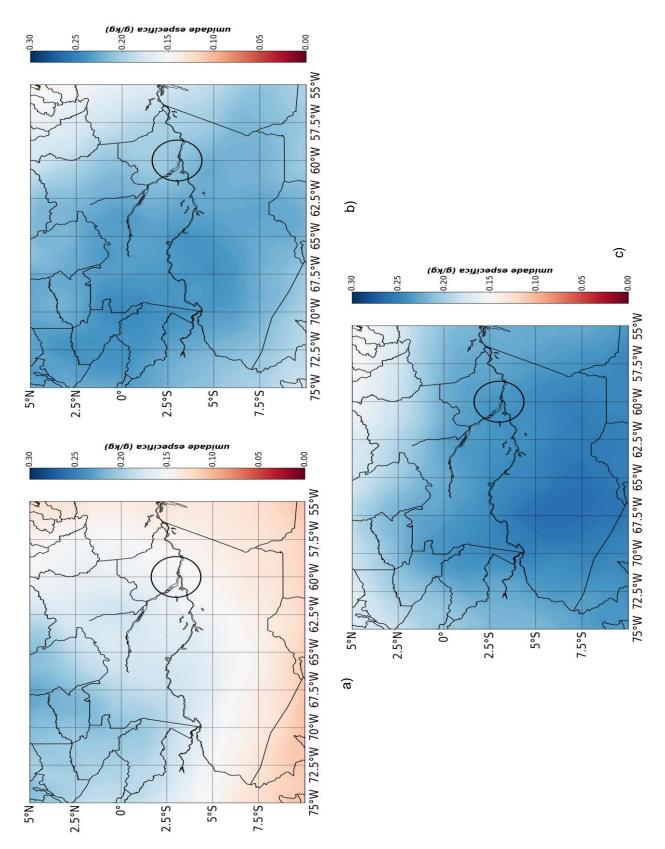


Figura 33: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a segunda classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

mais frequentes durante a terceira classe, entretanto, entre às 00:00 até às 05:00 UTC, a segunda classe apresentou níveis de altura um pouco maiores em relação a terceira classe. Porém, para os mesmo níveis ocorridos em ambas classes para a mesma estação, nota-se que as maiores frequências ocorreram durante a terceira classe. Para a estação chuvosa, nota-se que as densidades ocorreram durante o mesmo intervalo de tempo que ocorreu durante a segunda classe e também para as demais estações, que foi entre 18:00 até às 21:00 UTC. Para a terceira classe durante esta estação, nota-se que entre às 00:00 UTC até às 12:00 UTC, todas as refletividades foram menos frequentes e tiveram tempestades mais baixas, comparando-a com a mesma durante a segunda classe. Já entre o período das 13:00 até às 23:00 UTC, as refletividades de 20 a 30 dBZ foram mais frequentes em todas as alturas atingidas durante a terceira classe e a refletividade de 40 dBZ também foi mais frequente do que a classe anterior entre as alturas de 2 a 6 km.

Comparando as estações ente si durante a terceira classe, observa-se que entre às 00:00 até às 09:00 UTC, as refletividades de 35 e 40 dBZ foram menos frequentes durante a estação chuvosa, que na qual, apresentou menor desenvolvimento vertical do que nas demais estações. Enquanto isso, durante a estação de transição, as frequências das refletividades e os desenvolvimentos verticais foram maiores. Entre às 12:00 até às 23:00 UTC, intervalo na qual ocorreram as maiores densidades elétricas e as maiores frequências, nota-se que entre 2 a 6 km de altura, todas as refletividades foram mais frequentes durante a estação chuvosa e menos frequentes durante a estação seca. Entretanto, para as alturas acima de 6 km, as refletividades foram mais frequentes durante a transição, que atingiu entre 15 e 18 km de altura, para as refletividades entre 20 e 40 dBZ, respectivamente.

A Figura 35 mostra o perfil da temperatura do ar e do ponto de orvalho das estações para às 12:00 UTC para a terceira classe. No geral, a atmosfera se encontrou mais seca durante a terceira classe do que na segunda (Figura 26). Durante a estação seca e transição, a isoterma de 0°C esteve em níveis mais baixos de pressão, se encontrando por volta de 550 mb. Já para a estação chu-

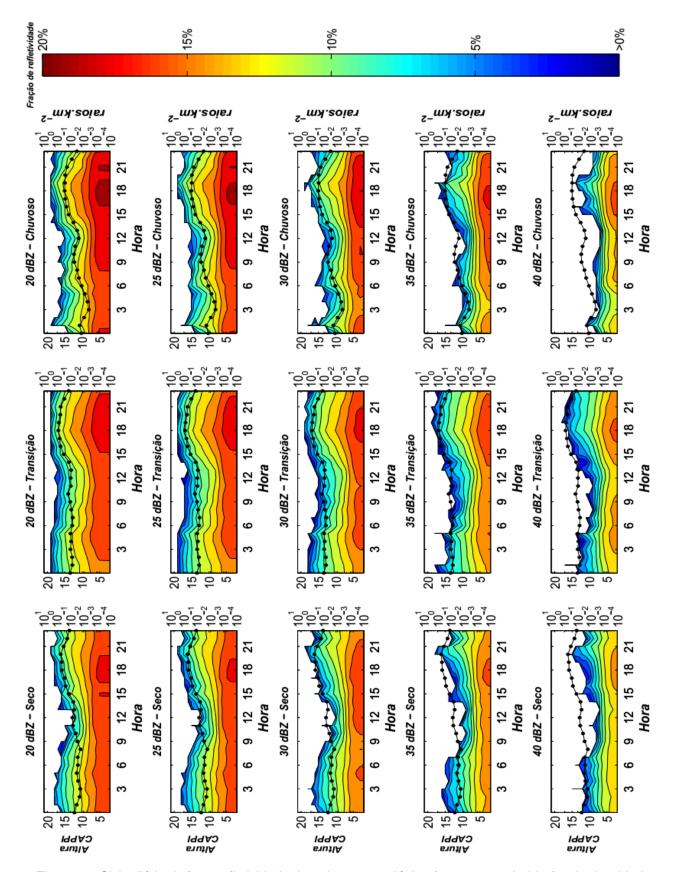


Figura 34: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a terceira classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica.

-vosa, a isoterma se manteve por volta de 600 mb. Em relação ao nível de pressão que ocorreu a temperatura de -10°C, nota-se que esta ocorre no mesmo nível para todas as estações, por volta de 450 mb. Para as estações seca e chuvosa, o CAPE médio teve um aumento em relação a segunda classe, que antes era de 1.441 J/kg e 591,3 J/kg, passou a ser de 2.143 J/kg e 1.091 J/kg, respectivamente. Para a transição entre a estação seca para a chuvosa, o CAPE médio durante a segunda classe foi de 2.213 J/kg e passou a ser de 978,8 J/kg durante a terceira classe, além disso, a terceira classe, na transição se encontrou bem mais seca em comparação com a mesma durante a segunda classe e também em relação as outras estações durante a terceira classe. O CAPE para a estação seca e chuvosa foram de 2.143 e 1.091 J/kg, respectivamente, sendo maiores que os mesmo durante a segunda classe. O CINE médio foi de -2,3 J/kg para estação seca, -7,9 J/kg para a transição e -17,8 J/kg para a estação chuvosa. O NCL médio durante a estação seca e chuvosa ocorreram em níveis de pressão mais altos em relação a classe anterior, tendo os seguintes valores: 976 mb e 918,8 mb. Para a transição, o NCL médio ocorreu por volta de 889,7 mb, mais alto do que na classe anterior e o NE médio ocorreu em mais ou menos 200 mb, nível mais alto que o da segunda classe. O NE médio para a estação seca e chuvosa ocorreram em níveis mais baixos do que a classe anterior, por volta de 170 mb e 200 mb, respectivamente.

A Figura 36 mostra a distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ durante a terceira classe. Ao compararmos a terceira classe com a classe anterior (Figura 27), nota-se que as frequências de 20 dBZ se tornaram bem mais frequentes durante a terceira classe. Nota-se que durante a terceira classe, a estação chuvosa e de transição, possuíram o mesmo comportamento ao se tratar da região com os maiores valores de frequência. Em ambas estações, os maiores valores ocorreram entre o sudoeste e noroeste da cidade de Manaus, na qual, as frequências ficaram por volta de 6% durante a transição e 10% durante a estação chuvosa. Para a estação seca, nota-se que a maiores frequências (5%) ocorreram mais ao norte e a leste da região.

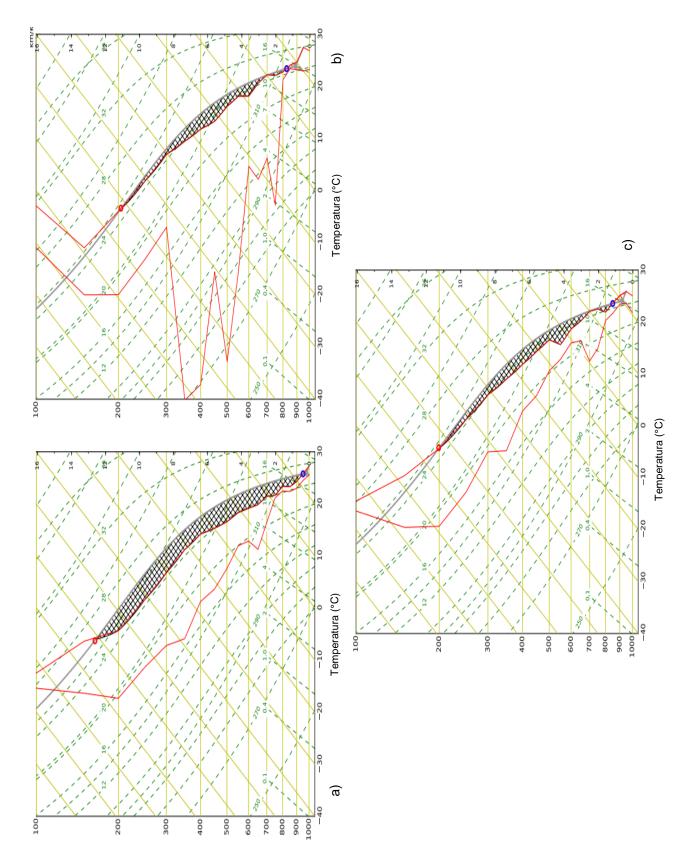


Figura 35: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a terceira classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

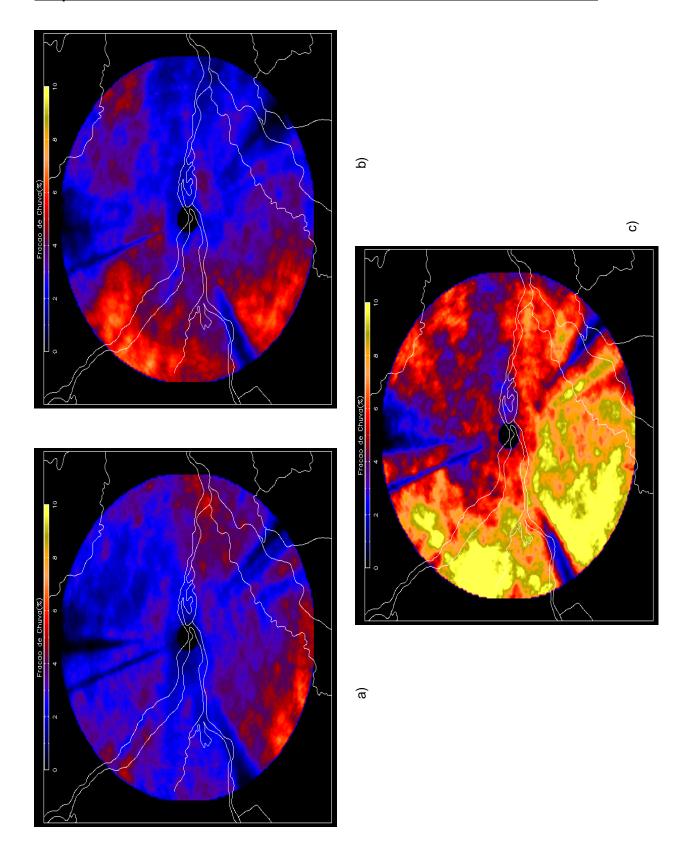


Figura 36: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 37 mostra o campo médio da temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC durante a terceira classe (alta atividade elétrica). Ao compararmos a terceira classe com as classes anteriores (Figura 19 e Figura 28), vemos que os ventos não mudaram de direção dentro da região de cobertura do radar em todas as classes, sendo de leste durante a estação seca, de nordeste durante a transição e durante a estação chuvosa. Em relação a temperatura média, a estação seca mostrou uma temperatura um pouco mais baixa em relação as classes anteriores, tendo a temperatura entre 17 e 17,5 °C. Para a transição, a temperatura média sofreu uma pequena diminuição em relação a classe anterior, de aproximadamente 0,5 °C. Já para a estação chuvosa, a temperatura sofreu um sutil aumento, ficando por volta de 17,5 °C. Ao compararmos as estações durante a terceira classe, nota-se que os ventos foram um pouco mais intensos durante a transição e também foi a estações que esteve um pouco mais quente, por volta de 18,5°C.

A Figura 38 mostra a distribuição da temperatura média e o vento médio ao nível de 500 mb às 12:00 UTC durante a terceira classe, na qual, o painel (a) é referente a estação seca, painel (b) é referente a transição entre a estação seca para a chuvosa e o painel (c) é referente a estação chuvosa. Comparando com as classes anteriores (Figura 20 e Figura 29), notamos que todas as estações tiveram diminuições em relação as classes anteriores, em torno de 0,5°C. Em relação ao vento, a estação seca mostra uma sutil inclinação do vento em comparação as classes anteriores. Em relação a transição, os ventos se mantiveram de leste, assim como nas outras classes anteriores. Durante a estação chuvosa os ventos tiveram um aumento bem sutil durante a terceira classe, sendo mais intensos do que as demais classes anteriores, como se pode notar através do comprimento das setas.

A Figura 39 mostra a distribuição da temperatura média e do vento médio no nível de 250 mb às 12:00 UTC durante a terceira. A estação seca em comparação com as classes anteriores (Figura 21 e Figura 30) apresentou um resfriamento em relação as classes anteriores, cuja temperatura média ficou por volta de -41.5 °C. Em relação ao vento médio, a estação seca não apresentou

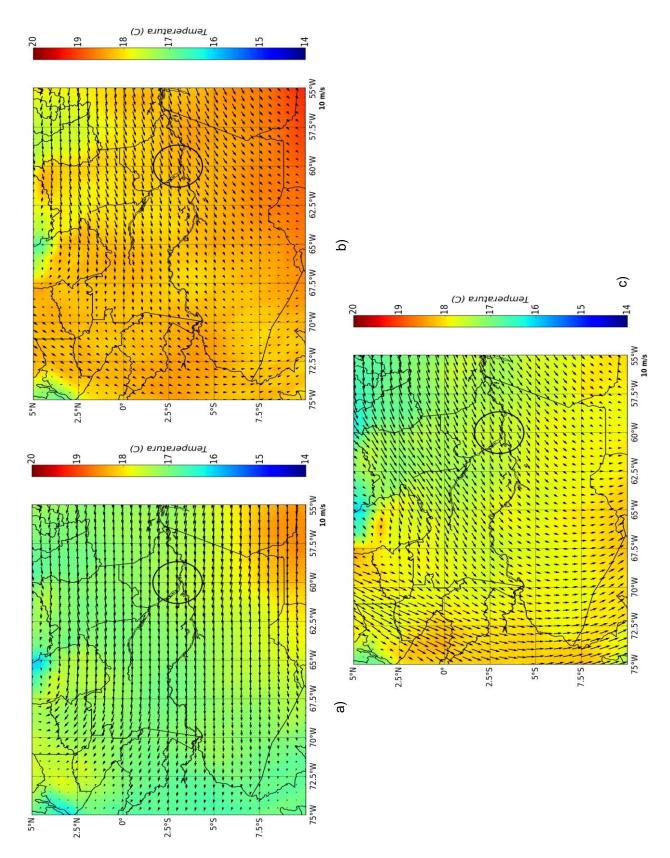


Figura 37: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

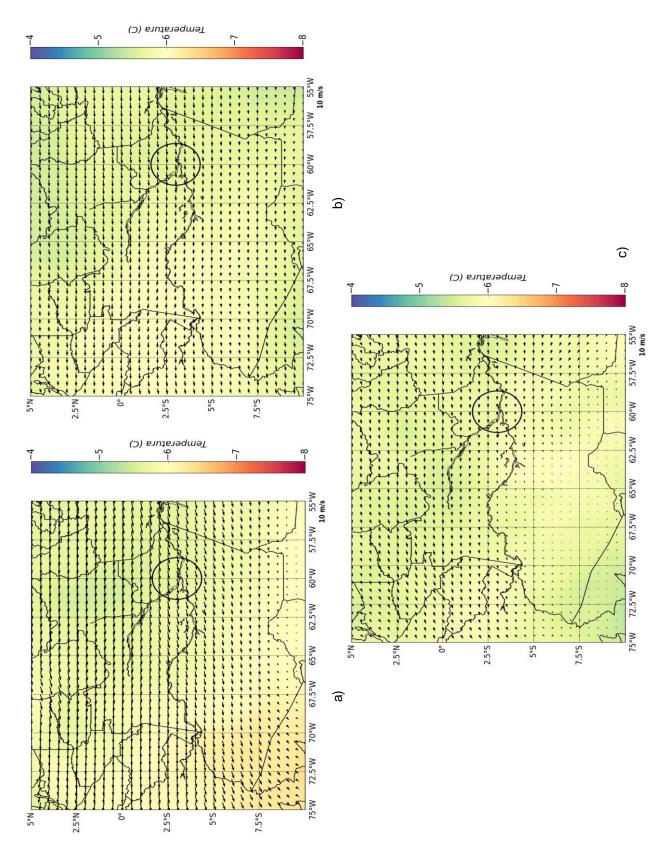


Figura 38: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

variações em relação a direção do vento, sendo de nordeste. Entretanto, a terceira classe mostrou uma intensidade de vento maior do que a primeira classe e menor do que a ocorrida durante a segunda classe. Durante a estação de transição, a temperatura também permaneceu um pouco mais baixa do que nas classes anteriores, tendo um valor médio de aproximadamente -41 °C. A direção do vento, não mostrou variações em comparação com as demais classes anteriores. Para a estação chuvosa, o comportamento da direção média do vento não mudou muito em relação as classes anteriores, sendo também de sudeste. Em relação a temperatura média nesta estação, a terceira classe apresentou uma temperatura maior que a primeira classe e praticamente a mesma temperatura ocorrida durante a segunda classe, que foi de aproximadamente -41 °C.

Comparando as estações entre si durante a terceira classe, nota-se que os ventos tiveram direções diferentes em todas as estações, sendo a estação chuvosa com as maiores velocidades. Em relação a temperatura, a estação de transição apresentou-se um pouco mais aquecida, cujo valor ficou por volta de -41°C, enquanto que a estação seca esteve mais fria, aproximadamente -41,75°C.

A Figura 40 mostra a umidade específica média ao nível de 850 mb às 12:00 UTC para os dias que foram classificados como alta atividade elétrica (terceira classe). De uma forma geral, todas as estações sofreram aumentos em relação as classes anteriores para o mesmo nível (Figura 22 e Figura 31), em torno de 1 g/kg para cada estação. Ao compararmos todas as estações durante a terceira classe, a estação chuvosa apresentou uma maior umidade específica média, que ficou por entre 13 e 14 g/kg, sendo a estação seca com o menor valor, em torno de 12 g/kg.

A Figura 41 mostra a umidade específica média no nível de 500 mb às 12:00 UTC para os dias que foram classificados como alta atividade elétrica (terceira classe). Em comparação com a classe anterior, a estação seca teve um pequeno aumento, em torno de 0.5 g/kg, enquanto que a estação seca teve uma pequena diminuição (menos que 0.5 g/kg) e a estação chuvosa teve praticamente o mesmo valor, entre 3 e 3.5 g/kg.

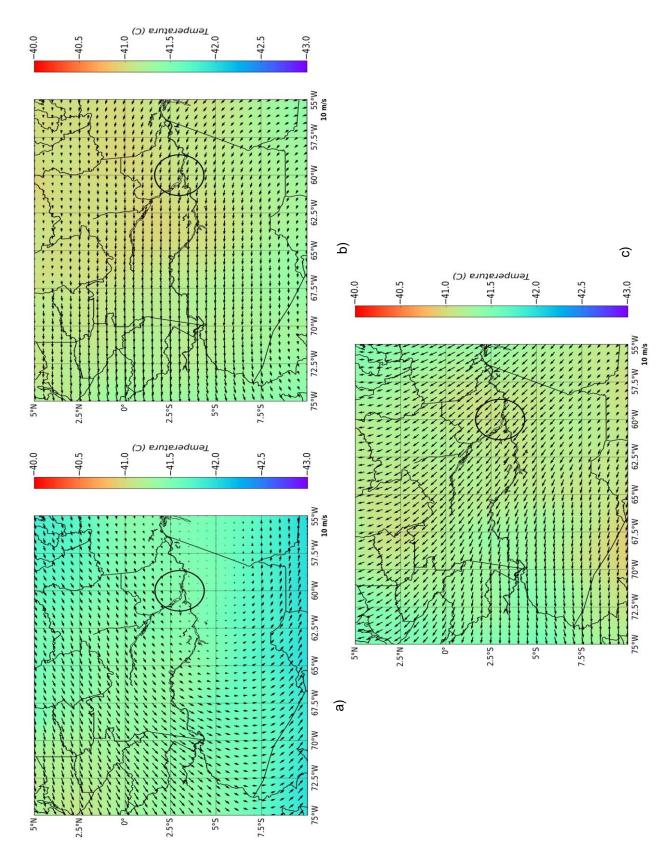


Figura 39: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

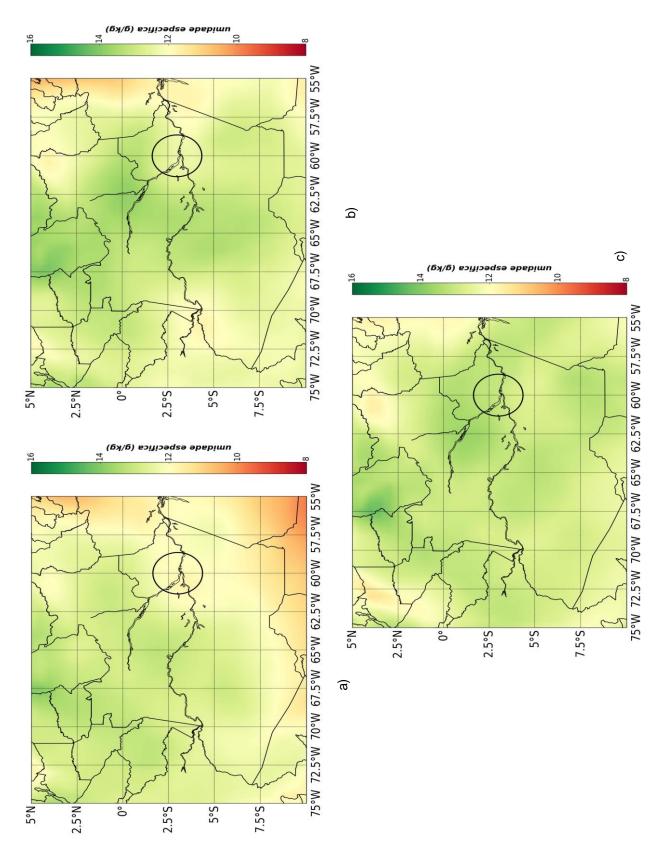


Figura 40: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

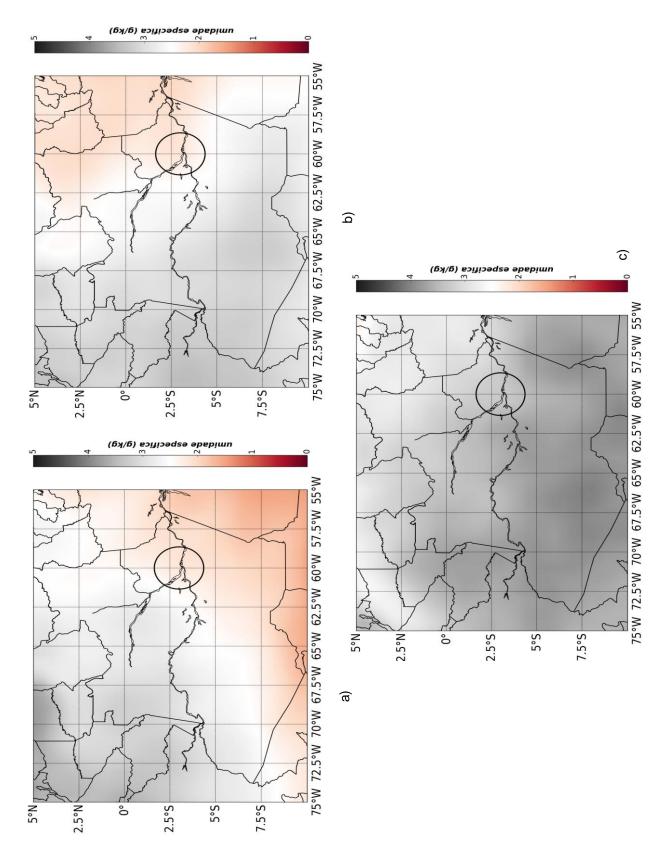


Figura 41: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a terceira classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 42 mostra a umidade específica média no nível de 250 mb às 12:00 UTC para os dias que foram classificados como alta atividade elétrica (terceira classe). Ao compararmos a terceira classe com a classe anterior, notase que a estação seca e chuvosa apresentaram um aumento de 0.05 g/kg. Já para a estação de transição, teve uma diminuição menor que 0.05 g/kg. Comparando as estações dentro da terceira classe, nota-se que a estação seca apresenta valores entre 0,10 a 0,20 g/kg em contraste com as demais estações que mostram valores maiores. A estação de transição e chuvosa tem distribuição entre 0,20 a 0,30 g/kg, com valores máximos atingidos na estação chuvosa.

4.5 Comportamento da 4° classe (atividade elétrica severa)

A Figura 43 apresenta a distribuição horária da densidade média de raios médios e das frequências verticais das refletividades para a quarta classe. Ao compararmos a quarta classe com a terceira classe (Figura 19), nota-se que durante a estação seca, as densidades foram maiores em praticamente em todos os horários. Para a estação de transição, entre às 00:00 até às 09:00 UTC, as densidades fora um pouco mais baixa em relação a terceira classe, porém, a partir da 10:00 UTC até às 23:00 UTC, foram maiores. Durante a estação chuvosa, a densidade de raios ocorridas na quarta classe durante o período entre às 00:00 até às 12:00 UTC, era maior do que na classe anterior, enquanto que entre às 13:00 e 23:00 UTC, as densidade se mantiveram praticamente iguais, totalizando uma densidade de aproximadamente 2 raios.km⁻².

Comparando as densidades de raios dentro da quarta classe, nota-se que durante a transição, as densidades de raios mostraram-se bem mais intensas a partir das 05:00 UTC até às 23:00 UTC, com o máximo às 18:00 UTC, tendo um valor acumulado de 1 raio.km⁻². Em relação a distribuição horária das frequências de refletividade na vertical, nota-se que entre 2 e 5 km de altura, as refletividades apresentaram comportamentos similares durante a terceira e a quarta classe entre às 16:00 e 22:00 UTC, porém, os maiores valores de frequência ocorreu durante a estação chuvosa. Como se pode notar durante a quarta classe, as refletividades atingiram alturas mais elevadas durante a esta-

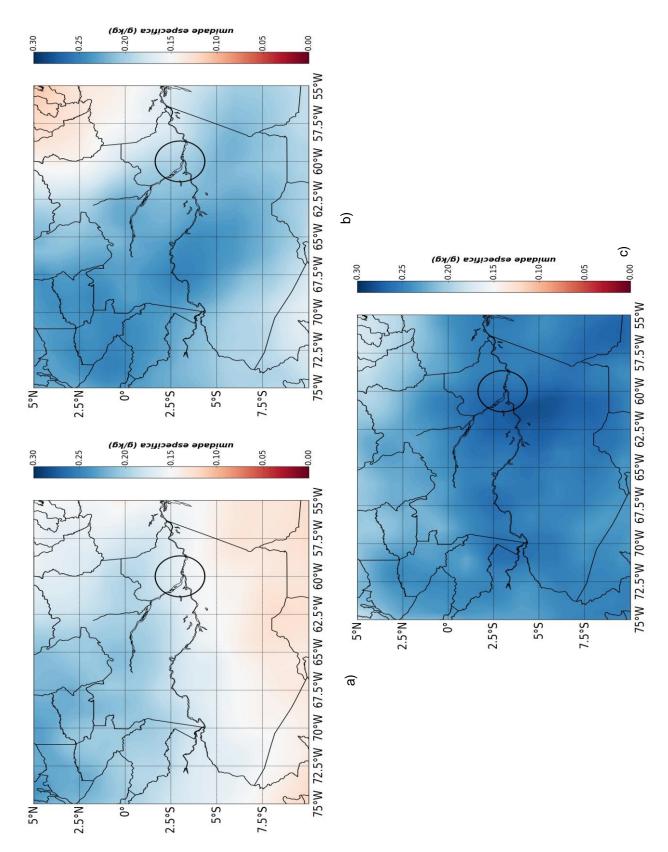


Figura 42: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

ção de transição, sendo que as refletividades de 20 a 30 dBZ atingiram níveis de 18 km de altura durante o intervalo dás 14:00 até às 21:00 UTC e, as refletividades de 35 e 40 dBZ atingiram o nível de 16 km. Para os níveis acima 6 km, todas as refletividades foram mais frequentes durante a estação de transição e menos frequentes durante a estação seca.

A Figura 44 mostra o perfil médio da temperatura do ar e da temperatura do ponto de orvalho para às 12:00 UTC para a quarta classe. Comparando a quarta classe com a terceira (Figura 35), nota-se que a estação de transição esteve mais seca do que a terceira, como se pode notar através da curva da temperatura do ponto de orvalho com valores mais baixos. A estação chuvosa teve uma temperatura média do ar parecida com a da terceira classe, enquanto que a quarta classe esteve menos seca do que a terceira classe, como se pode notar através da temperatura média do ponto de orvalho, que apresentou valores um pouco maiores.

Em relação a temperatura de 0°C, esta ocorreu no mesmo nível de pressão durante a estação seca e transição, que foi entre 600 e 550 mb. Para a estação chuvosa, esta temperatura ocorreu no nível de 600 mb. Para a temperatura de -10°C, nota-se que esta ocorreu no mesmo nível, em 450 mb. A estação seca teve uma diminuição no CAPE médio em relação a terceira classe, que foi de 2.143 J/kg e passou para 1.466 J/kg. Entretanto, o CINE médio teve um aumento, sendo que antes era -2,3 J/kg e passou para -42,8 J/kg. Em relação ao NCL e ao NE, ambas tiveram valores próximos. O NCL durante a quarta classe foi em aproximadamente 964 mb e o NE foi de aproximadamente de 180 mb, enquanto que na terceira foi em 976 mb e 175 mb. Para a transição, o CAPE e o CINE médio foram bem maiores do que a terceira classe, que antes foi de 978 J/kg passou para 2.205 J/kg e -8 J/kg passou para -116 J/kg, respectivamente. O NCL para a terceira classe foi em 890 mb e o NE foi em 200 mb, enquanto que para a quarta classe ocorreram em 933 mb e 160 mb. Para a estação chuvosa, o CAPE e o CINE aumentaram em relação a terceira classe, que foi de 1.091 J/kg e passou para 2.364 J/kg, enquanto o cine foi de -18 J/kg passou para -25,2 J/kg, respectivamente. O NCL esteve em nível mais alto em relação a terceira classe, que antes teve uma média de 918 mb e passou para

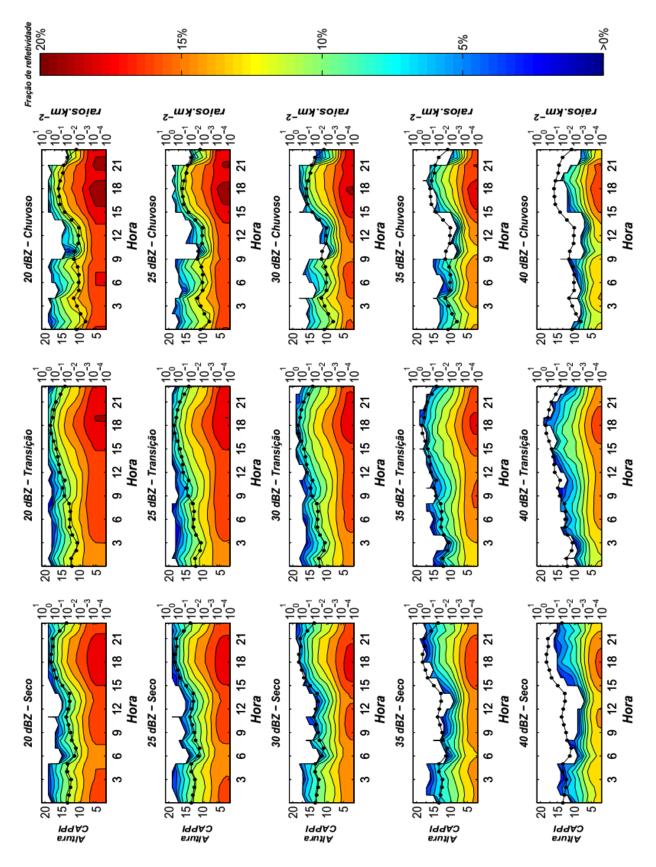


Figura 43: Ciclo diário do fator refletividade do radar meteorológico (contornos coloridos) e da densidade média de raios (linha pontilhada) acumulada para a quarta classe. A densidade média de raios está em escala logarítmica.

aproximadamente 966 mb, enquanto que o NE ocorreu em nível mais baixo, que antes foi de aproximadamente 200 mb e passou para aproximadamente 180 mb. Comparando todas as estações dentro da quarta classe, nota-se que a atmosfera se encontrou mais seca durante a transição, sendo seguida pela estação seca e, por último, a estação chuvosa, que se apresentou mais úmida entre demais estações.

A Figura 45 mostra a distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ dentro da área de varredura do radar durante a quarta classe (atividade elétrica severa). Ao compararmos a quarta classe com a terceira (Figura 36), nota-se que a distribuição espacial entre as classes foram parecidas, onde as regiões de maiores frequências da refletividade se mantiveram na quarta classe. Como se pode observar, a estação chuvosa apresentou frequências bem maiores em relação as demais estações, sendo que as maiores frequências ficaram mais na parte ocidental para todas as estações Durante a estação chuvosa, as maiores frequências (10%) estiveram entre os rios Solimões – Purus e Purus – Madeira, e teve uma frequência alta mais ao norte próximo ao rio Uatumã.

A Figura 46 mostra a temperatura média e o vento médio ao nível de 850 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. Ao compararmos todas as estações durante a quarta classe, nota-se que durante a transição entre a estação seca para a chuvosa apresentou uma temperatura média maior que as demais estações, tendo um valor entre 18 e 18,5°C, enquanto que a estação seca apresentou uma média mais baixa, estando por volta de 17°C. Entretanto, quando comparamos com a demais classes, nota-se que a estação seca e a de transição, tiveram uma média mais baixa em relação a primeira e segunda classe e sendo maior em relação a terceira. Para a estação chuvosa, nota-se que a temperatura média foi aumentando conforme foi aumentado a severidade das classes.

Em relação ao vento médio, a estação seca e chuvosa mostraram comportamento muito similar em relação as demais classes, tanto em relação a intensidade e com a direção do vento, sendo de leste na estação seca e de nordeste na estação chuvosa. Para a transição, nota-se que durante a primeira

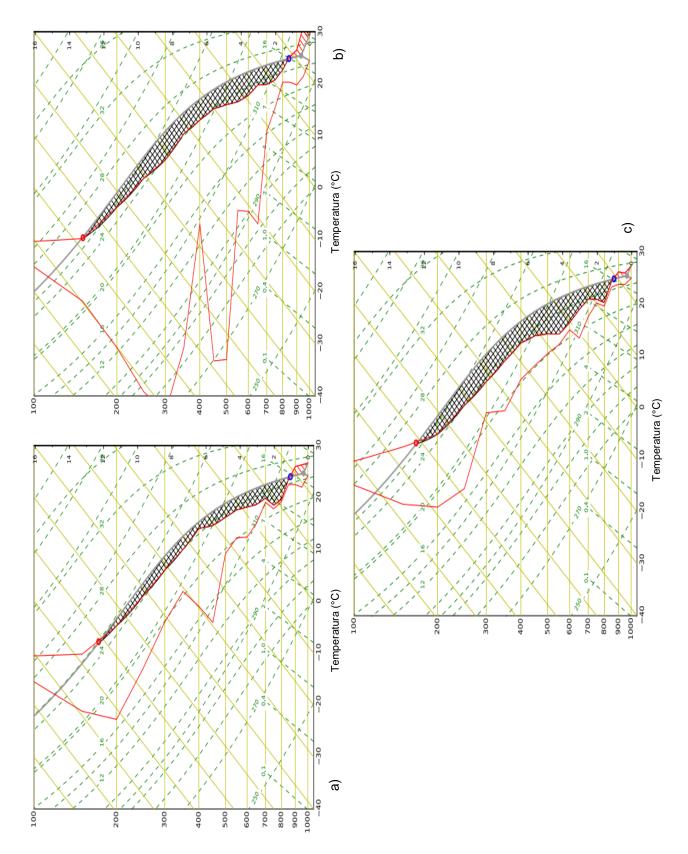


Figura 44: Temperatura média do ar (curva da direita) e da temperatura do ponto de orvalho (curva da esquerda) para a quarta classe às 12:00 UTC. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

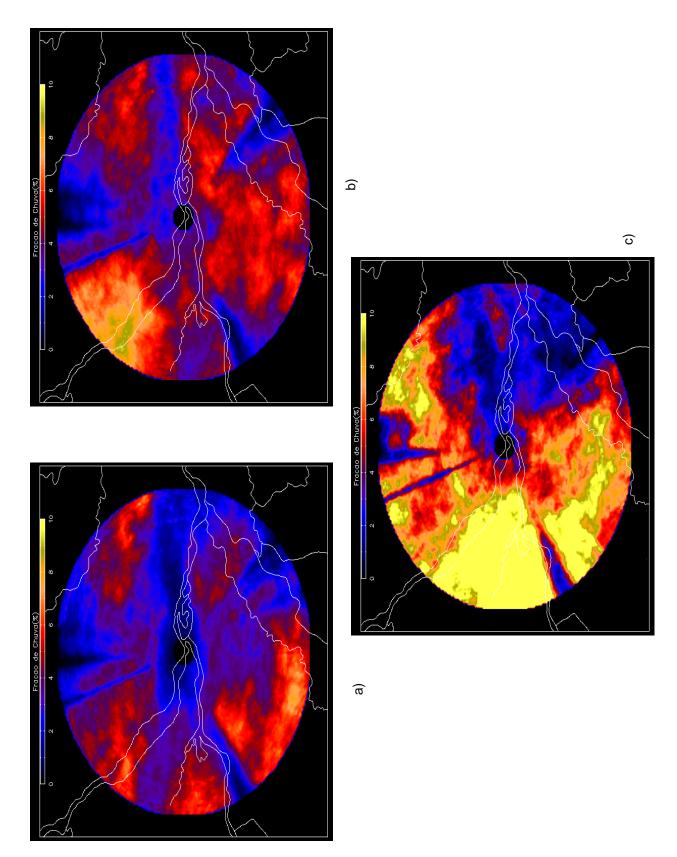


Figura 45: Distribuição espacial da frequência da refletividade de 20 dBZ ao nível de 3 km altura para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

até a terceira classe, os ventos foram de nordeste, enquanto que para a quarta classe, os ventos foram mais de leste.

A Figura 47 se refere a temperatura média e o vento médio ao nível de 500 mb às 12:00 UTC durante a quarta classe. Ao compararmos todas as estações entre si, percebe-se que a estação seca esteve mais fria que as demais estações, enquanto que a transição e a estação chuvosa tiveram um temperatura média, perto de -5,5 °C. Já em relação ao vento, todas estações tiveram um escoamento de leste, sendo mais intenso durante a estação seca. Comparando a quarta classe com as anteriores, a transição e a estação chuvosa tiveram aumentos em relação a terceira classe (Figura 38), em torno de 0,5°C, enquanto que a estação seca teve uma sutil diminuição. Em relação a segunda classe (Figura 29) apenas a transição sofreu um aumento na temperatura, enquanto as demais estiveram um pouco mais frias. Em comparação a primeira classe (Figura 20), apena a transição e a estação chuvosa tiveram aumentos na temperatura, enquanto que a estação seca se apresentou um pouco mais fria. Em relação ao vento médio, nota-se que não houve mudanças significativas em relação as classes anteriores, sendo estes de leste em todas as estações.

A Figura 48 se refere a temperatura média e o vento médio ao nível de 250 mb às 12:00 UTC durante a quarta classe. Comparando as estações durante a quarta classe, a transição entre a estação seca para a chuvosa esteve mais aquecida do que as demais, tendo uma temperatura média entre -40.5°C a -41°C, enquanto que a estação seca esteve um pouco mais fria, com uma temperatura média entre -41,75°C a -42°C. Em relação as classes anteriores (Figura 45, 33 e 25), a transição entre a estação seca para a estação chuvosa esteve mais aquecida durante a quarta classe do que nas demais. A estação chuvosa em relação a terceira classe teve um aumento da temperatura média, que esteve por volta de -41°C, enquanto que a estação seca teve praticamente a mesma temperatura, por volta de -41.5°C. Em relação aos ventos, observa-se que durante a transição e a estação chuvosa, não houve mudanças na direção do vento, sendo de leste e sudeste em todas as classes, respectivamente. Já para a estação seca, os ventos se tornaram de norte, se diferenciando da demais classes.

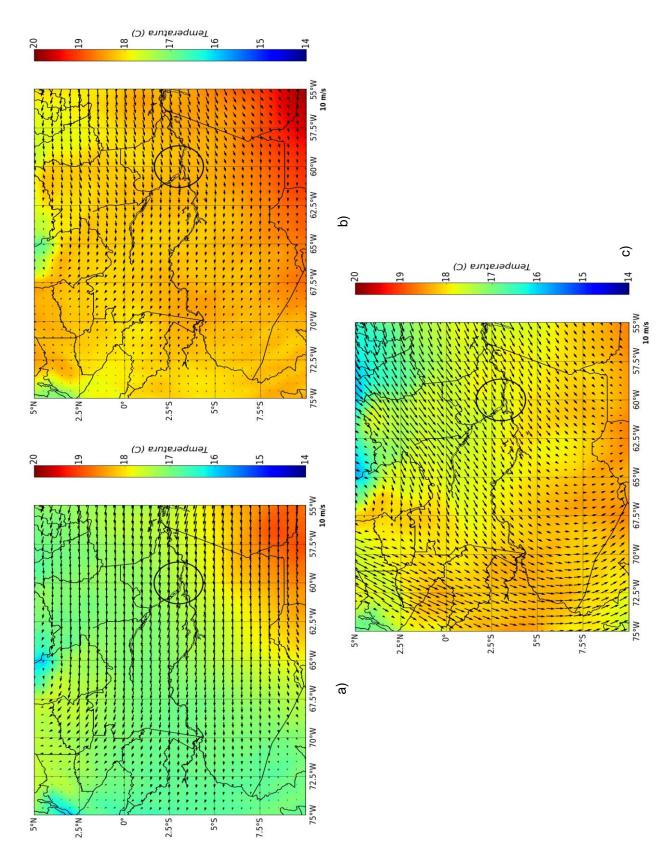


Figura 46: Campos médios de temperatura e vento no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

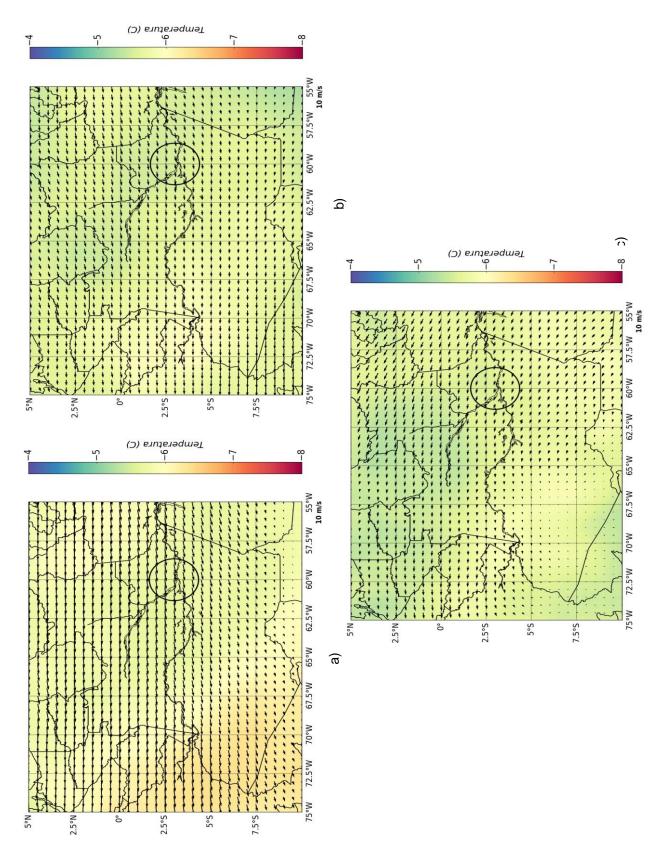


Figura 47: Campos médios de temperatura e vento no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

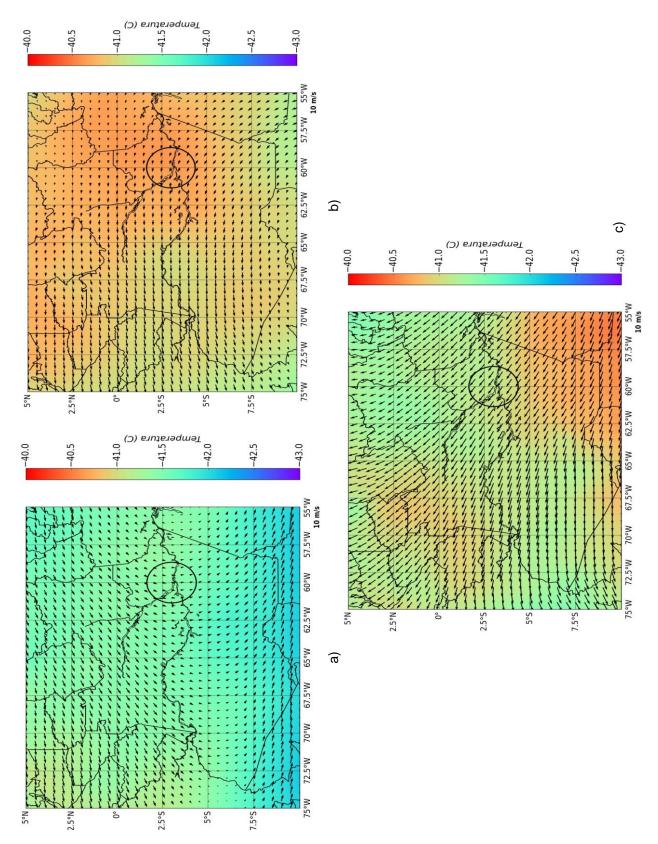


Figura 48: Campos médios de temperatura e vento no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

A Figura 49 mostra a umidade específica média ao nível de 850 mb às 12:00 UTC dentro da quarta classe. Como se pode ver nesta figura, a umidade específica média esteve maior durante a estação chuvosa e menor durante a estação seca, cujo valores foram de aproximadamente entre 12 e 14 g/kg para a estação chuvosa e 12 a 12,5 g/kg durante a estação seca. A transição teve um valor por volta de 13 g/kg. Ao compararmos estas estações dentro da quarta classe com as demais classes, observa-se que houve aumentos em todas as estações, sendo que, em relação a terceira classe, houve um aumento de aproximadamente 0,5 g/kg.

A Figura 50 mostra a umidade específica média ao nível de 500 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. Nesta classe, a estação chuvosa teve o maior valor da umidade específica média, que foi entre 3 e 3,5 g/kg, assim como nas classes anteriores, enquanto que a estação seca foi a menor, com um valor próximo de 2 g/kg. A transição entre a estação seca para a chuvosa teve um valor de aproximadamente 2,5 g/kg. Em comparação com as outras classes (Figura 41, 32 e 23), a estação seca e a de transição tiveram aumentos em relação a primeira classe perto de 1 g/kg, porém, em comparação com a segunda, a estação seca teve praticamente o mesmo valor, enquanto que a estação de transição teve uma diminuição de 0,20 g/kg. Em comparação com a terceira classe, a estação seca e de transição sofreram pequenas diminuições, em torno de 0,20 g/kg.

A Figura 51 mostra a umidade específica média ao nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. De uma forma geral, todas as estações tiveram sutis aumentos em relação as classes anteriores (Figura 48, 36 e 24), entre 0,01 a 0,1 g/kg. Ao compararmos todas as estações durante a quarta classe, observase maiores valores durante a estação chuvosa, cujo valor médio ficou perto de 0,25 g/kg e menor durante a estação seca, que teve o valor entre 0,15 a 0,20 g/kg.

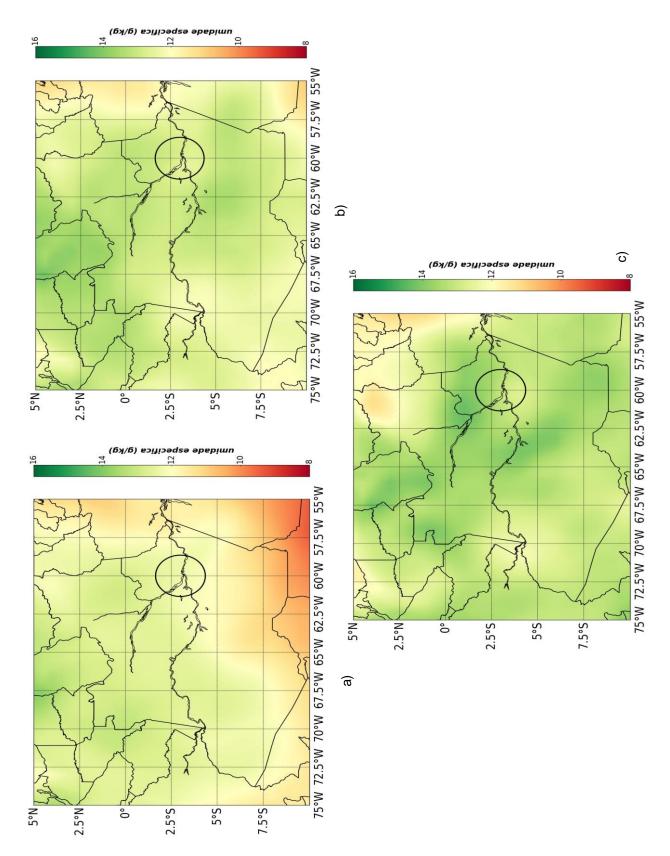


Figura 49: Umidade específica média (g/kg) no nível de 850 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

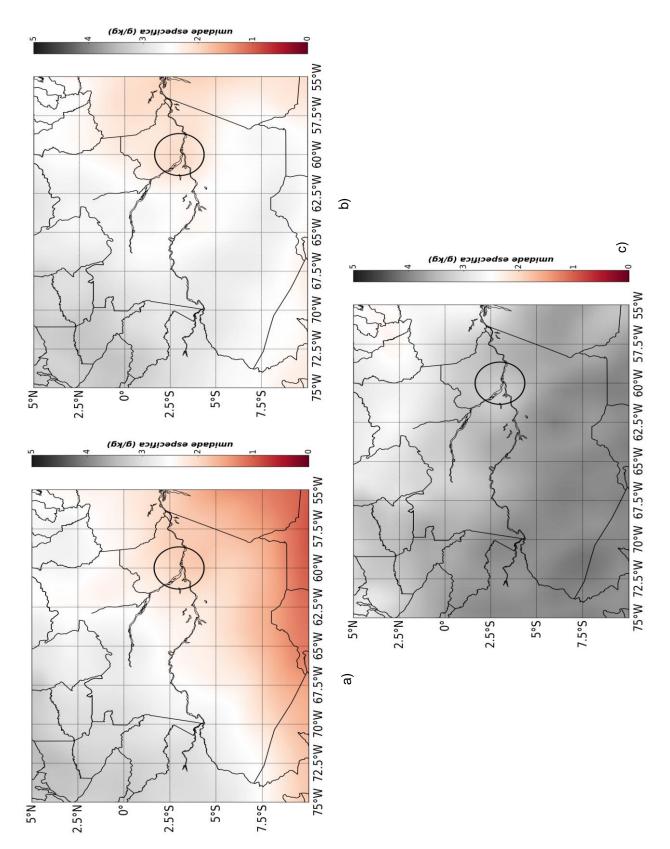


Figura 50: Umidade específica média (g/kg) no nível de 500 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

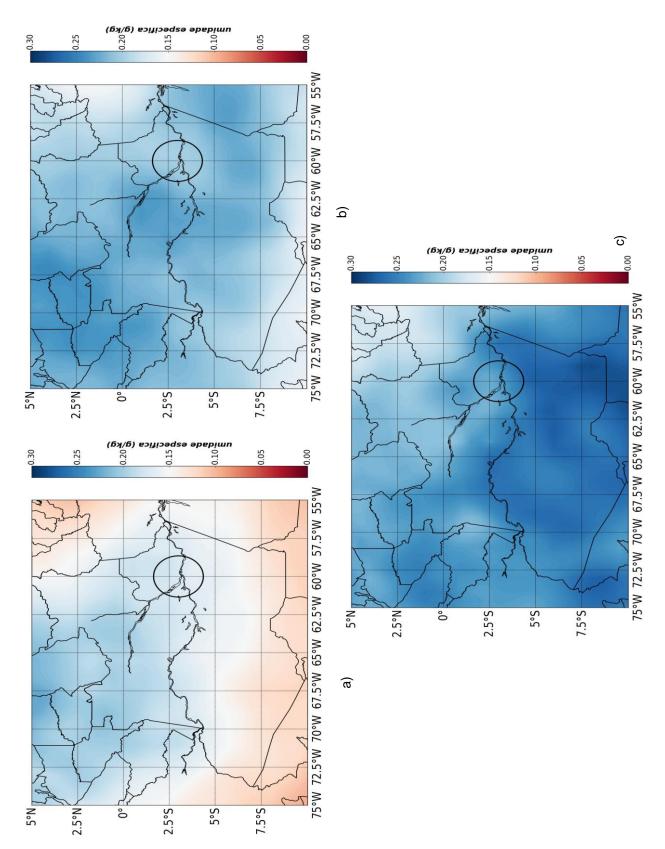


Figura 51: Umidade específica média (g/kg) no nível de 250 mb às 12:00 UTC para a quarta classe. O painel a) é referente a estação seca, o painel b) transição e painel c) chuvosa.

Como foi visto no capítulo anterior, foi possível notar comportamentos diferentes entre cada estação durante cada classe. Entretanto, foi possível notar que as maiores densidades de raios ocorreram durante o período da tarde entre às 17:00 e 20:00 UTC, que corresponde às 13:00 e 16:00 horas local. Esse comportamento ocorreu em todas as classes e estações, porém, as densidades foram maiores durante o período de transição entre a estação seca para a chuvosa.

A Figura 52 ilustra a frequência da refletividade de 40 dBZ em formas de barras para a terceira classe durante a estação seca (painel (a)), transição entre a estação seca para a chuvosa (painel (b)) e estação chuvosa (painel (c)) para os níveis de CAPPI de 2 km até 7 km durante o período das 17:00 até às 20:00 UTC. Nesta figura, pode-se notar que a estação seca apresentou menores valores de frequência da refletividade de 40 dBZ durante estes níveis de CAPPI. Desta forma, nota-se que a presença de gelo durante a estação seca foi menor do que na estação chuvosa.

Comparando a transição entre a estação seca para a chuvosa, nota-se que a frequência da refletividade de 40 dBZ, entre os CAPPIs de 2 e 3 km, foi um pouco mais frequente durante a estação chuvosa, sendo que, para os CAPPIs de 4 e 5 km (onde se encontra a isoterma de 0°C) durante às 18:00 e 19:00 UTC (pico da densidade de raio), nota-se que a refletividade de 40 dBZ foi um pouco mais frequente durante a transição entre a estação seca para a chuvosa, mostrando uma frequência maior desta refletividade na região da banda brilhante do radar, ou seja, maior frequência de gelo. Outro ponto notório nesta comparação é que a refletividade de 40 dBZ decai bem mais lento do que na estação chuvosa, chegando a ser dominante a partir do CAPPI de 6 km (altitude aproximada da isoterma de -10°C). Isto indica uma concentração maior de gelo entre esses níveis de CAPPI, que pode ser responsável pelas maiores densidades de raios.

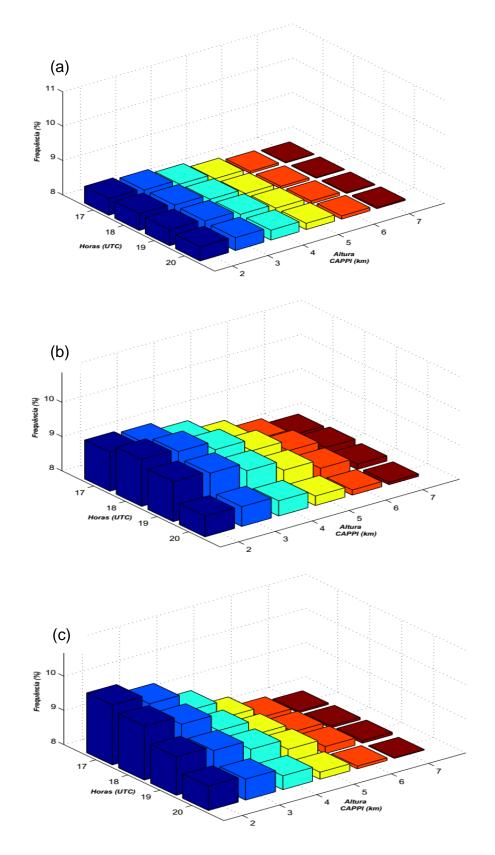


Figura 52: Frequência da refletividade de 20 dBZ entre às 17:00 e 20:00 UTC para os níveis de 2 a 7 km durante a terceira classe, onde o painel (a) se refere a estação seca, o (b) a transição e (c) se refere a estação chuvosa.

A Figura 53 ilustra a frequência da refletividade de 40 dBZ em formas de barras para a quarta classe. Comparando esta figura com a Figura 52, referente a terceira classe, nota-se que a refletividade de 40 dBZ se tornou mais frequentes em relação a classe anterior. A estação seca apresentou os menores valores, enquanto que a estação chuvosa apresentou as maiores frequências até o CAPPI de 5 km e sendo superada pela transição entre a estação seca para a chuvosa a partir do CAPPI de 6 km.

Assim como ocorreu na terceira classe, a estação seca apresentou uma concentração menor de gelo do que nas demais estações. Esse comportamento leva a acreditar que durante a estação seca as nuvens são mais eficientes para a formação de raios do que nas outras estações, levando em conta a concentração de gelo. Já para a estação chuvosa, nota-se que a eficiência não é tão alta comparada com as demais estações, pois, apesar de possuir uma maior concentração de gelo ente os níveis de 4 e 5 km, as densidades de raios durante a terceira e quarta classe foram menores do que as demais estações.

A Tabela 6, 7 e 8, mostram os dados das sondagens entre os níveis de 600 a 400 mb para a terceira classe durante a estação seca, transição entre a estação seca para a chuvosa e estação chuvosa, respectivamente. Já a Tabela 9, 10 e 11 mostram os mesmo níveis para a quarta classe durante a estação seca, transição e chuvosa, respectivamente.

Comparando as estações entre si é possível observar que a estação seca entre os níveis de 450 e 400 mb esteve mais seca durante a quarta classe, onde a sua umidade relativa ficou por volta de 24%. Já para a transição entre a estação seca para a chuvosa esteve mais seca em todos os níveis apresentados, principalmente no nível de -10°C, onde a umidade relativa ficou por volta de 1%. Desta forma, vem à tona o que Takahashi (1978), Jayaratane et al. (1983) e Saunders (1994) propuseram, ou seja, da influência do conteúdo de água líquida no processo de eletrificação dos graupels.

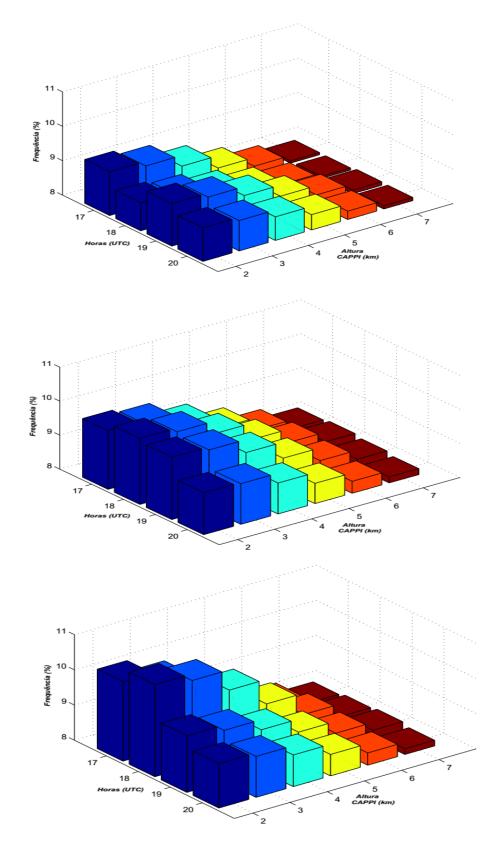


Figura 53: Frequência da refletividade de 20 dBZ entre às 17:00 e 20:00 UTC para os níveis de 2 a 7 km durante a quarta classe, onde o painel (a) se refere a estação seca, o (b) a transição e (c) se refere a estação chuvosa.

Tabela 6: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a estação seca.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4534	2.5	-3.8	64
550.0	5124	-0.9	-7.3	62
500.0	5900	-5.5	-14.5	49
450.0	6818	-9.9	-21.6	38
400.0	7620	-14.5	-27.5	32

Tabela 7: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a transição entre a estação seca para a chuvosa.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4542	1.5	-12.0	41
550.0	5138	-1.1	-34.6	11
500.0	5880	-5.9	-54.9	1
450.0	6666	-11.9	-40.8	17
400.0	7590	-16.9	-65.9	1

Tabela 8: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como alta atividade elétrica (terceira classe) durante a estação chuvosa.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4412	2.0	-0.7	82
550.0	5393	-3.6	-6.4	79
500.0	5890	-5.5	-11.5	63
450.0	6662	-10.9	-19.4	50
400.0	7600	-16.9	-25.9	46

Tabela 9: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a estação seca.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4307	1.5	-4.3	66
550.0	5034	-1.6	-7.0	62
500.0	5880	-5.9	-12.9	58
450.0	6723	-10.6	-29.3	24
400.0	7590	-14.7	-29.7	27

Tabela 10: Tabela 11: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a transição entre a estação seca para a chuvosa.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4491	1.1	-21.2	19
550.0	5208	-2.7	-23.6	30
500.0	5900	-6.1	-55.5	1
450.0	6902	-10.0	-58.8	1
400.0	7620	-15.7	-35.7	16

Tabela 12: Sondagem média às 12:00 UTC para as tempestades classificadas como extrema atividade elétrica (quarta classe) durante a estação chuvosa.

Pressão (mb)	Altura (m)	Tem. do ar (°C)	Pont. de orvalho (°C)	Umidade relativa (%)
600.0	4658	-0.3	-1.7	91
550.0	5419	-5.1	-7.1	86
500.0	5880	-7.9	-11.7	74
450.0	6584	-11.4	-17.1	62
400.0	7590	-16.3	-23.3	55

Este estudo apresentou uma metodologia para caracterizar e entender os mecanismos físicos e dinâmicos associados com as tempestades elétricas observadas na região Amazônica, mais precisamente em um raio de 150 km de Manaus, Amazonas. Para analisar as tempestades elétricas na região foram utilizadas as observações de raios da rede de detecção de descargas atmosféricas - STARNET durante o período de 2009 a 2011, bem como os dados do radar meteorológico do SIPAM de Manaus, as reanálises do ERA Interim e as radiossondas de Manaus.

As tempestades elétricas foram classificadas em função da sua severidade que foi calculada a partir da técnica dos percentis. A partir da taxa de raios, os dados do radar meteorológico do SIPAM foram utilizados para caracterizar a estrutura 3D da precipitação associado com cada tipo de severidade. Posteriormente as radiossondas auxiliaram na compreensão da estabilidade atmosféricas associada na formação das tempestades, enquanto que as reanálises do ERA-Interim serviram para caracterizar a circulação de meso e larga escala durante os diferentes regimes de severidade.

A série diária de raios durante o período de 2009 a 2011 evidência que quase sempre existem tempestades elétricas atuantes na região e as mesmas apresentam uma variabilidade intrasazonal e interanual. Pode-se destacar que durante a transição entre a estação seca para a chuvosa ocorreu a maior atividade elétrica com 31.879 raios.dias-1, seguida da estação seca e chuva com 28911 raios.dia-1 e 23468 raios.dia-1 respectivamente. Por outro lado, as medidas de radar indicam que é durante a estação chuvosa que temos maior área de chuva (5,6%), seguida da estação de transição da seca para a chuva (3,6%) e seca (2,4%), respectivamente.

Esta correlação inversa indica que durante o período de transição é quando observamos as tempestades mais severas enquanto que na chuvosa as menos severas. Para compreender estas diferenças as tempestades foram estudadas em função da sua severidade dentro de cada estação: chuvosa, seca e de transição entre a estação seca e chuvosa.

A seguir é apresentado um resumo das principais características observadas na região Amazônica de Manaus:

6.1 Severidade das tempestades elétricas

As tempestades elétricas foram classificadas de acordo com a sua severidade que está baseada nos percentis calculados a partir do número de raios diário. De acordo com os percentis as tempestades foram classificadas como: 1º Classe - baixa atividade elétrica (0-25% - 0 a 686 raios.dia-¹); 2º Classe - atividade elétrica moderada (25-75% - 687 a 6.385 raios.dia-¹), 3º Classe - alta atividade elétrica (75-90% - 6.386 a 14.370 raios.dia-¹); e 4º Classe - atividade elétrica severa (> 90% - > 14.371 raios.dias-¹).

6.1.1 Estações do Ano

Baseado na classificação acima foi feito uma análise da severidade das tempestades para as três estações, ou seja, chuvosa, seca e transição entre seca e chuvosa. A primeira classe apresentou as seguintes quantidades de dias e densidades de raios de acordo com as estações: estação seca - houve 26 dias, cuia a densidade média de raios foi de 5 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação de transição - 43 dias, tendo uma densidade de 4 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação chuvosa – 40 dias, cuja densidade de raios foi de 4 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹. Para a segunda classe, temos: estação seca - 70 dias e 39 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação de transição – 73 dias e 38 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação chuvosa – 81 dias e 36 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹. A terceira classe apresentou os seguintes valores: estação seca – 24 dias e uma densidade de 132 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação de transição – 32 dias e 138 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação chuvosa – 13 dias e densidade de 111 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹. Para a quarta classe, temos: estação seca – 24 dias e a densidade de raios foi de 409 x 10⁻³ raios.km⁻².dia⁻¹; estação de transição – 24 dias e a densidade de raios foi de 451x 10⁻³ raios.km⁻ ².dia⁻¹; estação chuvosa – 8 dias e uma densidade média de 332 x 10⁻³ raios.km⁻ ².dia⁻¹.

Como se pode notar, a primeira classe apresentou um número menor de dias durante a estação seca, porém, apresentou a mesma densidade média de raios ocorrida durante a estação de transição e chuvosa, mostrando uma atividade elétrica mais eficiente em relação às demais estações. Assim como para a primeira classe, a estação seca apresentou um número menor de dias em comparação com as demais estações para a segunda classe, sendo que, apresentou a maior densidade média. Para a terceira classe a maior densidade média de raios ocorreu durante a estação de transição, onde ocorreu um maior número de dias também. Entretanto, para a estação seca, pode-se notar que a sua densidade média de raios foi bem próxima da estação de transição, mesmo tendo um número menor de dias. Para a quarta classe, a estação de transição apresentou a maior densidade média de raios e também o maior número de dias, enquanto que a estação chuvosa teve a menor densidade e o menor número de dias. De uma forma geral, nota-se que todas as classes se tornaram mais frequentes durante a estação de transição, ou seja, apresentaram uma quantidade de dias maior do que nas demais estações, porém, entre a primeira e a terceira classe, as tempestades ocorridas durante a estação seca apresentaram um número maior de raios diários em comparação com as demais estações.

Em relação ao período com as maiores densidades de raios, os resultados encontrados neste estudo coincidem com os resultados encontrados por Albrecht et al. (2016), na qual, mostrou maiores atividades elétricas durante a transição entre a estação seca para a chuvosa.

6.1.2 Distribuição Espacial

De acordo com os campos de precipitação observados pelo radar meteorológico do SIPAM, as tempestades tinham uma maior ocorrência parte Ocidental, cobrindo os rios: Negro, Solimões Purus e Madeira. As tempestades se formaram mais sobre os cursos d'água e sobre a floresta. Conforme a severidade das tempestades aumentava, verificou-se também um aumento da frequência de ocorrência de 20 dBZ. Para a estação seca e de transição, notou-

se as refletividades apresentaram aumentos em torno de 2% conforme as tempestades eram mais severas. Já para a estação chuvosa o aumento chegou a 10%.

6.1.3 Ciclo Diurno

As tempestades elétricas apresentaram a maior atividade de raios entre o período das 17:00 e 20:00 UTC, que corresponde às 13:00 e 16:00 horas local, que coincide com o período com as maiores frequências de chuva e maiores extensões verticais das tempestades, independente da classe e estação. Durante este intervalo de tempo ocorreram os seguintes valores acumulados de raios por área: 1 classe: estação seca — 0,072 raios.km⁻²; transição — 0,095 raios.km⁻²; chuvosa — 0,070 raios.km⁻²; 2 classe: estação seca — 1,347 raios.km⁻²; transição — 1,674 raios.km⁻²; chuvosa — 1,641 raios.km⁻²; 3 classe: estação seca — 1,735 raios.km⁻²; transição — 2,804 raios.km⁻²; chuvosa — 1,022 raios.km⁻²; 4 classe: estação seca — 6,040 raios.km⁻²; transição — 6,514 raios.km⁻²; chuvosa — 1.510 raios.km⁻². Estes resultados revela, que a medida que as tempestades elétricas se tornam mais severas elas são mais eficientes, além disso, as tempestades elétricas durante a estação de transição seguida pela seca são quase 4 vezes mais eficientes do que as da estação chuvosa.

Em relação ao desenvolvimento vertical das tempestades ocorridas durante este intervalo de tempo com as maiores densidade de raios, foi possível observar que as tempestades atingiram o nível de 18 km de altura em praticamente todas as classes e estações. Para os intervalos de 20 e 40 dBZ, as tempestades foram mais frequentes durante a estação chuvosa entre os níveis de 2 a 5 km de altura. Entretanto, para a terceira e quarta classe, em especial, acima do nível de 5 km de altura, as refletividades de 35 e 40 dBZ foram mais frequentes e atingiram níveis de altura mais altos (18 km de altura para a terceira e quarta classe, respectivamente) durante a estação de transição. Foi possível verificar ainda que a maior densidade de raios para a estação de transição estava associada à máxima expansão vertical, ou seja, 18 km às 18:00 UTC, enquanto que para a estação seca era 15 km e a chuvosa a 12 km. Portanto é

possível constatar que as tempestades severas na estação de transição apresentam um maior desenvolvimento vertical, o que pode explicar porque tem a maior densidade de raios.

O período de máxima atividade elétrica, que corresponde o período entre às 17:00 e 20:00 UTC, coincide com os resultados encontrados por Albrecht et al. (2016), Anselmo (2015) e Almeida et al. (2012).

6.1.4 Comportamento atmosférico e dinâmico

De um modo geral, nota-se que o CAPE e o CIN médio foram maiores durante a transição entre a estação seca para a chuvosa e menores durante a estação chuvosa (estação seca – 1.650 J/kg e -19 J/kg; transição – 2.198 J/kg e -39 J/kg; chuvosa – 1.349 J/kg e -18,8 J/kg). Estas variáveis não acompanharam muito bem o aumento da severidade das tempestades elétricas, sendo que em geral temos que os maiores valores foram observados na 1º classe e diminuindo até a terceira classe e depois aumentando novamente na quarta classe.

Em relação ao NCL observa-se níveis mais altos na primeira classe e níveis mais baixos durante a segunda classe. Para o NE, os menores níveis ocorreram durante a primeira classe e os níveis mais altos durante a terceira classe. Os níveis médios do NCL e NE por classe, foram respectivamente: estação seca – 963,35 e 178 mb; estação de transição – 925,15 e 161,25 mb; estação chuvosa – 917,5 e 213,75 mb. Desta forma, nota-se que as tempestades foram mais desenvolvidas durante a transição entre a estação seca para a chuvosa e menos desenvolvida durante a estação chuvosa. Num todo, as espessuras médias entre estas classes ficou entre 11 a 13 km de altura, sendo maior durante a quarta e terceira classe, mostrando que a medida que as tempestades se tornam mais severas elas tem um maior desenvolvimento vertical.

Em relação a temperatura média do ponto de orvalho, houve mudanças significativas, principalmente durante a estação de transição, na qual, apresentou valores bem baixos durante a terceira e quarta classe. A estação chuvosa apresentou temperaturas do ponto de orvalho maiores em todas as

classes. Fisicamente, a temperatura do ponto de orvalho está ligada com a umidade relativa, logo, quanto maior a diferença entre temperatura do ar e do porto de orvalho, mais seca esta a atmosfera. Desta forma, visto que a temperatura média do ponto de orvalho foi menor durante a transição entre a estação seca para a chuvosa, é possível afirmar que esta estação esteve mais seca que as demais estações, enquanto que a estação chuvosa era a mais úmida. Para a terceira e quarta classe, foi possível observar a estação de transição ficava mais seca que as demais estações a partir de 600 mb, o que implica em uma atmosfera mais instável o que favorece ao desenvolvimento de tempestades mais severas.

A temperatura de 0°C ficou entre os níveis de 600 e 550 mb, principalmente durante a estação seca e o período de transição. Para a temperatura de -10°C, esta se manteve no nível de 450 mb em todas as classes e estações. No geral, a espessura entre esses níveis durante todas as classes e estações não tiveram muitas diferenças, tendo uma espessura média de aproximadamente 2 km.

As temperaturas médias no nível de 850 mb sofreram mudanças de classe para classe e estação para a estação. Para a estação chuvosa, à medida que a tempestades se tornavam mais severas a temperatura média aumentava, enquanto que a estação seca e de transição mostraram resfriamentos e na quarta classe foi observado um aquecimento. Para o nível de 500 mb, as maiores temperaturas ocorreram durante a primeira classe para cada estação. No nível de 250 mb, com o aumento da severidade das tempestades, notou-se que durante a estação seca a temperatura foi diminuindo, enquanto que a estação chuvosa foi aumentado. De uma forma geral, para a terceira e quarta classe, a temperatura média foi maior durante a estação de transição e menor durante a seca. Em relação a espessura entre estes níveis, não ocorreu mudanças significativas entre as classes e estações, tendo uma média de 9.4 km de espessura entre o nível de 850 até 250 mb.

A umidade específica média em 850 mb aumentou conforme a severidade das tempestades elétricas aumentava para todas as estações. A atmosfera era mais úmida na estação chuvosa e mais seca durante a estação

seca. No nível de 500 mb a atmosfera estava bem mais seca para a 1º classe independente da estação no ano. Para a segunda e terceira classe houve um amento entre 0,5 a 1,5 g/kg, enquanto que para a quarta classe observou-se pequenas diminuições em torno de 0,5 g/kg. Em 250 mb, a atmosfera ficava mais úmida a medida que a severidade das tempestades aumentava durante a estação seca e de transição, enquanto que para a estação chuvosa o máximo foi durante a terceira classe. Logo combinando estas observações com as de temperatura, percebe-se que durante a estação seca e de transição a atmosfera é mais instável e à medida que as tempestades ficam mais severas a instabilidade convectiva aumenta, o que explicaria o aumento do número de raios.

O vento médio sobre a região, no nível de 850 mb, as estação não apresentaram mudanças na direção do vento conforme foi aumentando a severidade das tempestade. Na estação seca, nota-se que o fluxo vem de leste passando pela região de Manaus e segue em direção à Colômbia. Durante a estação de transição e chuvosa, o fluxo de vento é mais de nordestes, porém na estação chuvosa é mais intenso. Em 500 mb, o fluxo era de leste para todas as classes e estações, sendo que foram mais intensos durante a estação seca e mais fracos durante a estação chuvosa. Finalmente em 250 mb as circulações foram anti-ciclônicas em todas as estações e classes sobre a região de Manaus. Durante a estação seca, a circulação anti-ciclônica foi mais intensa durante a 4º classe, onde a direção do vento foi praticamente de norte. Para a estação de transição, nota-se um deslocamento da circulação anti-ciclônica mais para a parte sul do Estado do Amazonas, sendo que sobre Manaus o vento foi de sudeste e leste (para a terceira e quarta classe). Para a estação chuvosa, a circulação anti-ciclônica foi mais evidente para a quarta classe, em especial sobre o Acre, Rondônia e Bolívia e está associada a Alta da Bolívia. Finalmente pode-se destacar que é durante a estação chuvosa que os ventos são mais intensos sobre Manaus.

- Adler, R. F., Huffman, G. J., Chang, A., Ferraro, R., Xie, P.-P., Janowiak, J., Rudolf, B., Schneider, U., Curtis, S., Bolvin, D., Gruber, A., Susskind, J. Arkin, P., Nelkin, E. The Version-2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979–Present). Journal of Hydrometeorology, v. 4, n. 6, p. 1147-1167, 2003.
- Ahrens, C. Donald. Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment. Cengage Learning, p. 621, 2012.
- Albrecht, R. I. Eletrificação dos sistemas precipitantes na região Amazônica: Processos físicos e dinâmicos do desenvolvimento de tempestade. Tese (Doutorado em ciências atmosféricas). Universidade de São Paulo, 2008.
- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., Christian, H. J. Where are the lightning hotspots on Earth? Bulletin of the American Meteorological Society, n. 2016, 2016.
- Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Petersen, W. A., Buechler, D. E., Bruning, E. C., Blakeslee, R. J., Christian, H. J. The 13 years of TRMM Lightning Imaging Sensor: from individual flash characteristics to decadal tendencies. 2011a.
- Albrecht, R. I.; Morales, C. A.; Silva Dias, M. A. F. Electrification of precipitating systems over the Amazon: Physical processes of thunderstorm development. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 116, n. D8, 2011b.
- Albrecht, R. I., Silva Dias, M. A. F. D. Microphysical evidence of the transition between predominant convective/stratiform rainfall associated with the intraseasonal oscillation in the Southwest Amazon. Acta Amazonica, v. 35, n. 2, p. 175-184, 2005.
- Almeida, A. C., Rocha, B. R., Souza, J. R. S., Sá, J. A. S., Pissolato Filho, J. A. Cloud-to-ground lightning observations over the eastern Amazon Region. Atmospheric Research, v. 117, p. 86-90, 2012.
- Anagnostou, E.N.; Krajewski, W. F. Calibration of the WSR-88D Precipitation Processing Subsystem. Weather and Forecasting, v. 13, p. 396-406, 1998.

- Angelis, C. F.; McGrefor, G. R. Kidd, Diurnal cycle of rainfall over the Brazilian Amazon. Climate Research, vol.26: 139-149, 2004.
- Anselmo, E. M. Morfologia das tempestades elétricas na América do Sul. Tese (Doutorado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo, 2015.
- Anselmo, E. M.; Morales, C. A. Seasonal and Diurnal Cycle of the thunderstorms observed in South America. XV International Conference on Atmospheric Electricity, n. 15–20 June 2014, p. 15–20, 2014.
- Ávila, E. E., Bürgesser, R. E., Castellano, N. E., Nicora, M. G. Diurnal patterns in lightning activity over South America. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 120, n. 8, p. 3103-3113, 2015.
- Baker, M. B.; Dash, J. G. Mechanism of charge transfer between colliding ice particles in thunderstorms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 99, n. D5, p. 10621-10626, 1994.
- Barry, R. G.; Chorley, R. J. Atmosfera, Tempo e Clima, 9 eds. Porto Alegre: Bookman, 2010. 512 p.
- Barthem, R. B., Charvet-Almeida, P., Montag, L. F. A., Lanna, A. E. Amazon Basin, GIWA Regional assessment 40b. Suécia, Universidade de Kalmar/UNEP, 76p, 2004.
- Byers, H. R., Braham Jr, R. R. Thunderstorm structure and circulation. Journal of Meteorology, v. 5, n. 3, p. 71-86, 1948.
- Cecil, D. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J. TRMM LIS Climatology of Thunderstorm Occurrence and Conditional Lightning Flash Rates*. Journal of Climate, v. 28, n. 16, p. 6536-6547, 2015.
- Cecil, D. J.; Zipser, E. J.; NESBITT, S. W. Reflectivity, ice scattering, and lightning characteristics of hurricane eyewalls and rainbands. Part I: Quantitative description. Monthly Weather Review, v. 130, n. 4, p. 769-784, 2002.
- Christian, H. J., Blakeslee, R. J., Boccippio, D. J., Boeck, W. L., Buechler, D. E., Driscoll, K. T., Goodman, S. J., Hall, J. M., Koshak, W. J., Mach, D. M., Stewart, M. F. Global frequency and distribution of lightning as observed from space by

the Optical Transient Detector. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 108, n. D1, 2003.

- Cohen, J. C., Silva Dias, M. A., Nobre, C. A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. Monthly Weather Review, v. 123, n. 11, p. 3163-3174, 1995.
- Cummer, S. A.; Inan, U. S. Modeling ELF radio atmospheric propagation and extracting lightning currents from ELF observations. Radio Science, v. 35, n. 2, p. 385-394, 2000.
- Cummins, K. L., Krider, E. P.; Malone, M. D. The US National Lightning Detection Network TM and applications of cloud-to-ground lightning data by electric power utilities. IEEE transactions on electromagnetic compatibility, v. 40, n. 4, p. 465-480, 1998.
- Demetriades, N. W., Murphy, M. J., Cramer, J. A. Validation of Vaisala's global lightning dataset (GLD360) over the continental United States. InPreprints, 29th Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Tucson, AZ, Amer. Meteor. Soc. Vol. 16, 2010.
- Dentel, L. M. Modelagem de sistemas de detecção de descargas atmosféricas na Amazônia. Tese (Doutorado em engenharia elétrica). Universidade Federal do Pará, 2013.
- Dentel, L. M., Da Rocha, B. R. P.; De Souza, J. R. S. Evaluation of STARNET lightning detection performance in the Amazon region. International Journal of Remote Sensing, v. 35, n. 1, p. 115-126, 2014.
- Doviak, R J., Zrnić, D.S. Doppler Radar and Weather Observations, 2 ed. Academic Press, 562 pp. 1993.
- Dwyer, J. R., Uman, M. A. The physics of lightning. Physics Reports, v. 534, n. 4, p. 147-241, 2014.
- Dye, J. E., Winn, W. P., Jones, J. J., Breed, D. W. The electrification of New Mexico thunderstorms: 1. Relationship between precipitation development and the onset of electrification. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 94, n. D6, p. 8643-8656, 1989.

- Fisch, G.; Marengo, J. A.; Nobre, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. Acta Amazônica, v.28, p. 101-126, 1998.
- Fletcher, N. H. Surface structure of water and ice, 2. Philosophical Magazine, v. 18, p. 1287.
- Fletcher, N. H. Surface structure of water and ice. Philosophical Magazine, v. 7, n. 74, p. 255-269, 1962.
- Garstang, M., Massie Jr, H. L., Halverson, J., Greco, S., Scala, J. Amazon coastal squall lines. Part I: Structure and kinematics. Monthly Weather Review, v. 122, n. 4, p. 608-622, 1994.
- Gungle, B.; Krider, E. P. Cloud-to-ground lightning and surface rainfall in warm-season Florida thunderstorms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 111, n. D19, 2006.
- Hondl, K. D.; Eilts, M. D. Doppler radar signatures of developing thunderstorms and their potential to indicate the onset of cloud-to-ground lightning. Monthly weather review, v. 122, n. 8, p. 1818-1836, 1994.
- Hong, Y., Gourley, Jonathan J. Radar hydrology: principles, models, and applications. CRC Press, 2014.
- Houze Jr, R. A. Cloud dynamics. Vol. 104. Academic press, p. 457, 2014.
- Houze, R. A. Orographic effects on precipitating clouds. Reviews of Geophysics, v. 50, n. 1, 2012.
- Jayaratne, E. R., Saunders, C. P. R., Hallett, J. Laboratory studies of the charging of soft-hail during ice crystal interactions. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 109, n. 461, p. 609-630, 1983.
- Katsanos, D., Lagouvardos, K., Kotroni, V., Argiriou, A. Combined analysis of rainfall and lightning data produced by mesoscale systems in the central and eastern Mediterranean. Atmospheric research, v. 83, n. 1, p. 55-63, 2007.
- Kuettner, J. P., Sartor, J. D., Levin, Z. Thunderstorm electrification-inductive or non-inductive?. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 38, n. 11, p. 2470-2484, 1981.

- Lal, D. M., Pawar, S. D. Relationship between rainfall and lightning over central Indian region in monsoon and premonsoon seasons. Atmospheric Research, v. 92, n. 4, p. 402-410, 2009.
- Lutgens, F. K., Tarbuck, E. J. The Atmosphere. 12 ed. Pearson, p. 553, 2013.
- MacGorman, D. R., Rust, W. D. The electrical nature of storms. Oxford University Press on Demand, 1998.
- Marengo, J. A., Tomasella, J., Alves, L. M., Soares, W. R., Rodriguez, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. Geophysical Research Letters, v. 38, n. 12, 2011.
- Mason, B. J. A critical examination of theories of charge generation in thunderstorms. Tellus, v. 5, n. 4, p. 446-460, 1953.
- Morales, C. A., Neves, J. R., Anselmo, E. M., Camara, L. S., Barreto, W., Paiva, V., Holle, R. L. years of Sferics Timing And Ranging NETwork–STARNET: A lightning climatology over South America. In: 23rd International Lightning Detection Conference & 5th International Lightning Meteorology Conference. 2014.
- Navidi, W. Statistics for Engineers and Scientists. McGraw-Hill, 3 Ed. p. 928. 2010.
- Nunes, A. M. P. Climatologia e ambiente de tempo severo na Amazônia. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo, 2015.
- Nunes, A. M., Silva Dias, M. A., Anselmo, E. M., Morales, C. A. Severe convection features in the Amazon Basin: a TRMM-based 15-year evaluation. Frontiers in Earth Science, v. 4, p. 37, 2016.
- Oliveira, A. P., Fitzjarrald, D. R. The Amazon river breeze and the local boundary layer: I. Observations. Boundary-Layer Meteorology, v. 63, n. 1, p. 141-162, 1993.
- Pereyra, R. G., Avila, E. E., Castellano, N. E., Saunders, C. P. A laboratory study of graupel charging. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 105, n. D16, p. 20803-20812, 2000.

- Pessi, A. T., Businger, S., Cummins, K. L., Demetriades, N. W. S., Murphy, M., Pifer, B. Development of a long-range lightning detection network for the Pacific: Construction, calibration, and performance*. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, v. 26, n. 2, p. 145-166, 2009.
- Petersen, W. A., Nesbitt, S. W., Blakeslee, R. J., Cifelli, R., Hein, P., Rutledge, S. A. TRMM observations of intraseasonal variability in convective regimes over the Amazon. Journal of Climate, v. 15, n. 11, p. 1278-1294, 2002.
- Raghavan, S. Radar Meteorology. Springer Science. Vol. 27, 556p., 2003.
- Rakov, V. A., Uman, M. A. Lightning: physics and effects. Cambridge University Press, 2003. 706p.
- Rasmussen, K. L., Zuluaga, M. D., Houze, R. A. Severe convection and lightning in subtropical South America. Geophysical Research Letters, v. 41, n. 20, p. 7359-7366, 2014.
- Rinehart, R. E. Radar for Meteorologists, 4 ed. Rinehart Publications, 482 pp. 2004.
- Rodriguez, C. A. M., et al. "9 years of lightning measurements in South America as detected by STARNET." Lightning Protection (XIII SIPDA), 2015 International Symposium on. IEEE, 2015.
- Santos, M. J., Silva Dias, M. A., Freitas, E. D. Influence of local circulations on wind, moisture, and precipitation close to Manaus City, Amazon Region, Brazil. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 119, n. 23, 2014.
- Saraiva, I. Características dos Sistemas Precipitantes Observados via Radar Meteorológico de Manaus. Dissertação (Mestrado em Ciências Atmosféricas) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. São Paulo, 2010.
- Saraiva, I. Variabilidade Regional das Nuvens de Chuva na Bacia Amazônica visto por uma Rede de Radares Meteorológicos. Tese de Doutorado Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia. Manaus AM, 2016.
- Saunders, C. Charge separation mechanisms in clouds. In: Planetary Atmospheric Electricity. Springer New York, p. 335-353. 2008.

- Saunders, C. P. R. A review of thunderstorm electrification processes. Journal of Applied Meteorology, v. 32, n. 4, p. 642-655, 1993.
- Saunders, C. P. R. Thunderstorm electrification laboratory experiments and charging mechanisms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 99, n. D5, p. 10773-10779, 1994.
- Saunders, C. P. R., Bax-Norman, H., Emersic, C., Avila, E. E., Castellano, N. E. Laboratory studies of the effect of cloud conditions on graupel/crystal charge transfer in thunderstorm electrification.Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 132, n. 621, p. 2653-2674, 2006.
- Saunders, C. P. R., Peck, S. L. Laboratory studies of the influence of the rime accretion rate on charge transfer during crystal/graupel collisions. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 103, n. D12, p. 13949-13956, 1998.
- Soriano, L. R., De Pablo, F., Díez, E. G. Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. Monthly Weather Review, v. 129, n. 12, p. 2998-3003, 2001.
- Steiger, S. M.; Orville, R. E.; Carey, L. D. Total lightning signatures of thunderstorm intensity over north Texas. Part I: Supercells. Monthly Weather Review, v. 135, n. 10, p. 3281-3302, 2007a.
- Steiger, S. M., Orville, R. E.; Carey, L. D. Total lightning signatures of thunderstorm intensity over north Texas. Part II: Mesoscale convective systems. Monthly Weather Review, v. 135, n. 10, p. 3303-3324, 2007b.
- Stolz, D. C., Businger, S., Terpstra, A. Refining the relationship between lightning and convective rainfall over the ocean. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 119, n. 2, p. 964-981, 2014.
- Stolzenburg, M., Rust, W. D., Marshall, T. C., Electrical structure in thuderstorm convective regions 3. Synthesis, J. Geophys. Res., vol. 103, p. 14097. 1998.
- Stolzenburg, M., Marshall, T. C., Rust, W. D., Bartels, D. L. Two simultaneous charge structures in thunderstorm convection. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 107, n. D18, 2002.

- Stolzenburg, M., Marshall, T. C. Charge structure and dynamics in thunderstorms. Space Science Reviews, v. 137, n. 1-4, p. 355-372, 2008.
- Takahashi, T. Riming electrification as a charge generation mechanism in thunderstorms. Journal of the Atmospheric Sciences, v. 35, n. 8, p. 1536-1548, 1978.
- Tanaka, L. D. S., Satyamurty, P., Machado, L. A. T. Diurnal variation of precipitation in central Amazon Basin. International Journal of Climatology, v. 34, n. 13, p. 3574-3584, 2014.
- Toracinta, E. R., Cecil, D. J., Zipser, E. J., Nesbitt, S. W. Radar, passive microwave, and lightning characteristics of precipitating systems in the tropics. Monthly Weather Review, v. 130, n. 4, p. 802-824, 2002.
- Villar, J. C. E., Ronchail, J., Guyot, J. L., Cochonneau, G., Naziano, F. Lavado, W., Oliveira, E., Pombosa, R., Vauchel, P. Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). International Journal of Climatology, v. 29, n. 11, p. 1574-1594, 2009.
- Vonnegut, B. Conf. Atmospheric Electricity No. 42 Possible mechanism for the formation of thunderstorm electricity. p. 169–181, 1955.
- Vonnegut, B., Aircraft measurements of electric field charge carried to ground through thunderstorms. Thunderstorm Electricity, (Cap. 10). ed. H.R. Byers, Univ. Chicago Press, 231. 1953.
- Wallace, J. M., Hobbs, P. V. Atmospheric science: an introductory survey. Academic press, p. 505, 2006.
- Wang, P. K. Physics and dynamics of clouds and precipitation. Cambridge University Press, p.476, 2013.
- Williams, E. R. Lightning and climate: A review. Atmospheric research, v. 76, n. 1, p. 272-287, 2005.
- Williams, E. R. The electrification of thunderstorms. Scientific American, 269, 88–99. 1988.

- Williams, E. R., Weber, M. E., Orville, R. E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 94, n. D11, p. 13213-13220, 1989.
- Williams, E. R., Weber, M. E., Orville, R. E. The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 94, n. D11, p. 13213-13220, 1989.
- Williams, E., Rosenfeld, D., Madden, N., Gerlach, J., Gears, N., Atkinson, L., Dunnemann, N., Frostrom, G., Antonio, M., Biazon, B., Camargo, R., Franca, H., Gomes, A., Lima, M., Machado, R., Manhaes, S., Nachtigall, L., Piva, H., Quintiliano, W., Machado, L., Artaxo, P., Roberts, G., Renno, N., Blakeslee, R., Bailey, J., Boccippio, D., Betts, A., Wolff, D., Roy, B., Halverson, J., Rickencach, T., Fuentes, J., Avelino, E. Contrasting convective regimes over the Amazon: Implications for cloud electrification. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, v. 107, n. D20, 2002.
- Zhou, Y., Qie, X., Soula, S. A study of the relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation in the convective weather system in China. In: Annales Geophysicae. p. 107-113. 2002.
- Zipser, E. J., Cecil, D. J., Liu, C., Nesbitt, S. W., Yorty, D. P. Where are the most intense thunderstorms on Earth? Bulletin of the American Meteorological Society, v. 87, n. 8, p. 1057, 2006.
- Zipser, E. J.; Lutz, K. R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning probability?. Monthly Weather Review, v. 122, n. 8, p. 1751-1759, 1994.